



Σχολή Επιστημών Υγείας και Πρόνοιας  
Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών  
Σχολή Διοικητικών, Οικονομικών και Κοινωνικών Επιστημών  
Τμήμα Αγωγής και Φροντίδας στην Πρώιμη Παιδική Ηλικία



Παιδαγωγικό τμήμα



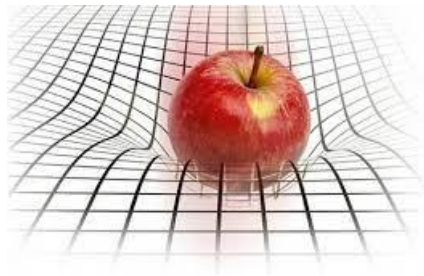
Διδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
**Παιδαγωγική μέσω Καινοτόμων Τεχνολογιών και Βιοϊατρικών  
Προσεγγίσεων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διερεύνηση της θεωρίας της βαρύτητας μέσα από την Ιστο-  
ρία Φυσικών Επιστημών και η εξέλιξη της από την αρχαιό-  
τητα έως τη σύγχρονη εποχή**

POST GRADUATE THESIS

**Investigation of the theory of gravity through the History of Natural Sci-  
ences and its evolution from antiquity to modern times**



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ(ΤΩΝ)/NAME OF STUDENTS

Φώτιος Κουρής  
Fotios Kouris

ΟΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ/NAME OF THE SUPERVISOR

Παναγιώτης Πήλιουρας  
Panagiotis Piliouras

ΑΙΓΑΛΕΩ/ΑΙΓΑΛΕΟ 2023



Faculty of Health and Caring Professions  
Department of Biomedical Sciences  
Faculty of Administrative, Financial and Social Sciences  
Department of Early Childhood Education and Care



Department of Pedagogy



Inter-Institutional Post Graduate Program  
**Pedagogy through innovative Technologies and Biomedical approaches**

POST GRADUATE THESIS

## **Investigation of the theory of gravity through the History of Natural Sciences and its evolution from antiquity to modern times**

Fotios Kouris

20048

[fkour88@gmail.com](mailto:fkour88@gmail.com)

FIRST SUPERVISOR

Panagiotis Piliouras

SECOND SUPERVISOR

Pinelopi Sotiropoulou

AIGALEO 2023

## Επιτροπή εξέτασης

Ημερομηνία εξέτασης: 7/7/2023

	Ονόματα εξεταστών	Υπογραφή
1 <sup>ος</sup> Εξεταστής	Παναγιώτης Πήλιουρας	
2 <sup>ος</sup> Εξεταστής	Πηνελόπη Σωτηροπούλου	

## Δήλωση συγγραφέα μεταπτυχιακής εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κουρής Φώτιος του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 20048 φοιτητής του Διιδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Παιδαγωγική μέσω Καινοτόμων Τεχνολογιών και Βιοϊατρικών Προσεγγίσεων των Τμημάτων Βιοϊατρικών Επιστημών/ Τμήμα Αγωγής και Φροντίδας στην Πρώιμη Παιδική Ηλικία/Παιδαγωγική τμήμα των Σχολών Επιστημών Υγείας και Πρόνοιας/Σχολή Διοικητικών, Οικονομικών και Κοινωνικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και της Ανώτατης Σχολής Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας Κ. Πήλιουρα Παναγιώτη αρχικά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα προσωπικής επιλογής και που πάντα είχα την επιθυμία να διερευνήσω, παρά την απαιτητικότητα και τη δυσκολία του. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την υπομονή, τη στήριξη, τις συμβουλές, την ανατροφοδότηση αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της. Ακόμη ευχαριστώ την δεύτερη επιβλέπουσα της εργασίας μου την Κ. Σωτηροπούλου Πηνελόπη για τις συμβουλές και την ανατροφοδότηση που μου έδωσε. Θα ήταν παράλειψη να μην εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Πρύτανη του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής Κ. Παπαγεωργίου Ευσταθία για την κατανόηση και τη στήριξη της τόσο σε εμένα αλλά και σε όλους τους φοιτητές, ενώ παράλληλα θα ήθελα να τονίσω ότι είναι ένας εξαιρετικός άνθρωπος. Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού τμήματος για τις πολύτιμες γνώσεις που μας προσέφεραν. Τέλος ευχαριστώ θερμά τους τέσσερις εκπαιδευτικούς, που συμμετείχαν στην ποιοτική έρευνα, κυρίως για την προθυμία τους, τη συνέπεια τους, για τον χρόνο που αφιέρωσαν καθώς και για τα σημαντικά στοιχεία που προσέφεραν μέσα από τις εμπειρίες τους, προκειμένου αυτή να ολοκληρωθεί.

# Αφιέρωσεις

Στην οικογένειά μου...

## Περίληψη

Η βαρύτητα θεωρείται μια από τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της Φύσης και παράλληλα μια πανταχού παρούσα ιδιότητα της ύλης και της ενέργειας. Η μελέτη και η περιγραφή της ξεκίνησε έμμεσα από υποθέσεις σχετικά με τη δομή του Κόσμου από τους αρχαίους πολιτισμούς και κυρίως μέσω της γέννησης της Φυσικής Φιλοσοφίας από τους Αρχαίους Έλληνες. Μια πρώτη εξήγηση για τη βαρύτητα δόθηκε από τον Αριστοτέλη, ως μια φυσική τάση κατακόρυφης κίνησης των σωμάτων στο κέντρο του τότε Κόσμου, τη Γη, με την μάζα να έχει πρωτεύοντα ρόλο στην ταχύτητα πτώσης.

Η περαιτέρω εξέλιξη της θεωρίας δεν επετεύχθη, παρά μόνο μέσα από τις διαμάχες, αμφισβητήσεις και αντιπαραθέσεις αστρονόμων σε βάθος πολλών ετών και κυρίως μέσα από τα έργα του Πτολεμαίου, του Κοπέρνικου, του Μπράχε, του Κέπλερ και του Γαλιλαίου. Η θεωρητική θεμελίωση της βαρύτητας πραγματοποιήθηκε από τον Ισαάκ Νεύτωνα, που διαπίστωσε την Παγκοσμιότητα της βαρύτητας ως ελκτικής δύναμης που ασκεί η ύλη εξ αποστάσεως, με μέτρο ανάλογο του γινομένου των εμπλεκόμενων μαζών και αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης. Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν επέκτεινε αργότερα τη Νευτώνεια θεωρία στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, συνδέοντας τη με τη Γεωμετρία του χωροχρόνου. Εν συνεχεία η ανάπτυξη της Κβαντικής Φυσικής θα οδηγήσει στην ανάγκη διατύπωσης μιας θεωρίας κβαντικής βαρύτητας, προκειμένου να ερμηνευθούν φαινόμενα στο εσωτερικών μελανών οπών και στην αρχή της Μεγάλης Έκρηξης. Αυτή, όμως, η προσπάθεια δεν έχει ολοκληρωθεί ως σήμερα.

Με αφορμή τα παραπάνω, στο ερευνητικό μέρος της εργασίας διερευνήθηκαν οι αντιλήψεις τεσσάρων εκπαιδευτικών Πρωτοβάθμιας, σχετικά με την χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στη διδασκαλία του μαθήματος της Φυσικής μέσω ποιοτικής έρευνας και με άξονες τα οφέλη, τις διδακτικές πρακτικές, τα εμπόδια και τους τρόπους άρσης αυτών. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν περιλαμβάνουν γνωστικά, μεταγνωστικά και συναισθηματικά οφέλη, πρακτικές που βασίζονται σε διαθεματικές και εποικοδομητικές προσεγγίσεις και εμπόδια συναφή με το περιεχόμενο των εγχειριδίων, τα χαρακτηριστικά του εκπαιδευτικού συστήματος, τις γνώσεις των εκπαιδευτικών και την υλικότεχνική επάρκεια των σχολείων. Τέλος διατυπώθηκαν προτάσεις επιμόρφωσης των εκπαιδευτικών, αναδιαμόρφωσης του αναλυτικού προγράμματος και των εγχειριδίων, χρηματοδότησης των σχολείων και άλλες για μελλοντική έρευνα.



Λέξεις κλειδιά: Βαρύτητα, Σχέση βάρους και μάζας, Γενική Θεωρία Σχετικότητας, Ελεύθερη πτώση, Ιστορία και Φιλοσοφία Φυσικών Επιστημών, Κβαντική βαρύτητα, Νόμος Παγκόσμιας Έλξης

## Abstract

Gravity is considered one of the four fundamental forces of Nature and simultaneously a ubiquitous property of matter and energy. Its study and its description were made through the assumptions about the structure of Cosmos from the ancient civilizations and the birth of Natural Philosophy from the Ancient Greeks. A first explanation for gravity was given by Aristotle, as a natural tendency of vertical movement of bodies at the center of that time Universe, the Earth, with mass having a primary role in the speed of fall.

The further development of the theory was not achieved, except through the disputes, doubts and confrontations of astronomers over many years and mainly through the works of Ptolemy, Copernicus, Brahe, Kepler and Galileo. Its theoretical foundation was carried out by Isaac Newton, who established the Universality of gravity as an attraction force exerted by matter at a distance with a measure proportional to the product of the masses involved and inversely proportional to the square of it between their distance. Albert Einstein later extended the Newtonian theory into the General Theory of Relativity linking it to the Geometry of Spacetime. Subsequently the development of Quantum Physics will lead to the need to formulate a theory of quantum gravity, in order to interpret phenomena in the interior of black holes and at the beginning of Big Bang. However, this effort has not been completed yet.

On the occasion of the above, in the research part of the paper, the perceptions of four Primary teachers were investigated, regarding the use of the history and Philosophy of Natural Sciences in the teaching of the Physics course through qualitative research and focusing on the benefits, the didactic practices, the obstacles and ways to remove them. The conclusions drawn include cognitive, metacognitive and affective benefits, practices based on cross-curricular and constructivist approaches and barriers related to textbook content, characteristics of the educational system, teacher's knowledge and the logistical adequacy of schools. Finally, proposals were made for teacher training, reformulation of the curriculum and textbooks, funding of schools and others for future research.

Key words: Gravity, Relationship between weight and mass, General Theory of Relativity, Free fall, History and Philosophy of Physics, Quantum gravity, Law of Universal Gravitation

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	xi
Κατάλογος πινάκων.....	xiv
Κατάλογος εικόνων.....	xv
Συντομογραφίες .....	xxxiii
Πρόλογος .....	1
1 Κεφάλαιο 1.Τα πρώτα αστρονομικά μοντέλα και οι προσεγγίσεις της βαρύτητας μέσα από την φυσική φιλοσοφία .....	4
1.1 Η πρόμη Αστρονομία.....	4
1.2 Τα κοσμολογικά μοντέλα από φιλοσοφικές σχολές και ρεύματα πριν τον Αριστοτέλη .....	5
1.3 Η θεωρία του Αριστοτέλη .....	18
1.3.1 Σύντομη βιογραφία.....	18
1.3.2 Τα έργα του και τα χαρακτηριστικά της αριστοτελικής σκέψης.....	19
1.3.3 Η θεωρία του Αριστοτέλη για την κίνηση και την πτώση των σωμάτων	20
1.4 Η εξέλιξη της Αστρονομίας κατά την ελληνιστική περίοδο .....	24
1.5 Το γεωκεντρικό σύστημα του Πτολεμαίου.....	32
1.6 Οι σημαντικότερες αστρονομικές μελέτες από τη βυζαντινή περίοδο μέχρι τον Μεσαίωνα .....	35
1.7 Το ηλιοκεντρικό σύστημα του Κοπέρνικου.....	41
1.7.1 Σύντομη βιογραφία.....	42
1.7.2 Η περιγραφή του Κοπερνίκειου συστήματος.....	43
2 Κεφάλαιο 2.Η ανάδυση της βαρύτητας μέσα από την εκτέλεση πειραμάτων και ο προσδιορισμός της με τη χρήση των Μαθηματικών.....	46
2.1 Οι παρατηρήσεις του Τύχο Μπράχε.....	46
2.2 Οι νόμοι του Κέπλερ .....	49
2.2.1 Σύντομη βιογραφία.....	49

2.2.2	Ο τρόπος ανακάλυψης και η διατύπωση των νόμων του Κέπλερ.....	51
2.3	Η συμβολή του Γαλιλαίου στη μελέτη της βαρύτητας.....	57
2.3.1	Σύντομη βιογραφία.....	57
2.3.2	Οι αστρονομικές παρατηρήσεις του Γαλιλαίου και η σημασία τους.....	60
2.3.3	Η θεωρία του Γαλιλαίου για την ελεύθερη πτώση των σωμάτων .....	61
2.3.4	Συνέπειες των συμπερασμάτων του Γαλιλαίου από την μελέτη της κίνησης των σωμάτων σε κεκλιμένα επίπεδα .....	66
3	Κεφάλαιο 3.Η θεωρητική θεμελίωση του Νόμου της βαρύτητας.....	69
3.1	Το έργο του Χόιχενς, του Καρτέσιου και του Μπέικον.....	69
3.2	Ο Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα .....	71
3.2.1	Σύντομη βιογραφία.....	71
3.2.2	Συλλογισμοί και δεδομένα που οδήγησαν τον Νεύτωνα στον Νόμο της Παγκόσμιας έλξης.....	74
3.2.3	Διατύπωση των νόμων της κίνησης και του Νόμου της Παγκόσμιας Έλξης	80
3.2.4	Συνέπειες του Νόμου Παγκόσμιας Έλξης .....	83
3.2.5	Η επιβεβαίωση της Νευτώνειας θεωρίας .....	85
3.2.6	Εφαρμογές της Νευτώνειας θεωρίας .....	89
3.3	Η θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν.....	108
3.3.1	Σύντομη βιογραφία.....	108
3.3.2	Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν.....	110
3.3.3	Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν.....	122
3.3.4	Συνέπειες της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας και η επιβεβαίωση της μέσα από τις προβλέψεις της. ....	132
4	Κεφάλαιο 4.Σύγχρονες θεωρίες και η ανάγκη ενοποίησης της βαρύτητας με τις άλλες αλληλεπιδράσεις.....	145
4.1	Ο Νόμος του Χάμπλ, τα μοντέλα Φρίντμαν και η Θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης.....	146

4.2	Οι μαύρες τρύπες και άλλες αστρονομικές δομές που προκύπτουν ως λύσεις των εξισώσεων της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας.....	158
4.3	Η Κβαντική Φυσική και η ανάγκη διατύπωσης μιας θεωρίας για την κβαντική βαρύτητα .....	169
4.3.1	Οι βασικοί νόμοι και τα φαινόμενα που ισχύουν στην Κβαντική Φυσική- Το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής .....	175
4.3.2	Το θέμα της κβαντικής βαρύτητας .....	199
4.4	Ενοποιημένες θεωρίες πεδίου και οι υποψήφιες θεωρίες κβαντικής βαρύτητας.....	206
4.5	Εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας.....	224
5	Κεφάλαιο 5.Ερευνητικά ερωτήματα σχετικά με τις αντιλήψεις των εκπαιδευτικών Πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης για την χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στη διδασκαλία της Φυσικής.....	235
5.1	Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική ανασκόπηση έρευνας .....	235
5.2	Αφετηρία, σκοπός και επιμέρους στόχοι της έρευνας .....	243
5.3	Μεθοδολογικό πλαίσιο έρευνας .....	244
5.3.1	Επιλογή ερευνητικής προσέγγισης και προσδιορισμός του ρόλου των συμμετεχόντων.....	244
5.3.2	Επιλογή εργαλείου συλλογής δεδομένων.....	245
5.3.3	Περιγραφή του δείγματος της έρευνας και της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων .....	246
5.3.4	Περιγραφή της μεθόδου ανάλυσης των ερευνητικών δεδομένων.....	247
5.4	Ανάλυση και παρουσίαση των ερευνητικών δεδομένων .....	247
5.5	Συμπεράσματα έρευνας-Συζήτηση-Προτάσεις .....	264
5.5.1	Περιορισμοί έρευνας.....	272
	Συμπεράσματα .....	273
	Βιβλιογραφικές αναφορές .....	278
	Παράρτημα.....	289

## Κατάλογος πινάκων

<b>Πίνακας 1</b> Ο νόμος πτώσης ενός σώματος στη Γη, το οποίο είναι αρχικά ακίνητο και χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η αντίσταση του αέρα. Στις στήλες του πίνακα φαίνονται κατά σειρά η διάρκεια πτώσης του, η κεκτημένη ταχύτητα του και η διανυθείσα απόσταση (Vigoureux, 2006). .....	65
<b>Πίνακας 2</b> Οι αλληλεπιδράσεις, η συγκριτική ισχύς τους, η εμβέλεια τους και τα σωματίδια που αφορούν (Καλδούδη & Ελευθεριάδης , 2015; NCERT, 2021). .....	85
<b>Πίνακας 3</b> Προσεγγιστικές τιμές της ταχύτητας διαφυγής και της επιφανειακής επιτάχυνσης της βαρύτητας στον Ήλιο και τους 8 πλανήτες του Ηλιακού μας συστήματος (Δεληκαράογλου, 2010; Grego & Mannion, 2010; Narlikar, 1999). .....	97
<b>Πίνακας 4</b> Πίνακας σωματιδίων ύλης και φορέων αλληλεπιδράσεων σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής. Στον πίνακα περιλαμβάνονται τα ονόματα των γνωστών σωματιδίων και φορέων με τα σύμβολα τους, την γενιά που ανήκουν, τις προσεγγιστικές τιμές της μάζας τους καθώς και τις τιμές των φορτίων και του σπιν τους. Το βαρυτόνιο/γκραβιτόνιο(μωβ σειρά), ο φορέας των βαρυτικών αλληλεπιδράσεων δεν έχει βρεθεί πειραματικά στους επιταχυντές σωματιδίων και έτσι οι προβλεπόμενες τιμές του προκύπτουν θεωρητικά (Arbuzov, 2018; Καλδούδη & Ελευθεριάδης , 2015; Μαρούδας , 2015). .....	195

## Κατάλογος εικόνων

<b>Εικόνα 1.1</b> Το πλανητικό μοντέλο του Φιλόλαου. Στο κέντρο βρίσκεται το Πυρ, στο σημείο Γ η Γη, στο Α ο Αντίχθονας και στο σημείο Σ η Σελήνη (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000). .....	10
<b>Εικόνα 1.2</b> Το Συμπαντικό μοντέλο του Αριστοτέλη βασισμένο στα ριζώματα του Εμπεδοκλή (Anjum & Mishra, 2020). .....	12
<b>Εικόνα 1.3</b> Τα Πέντε κανονικά στερεά του Πλάτωνα (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	15
<b>Εικόνα 1.4</b> Το μοντέλο του Εύδοξου (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000). .....	17
<b>Εικόνα 1.5</b> Το άγαλμα του Αριστοτέλη στο ομώνυμο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Varvoglis, 2014). .....	18
<b>Εικόνα 1.6</b> Οι ουράνιες σφαίρες των γνωστών πλανητών της εποχής του Αριστοτέλη μαζί με την εξωτερική σφαίρα των απλανών (Vigoureux, 2006). .....	23
<b>Εικόνα 1.7</b> Οι κωνικές τομές σύμφωνα με τον Απολλώνιο (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000). .....	28
<b>Εικόνα 1.8</b> Η διπλή κίνηση της Γης λογικά θα εκτόξευε όλα τα αντικείμενα από την επιφάνεια της (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	29
<b>Εικόνα 1.9</b> Το φαινόμενο της αστρικής παράλλαξης (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	30
<b>Εικόνα 1.10</b> Ένα αντικείμενο θα έμενε πίσω, εάν η Γη κινούνταν με μεγάλη ταχύτητα, σύμφωνα με το επιχείρημα του Ίππαρχου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	30

<b>Εικόνα 1.11</b> Επίκυκλοι και φέροντες κύκλοι (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000).....	31
<b>Εικόνα 1.12</b> Το πολεμαϊκό σύστημα (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000).....	34
<b>Εικόνα 1.13</b> Ένα βέλος αν ριφθεί οριζόντια πέφτει πιο μακριά σε σχέση με την κάθετη ρίψη του. Αυτό το παράδειγμα αντικρούει την αριστοτελική άποψη περί ώθησης του αέρα (Narlikar, 1999). .....	37
<b>Εικόνα 1.14</b> Η μέθοδος του Ορέσμιου σχετικά με το θεώρημα της μέσης ταχύτητας (Weinberg, 2016).....	41
<b>Εικόνα 1.15</b> Προσωπογραφία του Κοπέρνικου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005)...	42
<b>Εικόνα 1.16</b> Η ερμηνεία της ανάδρομης κίνησης ενός πλανήτη βάσει του πολεμαϊκού μοντέλου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	44
<b>Εικόνα 1.17</b> Η ερμηνεία της ανάδρομης κίνησης ενός πλανήτη βάσει του κοπερνίκειου μοντέλου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	44
<b>Εικόνα 2.1</b> Το πορτρέτο του Τύχο Μπράχε (Milsom, 2018).....	46
<b>Εικόνα 2.2</b> Στο τυχόνειο σύστημα οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο σε επίκυκλους και εν συνεχεία μαζί με αυτούς γύρω από τη Γη (Τριανταφυλλόπουλος, 1999). .....	48
<b>Εικόνα 2.3</b> Έγχρωμη προσωπογραφία του Γιοχάνες Κέπλερ (Singham, 2007).....	49
<b>Εικόνα 2.4</b> Το μοντέλο του Κέπλερ μέσα από την ιδέα του ότι οι τροχιές των έξι γνωστών πλανητών μπορεί να προσδιοριστούν βάσει των πέντε κανονικών στερεών του Πλάτωνα (Milsom, 2018). .....	50



<b>Εικόνα 2.5</b> Ο δεύτερος νόμος του Κέπλερ επιβεβαιώνει ότι τα εμβαδά που σαρώνονται σε ίσους χρόνους από την επιβατική ακτίνα είναι ίσα. Ως εκ τούτου οι κυκλικοί τομείς Α, Β και Γ είναι ίσοι (Vigoureux, 2006).....	53
<b>Εικόνα 2.6</b> Η δομή μιας ελλειπτικής τροχιάς. Στο σημείο F βρίσκεται ο Ήλιος και στο σημείο p ο πλανήτης. F' και F είναι οι εστίες της έλλειψης, A και P είναι το αφήλιο και το περιήλιο ενός πλανήτη αντίστοιχα ενώ a και r είναι ο μεγάλος ημιάξονας και η επιβατική ακτίνα αντίστοιχα. Το ae είναι η μετατόπιση από το κέντρο κάθε εστίας, όπου e είναι η εκκεντρότητα της έλλειψης (MacDougal, 2012).....	54
<b>Εικόνα 2.7</b> Στο διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η σχέση αναλογίας που υπάρχει ανάμεσα στον κύβο του μεγάλου ημιάξονα των ελλειπτικών τροχιών των πλανητών, μετρημένων σε αστρονομικές μονάδες καθώς και του τετραγώνου της περιόδου περιφοράς τους περί τον Ήλιο, σε αστρικά έτη (Vigoureux, 2006).....	56
<b>Εικόνα 2.8</b> Το πορτρέτο του Γαλιλαίου (Grego & Mannion, 2010). .....	57
<b>Εικόνα 2.9</b> Τα περάματα του Γαλιλαίου έγιναν σε κεκλιμένα επίπεδα με διαφορετική κλίση. Η ελεύθερη πτώση αντιστοιχεί στην κίνηση μια σφαίρας σε κεκλιμένο επίπεδο, που σχηματίζει με το έδαφος γωνία 90 μοιρών (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).....	63
<b>Εικόνα 2.10</b> Στη Σελήνη που δεν έχει ατμόσφαιρα, ο αστροναύτης D.Scott ρίχνοντας ένα βαρίδι και ένα πούπουλο διαπίστωσε ότι φτάνουν στο έδαφος της στον ίδιο χρόνο (Hawking, 2000).....	64
<b>Εικόνα 2.11</b> Τα διαγράμματα του νόμου πτώσης από τα δεδομένα του πίνακα1. Στο αριστερό διάγραμμα φαίνεται η σχέση απόστασης συναρτήσεως του χρόνου, ενώ στο δεξιό η σχέση ταχύτητας συναρτήσεως του χρόνου (Narlikar, 1999). .....	65
<b>Εικόνα 2.12</b> Εάν ένας ναύτης ρίξει ένα βαρίδι από τα κατάρτι ενός πλοίου σε κίνηση με σταθερή ταχύτητα, τότε αυτό θα πέσει στη βάση του όμοια με την περίπτωση ακινησίας του πλοίου. Σε αυτό το παράδειγμα δεν υπολογίζεται επίσης η αντίσταση του αέρα (T.Cushing, 2003).....	67

<b>Εικόνα 3.1</b> Καρετσιανές συντεταγμένες σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων(x,y,z) (Βρούλος & Καρνάβας, 2021).....	71
<b>Εικόνα 3.2</b> Προσωπογραφία του Ισαάκ Νεύτωνα (Grego & Mannion, 2010).....	71
<b>Εικόνα 3.3</b> Σχηματοποίηση της κίνησης της Σελήνης σε διαδοχικές μετατοπίσεις. Η Σελήνη, βάσει της Αρχής της αδράνειας έπρεπε να ακολουθεί την ευθύγραμμη πορεία AB, όμως επειδή δέχεται μια δύναμη έλξης από τη Γη η τροχιά της παρεκκλίνει στο AG (Vigoureux, 2006). .....	77
<b>Εικόνα 3.4</b> Η κεντρομόλος δύναμη F που δέχεται ένας πλανήτης από τον ήλιο σε απόσταση r (Narlikar, 1999).....	78
<b>Εικόνα 3.5</b> Το εξώφυλλο των Μαθηματικών Αρχών της Φυσικής Φιλοσοφίας, έργο του Νεύτωνα για τους νόμους της κίνησης και της Παγκόσμιας Έλξης (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	80
<b>Εικόνα 3.6</b> Σχηματική αναπαράσταση του νόμου Παγκόσμιας Έλξης μεταξύ δυο μαζών (Δεληκαράογλου, 2010). .....	82
<b>Εικόνα 3.7</b> Η πειραματική διάταξη, με την οποία ο Κάβεντις μέτρησε την Παγκόσμια Σταθερά της Βαρύτητας (G) (Milsom, 2018).....	83
<b>Εικόνα 3.8</b> Η μετάθεση του περιηλίου του Ερμή από το Π στο Π' καθώς περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο (Narlikar, 1999). .....	89
<b>Εικόνα 3.9</b> Η συνδυασμένη δράση της βαρυτικής έλξης(προς το κέντρο) αλλά και της φυγόκεντρης δύναμης(προς τα έξω) που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής της Γης επηρεάζουν την μέτρηση του βάρους ενός σώματος (Vigoureux, 2006).....	90
<b>Εικόνα 3.10</b> Το σχήμα της Γης είναι ελαφρώς πεπλατυσμένο στους Πόλους και διογκωμένο στον Ισημερινό, το οποίο ονομάζεται γεωειδές (Δεληκαράογλου, 2010).....	91

<b>Εικόνα 3.11</b> Σκίτσο, στο οποίο φαίνεται η επιρροή της επιτάχυνσης ενός ανελκυστήρα στις ένδειξεις ενός δυναμόμετρου, που μετρά το βάρος ενός ανθρώπου, σε σχέση με την ακινησία. Στην τελευταία περίπτωση ο ανελκυστήρας πέφτει ελεύθερα και όχι ελεγχόμενα (Hewitt P. G., 1997). .....	92
<b>Εικόνα 3.12</b> Περίπτωση αριστερόστροφης κυκλικής κίνησης. $\omega$ και $u$ αντίστοιχα είναι τα διανύσματα της γωνιακής επιτάχυνσης και της ταχύτητας ενώ η κεντρομόλος επιτάχυνση και δύναμη έχουν ίδια κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς και διεύθυνση όμοια με την ακτίνα $R$ (Βρούλος & Καρνάβας, 2021). .....	93
<b>Εικόνα 3.13</b> Η σταθερή δύναμη $F$ παράγει έργο κατά την μετατόπιση του αντικειμένου από το σημείο $A$ στο $B$ (Narlikar, 1999). .....	94
<b>Εικόνα 3.14</b> Η βαρυτική δυναμική ενέργεια της σφαίρας είναι ίδια και στις τρεις περιπτώσεις, αφού το έργο που απαιτήθηκε για να ανυψωθεί στα $3m$ είναι το ίδιο. Η μεταβολή της είναι ανεξάρτητη από το μήκος της διαδρομής που θα ακολουθήσει (Hewitt P. G., 1997). .....	95
<b>Εικόνα 3.15</b> Παλίρροιες στο σύστημα Γης-Σελήνης. Στα σημεία $a$ και $c$ παρατηρούνται πλημμυρίδες (MacDougal, 2012). .....	99
<b>Εικόνα 3.16</b> Οι αποστάσεις των σημείων $a$ , $b$ , $c$ (της εικόνας 3.15), οι αποστάσεις και οι άνισες βαρυτικές έλξεις τους από τη Σελήνη (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	99
<b>Εικόνα 3.17</b> Ένα σύστημα διπλών αστερών, περιφερόμενα σε ελλειπτικές τροχιές. Ο αστέρας $A$ έχει διασταλεί με αποτέλεσμα να έχει γεμίσει τον λοβό $P$ (δηλαδή τη δική του διακεκομμένη γραμμή). Οι παλιρροϊκές δυνάμεις του άστρου $B$ έπειτα από το σημείο $L$ έχουν καταστρεπτικές συνέπειες, αποσπώντας ύλη από το $A$ (Narlikar, 1999). .....	102
<b>Εικόνα 3.18</b> Η ισορροπία δυο δυνάμεων, της βαρύτητας και αυτής που δημιουργείται λόγω της πίεσης του θερμού αερίου και της ακτινοβολίας στο εσωτερικό του, είναι η αιτία που τα άστρα δεν καταρρέουν, μέχρι τουλάχιστον να εξαντλήσουν τα πυρηνικά τους καύσιμα (Narlikar, 1999). .....	105

<b>Εικόνα 3.19</b> Το νεφέλωμα του Καρκίνου είναι ένα παράδειγμα υπολείμματος μιας έκρηξης σούπερνόβα. Η εικόνα κάνει εστίαση επίσης σε ένα Πάλσαρ που βρίσκεται μέσα σε αυτό (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015). .....	107
<b>Εικόνα 3.20</b> Φωτογραφία του Άλμπερτ Αϊνστάιν (Lincoln, 2017). .....	108
<b>Εικόνα 3.21</b> Ο Ρέμερ μέσα από την παρατήρηση των δορυφόρων του Δία συνειδητοποίησε ότι το φως δεν κάνει τον ίδιο χρόνο να φτάσει στη Γη, όταν αυτός βρίσκεται στην κοντινή θέση του σε σχέση με την μακρινή θέση της τροχιάς του (T.Cushing, 2003). .....	111
<b>Εικόνα 3.22</b> Σχηματική αναπαράσταση του συμβολόμετρου του πειράματος των Μίκελσον και Μόρλεϊ (Vecchiato, 2017). .....	112
<b>Εικόνα 3.23</b> Ο τρόπος μέτρησης του απόλυτου χώρου και χρόνου (Narlikar, 1999). .....	115
<b>Εικόνα 3.24</b> Μελέτη της κίνησης με καρτεσιανές συντεταγμένες σε ακίνητο σύστημα αναφοράς Ο και σε κινούμενο, με σταθερή ταχύτητα, σύστημα αναφοράς Ο' (Ferraro, 2007). .....	116
<b>Εικόνα 3.25</b> Σχηματική αναπαράσταση της διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον χώρο. Με μπλε χρώμα φαίνεται η ηλεκτρική διαταραχή και με κόκκινο η μαγνητική διαταραχή (Grego & Mannion, 2010). .....	117
<b>Εικόνα 3.26</b> Η διαστολή του χρόνου λόγω ταχύτητας. Στην πρώτη περίπτωση(α) φαίνεται ένα στάσιμο ρολόι που μετράει τον χρόνο σε μια συγκεκριμένη θέση του χώρου. Αν θεωρηθεί ότι αυτό το ρολόι επεκτείνεται στο χώρο(περίπτωση β), τότε μετρά τον χρόνο σε διαφορετικές θέσεις τους χώρου. Εφόσον είναι ακίνητο οι ενδείξεις του θα είναι ίδιες σε όλες τις διαφορετικές θέσεις του χώρου. Όμως στην τρίτη περίπτωση(γ) που κινείται προς τα δεξιά με μια ταχύτητα $u$ , οι χρονικές ενδείξεις του είναι διαφορετικές στις διάφορες χωρικές θέσεις σε σχέση με την περίπτωση που ήταν ακίνητο. Η ΕΘΣ υποστηρίζει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα $u$ ενός ρολογιού τόσο πιο αργά κυλάει ο χρόνος για το εκάστοτε ρολόι (Epstein, Εικόνες της Σχετικότητας: 1.Ειδική θεωρία, 1990). .....	119

**Εικόνα 3.27** Η συστολή μήκους λόγω ταχύτητας. Στην εικόνα φαίνονται διαδοχικές περιπτώσεις ενός δίσκου αρχικά ακίνητου, που βαθμιαία αναπτύσσει ταχύτητα  $u$  προς τα δεξιά πλησιάζοντας την ταχύτητα του φωτός. Όταν είναι ακίνητος έχει το κανονικό μήκος του, καθώς όμως φτάνει σε ποσοστό κοντά στην ταχύτητα του φωτός τότε φαίνεται ότι το μήκος του μικραίνει προς την κατεύθυνση της κίνησης μόνο. Στην υποθετική περίπτωση που ο δίσκος φτάσει τη ταχύτητα του φωτός το μήκος του θα μηδενιστεί (Hewitt P. , 1997)..... 120

**Εικόνα 3.28** Χωροχρονικό διάγραμμα και κώνος φωτός. Εξαιτίας της σταθερότητας της ταχύτητας του φωτός( $c$ ) ο χρόνος γίνεται ισοδύναμος με τις άλλες χωρικές διαστάσεις, μέσω της ποσότητας  $c \cdot t$ . Η κατασκευή τετραδιάστατων χωροχρονικών διαγραμμάτων είναι εκτός αντίληψης της ανθρώπινης φυσιολογίας ,οπότε για λόγους ευκολίας σχηματίζονται τρισδιάστατα χωρικά διαγράμματα, όπου παραλείπεται η διάσταση του ύψους στον κάθετο άξονα και στη θέση της μπαίνει η διάσταση του χρόνου. Το φως καθώς διαδίδεται σφαιρικά στον χώρο προς όλες τις κατευθύνσεις, σχηματίζει ένα κώνο φωτός στον χωροχρόνο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το γεγονός E αντιπροσωπεύει το παρόν και ο κώνος που σχηματίζεται αντίστοιχα κάτω και πάνω από αυτό ονομάζεται παρελθοντικός και μελλοντικός κώνος φωτός. Οτιδήποτε βρίσκεται εντός των δυο κώνων (όπως το σημείο A) έχει ταχύτητες μικρότερες από αυτή του φωτός, ενώ το ίδιο το φως κινείται πάνω στις ημιευθείες με αρχή το E. Από την άλλη οτιδήποτε βρίσκεται εκτός κώνων φωτός (όπως το σημείο B) έχει ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτή του φωτός και δεν γίνεται αντιληπτό ούτε από τις ανθρώπινες αισθήσεις, ούτε από τις μετρήσεις των διαφόρων οργάνων (Ferraro, 2007)..... 121

**Εικόνα 3.29** Διάγραμμα μάζας ηρεμίας και ορμής. Η μάζα ενός σώματος σε ακινησία ονομάζεται ίδια μάζα ή αλλιώς μάζα ηρεμίας. Καθώς όμως το σώμα αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη ταχύτητα η μετρούμενη δυναμική μάζα, όπως ονομάζεται και η ορμή γίνεται μεγαλύτερη, όσο η ταχύτητα του σώματος πλησιάζει αυτή του φωτός. Στην περίπτωση που τη φτάσει, η δυναμική μάζα θα γίνει άπειρη (Erstein, Εικόνες της Σχετικότητας:2.Γενική θεωρία, 1992). ..... 122

**Εικόνα 3.30** Το υποθετικό γεγονός της καταστροφής του Ήλιου θα γίνει αντιληπτό από τους κατοίκους της Γης μετά από περίπου οκτώ λεπτά και όχι ακαριαία. Σύμφωνα με την

ΕΘΣ αυτό θα συμβεί επειδή καμία πληροφορία δεν μπορεί να διαδοθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός. Έτσι το γεγονός θα γίνει αντιληπτό μόλις η Γη μπει στον μελλοντικό κώνο φωτός του (Hawking, 2000). ..... 123

**Εικόνα 3.31** Η Αρχή της ισοδυναμίας αδρανειακών και μη αδρανειακών συστημάτων αναφοράς (T.Cushing, 2003). ..... 125

**Εικόνα 3.32** Τρία είδη Γεωμετρίας του χωροχρόνου. Κατά σειρά απεικονίζονται από αριστερά προς τα δεξιά η σφαιρική, η επίπεδη και η υπερβολική Γεωμετρία. Στη σφαιρική Γεωμετρία, που χαρακτηρίζεται από θετική καμπυλότητα, το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου είναι μεγαλύτερο από  $180^0$ . Στην επίπεδη Γεωμετρία, που χαρακτηρίζεται από μηδενική καμπυλότητα, το αντίστοιχο άθροισμα είναι ακριβώς  $180^0$ , ενώ στην υπερβολική Γεωμετρία, που χαρακτηρίζεται από αρνητική καμπυλότητα, είναι μικρότερο από  $180^0$  (Valtonen, Anosova, Kholshchevnikov, Mylläri, & Orlov, 2016). ..... 126

**Εικόνα 3.33** Η προβολή του τετραδιάστατου χωροχρονικού συνεχούς της Ριμάνειας Γεωμετρίας στον ψευτοευκλείδειο χώρο Μινκόφσκι (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018). ..... 127

**Εικόνα 3.34** Μοντέλο αναπαράστασης της καμπύλωσης του χωροχρόνου που προκαλεί η Γη λόγω της μάζας της. Στη ΓΘΣ η βαρύτητα είναι η ίδια η παραμόρφωση του χωροχρόνου που αναγκάζει τη Σελήνη να περιφέρεται γύρω από αυτή. Η Σελήνη αντίστοιχα προκαλεί λόγω της μικρότερη μάζας της μια αντίστοιχα μικρότερη καμπύλωση στο χωροχρόνο γύρω της(δεν φαίνεται στην εικόνα),που ερμηνεύει τη δική της βαρυτική έλξη. Σημειώνεται τέλος, ότι αυτό το μοντέλο αναπαράστασης προορίζεται μόνο για εκπαιδευτικούς σκοπούς, καθώς η καμπύλωση του χωροχρόνου είναι μη ορατή από την φυσιολογία των ανθρώπων. Στην πραγματικότητα είναι αυτό που ερμηνεύεται ως βαρύτητα (Kersting & Steier, 2018). ..... 129

**Εικόνα 3.35** Ο ορισμός της ευθείας σε επίπεδη και σφαιρική Γεωμετρία. Στην πρώτη περίπτωση είναι η συντομότερη διαδρομή μεταξύ δυο σημείων P και Q, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο μέγιστος κύκλος μεταξύ των ίδιων σημείων. Οι μέγιστοι κύκλοι ονομάζονται γεωδαισιακές και είναι οι ‘ευθείες’ διαδρομές του τετραδιάστατου χωροχρόνου που

ακολουθούν τα αντικείμενα δεχόμενα την βαρυτική έλξη μιας μάζας (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009)..... 130

**Εικόνα 3.36** Στο αριστερό σχήμα φαίνεται η τροχιά που θα ακολουθούσε το φως που διέρχεται από μια οπή ενός επιταχυνόμενου ανελκυστήρα με φορά προς τα πάνω χωρίς της επίδραση της βαρύτητας. Στο δεξί σχήμα φαίνεται ότι το ίδιο πρέπει να ισχύει και σε ένα ανελκυστήρα που επιταχύνεται εξαιτίας της βαρύτητας σε ομογενές πεδίο, αν η Αρχή της Ισοδυναμίας είναι σωστή (T.Cushing, 2003). ..... 132

**Εικόνα 3.37** Τα μετατοπισμένα είδωλα της πηγής φωτός S λόγω της καμπύλωσης του φωτός από το βαρυτικό πεδίο της μάζας G (Narlikar, 1999). ..... 133

**Εικόνα 3.38** Ένας γαλαξίας (στο κέντρο) λειτουργεί ως βαρυτικός φακός στο φως που προέρχεται από ένα πιο μακρινό γαλαξία, προκαλώντας γύρω του έναν Δακτύλιο Αϊνστάιν (Varvoglis, 2014)..... 135

**Εικόνα 3.39** Καλλιτεχνική απεικόνιση της διάδοσης βαρυτικών κυμάτων στον χωροχρόνο από δυο στροβιλιζόμενα άστρα μεγάλης μάζας (Hawking, 2000)..... 136

**Εικόνα 3.40** Φωτογραφία του Τζότζεφ Βέμπερ με την ευρηματική του κατασκευή, τον ραβδόμορφο ανιχνευτή βαρυτικών κυμάτων (Ciufolini & Matzner, 2010)..... 137

**Εικόνα 3.41** Το συμβολόμετρο του LIGO έχει τις ίδιες αρχές λειτουργίας με το αντίστοιχο του πειράματος των Μίκελσον και Μόρλεϊ, με την διαφορά ότι έχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και εκτείνεται σε μήκος αρκετών χιλιομέτρων (Cervantes-Cota, Galindo-Uribarri, & Smoot, 2016). ..... 138

**Εικόνα 3.42** Πανοραμική φωτογραφία του LIGO στις Η.Π.Α. Εκεί το 2016 εντοπίστηκαν για πρώτη φορά τα βαρυτικά κύματα επιβεβαιώνοντας την ΓΘΣ (Ciufolini & Matzner, 2010)..... 138

**Εικόνα 3.43** Απλουστευμένο διάγραμμα χώρου-χρόνου στην υποθετική περίπτωση που δεν υπάρχει βαρύτητα. Οι παρατηρητές A και B είναι ακίνητοι σε μια απόσταση  $\alpha\beta$  μεταξύ

τους και στέλνουν φωτεινά σήματα ο ένας στον άλλο ενώ παράλληλα είναι εφοδιασμένοι με δυο συγχρονισμένα ρολόγια. Οι κοσμικές γραμμές των παρατηρητών ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) δείχνουν φυσικά ότι παρόλο που δεν κινούνται στον χώρο, ο χρόνος περνάει γι' αυτούς. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι χωροχρονικές τροχιές του φωτός, που στέλνουν διαδοχικά ο ένας στον άλλο ανά δευτερόλεπτο. Η έλλειψη βαρύτητας έχει ως συνέπεια ο χωροχρόνος να είναι επίπεδος(ευκλείδειος), οπότε δεν υπάρχουν χρονικές διαφορές στην διάρκεια αποστολής-λήψης των σημάτων από τον ένα στον άλλο. Αυτό είναι λογικό, αφού το φως διανύει την ίδια απόσταση για να φτάσει από τον ένα στον άλλο, έχοντας παράλληλα σταθερή ταχύτητα (Narlikar, 1999)..... 139

**Εικόνα 3.44** Απλουστευμένο διάγραμμα χώρου-χρόνου στην υποθετική περίπτωση που ο ένας παρατηρητής(B) βρίσκεται στην επιφάνεια ενός άστρου πολύ μεγάλης μάζας(μαύρο παραλληλόγραμμο) και ο άλλος παρατηρητής(A) σε μια απόσταση  $\alpha\beta$ , χωρίς να κινείται στον χώρο. Στην περίπτωση αυτή η βαρύτητα του άστρου παραμορφώνει τον χωροχρόνο γύρω του και ως εκ τούτου τα σήματα που στέλνει ο B δεν έχουν την ίδια χρονική διάρκεια για τον A, αφού το φως χρειάζεται να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με το παράδειγμα της εικόνας 3.31. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Γεωμετρία του χωροχρόνου δεν είναι πλέον επίπεδη λόγω του ισχυρού βαρυτικού πεδίου του άστρου (Narlikar, 1999). ..... 140

**Εικόνα 3.45** Σχέδιο που απεικονίζει την εκπομπή φωτός ενός πολύ θερμού άστρου σε σχέση με τον γνωστό μας Ήλιο. Το άστρο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του εκπέμπει μπλε φως με συχνότητα  $F_1$ (μικρού μήκους κύματος). Καθώς όμως το ισχυρό βαρυτικό του πεδίο έχει καμπυλώσει τον χωροχρόνο γύρω του, τα φωτόνια στην πορεία της διάδοσης τους χάνουν ενέργεια και η συχνότητα του κύματος μειώνεται, ενώ παράλληλα το μήκος κύματος τους αυξάνεται. Το αποτέλεσμα είναι το φως να φτάνει ένα παρατηρητή μακριά με μια συχνότητα  $F_2$ (μικρότερη της αρχικής), που έχει μετατοπιστεί προς το ερυθρό φάσμα του φωτός (Kaiser, 2016)..... 141

**Εικόνα 3.46** Οι Πάουντ και Ρέμπκα επιβεβαίωσαν με το πείραμα τους την ΓΘΣ. Τα φωτόνια που έφτασαν στον ανιχνευτή κοντά στο έδαφος είχαν μικρότερο μήκος κύματος από τα αντίστοιχα την στιγμή της εκπομπής τους και το αντίστροφο. Από αυτό προκύπτει ότι ο χρόνος κυλάει πιο αργά στο έδαφος, όπου το βαρυτικό πεδίο είναι πιο ισχυρό σε



σχέση με την κορυφή του πύργου, όπου το βαρυτικό πεδίο είναι ασθενέστερο (Round-Rebka experiment, n.d.)..... 142

**Εικόνα 3.47** Η λειτουργία του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης στηρίζεται στις αρχές της ΕΘΣ και της ΓΘΣ. Αν δεν υπολογιστούν οι χρονικές διαφορές λόγω κίνησης των δορυφόρων και διαφορετικής τιμής της βαρύτητας σε σχέση με τη Γη, οι αποκλίσεις στον υπολογισμό των θέσεων των δεκτών θα ήταν μεγάλες (Ashby, 2017).. 143

**Εικόνα 3.48** Η ΓΘΣ ερμήνευσε την τροχιακή μετάπτωση του περιηλίου των ουράνιων σωμάτων με αποτέλεσμα να δίνει ακριβείς τιμές για την περίπτωση του Ερμή, που αδυνατούσε να εξηγήσει η νευτώνεια θεωρία (Λάιος, 2018). ..... 144

**Εικόνα 4.1** Η δομή του Γαλαξία μας, με τον δίσκο, το εξόγκωμα, την αλώ και τη θέση του Ήλιου σε αυτόν. Η διάμετρός του είναι 30 kpc (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015). ..... 147

**Εικόνα 4.2** Φωτογραφία του Έντουιν Χάμπλ (NASA, n.d.). ..... 148

**Εικόνα 4.3** Η μετατόπιση του φωτός προς το κυανό και το ερυθρό λόγω του φαινομένου Ντόπλερ(πάνω και κάτω τμήμα εικόνας), σε σχέση με την περίπτωση ακινησίας δυο άστρων(μεσαίο τμήμα εικόνας (Grego & Mannion, 2010)). ..... 149

**Εικόνα 4.4** Διάγραμμα ακτινικής ταχύτητας Γαλαξιών(σε Km/sec) στον κάθετο άξονα συναρτήσει της απόστασης τους(σε Mpc) στον οριζόντιο άξονα. Η αναλογική σχέση μεταξύ τους αναπαριστά γραφικά τον Νόμο του Χάμπλ (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015). ..... 150

**Εικόνα 4.5** Η διαστολή του χώρου, όπως προκύπτει από την συνεχή αύξηση της απόστασης των γαλαξιών μπορεί να παρομοιαστεί με ένα μπαλόνι που φουσκώνει σταδιακά (Δεληβοριάς, 2018). ..... 151

**Εικόνα 4.6** Διάγραμμα απόστασης μεταξύ των γαλαξιών(R) σε συνάρτηση με τον χρόνο(t). Οι τρεις καμπύλες δείχνουν τις πιθανές εξελίξεις του Σύμπαντος σύμφωνα με τα μοντέλα Φρίντμαν (Baez & Bunn, 2005). ..... 153

<b>Εικόνα 4.7</b> Τα στάδια εξέλιξης του Σύμπαντος σύμφωνα με τη Θεωρία της Μ. Έκρηξης. Το Σύμπαν ξεκίνησε από μια έκρηξη άγνωστης αιτίας, όπου από μια σημειακή ιδιομορφία υπέρθερμης κατάστασης εξελίχθηκε, ψυχόμενο σταδιακά και αυξάνοντας παράλληλα την διάμετρο του, στο παρατηρήσιμο Σύμπαν μετά την πάροδο 13,8 εκατομμυρίων ετών (Neiland & Hooper, 2022).....	155
<b>Εικόνα 4.8</b> Διάγραμμα της έντασης(κάθετος άξονας) σε σχέση με το μήκος κύματος(οριζόντιος άξονας) της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις του δορυφόρου COBE.Από αυτά προέκυψε ότι η θερμοκρασία της αντιστοιχεί σε 2,7 Κέλβιν (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).....	157
<b>Εικόνα 4.9</b> Η ακολουθία της βαρυτικής κατάρρευσης ενός άστρου(πάνω) λόγω εξάντλησης των πυρηνικών καυσίμων του, μοιάζει με την χρονοανεστραμμένη ακολουθία της Θεωρίας της Μ. Έκρηξης(κάτω) (Narlikar, 1999).....	159
<b>Εικόνα 4.10</b> Φωτογραφία του Σουμπραμανιάν Τσαντρασεκάρ (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). .....	160
<b>Εικόνα 4.11</b> Φωτογραφία του Καρλ Σβάρτσιλντ (Grøn, Celebrating the centenary of the Schwarzschild solutions, 2016).....	161
<b>Εικόνα 4.12</b> Τα βασικά μέρη μιας μελανής οπής. Η περιφέρεια του σφαιρικού αντικειμένου αποτελεί τον ορίζοντα γεγονότων της οπής, ο οποίος ορίζεται από την ακτίνα Σβάρτσιλντ. Αυτή φέρεται από το κέντρο του αντικειμένου, που αποτελεί την μοναδικότητα η σημειακή ιδιομορφία της οπής. Σε αυτό το σημείο του χωροχρόνου έχει συγκεντρωθεί όλη η εναπομείνουσα μάζα του άστρου, λόγω βαρυτικής κατάρρευσης (Albanay, 2015). .....	161
<b>Εικόνα 4.13</b> Η δομή μιας περιστρεφόμενης οπής Kerr. Στο σχέδιο φαίνεται με μπλε χρώμα το στατικό όριο, η εργόσφαιρα με κόκκινο χρώμα, ο εξωτερικός και ο εσωτερικός ορίζοντας καθώς και η ιδιομορφία στο κέντρο της, από όπου περνάει ο νοητός άξονας περιστροφής της (Tito & Pavlov, 2018).....	163

<b>Εικόνα 4.14</b> Καλλιτεχνική απεικόνιση περιστρεφόμενης οπής. Οι πίδακες ροής ιονισμένου αερίου φαίνονται κατά μήκος του άξονα που περνάει από το αόρατο κέντρο της (Hlavacek, 2013).....	165
<b>Εικόνα 4.15</b> Φωτογραφία υπερμεγέθους μελανής οπής στο κέντρο του γαλαξία M87. Η λήψη της έγινε το 2019 από το Event Horizon Telescope και ήταν αποτέλεσμα συνεργασίας πολλών ραδιοτηλεσκοπίων σε Ευρώπη, Αμερική και Ανταρκτική (Kalhor & Mehrparvar, 2020).....	165
<b>Εικόνα 4.16</b> Σχηματική αναπαράσταση μιας σήραγγας Ρόζεν-Αϊνστάιν, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις της ΓΘΣ (Thorne, 2019).....	166
<b>Εικόνα 4.17</b> Διάγραμμα της ταχύτητας περιφοράς των άστρων σε σχέση με την απόσταση τους από το κέντρο του γαλαξία. Η κίτρινη καμπύλη δείχνει τις αναμενόμενες τιμές βάσει τη παρατηρούμενης ύλης, ενώ η πράσινη καμπύλη δείχνει τα πραγματικά αποτελέσματα των μετρήσεων (Δεληβοριάς, 2018).....	168
<b>Εικόνα 4.18</b> Η διάταξη του πειράματος της διπλής σχισμής. Στα δεξιά φαίνονται οι σχηματισμοί πάνω στο φωτογραφικό φιλμ. Τα αποτελέσματα του πειράματος δίνουν την ίδια εικόνα είτε ερμηνευτεί με την σωματιδιακή φύση του φωτός είτε με την κυματική, γεγονός που αποδεικνύει την διττή φύση του (Hewitt P. , 1997).....	171
<b>Εικόνα 4.19</b> Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στην περίπτωση του καυσίου η συχνότητα κατωφλίου είναι 1,96 eV. Εάν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει συχνότητα μικρότερη από αυτή, όπως η κόκκινη, δεν αποσπώνται ηλεκτρόνια από το μέταλλο, όσο χρόνο και αν φωτιστεί με αυτή. Εάν όμως η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει μεγαλύτερη συχνότητα από την συχνότητα κατωφλίου, όπως η κίτρινη και η μπλε, τότε αποσπώνται ηλεκτρόνια από το μέταλλο. Οι νόμοι της Κλασικής Φυσικής αδυνατούσαν να ερμηνεύσουν το φαινόμενο αυτό, πράγμα που έκανε ο Αϊνστάιν στηριζόμενος στη θεωρία των κβάντων φωτός, που είχε ήδη υποθέσει ο Πλάνκ (Varvoglis, 2014). .....	173
<b>Εικόνα 4.20</b> Φωτογραφία του Δανού Νιλς Μπορ (Encyclopedia Britannica, 2022). .....	176

<b>Εικόνα 4.21</b> Φωτογραφία του Γερμανού Βέρνερ Χάιζενμπεργκ, που διατύπωσε τον βασικότερο νόμο της κβαντικής μηχανικής, την Αρχή της Απροσδιοριστίας (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).	176
<b>Εικόνα 4.22</b> Φωτογραφία του Αυστριακού Έρβιν Σρέντιγκερ, που ανακάλυψε την περίφημη κυματική εξίσωση (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).	178
<b>Εικόνα 4.23</b> Τροχιακά ηλεκτρονίων στο άτομο. Η πυκνότητα των ηλεκτρονιακών νεφών σχετίζεται με την πυκνότητα των χρωμάτων (Λιοδάκης, Γάκης, Θεοδωρόπουλος, Θεοδωρόπουλος, & Κάλλης).	180
<b>Εικόνα 4.24</b> φωτογραφία του Άγγλου φυσικού Πωλ Ντιράκ, ο οποίος μεταξύ άλλων προέβλεψε και την ύπαρξη της αντιύλης (Fraser, 2003).	183
<b>Εικόνα 4.25</b> Φωτογραφία του Αυστριακού φυσικού Βολφγκανγκ Πάουλι, γνωστός για την Απαγορευτική Αρχή στη κβαντική μηχανική (Encyclopedia Britannica, 2022).	184
<b>Εικόνα 4.26</b> Εσωτερική δομή πρωτονίου(αριστερά) και νετρονίου(δεξιά). Κάθε πρωτόνιο αποτελείται από δυο πάνω κουάρκ και ένα κάτω κουάρκ, ενώ αντίστοιχα κάθε νετρόνιο αποτελείται από δυο κάτω κουάρκ και ένα πάνω κουάρκ (Modinos, 2014).	188
<b>Εικόνα 4.27</b> Η ερμηνεία των τριών αλληλεπιδράσεων(ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή) από την κβαντική μηχανική στηριζόμενη στην διαταρακτική μέθοδο, που αναπαρίσταται με τα διαγράμματα Φέινμαν. Στα δισδιάστατα αυτά χωροχρονικά διαγράμματα κάθε σωματίδιο ύλης(φερμιόνιο) αντιπροσωπεύεται με μια ευθεία γραμμή ενώ οι φορείς αλληλεπίδρασης(μποζόνια) με διακεκομμένες, καμπύλες η ελικοειδείς γραμμές. Η μέθοδος της επακανονικοποίησης μέσω της QED και της QCD δίνουν πεπερασμένα αποτελέσματα για τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις (Thomson, 2002).	191
<b>Εικόνα 4.28</b> Η ερμηνεία της βαρύτητας από την κβαντική μηχανική ως ανταλλαγή ενός υποθετικού βαρυτονίου ανάμεσα σε ένα σωματίδιο στη Γη και ένα άλλο στον Ήλιο (Hawking, 2000).	191

**Εικόνα 4.29** Η εφαρμογή της επακανονικοποίησης στην περίπτωση της βαρυτικής αλληλεπίδρασης δεν δίνει πεπερασμένα αποτελέσματα λόγω του γεγονότος ότι τα υποθετικά γκραβιτόνια ή βαρυτόνια αλληλεπιδρούν και μεταξύ τους (Kaku, 2022). ..... 192

**Εικόνα 4.30** Η διαδικασία παραγωγής της ακτινοβολίας Χόκινγκ. Τα δυνητικά σωματίδια(κόκκινα και μωβ) αναδύονται λόγω των κβαντικών διακυμάνσεων γύρω από την μελανή οπή και εν συνεχεία γίνονται πραγματικά δανειζόμενα ενέργεια αυτή στον ορίζοντα γεγονότων της. Το σωματίδιο αντιύλης(μωβ) πέφτει μέσα στον ορίζοντα οδηγούμενο προς την σημειακή της ιδιομορφία, προσδίδοντάς της αρνητική ενέργεια, που μειώνει τη μάζα της και τελικά εξατμίζεται σταδιακά. Το σωματίδιο με θετική ενέργεια(κόκκινο) διαφεύγει από την οπή και στο σύνολό τους αντιπροσωπεύουν την λεγόμενη ακτινοβολία Χόκινγκ (Siegel, 2022). ..... 198

**Εικόνα 4.31** Στην αρχή της Μ. Έκρηξης όλες οι γνωστές θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις ήταν ενοποιημένες σε μια Υπερδύναμη (Kaku, 2022). ..... 200

**Εικόνα 4.32** Η προσπάθεια συνδυασμού της ΓΘΣ με την κβαντική μηχανική δεν είναι εύκολη λόγω της διαφορετικής θεώρησης των δυο θεωριών σχετικά με την φύση του χωροχρόνου. Η ΓΘΣ ερμηνεύει την βαρύτητα γεωμετρικά ως καμπύλωση ενός εξελισσόμενου χωροχρόνου ενώ η κβαντική μηχανική χρησιμοποιεί την διαταρακτική μέθοδο, στηριζόμενη στα διαγράμματα Φέινμαν σε στατικό χωροχρόνο(άσπρες γραμμές). Η διαδικασία της επακανονικοποίησης στην περίπτωση της βαρυτικής αλληλεπίδρασης δεν εξαλείφει τους απειρισμούς. Έτσι τέθηκε η ανάγκη διατύπωσης μιας θεωρίας κβαντικής βαρύτητας, που θα συνδυάζει επιτυχώς τις δυο θεωρίες (SLAC National Accelerator Laboratory, n.d.). ..... 202

**Εικόνα 4.33** Φωτογραφία του Γερμανού Φυσικού Μαξ Πλανκ, που πρότεινε τις ομώνυμες μονάδες μέτρησης μέσα από τον συνδυασμό Φυσικών Σταθερών (Encyclopedia Britannica, 2022). ..... 205

**Εικόνα 4.34** Η κλίμακα Πλανκ όπου επιχειρείται η ανακάλυψη μιας θεωρίας κβαντικής βαρύτητας έχει 16 τάξεις μεγέθους διαφορά σε σχέση με την ασθενή κλίμακα δράσης του

μποζονίου Χίγκς. Κάτω από την μάζα του ηλεκτρονίου βρίσκεται η ενέργεια των κβαντικών διακυμάνσεων του κενού (Jones & Robbins, 2010)..... 206

**Εικόνα 4.35** Σχηματική αναπαράσταση της επιπλέον χωρικής διάστασης που εισήγαγε η Θεωρία Καλούζα-Κλέιν. Στο αριστερό τμήμα φαίνεται κάθε σημείο του τρισδιάστατου χώρου να αποτελείται από μια σφαίρα που περιέχει την πέμπτη διάσταση, με τον ίδιο τρόπο που ένας κύκλος(δεξί τμήμα) σε μονοδιάστατο χώρο αν παρατηρηθεί σε μεγέθυνση μοιάζει με κύλινδρο (Smolin, Θεωρία χορδών:όλα ή τίποτα;, 2008). ..... 208

**Εικόνα 4.36** Τα δυο βασικά είδη των χορδών. Αριστερά φαίνεται μια ανοιχτή χορδή ενώ δεξιά μια κλειστή χορδή (White, 2018)..... 212

**Εικόνα 4.37** Οι αλληλεπιδράσεις στη Θεωρία των Χορδών ερμηνεύονται μέσα από συνενώσεις ή διαχωρισμούς μεταξύ ανοιχτών και κλειστών χορδών (Jones & Robbins, 2010)..... 213

**Εικόνα 4.38** Οι χορδές(ανοιχτές και κλειστές) καθώς κινούνται στον χρόνο σχηματίζουν κοσμικές επιφάνειες που μοιάζουν με φύλλα για τις ανοιχτές και με σωλήνες για τις κλειστές, όπως φαίνεται αριστερά στην εικόνα. Η βαρύτητα στην Θεωρία Χορδών περιγράφεται αποκλειστικά από την δράση κλειστών χορδών που συνενώνονται, όπως φαίνεται στα δεξιά της εικόνας. Επίσης φαίνεται η διαφορά με τα διαγράμματα Φέινμαν, μέσω των οποίων ερμηνεύονται οι αλληλεπιδράσεις στην Κβαντική μηχανική (Anderson, 2017)..... 214

**Εικόνα 4.39** Σχηματική υποθετική αναπαράσταση ενός χώρου Κάλαμπι-Γιάο, όπου οι έξι κρυμμένες χωρικές διαστάσεις είναι συμπαγοποιημένες (Jones & Robbins, 2010). ..... 215

**Εικόνα 4.40** Φωτογραφία του Αμερικανού Φυσικού Έντουαρντ Βίτεν, ο οποίος συνέβαλε στην συνένωση των πέντε συνεπών θεωριών χορδών στην επονομαζόμενη Θεωρία Μ (Encyclopedia Britannica, 2022). ..... 217

**Εικόνα 4.41** Η Θεωρία Μ συνδυάζει τις πέντε θεωρίες χορδών με τεχνικές ονομασίες I,IIA,ΙΙΒ και τις δυο ετεροτικές χάρις στου δυϊσμούς S και T,δίνοντας παράλληλα τα ίδια

αποτελέσματα με την ενδεκαδιάστατη Θεωρία Υπερβαρύτητας στις χαμηλές ενέργειες ή αλλιώς στις μεγάλες κλίμακες (Anderson, 2017). ..... 218

**Εικόνα 4.42** Τα διάφορα είδη βρανών. Ένα σημείο είναι μια 0-βράνη, η χορδή θεωρείται ως 1-βράνη, οι κοσμικές επιφάνειες τους θεωρούνται ως 2-βράνες ενώ το τρισδιάστατο ανάλογο τους είναι οι 3-βράνες. Ο γραφικός σχεδιασμός της κλειστής 3-βράνης ενέχει δυσκολίες (Gubser, 2020). ..... 219

**Εικόνα 4.43** Γραφική αναπαράσταση ενός δικτύου σπιν, μέσω του οποίου επιχειρείται η κβάντωση της γεωμετρίας του χωροχρόνου. Οι ακμές του δικτύου εκφράζουν κβάντα εμβαδού ενώ οι κόμβοι κβάντα όγκου (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002). ..... 222

**Εικόνα 4.44** Η εξέλιξη των δικτύων σπιν μέσα από την κίνησή τους στον χρόνο σχηματίζει τον αφρό σπιν, αντιπροσωπεύοντας έτσι έναν δυναμικό χωροχρόνο (Ashtekar & Bianchi, 2021). ..... 223

**Εικόνα 4.45** Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον δορυφόρο Πλανκ επιβεβαιώνουν ότι μόνο το 4,6% του Σύμπαντος αποτελεί την συνήθη υλοενέργεια, ενώ το υπόλοιπο έχει σκοτεινή φύση (Jones & Robbins, 2010). ..... 225

**Εικόνα 4.46** Διάγραμμα μήκους της κοσμικής κλίμακας σε συνάρτηση με την επιτάχυνση. Οι αποκλίσεις της ΓΘΣ εμφανίζονται σε συστήματα, που η επιτάχυνση είναι πολύ μικρή δίνοντας ισχυρές ενδείξεις για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης. Τέτοια συστήματα είναι οι σπειροειδείς γαλαξίες, τα σμήνη γαλαξιών και γενικά οι μεγάλες συμπαντικές δομές (Ferreira & Starkman, 2009). ..... 227

**Εικόνα 4.47** Οι διαφορετικές καμπυλώσεις του χωροχρόνου που προκαλούνται από μια συνήθη μάζα(κόκκινη σφαίρα) και από μια αρνητική μάζα(μπλε σφαίρα) (Kruckemyer, 2013). ..... 230

**Εικόνα 4.48** Μοντέλο αναπαράστασης της κατανομής της πληροφορίας στην επιφάνεια μιας μελανής οπής σύμφωνα με την Ολογραφική Αρχή (t Hooft, 2001). ..... 231

**Εικόνα 4.49** Η βαρύτητα αυξάνει την εντροπία των συστημάτων (Lineweaver & Egan, 2010)..... 233

**Εικόνα 4.50** Οι Μπερν , Καραάσκο και Ντίξον έδειξαν ότι ο υπολογισμός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ γκραβιτονίων είναι ισοδύναμος με τον πιο βατό υπολογισμό δυο αλληλεπιδράσεων μεταξύ γλοιονίων, τον φορέα της πυρηνικής δύναμης σύμφωνα με την κβαντική μηχανική (Wolchover, 2014)..... 234



## Συντομογραφίες

	Αγγλική ορολογία	Ελληνική ορολογία
ΓΘΣ	General Theory of Relativity	Γενική Θεωρία της Σχετικότητας
ΔΦΕ	Teaching of Natural Sciences	Διδακτική Φυσικών Επιστημών
ΕΘΣ	Special Theory of Relativity	Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας
ΗΠΑ	United States of America	Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής
H/Y	Computer	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
ΙΦΦΕ	History and Philosophy of Natural Sciences	Ιστορία και Φιλοσοφία Φυσικών Επιστημών
ΚΠ	Standard Model of Particle Physics	Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής
ΦΕ	Natural Sciences	Φυσικές Επιστήμες
ADS/CFT	Anti-De Sitter/Conformal Field Theory correspondence	Αμφίδρομη αντιστοιχία Θεωρίας Υπερβαρύτητας σε χώρο Άντι-Ντε Σίττερ και Σύμμορφης Θεωρίας πεδίου σε τέσσερις διαστάσεις
CERN	European Organization for Nuclear Research	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Πυρηνικών Ερευνών
CP	Charge-Parity symmetry combination	Συνδυασμένη συμμετρία Φορτίου-Ομοτιμίας των σωματιδίων
DSR	Doubly Special Relativity	Διπλά Ειδική Σχετικότητα
GPS	Global Positioning System	Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης
GUT	Grand Unified Theories	Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες
GZK	Abbreviation of prediction made by the physicists Kenneth Greizen, Georgy Zatsepin and Vadim Kuzmin	Πρόβλεψη που έγινε από τους φυσικούς Κένεθ Γκρέιζεν, Γκεόργκι Ζατσέπιν και Βαντίμ Κούζμιν
LIGO	Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory	Παρατηρητήριο Βαρυτικών κυμάτων με Διασυμβολόμετρο Λείζερ
LQG	Loop Quantum Gravity	Κβαντική Βαρύτητα Βρόχων
MOND	Modified Newtonian Dynamics	Τροποποιημένη Νευτώνεια Δυναμική
QCD	Quantum Chromodynamics	Κβαντική Χρωμοδυναμική
QED	Quantum Electrodynamics	Κβαντική Ηλεκτροδυναμική

## Πρόλογος

Ο όρος Επιστήμη από τα αρχαία χρόνια θεωρούνταν άμεσα συνυφασμένος με τη γνώση, η οποία εξακριβώνεται και τεκμηριώνεται μέσα από λογικά επιχειρήματα. Στην εξέλιξή του αυτός όρος, όμως, συνδέθηκε περισσότερο με την οργανωμένη γνώση στο σύστημα της Φύσης, που προκύπτει μέσα από τους κανόνες της επιστημονικής μεθόδου και έρευνας.

Οι Επιστήμες διακρίνονται σε Θετικές-Φυσικές, Ανθρωπιστικές, Κοινωνικές και Εφαρμοσμένες. Φυσικές επιστήμες ονομάζονται οι επιστήμες, που έχουν ως αντικείμενο την παρατήρηση τη μελέτη και την πρόβλεψη μεταβολών που συμβαίνουν στη Φύση, οι οποίες είναι γνωστές ως φαινόμενα. Στις Φυσικές επιστήμες συγκαταλέγονται η Φυσική, που μελετά τα φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με την άβια ύλη, η Χημεία που μελετά τα χημικά φαινόμενα που συνδέονται με την άβια ύλη, η Βιολογία που μελετά τα φυσικά και χημικά φαινόμενα που σχετίζονται με τους ζωντανούς οργανισμούς, η Μετεωρολογία και η Γεωλογία.

Η Φυσική χρησιμοποιώντας εργαλεία από τις προϋπάρχουσες επιστήμες της Λογικής και των Μαθηματικών θεωρείται η θεμελιώδης Επιστήμη καθώς όλες οι υπόλοιπες βασίζονται σε έννοιες και δεδομένα της πρώτης. Σκοπός της Φυσικής είναι η αναζήτηση μοτίβων στα φυσικά φαινόμενα, προκειμένου να δοθούν ερμηνείες γι' αυτά μέσω του πειράματος και έτσι να διατυπωθούν καθολικοί νόμοι που διέπουν την Φύση με απλό, μεστό και ακριβή τρόπο. Βασικές δομές μελέτης της Φυσικής εστιάζουν στην ύλη, την ενέργεια και τις αλληλεπιδράσεις.

Εάν ανατρέξουμε στην Ιστορία Φυσικών Επιστημών θα παρατηρήσουμε ότι ή συσσωρευτική γνώση δεν είναι γραμμική, αλλά ασυνεχής και αυτό γιατί αρκεί ένα αναπάντητο ερώτημα, για να ανατραπεί μια θεωρία, που ίσχυε για αιώνες από μια καινούργια, η οποία θα δίνει ακριβείς απαντήσεις και άλλες προοπτικές, προκαλώντας έτσι μια επιστημονική επανάσταση. Αυτό θα γίνει κατανοητό μέσα από την διαχρονική μελέτη της έννοιας της βαρύτητας, που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Στη Φύση οι αλληλεπιδράσεις της ύλης είναι τέσσερις η ηλεκτρομαγνητική, η ηλεκτρασθενής η ισχυρή πυρηνική και η βαρυτική. Η βαρύτητα είναι μια ιδιότητα της ύλης που έχει την τάση να έλκει και να έλκεται από άλλα σώματα, που έχουν μάζα ή ενέργεια ,ενώ παράλληλα ασκείται και σε μεγάλες αποστάσεις και θεωρείται η πιο αδύναμη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ωστόσο συνίσταται από τις πιο σημαντικές αλληλεπιδράσεις αφού σε αυτή οφείλεται η συγκρότηση της ύλης, η διαστολή του σύμπαντος, οι τροχιές των πλανητών, η πτώση των σωμάτων στην επιφάνεια της γης και συνεπώς η ίδια η ζωή. Με μια λέξη θα

μπορούσε να χαρακτηριστεί η «κόλλα» του σύμπαντος. Ενώ εμπειρικά η κατανόηση της φαίνεται εύκολη, η επιστημονική περιγραφή της διήρκησε πολλά χρόνια και ακόμα και σήμερα ενέχει μυστήρια, που δεν έχουν ανακαλυφθεί. Στο υποατομικό επίπεδο φαίνεται να είναι σχεδόν αμελητέα, στο μακρόκοσμο όμως, είναι η ισχυρότερη όλων.

Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια με βάση την χρονολογική σειρά της εξέλιξης της θεωρίας της βαρύτητας αλλά και με γνώμονα τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διατυπωθεί.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση των πρώτων αστρονομικών μοντέλων και ανακαλύψεων από τους αρχαίους πολιτισμούς και εν συνεχεία από τους φυσικούς φιλοσόφους, καθώς η έννοια της βαρύτητας μελετήθηκε μέσα στα πλαίσια της Αστρονομίας και των πλανητικών κινήσεων. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην επικρατούσα μέχρι και τον Μεσαίωνα θεωρία του Αριστοτέλη αλλά και στα κοσμολογικά μοντέλα του Κλαύδιου Πτολεμαίου και του Νικόλαου Κοπέρνικου που οδήγησαν στη σταδιακή αποδόμησή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η μετάβαση στην επιστημονική μέθοδο προσέγγισης των κοσμολογικών μοντέλων μέσω της μέτρησης, της μαθηματικής έκφρασης και των πειραμάτων με κύριους εκφραστές τον Γαλιλαίο Γαλιλέι, τον Γιοχάνες Κέπλερ και τον Τύχο Μπράχε.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η θεμελίωση της βαρυτικής θεωρίας και ο τρόπος με τον οποίο οδηγήθηκαν σε αυτή ο Ισαάκ Νεύτωνας μέσω του Νόμου της Παγκόσμιας Έλξης και ο Άλμπερτ Αϊνστάιν μέσω της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας διαμορφώνοντας την σύγχρονη κοσμοθεωρία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος παγίωσής της αμφισβητούμενης Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας στην επιστημονική κοινότητα, μέσα από φαινόμενα που προέβλεπε, όπως η θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης, η ύπαρξη μαύρων τρυπών και των βαρυτικών κυμάτων. Ακόμη περιγράφονται οι προσπάθειες σύγχρονων θεωριών που έχουν ως στόχο την ερμηνεία της Κβαντικής βαρύτητας, καθώς και την ενοποίηση της βαρύτητας με τις άλλες αλληλεπιδράσεις σε ένα ενιαίο πλαίσιο τόσο για τον μικρόκοσμο, όσο και για τον μακρόκοσμο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της ποιοτικής έρευνας που σχεδιάστηκε με σκοπό τη διερεύνηση των αντιλήψεων των εκπαιδευτικών πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης αναφορικά με την χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στη διδασκαλία του μαθήματος της Φυσικής. Συγκεκριμένα αποτυπώνονται οι απόψεις των εκπαιδευτικών βάσει τριών ερευνητικών αξόνων, που περιλαμβάνουν κατά σειρά τα οφέλη από την χρήση της παραπάνω προσέγγισης για τους μαθητές, τις διδακτικές πρακτικές εφαρμογής της, τα

εμπόδια που συναντούν οι εκπαιδευτικοί στην εφαρμογή της καθώς και τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν ώστε να αντιμετωπιστούν. Τέλος με αφορμή τα ευρήματα που προκύπτουν, γίνονται προτάσεις που μεταξύ άλλων αφορούν και μελλοντική έρευνα.

# 1 Κεφάλαιο 1. Τα πρώτα αστρονομικά μοντέλα και οι προσεγγίσεις της βαρύτητας μέσα από την φυσική φιλοσοφία

## 1.1 Η πρόιμη Αστρονομία

Σύμφωνα με τον δημοσιογράφο Τζέιμς Κρόουθερ η Επιστήμη είναι το σύστημα συμπεριφοράς μέσω του οποίου ο άνθρωπος κατάφερε να κυριαρχήσει στο περιβάλλον του ενώ ο ιστορικός Ντέιβιντ Πινγκρί συμπεριέλαβε και το λειτουργικό σύστημα σκέψης στο πλαίσιο κάθε κοινωνίας, όπως εκφράζεται από οποιοδήποτε πεδίο διανοητικής δραστηριότητας που αποσκοπεί στην απόκτηση γνώσης. Έτσι δεν εξαιρούνται τομείς όπως Αστρολογία, Μαγεία και Αστρομαντεία παρά το γεγονός ότι σήμερα δεν θεωρούνται έγκυρες επιστημονικά. Ο Μάρσαλ Κλάγκετ, συμπληρώνοντας τον ορισμό της Επιστήμης, περιλαμβάνει τη μεθοδική και συστηματική κατανόηση, περιγραφή και εξήγηση φυσικών φαινομένων μέσω των εργαλείων της Λογικής και των Μαθηματικών. Επίσης η Αστρονομία είναι ο επιστημονικός τομέας που μελετά την σύσταση, την εξέλιξη και τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων, που εμπεριέχονται εντός του Σύμπαντος (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000).

Οι Προϊστορικοί άνθρωποι ήταν κατά κύριο λόγο νομάδες αφού μετακινούνταν διαρκώς προκειμένου να εξασφαλίσουν τροφή και να προστατευτούν από τις εναλλαγές των καιρικών φαινομένων, ώστε να επιβιώσουν. Όπως είναι λογικό ερμήνευαν τα διάφορα φαινόμενα στηριζόμενοι όχι τόσο στον ορθολογισμό όσο στο συναίσθημα αποδίδοντας τα, έτσι, σε θεότητες, άρατες και απόκρυφες δυνάμεις καθώς και σε μύθους. Ωστόσο η έμφυτη περιέργεια των ανθρώπων και η επιθυμία τους για εξερεύνηση και κατανόηση του Κόσμου τους οδήγησε στο να διατυπώσουν διάφορες θεωρίες γι' αυτόν. Αργότερα όμως η αλλαγή του τρόπου οργάνωσης τους σε μόνιμους τόπους καθώς και η ανακάλυψη της γραφής συνέβαλαν στην περαιτέρω εξέλιξη τους καθώς πλέον η γνώση μεταβιβάζονταν στις επόμενες γενιές, χωρίς την οποία δεν θα υπήρχε η παραμικρή πρόοδος (Καλδούδη & Ελευθεριάδης , 2015).

Περνώντας λοιπόν στην αρχή της Ιστορίας, οι αρχαίοι λαοί ελάχιστα γνώριζαν για τη βαρύτητα. Αυτό ήταν απολύτως λογικό αφού παρά την διαισθητική αντίληψη της η πραγματική μελέτη της απαιτούσε ανάλυση του τρόπου και της αιτίας κίνησης των ουράνιων σωμάτων. Οι λαοί αυτοί ασχολήθηκαν με την Αστρονομία, επειδή η μελέτη του ουρανού τους έδινε χρήσιμες πληροφορίες για τον υπολογισμό του χρόνου, που ήταν απαραίτητος

για τον προγραμματισμό των γεωργικών εργασιών. Αυτό έγινε εφικτό με την παρατήρηση της κίνησης του Ήλιου και της Σελήνης, γεγονός που τους οδήγησε στην εφεύρεση διαφόρων χρήσιμων οργάνων όπως η κλεψύδρα, τα ηλιακά ρολόγια, ο γνώμονας, ο διαβήτης καθώς στην ανάπτυξη ημερολογίων (Weinberg, 2016).

Οι λαοί που είχαν αναπτύξει από νωρίς την Αστρονομία ήταν οι Ινδοί, οι Κινέζοι οι Αιγύπτιοι και οι Βαβυλώνιοι. Αυτό μάλιστα είχε ως αποτέλεσμα και την διατύπωση των πρώτων κοσμολογικών μοντέλων, τα οποία όμως ήταν ακόμα συνδεδεμένα με θρησκευτικές πεποιθήσεις και δεισιδαιμονίες. Οι Ινδοί έχοντας τα ζώα, ως κυρίαρχο στοιχείο στα πιστεύω τους θεωρούσαν ότι ο Κόσμος στηρίζεται σε τέσσερις ελέφαντες, οι οποίοι εν συνεχεία πατούν σε μια τεράστια χελώνα, η οποία τελικά περικλείεται από ένα μεγάλο φίδι. Άλλες θεωρίες υποστήριζαν ότι ο Κόσμος είναι φτιαγμένος σε πέτρινες κολώνες, γεγονός που εξηγούσε την εναλλαγή μέρας και νύχτας ενώ άλλες θεωρούσαν ότι η εξαφάνιση του Ηλίου συμβαίνει εξαιτίας της κατάποσης του από ένα μυθικό δράκο.

Οι Βαβυλώνιοι συγκεκριμένα είχαν καταρτήσει ένα μεγάλο κατάλογο ζωδιακών αστερισμών, αφού πίστευαν ότι η μελέτη τους επηρεάζει τις ζωές και τις τύχες των ανθρώπων. Οι Κινέζοι ήταν ικανοί να προβλέπουν με βάση το ημερολόγιο τους και τις ηλιακές εκλείψεις, ενώ οι Αιγύπτιοι κατάφεραν να υπολογίσουν τις περιόδους των πλημμυρών των Νείλου για την σπορά και την συγκομιδή των σιτηρών τους (Ebison, 1993; Κορδαλής, 2019). Πάρα τα επιτεύγματα αυτά η ερμηνεία των αστρονομικών φαινομένων καθώς και των κινήσεων των ουράνιων σωμάτων βασιζόνταν στην φαντασία τους κυρίως, κάτι απολύτως εύλογο δεδομένου ότι αγνοούσαν την επιρροή της βαρύτητας.

## **1.2 Τα κοσμολογικά μοντέλα από φιλοσοφικές σχολές και ρεύματα πριν τον Αριστοτέλη**

Η ελληνική Επιστήμη δεν αναπτύχθηκε από το μηδέν, καθώς επηρεάστηκε από την κουλτούρα και τα προαναφερθέντα επιτεύγματα πολιτισμών της Ανατολής, κυρίως των Μεσοποτάμιων και των Αιγυπτίων και ιδιαίτερα στους τομείς των Μαθηματικών, της Αστρονομίας και της Ιατρικής. Η Κοσμολογία, όμως, και η Φυσική προέκυψαν από τις παραδόσεις, τους Μύθους και την Ποίηση του ελληνικού χώρου (Weinberg, 2016). Ο επιστημονικός και φιλοσοφικός λόγος ξεκίνησε στην Ιωνία τον 6ο αιώνα π.Χ. όπου για πρώτη φορά στην Ιστορία εισάγεται ο ορθολογισμός στην διαδικασία απόκτησης γνώσεων για τον φυσικό κόσμο.

Ήδη από τον 5ο αιώνα π.Χ. εμφανίζονται οι Προσωκρατικοί στοχαστές στις ιωνικές πόλεις της Μιλήτου και της Κολοφώνας στην Μικρά Ασία. Εκείνη την εποχή η αλφαβητική

γραφή διαδίδεται και ο γραπτός λόγος επικρατεί του προφορικού λόγου. Συνεπώς η ευκρίνεια, η τάξη και η εννοιολογική αυστηρότητα καταλαμβάνει την θέση της αμεσότητας και του συναισθήματος, που χαρακτηρίζουν τον δεύτερο. Οι Προσωκρατικοί ασχολήθηκαν με προβλήματα τεχνικής και πρακτικής φύσεως όσον αφορά τη μελέτη του φυσικού περιβάλλοντος, καθώς και με ερωτήματα σχετικά με τη θέση και τον προορισμό του ανθρώπου στο Σύμπαν (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000).

Η Ιωνική σκέψη προσπαθούσε από γενικές υποθέσεις να εξηγήσει ομάδες φαινομένων και πεδίων του φυσικού κόσμου δίνοντας έμφαση στη συλλογή δεδομένων και όχι σε θρησκευτικές και απόκρυφες αναλύσεις, Γενικότερα αναζητούνταν οι Αρχές, μέσω των οποίων μπορούσε να ερμηνευθεί μια φυσική μεταβολή και θα οδηγούσαν στην ανακάλυψη των αιτιών και της προέλευσης των πραγμάτων. Κύριοι εκφραστές της Προσωκρατικής περιόδου ήταν ο Θαλής, ο Αναξίμανδρος και ο Αναξίμανης που ανήκαν στην Σχολή της Μιλήτου, η οποία δεν ήταν εκπαιδευτικό ίδρυμα αλλά μορφή μαθητείας με κοινό πλαίσιο αντιλήψεων και μεθόδων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αυτοί αποκαλούνταν στοχαστές και όχι φιλόσοφοι καθώς η Φιλοσοφία αναπτύχθηκε αργότερα στις περιοχές της Νότιας Ιταλίας από τον Παρμενίδη και τον Πλάτωνα, οι οποίοι αντιπροσώπευαν έναν άλλο τρόπο σκέψης που θα αναλυθεί στην συνέχεια (Vegetti, 2000).

Ο Θαλής, ο Μιλήσιος, είχε καταγωγή από οικογένεια Φοινικικής προέλευσης και διακρίθηκε τον 6ο αιώνα π.Χ. ως πολιτικός σύμβουλος, επιλύοντας πρακτικά καθημερινά προβλήματα μηχανικών εφαρμογών, μέσω της χρήσης Μαθηματικών. Επίσης προέβλεπε εκλείψεις και μετεωρολογικά φαινόμενα και αποσκοπούσε στον έλεγχο της φύσης με γνωστικά και τεχνικά μέσα, μετατοπίζοντας το Θείο από το ναό στον φυσικό κόσμο. Επιπλέον είχε πάρα πολλούς οπαδούς, παρά το γεγονός ότι δεν ίδρυσε κάποια σχολή, ενώ πληροφορίες για τα έργα του σώζονται από τους μεταγενέστερους Ηρόδοτο, Πλάτωνα και Αριστοτέλη μέσα από την προφορική παράδοση.

Ο Θαλής πίστευε ότι η Γη είναι ένας επίπεδος κυκλικός δίσκος που πλέει πάνω στο νερό, το οποίο θεωρούσε ότι ήταν το βασικό συστατικό, η ζωοποιητική δύναμη και η απαρχή όλων των πραγμάτων στο Σύμπαν. Ακόμη ερμήνευσε τις κινήσεις των όντων μέσα από ζωικές λειτουργίες, που σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η Ψυχή. Σύγχρονοι ερευνητές θεωρούν ότι ο Θαλής δεν είχε την αστρονομική επάρκεια για να προβλέπει εκλείψεις και να κάνει προγνώσεις καιρού, αφού οι έννοιες της εκλειπτικής και του γεωγραφικού πλάτους δεν ήταν κατανοητές εκείνη την εποχή (Weinberg, 2016). Άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι είχε πρόσβαση σε τεχνικές που χρησιμοποιούσαν οι Βαβυλώνιοι (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000).

Ο Αναξίμανδρος (610-546 π.Χ.) ήταν ο πρώτος που διατύπωσε ένα μηχανιστικό μοντέλο για την περιγραφή και τη δημιουργία του Σύμπαντος ενοποιώντας εμπειρικό υλικό που είχε συσσωρεύσει με την επιστημονική διαίσθησή του, χωρίς να αναφέρεται σε κάποια θεϊκή παρέμβαση. Σύμφωνα με την θεωρία του η αρχή των Πάντων είναι το άπειρο, μια καθαρή απροσδιόριστη ουσία και ένας χώρος χωρίς όρια που μπορεί να προσπελαστεί από άκρη σε άκρη. Από αυτή την ουσία δημιουργήθηκαν τα βασικά στοιχεία του κόσμου, τα οποία είναι η Γη, το νερό, ο αέρας, η φωτιά και κατ' επέκταση τα αντικείμενα που παρατηρούνται στην καθημερινή ζωή. Στην συνέχεια αυτά φθείρονται μέσω του χρόνου και επιστρέφουν στην ίδια ουσία (άπειρο) από την οποία ξαναγεννιούνται.

Η Γη για τον Αναξίμανδρο σχηματίστηκε από την αλληλεπίδραση χώματος και λάσπης με τον Ήλιο, ενώ οι άνθρωποι εξελίχθηκαν από υδρόβια όντα που προσαρμόστηκαν στην ξηρά. Στο συμπαντικό του μοντέλο τοποθετεί τη Γη, με κυλινδρικό σχήμα, ακίνητη στο κέντρο ενός σφαιρικού Σύμπαντος, το οποίο χωρίζεται σε τρεις πύρινους, αόρατους δακτυλίους, που περιβάλλονται από ομίχλη. Στην ομίχλη αυτή υπάρχουν οπές, από τις οποίες διαφεύγει το φως και έτσι τα ουράνια σώματα γίνονται ορατά. Οι δακτύλιοι αντιστοιχούν σε έναν για τον Ήλιο, έναν για τη Σελήνη και έναν για τους απλανείς αστέρες. Με βάση τις παραπάνω πληροφορίες δεν φαίνεται να γίνεται διάκριση πλανητών και απλανών ενώ οι δεύτεροι φαίνεται να βρίσκονται πιο κοντά στη Γη από ότι ο Ήλιος και η Σελήνη (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; Vegetti, 2000).

Ο Αναξίμανδρος (585-525 π.Χ.) ήταν μαθητής του Αναξίμανδρου και ασχολήθηκε με την αστρονομία και την μετεωρολογία. Επηρεασμένος από το δάσκαλο του διατυπώνει και αυτός μια μηχανιστική εικόνα του σύμπαντος με την διαφορά ότι την θέση του απείρου καταλαμβάνει ο αέρας. Για τον Αναξίμανδρο ο αέρας είναι μια λεπτή, ποιοτικά απροσδιόριστη και άπειρη μάζα, που βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση και οι διαδικασίες πύκνωσης και αραιώσης της οδηγούν στην δημιουργία των ουσιών του φυσικού κόσμου. Στο δικό του μοντέλο του σύμπαντος η Γη είναι μια αβαθής σκάφη και οι αστέρες επίπεδοι δίσκοι αιωρούμενοι στον αέρα. Οι πλανήτες κατά την θεωρία του αποτελούνται από φωτιά ενώ έχουν στερεό πυρήνα, που δεν είναι άμεσα ορατός. Ενδιαφέρον στοιχείο είναι το γεγονός ότι δίνει στον Ήλιο κυρίαρχη και ρυθμιστική θέση αποδίδοντας σε αυτόν το φωτισμό της Σελήνης και την αιτία των γήινων μετεωρολογικών φαινομένων. Οι έννοιες της μεταβολής και της κίνησης θεωρούνται αυτονόητες γι' αυτόν και γίνονται αντιληπτές μέσω των ανθρώπινων αισθήσεων, αμφισβητώντας παράλληλα αν η γνώση που αντλείται από αυτές είναι αληθινή (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).



Ο Αναξαγόρας (500-480 π.Χ.) γεννήθηκε στις Κλαζομένες στην Μικρά Ασία και πραγματεύτηκε με τα Μαθηματικά, την Αστρονομία τη Βιολογία και την Ιατρική. Υπήρξε δάσκαλος και σύμβουλος του Περικλή ενώ επηρέασε μεγάλες προσωπικότητες της εποχής όπως ο Ιπποκράτης, ο Σωκράτης και ο Μέτωνας. Η κοσμολογική θεωρία του συνδυάζει στοιχεία του Αναξίμανδη και του Αναξίμανδρου καθώς αναφέρει ότι τα πάντα στο Σύμπαν ξεκίνησαν από μια αρχική κατάσταση απροσδιόριστη, που δεν υπήρχε κανένα πρωταρχικό υλικό. Στη συνέχεια αυτό διαμορφώθηκε με γραμμικό τρόπο σε κάτι προσδιορισμένο λόγω αλλαγής της ισορροπίας και των συνθηκών των στοιχείων αυτής της απροσδιόριστης κατάστασης. Η ατομικότητα οφείλεται σε ένα τρόπο οργάνωσης που έγινε από εξωτερική παρέμβαση και ένωσε όλα τα στοιχεία και αντικείμενα σύμφωνα με τις ίδιες αρχές. Τέλος υποστήριξε ότι ο Ήλιος αλλά και τα υπόλοιπα άστρα είναι κατασκευασμένα από πυρακτωμένο μέταλλο (Vegetti, 2000).

Η Φιλοσοφία ως όρος αποκτά υπόσταση στο ενδιάμεσο του 6ου και 5ου αιώνα π.Χ. μέσα από τα έργα και τις ιδέες του Πυθαγόρα, του Ηράκλειτου και του Παρμενίδη, οι οποίοι δημιούργησαν έναν ορθολογικό στοχασμό ανώτερο των προγενέστερων. Κύρια ιδέα ήταν ότι το Σύμπαν και οι μεταβολές της Φύσης διέπονται από νόμους που αποκαλύπτονται από το Θεό μέσω της φώτισης στους Σοφούς ενώ η αταξία που παρατηρείται είναι φαινομενική. Ο Σοφός έχει χρέος να εξηγήσει στους πολίτες ορθολογικά τις αποκαλύψεις αυτές με τρόπο κατανοητό. Επίσης ορίζονται οι τρεις μορφές ορθολογική σκέψης που είναι τα Μαθηματικά, η Λογική και η Διαλεκτική. Η γνώση που προκύπτει με αυτό τον τρόπο είναι καθαρή και απαλλαγμένη από αυτή των αισθήσεων και των χειρωνακτικών εφαρμογών, στην οποία βασίστηκαν οι στοχαστές στο παρελθόν. Η νέα αυτή σκέψη βασίζεται σε ζεύγη αντιθετικών εννοιών όπως πραγματικότητα-φαινομενικότητα, ψυχή-σώμα, είναι-γίγνεσθαι, λόγος-αίσθηση και ένας(σοφοί)-πολλοί(αδαείς). Έτσι η Φιλοσοφία διαχωρίζεται από την κοινή γνώση λόγω του αποκαλυπτικού χαρακτήρα της και της μεθόδου που χρησιμοποιεί και ερμηνεύεται ως η ύψιστη αλήθεια, που σκοπός της είναι όχι η απλή συσσώρευση γνώσης αλλά η σωτηρία της ψυχής και η εγγύηση της Κοσμικής τάξης (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Ένας από τους πρώτους Έλληνες Φιλοσόφους ήταν ο Πυθαγόρας, που γεννήθηκε το 570 π.Χ. στη Σάμο. Σύμφωνα με τις πηγές ήταν γιος χαρακτή νομισμάτων και έγινε τύραννος της Σάμου μαχόμενος τους αριστοκράτες και τους γαιοκτήμονες πριν μεταβεί στον Κρότωνα το 530 π.Χ. Επίσης ίδρυσε μια μυστική αδελφότητα όπου οι γνώσεις μεταδίδονταν σε κλειστό κύκλο και δεν γνωστοποιούνταν εκτός αυτού. Ο Πυθαγόρας ασχολήθηκε με την

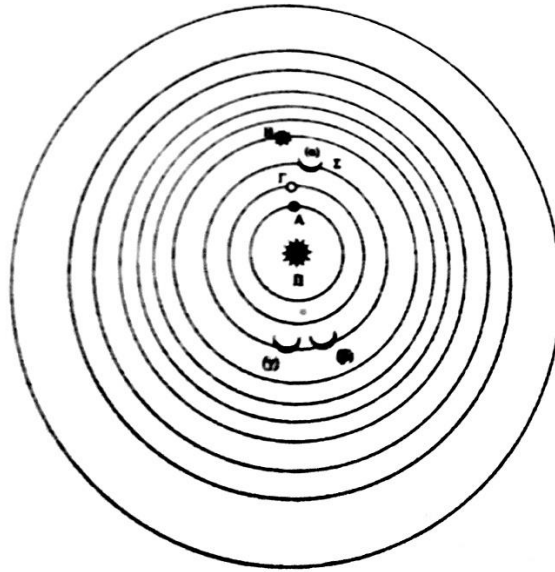
αστρονομία, την αριθμολογία, την μουσική και την κοσμολογία και η σχολή του επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τη Μεγάλη Ελλάδα (Vegetti, 2000).

Οι πυθαγόρειοι έδιναν μεγάλη σημασία στην έννοια του αριθμού και κατ' επέκταση στα Μαθηματικά ως ύψιστη έκφραση του πέρατος. Ακόμη δέχθηκαν επιρροές από τη Βαβυλωνιακή αστρονομία σύμφωνα με την οποία τα άστρα διέπονται από κανονικές και αμετάβλητες κινήσεις ως ένδειξη της θεϊκής τελειότητας στη Φύση. Οι κινήσεις αυτές μπορούσαν να εκφραστούν μέσω μαθηματικών σταθερών. Επιπροσθέτως η μουσική αρμονία, κατά τους Πυθαγόρειους, ήταν άμεσα συνυφασμένη με την αριθμητική, αφού υπήρχαν σταθερές σχέσεις του μήκους των χορδών διαφόρων οργάνων με τις βασικές συγχορδίες. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι Πυθαγόρειοι συνέδεσαν την μουσική αρμονία με την αρμονία που υπάρχει στα σχήματα και τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων.

Ο αριθμός επίσης ήταν συνδεδεμένος με τον χώρο και τη Γεωμετρία, αφού από την μονάδα-τελεία προκύπτει η γραμμή, στην συνέχεια ο συνδυασμός γραμμών σχηματίζει τη επιφάνεια και η επιφάνεια τον όγκο-στερεό. Τέλος ο χρόνος για τους Πυθαγόρειους ρέει κυκλικά και παρομοιάζεται με την κίνηση των άστρων γύρω από το κέντρο του σύμπαντος. Ο κύκλος του χρόνου σημαίνει γι' αυτούς τέλος μιας εποχής, που στην συνέχεια επαναλαμβάνεται πανομοιότυπα επ' άπειρον. Η αλλαγή λοιπόν ερμηνεύεται ως η αιώνια επανάληψη μιας πανομοιότυπης ιστορίας όπου ο αριθμός εκφράζει το μήκος χρόνου στην χωρική δομή του (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; Modinos, 2014; Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Ο Φιλόλαος ήταν ένας πυθαγόρειος που έζησε στον Κρότωνα και ασχολήθηκε με την αστρονομία και τα Μαθηματικά. Βασικό μέρος της θεωρίας του ήταν ότι κεντρική θέση στο Σύμπαν δεν κατέχει η Γη αλλά το κεντρικό Πυρ που ονόμασε Εστία. Γύρω από αυτήν περιφέρονται διαγράφοντας κυκλική τροχιά η Γη, οι αστέρες τόσο οι πλανήτες όσο και οι απλανείς. Στα ουράνια σώματα επίσης περιλαμβάνεται και ο Αντίχθων, ένας πλανήτης ανάμεσα από τη Γη και το Πυρ. Σύμφωνα με το μοντέλο του Φιλόλαου γύρω από το Πυρ περιφέρονται κατά σειρά ο Αντίχθων, η Γη, η Σελήνη, ακολουθούν οι πέντε γνωστοί πλανήτες της εποχής (Ερμής, Αφροδίτη, Άρης, Δίας, Κρόνος) και στο τέλος η εξωτερική σφαίρα του σύμπαντος φέρει τους απλανείς αστέρες (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι το μοντέλο του Φιλόλαου δεν είναι ούτε γεωκεντρικό, ούτε ηλιοκεντρικό όπως επίσης και το γεγονός ότι αναφέρει ότι το σχήμα της Γης είναι σφαιρικό και περιφέρεται γύρω από το Πυρ σε 24 ώρες. Οι παρατηρητές στη Γη δεν μπορούν να δουν ούτε το Πυρ, ούτε τον Αντιχθωνα, γιατί η γη βρίσκεται στο ημισφαίριο που βλέπει αντίθετα από την κατεύθυνση του Αντίχθωνα.



*Εικόνα 1.1 Το πλανητικό μοντέλο του Φιλόλαου. Στο κέντρο βρίσκεται το Πυρ, στο σημείο Γ η Γη, στο Α ο Αντίχθονας και στο σημείο Σ η Σελήνη (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).*

Ο Ηράκλειτος γεννήθηκε στην Έφεσο το 540 π.Χ. από αριστοκρατική οικογένεια και θεωρείται ένας από τους πιο δυσνόητους φιλοσόφους λόγω της αινιγματικότητας και της πολυπλοκότητας της γλώσσας που χρησιμοποιεί. Σύμφωνα με την θεωρία του το σταθερό χαρακτηριστικό του κόσμου είναι ότι ο ίδιος βρίσκεται σε συνεχή κίνηση, μια κίνηση που έχει περιοδικό ρυθμό, μέτρο και αναλογίες. Επίσης ο κόσμος κυριαρχείται από αντιθετικές δυνάμεις που βρίσκονται σε σύγκρουση αλλά και σε ισορροπία και από αυτό δεν εξαιρούνται και τα στοιχεία της φύσης με τις συνεχείς μετατροπές τους.

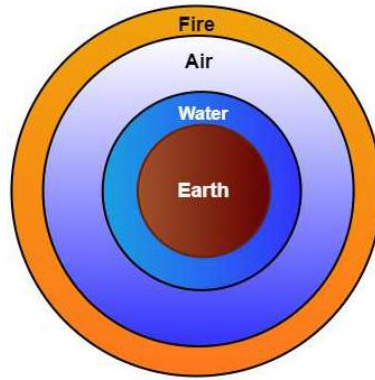
Σύμφωνα με τον Ηράκλειτο ο κόσμος δεν έχει αρχή ούτε τέλος και η ανοδική κίνηση των στοιχείων είναι κατά σειρά γη-θάλασσα-πυρ ενώ αντίστοιχα η καθοδική πυρ-θάλασσα-γη. Επειδή όμως η πορεία του γίνεσθαι είναι κυκλική οι δυο κινήσεις(ανοδική και καθοδική) αποτελούν μια. Εδώ ο Ηράκλειτος φαίνεται να κάνει μια διάκριση των στοιχείων και των κινήσεων τους με βάση την πυκνότητα τους δεδομένης της βαρύτητας του καθενός. Επίσης άξιο λόγου είναι το γεγονός ότι αναγνώριζε την ψευδαίσθηση του χώρου και του χρόνου αλλά και των ανθρώπινων αισθήσεων (Τριανταφυλλόπουλος, 1999; Vegetti, 2000).

Ο Παρμενίδης(515-440 π.Χ.) γεννήθηκε και μεγάλωσε στην Ελαία της Μεγάλης Ελλάδας, όπου αναπτύχθηκε ένα φιλοσοφικό ρεύμα, κίνητρα του οποίου ήταν η συστηματική κριτική της πίστης στην ύπαρξη του υλικού κόσμου. Αποσπάσματα της θεωρίας του, που σώζονται από τον Σιμπλίκιο, αναφέρουν ότι ο κόσμος είναι φτιαγμένος από το 'μη ον' και είναι προϊόν της πλάνης των αισθήσεων. Επίσης ο κόσμος είναι συγκροτημένος από τις δυο αντιθετικές αρχές φως-φωτιά και σκοτάδι-γη, ενώ η μεταβολή και κάθε μορφή της είναι

λογικά αδύνατη, αφού θα αποτελούσε μεταβολή από το 'μη είναι' στο 'είναι'. Έμμεσα εδώ ο Παρμενίδης αρνείται την πραγματική υπόσταση του χρόνου, της πολλαπλότητας, του χώρου, της φθοράς και της κίνησης, αφού δεν μπορούν να αποδειχθούν, δίνοντας παράλληλα σημασία στην λογική και όχι στα εμπειρικά δεδομένα (Τριανταφυλλόπουλος, 1999; Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Ένας άλλος ελεατικός φιλόσοφος ο Ζήνωνας(440-415 π.Χ.), μαθητής του Παρμενίδη, υποστήριξε τις θέσεις του δασκάλου του που κατηγορούνταν ότι είναι αντίθετες με τα εμπειρικά δεδομένα. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της εις άτοπου απαγωγής διατυπώνει ότι κίνηση και πολλαπλότητα δεν μπορούν να συνυπάρχουν, αφού η δεύτερη θεωρεί αναγκαία την πρώτη. Έτσι έμεινε γνωστός για τα περίφημα παράδοξα, που τα πιο γνωστά είναι «του Αχιλλέα και της χελώνας», «της διχοτομίας», «του βέλους» και «του σταδίου». Στα δυο πρώτα καταδεικνύει την αντίφαση της κίνησης αν ο χώρος και ο χρόνος είναι απείρως διαίρετα μεγέθη. Στα άλλα δυο καταδεικνύει την αντίφαση της κίνησης αν ο χώρος και ο χρόνος υποθεθεί ότι αποτελούνται από αδιαίρετα μέρη. Στο ίδιο μήκος κύματος κινήθηκε και ο Μέλισσος, υποστηρικτής του Παρμενίδη, λέγοντας ότι το 'όν' νοείται ως μια πραγματικότητα που εκτείνεται στον χώρο και στον χρόνο ως άπειρο του παρελθόντος και του μέλλοντος και άρα θα υπάρχει για πάντα. Μεταγενέστερα η ελεατική σχολή έπαψε να υπάρχει ως αυτόνομο ρεύμα αλλά επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τη σκέψη του Πλάτωνα (Boccalletti, 2016; Modinos, 2014).

Ο Εμπεδοκλής, ο Ακραγαντινός(454-444 π.Χ.) γεννήθηκε στον Ακράγαντα της Σικελίας, υπήρξε φυσικός φιλόσοφος, γιατρός και πολιτικός και διατύπωσε την θεωρία των τεσσάρων ριζωμάτων, που επηρέασε αργότερα την σκέψη του Αριστοτέλη, ο οποίος την προσάρμοσε και κράτησε μέχρι την περίοδο της Αναγέννησης. Τα ριζώματα αυτά είναι η γη, το νερό, ο αέρας και η φωτιά και θεωρούνται αδημιούργητα, ισοδύναμα και αιώνια. Από αυτά τα ριζώματα προέρχονται όλα τα φυσικά δημιουργήματα συνδυαστικά με τις δυο δυνάμεις της «φιλότητας» και του «νείκους» (Vegetti, 2000).



*Εικόνα 1.2 Το Συμπαντικό μοντέλο του Αριστοτέλη βασισμένο στα ριζώματα του Εμπεδοκλή (Anjum & Mishra, 2020).*

Όταν τα ριζώματα διαπεράσουν από την πρώτη δύναμη συνιστούν την ενότητα ενώ αν διαπεράσουν από το «νείκος» διαχωρίζονται συνιστώντας την πολλαπλότητα. Με αυτό τον τρόπο η δημιουργία του σύμπαντος κατά τον Εμπεδοκλή ερμηνεύεται ως εξής: στην αρχή όλα τα στοιχεία ήταν στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους και ο κόσμος απαρτιζόταν από μια ομοιογενή σφαίρα, μέχρι που η δύναμη του «νείκους» οδήγησε στον κατακερματισμό της αρμονικής τάξης. Στην συνέχεια επέδρασε και πάλι η δύναμη της «φιλότητας» και αυτά τα στοιχεία ενοποιούνται και παράγουν σύνθετα όντα (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Ο κύκλος των Προσωκρατικών φιλοσόφων κλείνει με τους ατομικούς φιλοσόφους, κύριοι εκπρόσωποι των οποίων είναι ο Λεύκιππος και ο Δημόκριτος. Ο Λεύκιππος (480-400 π.Χ.) ήταν μαθητής του Ζήνωνα και δημιουργός της ατομικής αντίληψης της ύλης, επηρεαζόμενος από τον σκεπτικισμό για την επ' άπειρο τομή των φυσικών μεγεθών που είχε εκφράσει ο δάσκαλός του. Ο ίδιος θεωρούσε ότι η ύλη, σε αντίθεση με τα μαθηματικά μεγέθη, δεν διαιρείται συνεχώς αλλά αποτελείται από μικρά, αμετάβλητα και άπειρα σε πλήθος τεμάχια, τα άτομα. Η κίνηση των ατόμων δημιουργεί τα διάφορα αντικείμενα και προϋποθέτει την ύπαρξη του κενού ('μη ον'). Τα άτομα μεταξύ τους διαφέρουν κατά σχήμα, τάξη και μέγεθος και από την ένωση τους προκύπτει η γέννηση των αντικειμένων ενώ από τον διαχωρισμό τους η φθορά. Σύμφωνα με τον Λεύκιππο το κενό είναι γεμάτο από άτομα και όταν η ύλη αποσυντίθεται επιστρέφουν σε αυτό (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000; Varvoglis, 2014).

Ο Δημόκριτος γεννήθηκε στα Άβδηρα το 470 π.Χ., ήταν γόνος πλούσιας οικογένειας, γεγονός που του επέτρεψε να κάνει πολλά ταξίδια και να έχει πλουραλισμό αναπαραστάσεων και γνώσεων. Επέκτεινε την θεωρία του δασκάλου του, Λεύκιππου προσθέτοντας δυο ακόμα χαρακτηριστικά στα άτομα, τη διαφορά μεγέθους και την προέλευση της κίνησης

τους, η οποία ήταν η ορμή κάποιας κρούσης. Επίσης διατύπωσε ότι τα ουράνια σώματα δημιουργήθηκαν από στροβιλισμούς των ατόμων εξαιτίας του μεγάλου κενού που αυτά τείνουν να καταλάβουν. Οι περιστροφικές αυτές κινήσεις είχαν ως αποτέλεσμα τα βαρύτερα άτομα να συγκεντρώνονται στο κέντρο των σωμάτων και τα ελαφρύτερα στην περιφέρεια (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Ακόμη, κατά την διαδικασία αυτή συνέβαιναν συγκρούσεις ατόμων βάσει των σχημάτων τους και έτσι φτιάχτηκαν κατά σειρά η γη, το νερό, ο αέρας και η φωτιά. Η τυχαιότητα στις ατομικές συγκρούσεις είναι υπεύθυνη για τη διάλυση και την επανένωση τους, ενώ ο χρόνος είναι μια άπειρη ευθεία και πορεία κινήσεων, συνθέσεων και αποσυνθέσεων των ατόμων στο κενό. Η υπόθεση του Δημόκριτου για το άπειρο κενό και τον άπειρο αριθμό ατόμων επέτρεπε τη ύπαρξη άπειρων κόσμων που διαμορφώνονται και εξαφανίζονται μέσα από το κενό. Τέλος προσπάθησε να ενοποιήσει την ατομική θεωρία και με άλλες Επιστήμες και ως ένα βαθμό τα κατάφερε ειδικά με την Γεωμετρία και τη Βιολογία (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; Weinberg, 2016).

Με τον Δημόκριτο τελειώνει η προσωκρατική περίοδος της ελληνικής Επιστήμης και δίνει τη θέση της στον Σωκράτη και τους σοφιστές που φέρνουν στο προσκήνιο ανθρωπιστικής και κοινωνικής φύσεως ζητήματα. Επιπλέον κατά το δεύτερο μισό του 5ου αιώνα π.Χ. έγιναν ορισμένες αλλαγές που επηρέασαν την ανάπτυξη της ελληνικής επιστήμης. Αρχικά η Αθήνα μετατρέπεται σε μεγάλο κέντρο πνευματικής ζωής με αποτέλεσμα φιλόσοφοι και στοχαστές της εποχής να περνούν μεγάλο μέρος της ζωής τους εκεί. Αυτό είχε ως συνέπεια τη δημιουργία δυο μεγάλων σχολών, την Ακαδημία που ιδρύθηκε από τον Πλάτωνα μεταξύ 385-370 π.Χ. και το Λύκειο, που ιδρύθηκε από τον Αριστοτέλη μετά το 335 π.Χ.

Επίσης λόγω του Σωκράτη και των Σοφιστών παρατηρείται μια γενικότερη μετατόπιση του ενδιαφέροντος από τα κοσμολογικά-φυσικά προβλήματα στα πολιτικά-ηθικά με επίκεντρο τον 'άνθρωπο' και όχι τον φυσικό κόσμο. Άξιο αναφοράς είναι επίσης το γεγονός ότι η Φιλοσοφία και η Γεωμετρία εντάσσονται στα βασικά μαθήματα της τότε εκπαίδευσης συμβάλλοντας στο πέρασμα από τις ποιοτικές κοσμολογικές ερμηνείες στις θεωρητικές και γεωμετρικές περιγραφές των ουράνιων σωμάτων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η Αστρονομία να περάσει σταδιακά από την εμπειρική περιγραφή των προσωκρατικών στην μαθηματική περιγραφή με σκοπό την εξαγωγή ποσοτικών στοιχείων για τη θέση και τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων προς την κατανόηση του υλικού σύμπαντος (Vegetti, 2000).

Ο Πλάτωνας γεννήθηκε το 428 π.Χ. στην Αθήνα καταγόμενος από μεγάλη αριστοκρατική οικογένεια και βρισκόμενος στο κέντρο της πολιτικής και κοινωνικής ζωής της πόλης. Η σκέψη του Πλάτωνα στηρίχθηκε στον ορθό λόγο και επηρεάστηκε αφενός από τη

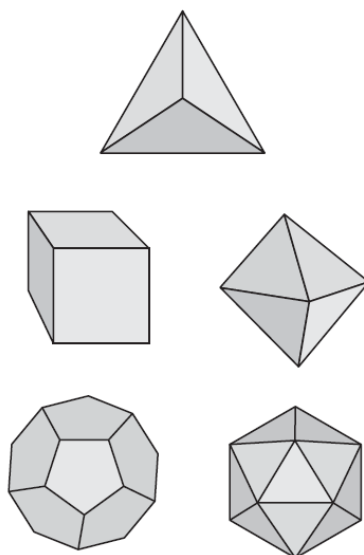
διδασκαλία του Σωκράτη και τις ιδέες του Σόλωνα και αφετέρου από τα εκπαιδευτικά βιώματα του, προερχόμενα από τον υπέρμαχο της Ολιγαρχίας, Κριτία. Το 387 π.Χ. ίδρυσε την Ακαδημία, ένα εκπαιδευτικό ίδρυμα, το οποίο αποτέλεσε σημείο αναφοράς όχι μόνο για τους φιλοσόφους αλλά και για τους μαθηματικούς και αστρονόμους και όραμα του οποίου ήταν η ενοποίηση εξουσίας, γνώσης, επιστήμης, ηθικής και πολιτικής (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Η αλήθεια για τον Πλάτωνα ήταν μια καθαρή θεωρία αστρονομικού και λογικο-μαθηματικού περιεχομένου απαλλαγμένη από την εμπειρική γνώση της Ιωνικής σκέψης. Κύριο μέλημα του Φιλοσόφου ήταν να την κάνει προσιτή και πειστική στον κόσμο μέσα από τη διαλεκτική, την έρευνα δηλαδή που είχε ως σκοπό την γεφύρωση των αντιθέτων. Εισάγει, έτσι την θεωρία των ιδεών, που αποτελεί την ανώτερη μορφή γνώσης συνδέοντάς την με το 'είναι' του Παρμενίδη και διαχωρίζοντας την από την Δόξα, που εκφράζει το εμπειρικό. Σε αυτό το πλαίσιο τα Μαθηματικά αποτελούν υψηλό θεωρητικό επίπεδο επιστημονικής γνώσης με οικουμενική ισχύ σε αντίθεση με την αισθητηριακή εμπειρία που είναι μεταβαλλόμενη στον χρόνο και ενέχει στοιχεία υποκειμενικότητας (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Η κοσμολογία του Πλάτωνα αναπτύσσεται στο έργο του «Τίμαιος» και «Νόμοι» στα οποία εκφράζει τις δυο αρχές που διέπουν τον κόσμο, δηλαδή τις ιδέες και την άμορφη ύλη. Οι πρώτες διέπονται από την αιωνιότητα, την τελειότητα και χρησιμοποιούνται ως πρότυπο από το Δημιουργό του Σύμπαντος για να διαπλάσει την ύλη. Για τον Πλάτωνα η επιστημονική γνώση είναι μαθηματική με δομή που ξεκινά από το απλό στο σύνθετο. Επίσης θεμελιώδης επιστήμη είναι η θεωρία των αριθμών, που με την προσθήκη της έκτασης δημιουργούνται οι επιφάνειες, αντικείμενο μελέτης της επίπεδης Γεωμετρίας, και προσθέτοντας μια διάσταση ακόμη δημιουργούνται τα στερεά, αντικείμενο μελέτης της Στερεομετρίας. Εν συνεχεία τα στερεά σε κίνηση δίνουν τις ιδέες των άστρων και των εμπειρικών αντικειμένων, τα οποία αποτελούν αντικείμενο μελέτης της Αστρονομίας, ενώ η κίνηση τους ρυθμίζεται μέσα από μαθηματικές σχέσεις και συμφωνίες παράγοντας αρμονίες και 'ήχους' που δεν σχετίζονται με αυτούς που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος (Boccalletti, 2016; T.Cushing, 2003).

Όσον αφορά τη σύσταση της ύλης ο Πλάτωνας στον «Τίμαιο» υποστηρίζει ότι η ύλη αποτελείται από τα τέσσερα ριζώματα του Εμπεδοκλή(αέρας, νερό, γη, φωτιά) και καθένα από αυτά αντιστοιχεί σε κάποιο κανονικό γεωμετρικό στερεό. Έτσι ορίζει το εικοσάεδρο για το νερό, το τετράεδρο για τη φωτιά, το οκτάεδρο για τον αέρα και τον κύβο για την γη. Επίσης αναφέρει και ένα πέμπτο στερεό το κανονικό δωδεκάεδρο αλλά δεν το ταυ-

τίζει με κανένα στοιχείο. Τα τέσσερα ριζώματα στη συνέχεια αποτελούνται από πιο θεμελιώδεις οντότητες που έχουν σχήμα που αντιστοιχεί στο ορθογώνιο ισοσκελές τρίγωνο και στο ήμισυ του ισόπλευρου τριγώνου. Αυτά τα στερεά ανάγονται σε επιφάνειες και κατόπιν σε στοιχειώδεις αριθμητικούς τύπους, τους οποίους οφείλει η Φυσική και η Βιολογία να μελετήσει με αριθμητικές και γεωμετρικές μεθόδους (Weinberg, 2016).



*Εικόνα 1.3 Τα Πέντε κανονικά στερεά του Πλάτωνα (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).*

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο κόσμος για τον Πλάτωνα είναι μια μεγάλη μαθηματική μηχανή που δεν λειτουργεί τυχαία αλλά συνεχώς τείνει προς το καλύτερο, το αγαθό όπως ονομάζει, μέσω της βούλησης του Δημιουργού που την επινόησε. Αυτό το αγαθό έχει τη δική του υπόσταση στη θεωρία του Πλάτωνα και είναι ο κόσμος των άστρων. Οι κινήσεις των άστρων θεωρούνται αιώνιες, αμετάβλητες και οι τροχιές τους τέλειες σε αντίθεση με τις κινήσεις της ύλης και των γήινων αντικειμένων. Με αυτό τον τρόπο η Αστρονομία ανάγεται σε ύψιστη επιστήμη που μπορεί να δώσει ακριβή περιγραφή των φυσικών μεγεθών των αστερών και της φύσης τους. Οι πλατωνικές αστρονομικές απόψεις κάνουν διάκριση δυο κινήσεων σχετικά με τα ουράνια σώματα. Η μια είναι η ημερήσια κίνηση της ουράνιας σφαίρας των πλανητών και των απλανών αστερών από την ανατολή προς τη δύση και η άλλη είναι η ιδιοκίνηση των πλανητών επί της τροχιά τους με κατεύθυνση από τη δύση προς την ανατολή (Boccalletti, 2016; Galili, Bar, & Brosh, 2016).

Μετά τον θάνατο του Πλάτωνα η Ακαδημία εξελίχθηκε από τους μαθητές του, οι οποίοι προσπάθησαν να της δώσουν μια συστηματική και οργανωμένη μορφή προσπαθώντας με την εισαγωγή νέων ιδεών, να παραμείνουν πιστοί στις βασική μορφή της Πλατωνικής σκέψης.



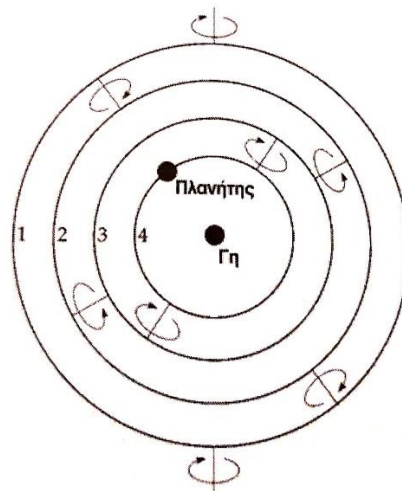
Ο Ηρακλείδης ο ποντικός, από την Ηράκλεια του Πόντου υπήρξε μαθητής του Πλάτωνα και απόφοιτος της σχολής της Ακαδημίας ενώ αργότερα ίδρυσε και τη δική του σχολή. Ανάμεσα στις πρωτότυπες για την εποχή διατυπώσεις του ήταν η ημερήσια περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της καθώς και η υπόθεση ότι ο Ερμής και η Αφροδίτη περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο (Vegetti, 2000).

Μια άλλη σημαντική προσωπικότητα της εποχής ήταν ο Εύδοξος ο Κνίδιος, ο οποίος γεννήθηκε στην Κνίδα τον 4ο αιώνα π.Χ. και ήρθε σε επαφή με την παρατηρησιακή αστρονομία λόγω των συχνών ταξιδιών του στην Αίγυπτο διατηρώντας παράλληλα επιστημονική συνεργασία με τον Πλάτωνα και τους μαθητές του. Επίσης ασχολήθηκε με την αστρονομία, τη γεωγραφία, τα μαθηματικά και την γεωμετρία (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Ένα μεγάλο ερώτημα που τον απασχόλησε σε συζητήσεις με τους πλατωνικούς ήταν γιατί οι πλανήτες, ενώ θεωρείται ότι εκτελούν κυκλική περιστροφική κίνηση γύρω από τη Γη, φαίνεται να μεταβάλλουν σημαντικά τη γωνιακή τους ταχύτητα. Οποιαδήποτε λογική απάντηση σε αυτό το ερώτημα δύσκολα ευσταθεί σε ένα μοντέλο γεωκεντρικού συστήματος. Για τον Πλάτωνα η ομαλή κυκλική κίνηση των πλανητών θεωρούνταν μια κίνηση κανονικότητας του τέλει κόσμου των άστρων. Αν καταρρίπτονταν η ιδέα της σταθερής ταχύτητας θα άφηνε ανεξήγητες αυτές τις μεταβολές γνωστές και ως αναδρομήσεις με αποτέλεσμα ο Ουρανός να υπάγεται στην αταξία και να μην αποτελεί πλέον τη περιοχή του Θείου. Έτσι ο Πλάτωνας έθεσε στον Εύδοξο το ερώτημα σχετικά με το ποιες ομοιόμορφες κινήσεις πρέπει να υποτεθούν, ώστε να 'σώζονται τα φαινόμενα' αναφορικά με τις κινήσεις των πλανητών. Αυτή η αντίληψη που εκφράζεται σε αυτό το ερώτημα είχε ως στόχο την διάσωση του πλατωνικού κοσμοειδώλου, ενώ θα διατηρηθεί για πολλά χρόνια μέχρι την εποχή της διατύπωσης των νόμων του Κέπλερ και της απόδειξης τους από τον Νεύτωνα (Grego & Mannion, 2010; Weinberg, 2016).

Ο Εύδοξος δημιούργησε με αυτή την προτροπή του Πλάτωνα ένα γεωκεντρικό μοντέλο γνωστό ως μοντέλο των «ομόκεντρων σφαιρών» που όχι μόνο περιγράφει την κίνηση των πλανητών αλλά επιτρέπει και την πρόγνωση των μελλοντικών τους θέσεων. Σύμφωνα με τις αρχές του μοντέλου αυτού οι πλανήτες, ο Ήλιος, η Σελήνη και οι απλανείς αστέρες κινούνται σε τέλειες κυκλικές τροχιές με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και κέντρο των τροχιών αυτών αποτελεί η ακίνητη Γη. Οι ανωμαλίες της φαινόμενης κίνησης των πλανητών εξηγούνται στο έργο του «Περί ταχών», περιγράφοντας ότι η σφαιρική Γη βρίσκεται ακίνητη στο κέντρο ενός συστήματος 27 ομόκεντρων σφαιρών που περιφέρονται ομαλά γύρω από αυτό. Η εξωτερική σφαίρα φέρει τους απλανείς αστέρες ενώ οι υπόλοιπες περιγράφουν

την κίνηση του Ήλιου, της Σελήνης και των πέντε γνωστών πλανητών. Για κάθε πλανήτη χρειάζονται 4 σφαίρες ενώ για τον ήλιο και τη Σελήνη 3 σφαίρες. Επειδή, όμως η κυκλική κίνηση για κάθε πλανήτη δεν συμφωνούσε με τις παρατηρήσεις, υπέθεσε ότι οι πόλοι του άξονα περιστροφής της εσωτερικής σφαίρας είναι σταθερά προσαρμοσμένοι στην εσωτερική επιφάνεια μιας περιβάλλουσας σφαίρας, η οποία πραγματοποιεί ομαλή κυκλική κίνηση με αντίθετη φορά και γύρω από τον δικό της άξονα περιστροφής που δεν συμπίπτει με τον άξονα της τέταρτης σφαίρας. Με αυτό τον τρόπο ο πλανήτης δεν εκτελεί μόνο την κίνηση της τέταρτης σφαίρας αλλά συμβάλλει και στην κίνηση της τρίτης, καθώς αυτή συμπαρασύρει στην περιστροφή της και τον άξονα της εσωτερικής σφαίρας. Ο πλανήτης τελικά διαγράφει μια κλειστή καμπύλη που μοιάζει με οριζόντιο οκτώ και ονομάζεται ιπποπέδη (Grego & Mannion, 2010; Τριανταφυλλόπουλος, 1999; Weinberg, 2016).

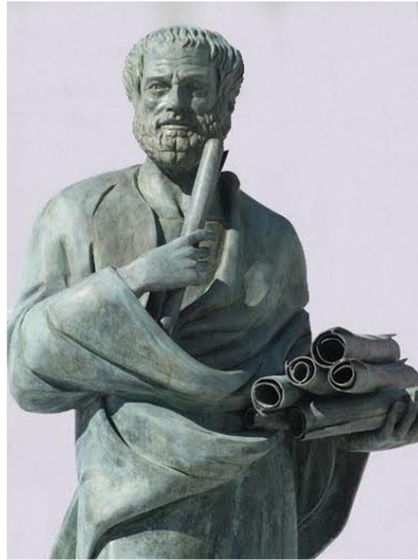


*Εικόνα 1.4 Το μοντέλο του Εύδοξου (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).*

Το μοντέλο των ομόκεντρων σφαιρών του Εύδοξου θεωρούνταν επιτυχημένο για τα δεδομένα της εποχής καθώς συμφωνούσε με τις περισσότερες παρατηρήσεις και εξηγούσε πολύ καλά την φαινόμενη τροχιά του Δία και του Κρόνου. Βέβαια δεν ίσχυε το ίδιο για αυτή του Ερμή και του Άρη. Επίσης αδυνατούσε να εξηγήσει την ανισότητα των εποχών που είχε υπολογιστεί πιο παλιά από τον Μέτωνα και τον Ευκλήμονα με μεγάλη ακρίβεια. Τέλος δυο ακόμη μειονεκτήματα ήταν ότι δεν εξηγούσε την μεταβολή της φαινόμενης διαμέτρου της Σελήνης και τις αλλαγές της λαμπρότητας των πλανητών, γεγονός που είναι λογικό αφού στο μοντέλο του Εύδοξου η απόσταση κάθε πλανήτη από τη Γη είναι σταθερή λόγω των ομόκεντρων σφαιρών (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

## 1.3 Η θεωρία του Αριστοτέλη

### 1.3.1 Σύντομη βιογραφία



*Εικόνα 1.5 Το άγαλμα του Αριστοτέλη στο ομώνυμο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Varvoglis, 2014).*

Ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.) γεννήθηκε στα Στάγειρα, μια μικρή πόλη της Χαλκιδικής, όπου ο πατέρας του Νικόμαχος ήταν γιατρός του βασιλιά της Μακεδονίας Αμύντα Γ', ο οποίος με την σειρά του ήταν πατέρας του Φιλίππου και παππούς του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Το 367 π.Χ., στα 15 του χρόνια, ο Αριστοτέλης έγινε μέλος της πλατωνικής Ακαδημίας στέφοντας το ενδιαφέρον του όχι τόσο στην πολιτική δραστηριότητα της σχολής αλλά στην επιστημονική έρευνα. Το ενδιαφέρον του για την μάθηση, η κλίση του στα Μαθηματικά και την Λογική καθώς και η ανεξάρτητη προσωπικότητά του, τον έκαναν πρωταγωνιστή στις σημαντικότερες συζητήσεις στη σχολή.

Στην 2η δεκαετία της παραμονής του στη σχολή έγραψε πολλά σημαντικά επιστημονικά έργα μεταξύ των οποίων ήταν και τα «Φυσικά», στα οποία εκθέτει την κοσμοθεωρία του και μελετά τις κινήσεις των σωμάτων. Μετά τον θάνατο του Πλάτωνα ο Αριστοτέλης δέχτηκε πρόσκληση από τον Φίλιππο, ώστε να αναλάβει την διαπαιδαγώγηση του γιού του και μελλοντικού διαδόχου του μακεδονικού θρόνου, Αλέξανδρου. Έτσι ο Αριστοτέλης έμεινε κάποια χρόνια στη Μακεδονία διδάσκοντας τον Αλέξανδρο ρητορική και λογοτεχνία κυρίως, γεγονός που είχε μεγάλη επίδραση στο πνεύμα του νεαρού βασιλιά. Το 338 π.Χ. η

νίκη του Φιλίππου στην μάχη της Χαιρώνειας οδήγησε στην οριστική επικράτηση των Μακεδόνων στον ελληνικό χώρο και δυο χρόνια αργότερα ο Αλέξανδρος διαδέχτηκε τον πατέρα του στον θρόνο (T.Cushing, 2003; Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Ο Αριστοτέλης επιστρέφει ασφαλής πλέον στην Αθήνα, λόγω της προστασίας του από τον βασιλιά και ιδρύει την δική του σχολή το γνωστό Λύκειο που ήταν ανοιχτό στην διδασκαλία φιλοσόφων. Η σχολή αυτή ήταν επίσης γνωστή με την ονομασία περιπατητική σχολή εξαιτίας των συζητήσεων των μελών της περπατώντας στους κήπους του Λυκείου. Το Λύκειο του Αριστοτέλη διέφερε από την πλατωνική Ακαδημία καθώς δεν διακρίνονταν για την αυστηρότητα και τους θρησκευτικούς, πολιτικούς και κοσμοθεωρητικούς κανόνες μεταξύ των μελών του. Αντιθέτως στο Λύκειο οι έρευνες γινόταν με ελεύθερη διαλεκτική συζήτηση μεταξύ μεγάλου αριθμού σπουδαστών υπό την καθοδήγηση του Αριστοτέλη. Κατά την περίοδο αυτή ο Αριστοτέλης συνέταξε τα σπουδαιότερα φιλοσοφικά, ψυχολογικά και βιολογικά έργα του, η οποία όμως διακόπηκε λόγω μιας πολιτικής εξέγερσης συνδυαστικά με τον θάνατο του Μ. Αλεξάνδρου το 323 π.Χ. Ο αντιπαθής πλέον Αριστοτέλης στον δήμο εξαιτίας των δεσμών του με τους Μακεδόνες φεύγει για το σπίτι της μητέρας του στην Χαλκίδα της Εύβοιας, όπου περνάει τους τελευταίους μήνες της ζωής του μόνος, μέχρι το θάνατο το 322 π.Χ. και παραδίδοντας τη διεύθυνση του Λυκείου στον Θεόφραστο (Vegetti, 2000; Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

### 1.3.2 Τα έργα του και τα χαρακτηριστικά της αριστοτελικής σκέψης

Τα έργα του Αριστοτέλη καλύπτουν όλους τους τομείς της Επιστήμης και έχουν άμεση σχέση με τη διδασκαλία του και τον τρόπο ζωής του. Στον τομέα της Φυσικής έγραψε τα «Φυσικά», που αποτελούν πραγματεία για την γενική θεωρία της Φύσης, το «Περί Ουρανού» που σχετίζεται με την αστρονομία, κοσμολογία και μετεωρολογία και τα «Μεταφυσικά», που ανήκει στον τομέα της Φιλοσοφίας.

Ο πλατωνισμός και ο αριστοτελισμός εξελίχθηκαν σε δυο διαφορετικούς φιλοσοφικούς τρόπους σκέψης με διαφορετικό σκοπό και αντικείμενο. Για τον Πλάτωνα σκοπός της γνώσης ήταν η ηθικοπολιτική αναγέννηση της κοινωνίας ενώ για τον Αριστοτέλη είναι αυτοσκοπός της ανθρώπινης έμφυτης ανάγκης για καθαρή γνώση. Επίσης η σκέψη του διαφέρει και από αυτή του Παρμενίδη και από την Ιωνική, που σκοπός της ήταν να τεθούν οι τέχνες στην υπηρεσία του δήμου. Ακόμη για τον Αριστοτέλη υπάρχει μόνο ο κόσμος της καθημερινής εμπειρίας μαζί με την πολυπλοκότητα και τις ποικίλες δομές της, τις οποίες η επιστήμη οφείλει να συλλάβει και να μελετήσει. Στον αντίποδα ο πλατωνισμός διχοτομεί

τον κόσμο σε ανώτερο επίπεδο(ουρανός) και κατώτερο(Γη) και η αποκατάσταση της ενότητας επιτυγχάνεται μέσω της κάθετης ιεραρχικής δομής και με γνώμονα τα μαθηματικά και τη διαλεκτική. Μέσω του Αριστοτέλη καταρρίπτεται το πρότυπο των Ιδεών, η εξέχουσα θέση των Μαθηματικών και η καθολική ισχύ τους έναντι των άλλων επιστημών θεωρώντας ότι κάθε γνωστικό αντικείμενο είναι ισάξιο απέναντι σε κάθε άλλο (T.Cushing, 2003).

Όλες αυτές οι ιδέες αποτυπώνονται στην οργάνωση και την ερευνητική δραστηριότητα του Λυκείου δίνοντας μεγάλη σημασία στον συλλογισμό ως τρόπο σκέψης, σύμφωνα με τον οποίο από κάποιες υποθέσεις συνάγονται υποχρεωτικά άλλες, που βασίζονται στις προηγούμενες. Στο βασικό σχήμα περιλαμβάνονται τρεις προτάσεις, δυο εκ των οποίων αποτελούν τις προκείμενες και μια τρίτη που αποτελεί το συμπέρασμα. Η αλήθεια των συμπερασμάτων εξαρτάται εξολοκλήρου από την αλήθεια των προκείμενων προτάσεων δημιουργώντας έτσι ένα συνεκτικό κανόνα του επιστημονικού τρόπου σκέψης. Στον συλλογισμό του Αριστοτέλη οι αρχές και οι ορισμοί στερούνται απόδειξης καθώς θα πρέπει να προέρχονται από άλλες προκείμενες που θα χρειαζόντουσαν και αυτές απόδειξη. Για να δώσει λύση σε αυτό τον φαύλο κύκλο ο Αριστοτέλης προτείνει οι αρχές και οι ορισμοί να προέρχονται από την εμπειρία μέσω της επαγωγικής μεθόδου.

Συνοπτικά το πρότυπο της επιστήμης κατά τον Αριστοτέλη έχει τα χαρακτηριστικά μια αποδεικτικής επιστήμης, συνδεδεμένη με τους γλωσσικούς κανόνες δόμησης του συλλογισμού και στηριζόμενη σε προκείμενες και αρχές, οι οποίες είναι άμεσα επαληθεύσιμες από την εμπειρία. Επίσης η εμπειρία διαφέρει από την σύγχρονη έννοια του πειράματος και δίνει έμφαση στην αισθητηριακή αντίληψη κυρίως. Τέλος σκοπός της αριστοτελικής επιστήμης είναι η όσο ο δυνατόν μεγαλύτερη εμβάθυνση στη δομή όλων των όντων που απαρτίζουν τον κόσμο (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000).

### 1.3.3 Η θεωρία του Αριστοτέλη για την κίνηση και την πτώση των σωμάτων

Ο Πλάτωνας στον Τίμαιο προσπαθεί να γεφυρώσει το χάσμα της αταξίας του εμπειρικού κόσμου με την τάξη και την τελειότητα του ουράνιου κόσμου. Ο Αριστοτέλης δεν χρειάζεται να κάνει κάτι ανάλογο, αφού γι' αυτόν η φύση αποτελεί πρωτεύων αντικείμενο μελέτης της επιστήμης. Έτσι θεωρεί ότι βασικό συστατικό της φύσης είναι ένα σταθερό σύνολο ουσιών το οποίο βρίσκεται σε κίνηση. Η κίνηση δεν είναι η μετατόπιση στον χώρο αλλά συνώνυμο της αλλαγής κατάστασης ενός όντος. Η αρχική αιτία των φυσικών διαδικασιών περιλαμβάνει αυτό από το οποίο αποτελείται, δηλαδή την ίδια την ύλη. Δευτερογενής αιτία είναι το υποκείμενο που το δημιουργεί και ονομάζεται ποιητικό αίτιο. Στην συνέχεια εμφανίζεται το μορφικό αίτιο, δηλαδή το είδος και η ουσία του πράγματος και ο σκοπός της

δημιουργίας τους αποτελεί το τελικό αίτιο. Από τα παραπάνω εξωγενής παράγοντας είναι μόνο το ποιητικό αίτιο καθώς τα υπόλοιπα είναι σύμφυτα με το ίδιο το αντικείμενο. Η μορφή και το τέλος συμπίπτουν, αφού αντιπροσωπεύουν την ολοκλήρωση ενός όντος με την διαφορά ότι η πρώτη είναι στατική, ενώ το δεύτερο είναι δυναμικό (Boccalletti, 2016; Ebison, 1993).

Ένα άλλο ζεύγος φυσικών εννοιών που εισάγει ο Αριστοτέλης στη θεωρία του είναι αυτό της δύναμης και της ενέργειας. Η δύναμη αποτελεί τη προδιάθεση ή την δυνατότητα του αντικείμενου να αποκτήσει μια μορφή, ενώ η ενέργεια αντιπροσωπεύει την πραγμάτωση της μορφής. Αυτό συνεπάγεται ότι χωρίς την δύναμη δεν υπάρχει ενέργεια. Η ίδια η ύλη αντιπροσωπεύει τη δυνατότητα ενός υποκειμένου να πάρει τελική μορφή αλλά η θεότητα χαρακτηρίζεται από καθαρή ενέργεια και απόλυτη μορφή (Vegetti, 2000).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί η προσπάθεια που κάνει ο Αριστοτέλης να λύσει μεγάλα φιλοσοφικά προβλήματα, που συνδέονται, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, με το πρόβλημα της βαρύτητας και δεν είναι άλλα από αυτά του απείρου, του κενού, του χώρου και του χρόνου. Εμπνευσμένος από την εφαρμογή του σχήματος ενέργειας-δύναμης ο Αριστοτέλης διακρίνει δυο είδη απείρου: το κατά πρόσθεση άπειρο και το κατ' αφαίρεση άπειρο. Το πρώτο συμπίπτει με τη νοητή σειρά αριθμών, που ενώ είναι ενέργεια πεπερασμένη, εν δυνάμει επεκτείνεται στο άπειρο. Η έκταση στον χώρο όμως είναι άπειρη κατ' αφαίρεση και καθώς ο Αριστοτέλης θεωρεί το Σύμπαν πεπερασμένο στο σύνολο του, δεν μπορεί σε αυτό να υπάρξει σώμα άπειρης έκτασης. Κάθε σώμα που εκτείνεται στον χώρο μπορεί να μειωθεί απείρως και να του αφαιρεθούν μέρη, χωρίς να εξαντλείται. Ο χρόνος είναι και αυτός σύμφωνα με τον Αριστοτέλη δυνάμει άπειρος και προσθετικά και αφαιρετικά. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνει να λύσει το παράδοξο του Ζήνωνα, αφού κάποιος μπορεί να διανύσει ένα άπειρο διαιρετό χώρο σε πεπερασμένο χρόνο, δεδομένου ότι και ο δεύτερος είναι διαιρετός επ' άπειρον. Η θέση αυτή του Αριστοτέλη περί συνεχούς χώρου συνεπάγεται την άρνηση της ύπαρξης του κενού, συμπέρασμα που αντιτίθεται στη θεωρία του Δημόκριτου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Ebison, 1993).

Ο Αριστοτέλης περιγράφει το Σύμπαν ως πεπερασμένο, κλειστό και ιεραρχημένο σε δυο καλά ορισμένες περιοχές. Η μια είναι η υποσελήνια περιοχή και η άλλη είναι η περιοχή πέρα από την Σελήνη. Η πρώτη χαρακτηρίζεται από συνεχείς μεταβολές μέσω διαδικασιών γένεσης, αύξησης, ελάττωσης και φθοράς. Η κίνηση σε αυτή την περιοχή δεν είναι ποτέ αυθόρμητη αλλά επιτυγχάνεται μέσω μιας ενεργούσας δύναμης που ονομάζεται 'κινούν' και βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με το σώμα. Βάσει αυτής της θέσης υπάρχουν δυο είδη

κινήσεων σε αυτή την περιοχή: οι φυσικές κινήσεις και οι βίαιες κινήσεις. Προτού αναλυθούν οι δυο κινήσεις πρέπει να ειπωθεί ότι για τον Αριστοτέλη η κίνηση περιλαμβάνει πέρα από τη μετατόπιση και την αλλαγή ουσίας, μεγέθους και ποιότητας. Ακόμη το μέσον εντός του οποίου κινούνται αναλαμβάνει τον ρόλο του ‘κινούντος’ και συνιστά την θεωρία της αντιπερίσπασης, όπως είναι γνωστή (Boccalletti, 2016; Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Modinos, 2014; T.Cushing, 2003).

Η φυσική κίνηση είναι η ελεύθερη κίνηση των σωμάτων με ευθύγραμμη τροχιά και κατακόρυφη διεύθυνση προς τον φυσικό τους τόπο. Με άλλα λόγια το ‘κινούν’ εδώ είναι η φύση του σώματος που έχει την τάση να πηγαίνει προς τη Γη, δηλαδή το κέντρο του κόσμου και μετά να βρίσκεται σε ηρεμία-ακίνησια. Οι νόμοι της φυσικής κίνησης του Αριστοτέλη είναι δυο. Ο πρώτος νόμος είναι ότι αν δυο σώματα διαφορετικού βάρους πέφτουν ελεύθερα, ο χρόνος που χρειάζεται για να καλυφθεί μια δεδομένη απόσταση είναι αντιστρόφως ανάλογος του βάρους του καθενός. Ο δεύτερος νόμος αναφέρει ότι αν δυο σώματα ίδιου βάρους κινούνται ελεύθερα σε διαφορετικά μέσα, ο χρόνος που χρειάζεται για να καλυφθεί δεδομένη απόσταση είναι ανάλογος προς την αντίσταση του μέσου δηλαδή της πυκνότητας του. Από τον δεύτερο νόμο ο Αριστοτέλης καταλήγει ότι το κενό δεν είναι δυνατόν να υπάρξει καθώς η κίνηση ενός σώματος σε αυτό θα είχε άπειρη ταχύτητα λόγω μηδενικής πυκνότητας του κενού. Κάτι τέτοιο όμως δεν παρατηρείται, οπότε ο Αριστοτέλης θεωρεί αναγκαία την ύπαρξη κάποιου μέσου για να μεταδοθεί η κίνηση (Galili, Bar, & Brosh, 2016; Τριανταφυλλόπουλος, 1999; Varvoglis, 2014).

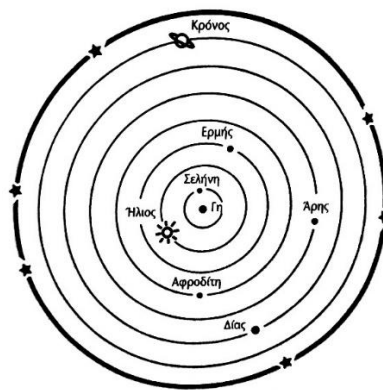
Η βίαιη κίνηση είναι η κίνηση υπό την επίδραση εξωτερικής δύναμης, που έχει τον ρόλο του ‘κινούν’, και υποχρεώνει το σώμα να παρεκκλίνει από τη φυσική του κίνηση. Έτσι η τροχιά της βίαιης κίνησης μπορεί να είναι ευθύγραμμη αλλά όχι απαραίτητα και η διεύθυνση κατακόρυφη. Εάν όμως είναι κατακόρυφη, η φορά της είναι αντίθετη προς αυτή του φυσικού τόπου. Επίσης η βίαιη κίνηση σταματάει όταν πάψει να επιδρά η εξωτερική δύναμη (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται όλα τα σώματα στην υποσελήνια περιοχή αντιστοιχούν στα ριζώματα του Εμπεδοκλή(γη, νερό, αέρας, φωτιά). Για τον Αριστοτέλη η γη και το νερό έχουν την ιδιότητα του βαρέως, δηλαδή έχουν την τάση να κατέρχονται στον φυσικό τους τόπο, με τη γη να θεωρείται πιο βαριά μεταξύ τους. Αντιθέτως ο αέρας και η φωτιά ως ελαφρύτερα έχουν την τάση να ανέρχονται προς την περιφέρεια της Γης, με τη φωτιά να θεωρείται ελαφρύτερη από τον αέρα. Στην ιδανική περίπτωση που δεν υπήρχαν εμπόδια και σώματα διαφορετικών στοιχείων, θα διαμορφώνονταν 4 ομόκεντρες σφαίρες-φυσικοί τόποι των στοιχείων σε ηρεμία με την εξής σειρά: σφαίρα της γης, του νερού, του

αέρα της φωτιάς και του αιθέρα. Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κινητική συμπεριφορά ενός σώματος εξαρτάται από τη αναλογία βαρέων και ελαφριών στοιχείων που το συνθέτουν. Κατ' επέκταση η ελεύθερη πτώση των σωμάτων κατά τον Αριστοτέλη είναι η φυσική κίνηση βαρέων σωμάτων, των οποίων η κινητική συμπεριφορά είναι ανάλογη της βαρύτητας τους (Ebison, 1993; Goehring, 1980; Weinberg, 2016).

Σχετικά με την περιοχή που βρίσκεται πέρα από τη Σελήνη, ο χώρος θεωρείται άφθαρτος, αμετάβλητος και οι φυσικές κινήσεις των σωμάτων είναι τέλειες και συγκεκριμένα ομαλές κυκλικές. Τα ουράνια σώματα στον χώρο αυτό δεν αποτελούνται από τα γνωστά τέσσερα γήινα στοιχεία, αλλά από ένα πέμπτο στοιχείο τον αιθέρα ή αλλιώς πεμπτούσια. Φυσικά η εισαγωγή του αιθέρα εδώ είναι απαραίτητα από τον Αριστοτέλη προκειμένου να ερμηνευθεί η ομαλή κυκλική κίνηση των πλανητών και των απλανών αστερών, η οποία εδώ δεν μπορεί να θεωρείται ποτέ βίαιη, άρα επαγωγικά είναι φυσική.

Ο Αριστοτέλης διατύπωσε και ένα δικό του πλανητικό μοντέλο που στηρίζεται σε αυτό του Εύδοξου και το μετατρέπει από γεωμετρική κατασκευή σε μηχανική. Θεωρεί τις ομόκεντρες σφαίρες συνδεδεμένες μεταξύ τους και ταυτόχρονα επιχειρεί να εξηγήσει τη μετάδοση της κίνησης από τη μια σφαίρα στην άλλη. Για να το επιτύχει αυτό εισάγει έναν αριθμό αντισταθμιστικών σφαιρών τόσο στο σύστημα του εξωτερικού πλανήτη, όσο και στο σύστημα του εσωτερικού πλανήτη. Ο τελικός ουράνιος μηχανισμός είναι εξαιρετικά πολύπλοκος, αποτελούμενος από 55 ομόκεντρες σφαίρες (ενεργούσες και αντισταθμιστικές) για την κίνηση των πλανητών προσθέτοντας και μια για τη σφαίρα των απλανών αστερών. Πέρα από την πολυπλοκότητα του, αδυνατούσε να εξηγήσει τα ίδια φαινόμενα που είχαν αναφερθεί και στο μοντέλο του Εύδοξου, παρά τις προσπάθειες του Αυτόλυκου και του Κάλλιπου να το βελτιώσουν. Αυτό θα επιτευχθεί στα ελληνιστικά χρόνια με την εισαγωγή της θεωρίας των επίκυκλων (Boccalletti, 2016; Modinos, 2014; T.Cushing, 2003).



**Εικόνα 1.6** Οι ουράνιες σφαίρες των γνωστών πλανητών της εποχής του Αριστοτέλη μαζί με την εξωτερική σφαίρα των απλανών (Vigoureux, 2006).



Παρά το γεγονός ότι για πρώτη φορά ο Αριστοτέλης επιχειρεί με έμμεσο τρόπο να περιγράψει τις γήινες βαρυτικές κινήσεις η θεωρία του συμφωνεί με τις παρατηρήσεις και μάλιστα ο δεύτερος νόμος ισχύει και σήμερα με την προϋπόθεση βεβαίως ότι τα σώματα έχουν το ίδιο μέγεθος και διαστάσεις. Ωστόσο σήμερα είναι γνωστό ότι στο κενό δεν πέφτουν όλα τα σώματα με τον ίδιο τρόπο αλλά ο ίδιος ο Αριστοτέλης καταλήγει με αυθαίρετο τρόπο στην απόρριψη της ύπαρξής του. Γενικότερα όμως η θεωρία του έχει ασάφειες καθώς δεν εξηγεί τι συμβαίνει στο σύνορο των δυο περιοχών του υποσελήνιου χώρου και του χώρου των απλανών, όπως και πως γίνεται η μετάβαση από την ανοδική και καθοδική κίνηση των στοιχείων στην κυκλική κίνηση του αιθέρα. Τέλος δεν εξηγούνταν η μετάδοση της θερμότητας από τον Ήλιο με την θεωρία του αιθέρα, αφού αυτός δεν έχει τις ιδιότητες των τεσσάρων γήινων στοιχείων (Narlikar, 1999; Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

#### **1.4 Η εξέλιξη της Αστρονομίας κατά την ελληνιστική περίοδο**

Στις απαρχές της ελληνιστικής φιλοσοφίας ο Επίκουρος, που γεννήθηκε το 341 π.Χ. και έχοντας λάβει εκπαίδευση στον ιωνικό χώρο, διατυπώνει μια υλιστική κοσμοθεωρία. Η Φύση γι' αυτόν είναι σύζευξη ύλης, η οποία συγκροτείται από άτομα που έχουν το χαρακτηριστικό του βάρους και υπάγονται στην Δημοκρίτεια θεωρία. Η κίνηση τους στο κενό αποτελεί ένα είδος περιδίνησης των ατόμων σε παράλληλες τροχιές από τα υψηλά σημεία του σύμπαντος προς τα χαμηλά. Το μοντέλο του Επίκουρου θεωρείται ως μια μηχανιστική δομή, που για να μελετηθεί απαιτεί πολύπλοκους αριθμητικούς υπολογισμούς, δίνοντας ταυτόχρονα χώρο στο τυχαίο και το απρόοπτο. Συνολικά αποτελεί μια εναλλακτική θεωρία από αυτή του Πλάτωνα και του Αριστοτέλη, αφού δεν δίνει έμφαση σε θεολογικές υποθέσεις και τελεολογισμούς αλλά σε υλιστικά χαρακτηριστικά και στην εμπειριοκρατική γνώση (Boccalletti, 2016; Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Εν συνεχεία μια άλλη διαδεδομένη θεωρία της εποχής ήταν αυτή που διατυπώθηκε από την Στωική σχολή. Αυτή ιδρύθηκε από τον Ζήνωνα στην Αθήνα στις αρχές του 3ου αιώνα π.Χ. Ο ίδιος ανέπτυξε μια υβριδική θεωρία συνδυάζοντας της υλική φύση της θεότητας με τα ιδεαλιστικά χαρακτηριστικά ενός ενδοκοσμικού νου, ο οποίος αποκτά αξία μέσω των αισθήσεων. Η πραγματικότητα για τους Στωικούς είναι μια ολότητα και ένα συνεχές, κάθε σημείο του οποίου εντάσσεται στην δυναμική του συνόλου. Τα αίτια της κίνησης είναι εσωτερικό στοιχείο των σωμάτων και συγκεκριμένα εξαρτάται από τη διάταξη τους και την

αντίδραση τους στην επαφή με άλλα αντικείμενα. Επιπροσθέτως οι φυσικές αλληλεπιδράσεις των σωμάτων και η πορεία των γεγονότων δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένα σύνολο ενός κλειστού αυτορρυθμιζόμενου συστήματος (Vegetti, 2000).

Το Σύμπαν για τους Στωικούς είναι μια πεπερασμένη σφαίρα, πλήρως συνεκτική στο κέντρο της οποίας βρίσκεται η Γη και στην εξωτερική της πλευρά περιφέρονται τα άστρα. Ο Ήλιος έχει ρυθμιστικό ρόλο για τη ζωή και τα γεγονότα καταλήγουν στο κοσμικό πυρ. Από αυτό στη συνέχεια ξεκινά ένας νέος κύκλος ζωής πανομοιότυπος με τον προηγούμενο. Η καινοτομία της κοσμοθεωρίας των Στωικών έγκειται στην άρση του χάσματος Γης και Ουρανού καθώς τα άστρα εντάσσονται στους νόμους των γήινων πραγμάτων. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι το πεπερασμένο του χρόνου και η επ' άπειρον μεταβλητή πορεία των γεγονότων. Σε αντίθεση με την πλατωνική και αριστοτελική κοσμοθεωρία ο στωικός θεός-δημιουργός και η θεία πρόνοια εμπλέκονται στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων και εκφράζονται μέσω της ανάγκης και της ειμαρμένης ως διάσταση του κοσμικού ορθού λόγου (Boccalletti, 2016).

Προχωρώντας στην ελληνιστική περίοδο του 3ου και 2ου αιώνα π.Χ. η πνευματική εστία του ελληνόφωνου κόσμου μετατοπίζεται από την Αθήνα στην Αλεξάνδρεια, την σημαντικότερη πόλη που ίδρυσε ο Μ. Αλέξανδρος. Η Αίγυπτος, το μικρότερο από τα τρία βασίλεια της αυτοκρατορίας του είχε μεγάλη ανάπτυξη, εξαιτίας της δραστηριότητας των βασιλέων της δυναστείας των Πτολεμαίων. Συγκεκριμένα ο Πτολεμαίος ο Α΄ ο Σωτήρ θεμελίωσε μέσω των μαθητών του Αριστοτέλη δυο μεγάλα ιδρύματα. Το πρώτο ήταν το Μουσείο που φιλοξενούσε επιστήμονες κάθε ειδικότητας δίνοντας τους υλικό και χώρο για έρευνα και το δεύτερο ήταν η Βιβλιοθήκη, που ήταν αποθετήριο μεγάλων φιλοσοφικών και επιστημονικών έργων. Τα μέλη του Μουσείου είχαν πολύ καλή μισθοδοσία, δωρεάν σίτιση και ήταν απαλλαγμένα από φόρους. Σκοπός της όλης προσπάθειας ήταν η προσέλκυση των σπουδαιότερων λογίων του τότε κόσμου που θα αναλάμβαναν ερευνητικό και διδακτικό ρόλο στα πρότυπα του σημερινού Πανεπιστημίου. Η Βιβλιοθήκη ωστόσο δέχτηκε πάρα πολλές καταστροφές από πολέμους, καθώς πυρπολήθηκε τέσσερις φορές από Ρωμαίους και Άραβες (Weinberg, 2016).

Οι Επιστήμες που γνώρισαν μεγάλη άνθηση μέσω της εννοιολογικής και θεωρητικής αυστηρότητας ήταν τα Μαθηματικά, η Γεωμετρία και η Αστρονομία. Οι αλεξανδρινοί επιστήμονες αναπτύσσουν την Αστρονομία συνδέοντάς την με την Γεωμετρία ανοίγοντας δρόμο για επιτεύγματα τεράστιας σημασίας. Επηρεασμένοι από τις ιδέες του Πλάτωνα θεωρούν ως αρχή το γεγονός ότι η κίνηση των άστρων είναι κυκλική, κανονική και ομοιόμορφη ως έκφραση της θεϊκής τελειότητας και κάθε φαινομενική έλλειψη κανονικότητας

πρέπει να εξαλείφεται με μαθηματικές μεθόδους ώστε να «σώζονται τα φαινόμενα». Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα θεωρητικό οικοδόμημα, το οποίο αν και έχει στοιχεία αυθαιρεσίας, θα παραμείνει άθικτο ως και τις αρχές του 19ου αιώνα (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Στην ελληνιστική περίοδο παρατηρούνται σημαντικά επιτεύγματα από τρεις Έλληνες μαθηματικούς τον Ευκλείδη, τον Αρχιμήδη και τον Απολλώνιο. Για τον Ευκλείδη δεν είναι γνωστά πολλά πράγματα για τη ζωή του εκτός από το ότι έζησε γύρω στο 330 π.Χ. γράφοντας τα Στοιχεία, ένα γεωμετρικό έργο 13 βιβλίων και τα Φαινόμενα, που ήταν έργο μαθηματικής αστρονομίας. Ο Ευκλείδης ήταν από τους σπουδαιότερους επιστήμονες του Μουσείου, ο οποίος οργάνωσε συστηματικά και καθιέρωσε ως θεμελιώδη Επιστήμη τη Γεωμετρία προσδιορίζοντας τα λεγόμενα αξιώματα με ένα αριστοτελικό σχήμα. Τα αξιώματα στερούνται απόδειξης, αλλά γίνονται δεκτά μέσω της ενόρασης της προφάνειας της αλήθειας. Στην συνέχεια εισήγαγε τα θεωρήματα, που αποδεικνύονται βάσει των αξιωμάτων, δημιουργώντας έτσι μια αδιάσπαστη αλυσίδα με τη μέθοδο της εις άτοπο απαγωγής και της εξαντλητικής μεθόδου (Boccalletti, 2016).

Η εις άτοπο απαγωγή είναι συναφής με τη λογική του Ζήωνα και συνίσταται στη διατύπωση μιας πρότασης αντίθετης με την αποδεικτέα, ώστε να φανεί το άτοπο των συνεπειών της. Ένα άλλο σημαντικό αξίωμα είναι αυτό των παραλλήλων που ορίζονται ως δυο ευθείες που αν επεκταθούν απεριόριστα δεν συναντώνται ποτέ. Στο 5ο αξίωμα στα Στοιχεία ο Ευκλείδης αναφέρει επίσης ότι αν μια ευθεία συναντώντας άλλες δυο σχηματίσει τις εσωτερικές γωνίες από την ίδια πλευρά μικρότερες από 180°, τότε οι δυο ευθείες αν επεκταθούν επ' άπειρον συναντώνται από την πλευρά που οι δυο γωνίες είναι μικρότερες από δυο ορθές. Η κριτική κατά της προφάνειας αυτού του αξιώματος και η προσπάθεια απόδειξης του θα οδηγήσει τον 19ο αιώνα στη θεμελίωση των λεγόμενων «μη ευκλείδειων γεωμετριών» που έχουν άμεση σχέση με την εξέλιξη της βαρυτικής θεωρίας (Modinos, 2014).

Ο Αρχιμήδης γεννήθηκε στις Συρακούσες το 287 π.Χ. και ασχολήθηκε με τα μαθηματικά, τη γεωμετρία και τη φυσική, διατηρώντας στενές επαφές με τους επιστήμονες του Μουσείου. Ήταν από τους πρώτους που εφάρμοσαν απειροστικές μεθόδους, γνωστές από τον Εύδοξο για την εύρεση εμβαδών και όγκων στερεών ενώ δεν δίσταζε να εκτελεί πολύπλοκους αριθμητικούς υπολογισμούς, συμβάλλοντας έτσι στην εύρεση του αριθμού  $\pi$  που έχει μεγάλη σημασία για τη γεωμετρική μελέτη του κύκλου.

Στο έργο του «περί ισορροπιών» μελέτησε παραδείγματα που σχετίζονται έμμεσα με την βαρύτητα βρίσκοντας το κέντρο βάρους διαφόρων στερεών ενώ παράλληλα έφτασε πολύ κοντά στον ορισμό του ειδικού βάρους, ενός μεγέθους σημαντικού για τους νόμους

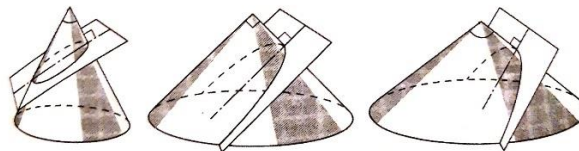
της πλευσης. Το κέντρο βάρους το μελέτησε μέσω της ισορροπίας του ζυγού πάνω στον οποίο είναι τοποθετημένα διάφορα βάρη. Για να απλοποιήσει ο Αρχιμήδης την πολυπλοκότητα των κινήσεων θεώρησε ακίνητο και αβαρές το υπομόχλιο ενώ τα βάρη πάνω του θεωρήθηκαν μαθηματικά σημεία. Εδώ για πρώτη φορά παρατηρείται η μετατροπή ενός φυσικού προβλήματος σε μαθηματικό (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Η πρώτη από τις τέσσερις αρχές ισορροπίας του ζυγού που διατύπωσε ο Αρχιμήδης είναι ότι τα ίσα βάρη ισορροπούν όταν εξαρτώνται από ίσα μήκη ενώ τα ίσα βάρη, όταν εξαρτώνται από άνισα μήκη δεν ισορροπούν και κλείνει η φάλαγγα προς το βάρος, που είναι εξαρτημένο από το μεγαλύτερο μήκος. Η δεύτερη αρχή εξηγεί ότι εάν υπάρχουν βάρη που ισορροπούν εξαρτημένα από ορισμένα μήκη και προστεθεί βάρος σε αυτά, τότε δεν υπάρχει ισορροπία πλέον και η φάλαγγα κλίνει προς τη μεριά του προστιθέμενου βάρους. Η τρίτη αρχή αναφέρει ότι εάν από το βάρος του ζυγού αφαιρεθεί κάτι, ώστε να μην υπάρχει πλέον ισορροπία, τότε η φάλαγγα θα κλίνει προς το μέρος του βάρους που δεν αφαιρέθηκε κάτι. Η τέταρτη αρχή αναφέρει ότι τα συμμετρικά μεγέθη ισορροπούν σε αποστάσεις αντιστρόφως ανάλογες προς το λόγο των βαρών, ενώ μη συμμετρικά μεγέθη θα ισορροπούν σε μήκη που έχουν λόγο αντιστρόφως ανάλογο προς το λόγο των μεγεθών (Galili, Bar, & Brosh, 2016; Kuehn, 2015; Modinos, 2014).

Στο βιβλίο του «περί οχουμένων» ο Αρχιμήδης διατυπώνει την ανακάλυψη του βασικού νόμου της Υδροστατικής. Αυτή αναφέρει ότι τα βαρύτερα στερεά από ένα υγρό όταν αφήνονται σε αυτό θα αφήνονται προς τα κάτω όσο είναι δυνατό να βυθίζονται και θα είναι ελαφρύτερα εντός του υγρού τόσο, όσο βάρος έχει το υγρό, που έχει τόσο όγκο, όσος είναι ο όγκος του στερεού σώματος. Τέλος, σημαντική ήταν η μελέτη για το ειδικό βάρος των σωμάτων, μέγεθος που σχετίζεται με την πυκνότητα. Μάλιστα ο Ιέρωνας θέλοντας να αφιερώσει στους Θεούς ένα χρυσό στεφάνι, ανέθεσε στον Αρχιμήδη να ελέγξει αν το στεφάνι που παρήγγειλε από έναν χρυσοχόο ήταν από καθαρό χρυσό (Vegetti, 2000).

Ένας άλλος σημαντικός μαθηματικός και αστρονόμος της περιόδου ήταν ο Απολλώνιος. Γεννήθηκε το 262 π.Χ. στην Πέργη της Παμφυλίας στην Μ. Ασία και σπούδασε μαθηματικά κοντά σε μαθητές του Ευκλείδη. Το μεγαλύτερο έργο του ήταν τα «Κωνικά» που αποτελούνται από 8 βιβλία εκ των οποίων τα μισά είναι μεταφρασμένα στα ελληνικά και τα υπόλοιπα στα αραβικά. Σε αυτό το έργο ο Απολλώνιος μελετά τις παραλλαγές των καμπύλων γραμμών, που προκύπτουν από τομές ενός κώνου. Παλαιότερα με το ίδιο θέμα είχε ασχοληθεί και ο Μέναιχμος προκειμένου να λύσει ένα πρόβλημα παρόμοιο με το διπλασιασμό του κύβου. Οι τρεις κωνικές τομές ή τριάδες αλλιώς του Μέναιχμου είναι η παραβολή, η υπερβολή και η έλλειψη (Vegetti, 2000).

Ο ορισμός του κώνου όπως δίνεται από τον Ευκλείδη αναφέρει ότι ο κώνος είναι το περιληφθέν σχήμα που προκύπτει όταν ορθογώνιο τρίγωνο περιστραφεί γύρω από μια εκ των κάθετων πλευρών και επανέλθει στη θέση από τη οποία άρχισε να κινείται. Η μια κάθετη θεωρούμενη ως ακίνητη αν είναι ίση προς την άλλη κάθετη που εκτελεί την περιστροφή, τότε ο κώνος θα είναι ορθογώνιος. Αν από την άλλη είναι μικρότερη, ο κώνος θα είναι αμβλυγώνιος ενώ αν είναι μεγαλύτερη ο κώνος θα είναι οξυγώνιος. Η παραβολή σχηματίζεται από την τομή με ένα επίπεδο κάθετο στην γενέτειρα ορθογώνιων κώνων. Αντίστοιχα η έλλειψη προκύπτει από την ανάλογη τομή οξυγώνιου κώνου και η υπερβολή από τομή αμβλυγώνιου κώνου. Η θεωρία των κωνικών τομών του Απολλώνιου είχε μεγάλη σημασία αφού αργότερα εφαρμόστηκε από τον Γιοχάνες Κέπλερ και άλλους σχετικά με τις τροχιές των πλανητών. Ωστόσο ο Απολλώνιος δεν διανοούνταν ότι οι πλανήτες μπορεί να διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές, αφού παρέμενε πιστός στην πλατωνική προκατάληψη περί της τελειότητας της κυκλικής κίνησης των ουράνιων σωμάτων.



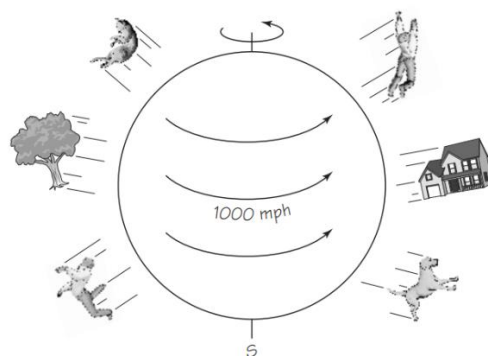
*Εικόνα 1.7 Οι κωνικές τομές σύμφωνα με τον Απολλώνιο (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).*

Στον Απολλώνιο αποδίδεται και η επινόηση των δίδυμων μαθηματικών μοντέλων φερόντων, επίκυκλων και έκκεντρων κύκλων που αντικατέστησε το μοντέλο των ομόκεντρων σφαιρών του Εύδοξου για τις πλανητικές κινήσεις. Προκειμένου να εξηγήσει τις παρατηρούμενες ελλείψεις κανονικότητας και να λύσει το πρόβλημα του διαφορετικού μήκους των ισημεριών χρησιμοποίησε αυτή την τροχιακή θεωρία που, αν και άψογη γεωμετρικά για να υποστηριχθεί η κεντρικότητα της Γης, ήταν αρκετά περίπλοκη και αποτέλεσε ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια για την επικράτηση της ηλιοκεντρικής θεωρίας αργότερα (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

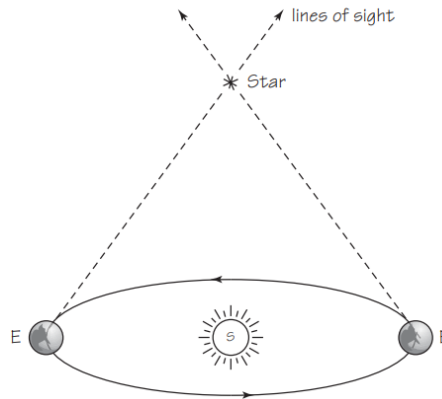
Η πιο επαναστατική θεωρία της αρχαίας αστρονομίας διατυπώθηκε τον 3ο αιώνα π.Χ. από τον Αρίσταρχο. Ο Αρίσταρχος γεννήθηκε στην Σάμο το 310 π.Χ. και ασχολήθηκε με την αστρονομία, τα μαθηματικά και την οπτική. Στο έργο του Ψαμμίτης διατυπώνει την ιδέα ενός ηλιοκεντρικού συστήματος με αποτέλεσμα να ονομαστεί αργότερα ως ο «Κοπέρνικος της αρχαιότητας». Προκειμένου να εξηγήσει την φαινομενική ελλειπτική τροχιά των πλανητών με απλότητα και ακρίβεια κάνει μια μαθηματική υπόθεση, χωρίς όμως να εξηγήσει τις φιλοσοφικές συνέπειές της.

Αρχικά υποθέτει ότι η Γη δεν είναι το κέντρο του Σύμπαντος αλλά κινείται γύρω από τον Ήλιο και γύρω από τον άξονα της. Μια παρόμοια πρόταση είχε κάνει και ο Φιλόλαος, όπως έχει αναφερθεί, μόνο που είχε ως κέντρο την Εστία. Για τον Αρίσταρχο ο Ήλιος είναι το κέντρο του Σύμπαντος και η σφαίρα των απλανών αστερών, όντας ακίνητη βρίσκεται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από τη Γη από όσο θεωρούνταν τότε. Η θεωρία αυτή φυσικά δεν έγινε αποδεκτή ούτε από τον Απολλώνιο ούτε από άλλους εμμένοντας στο γεωμετρικό δόγμα. Μάλιστα ο στωικός Κλεάνθης ζήτησε να παραπεμφθεί ο Αρίσταρχος σε δίκη για ασέβεια και αθεϊσμό, αλλά χάρη στην βασιλική υποστήριξη οι επιστήμονες του Μουσείου απολάμβαναν ασυλίας και ελευθερίας σκέψης, πράγμα άγνωστο τους προηγούμενους αιώνες (Modinos, 2014; Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Εντούτοις υπήρχαν και άλλοι λόγοι που δεν έγινε δεκτή η ηλιοκεντρική υπόθεση του Αρίσταρχου. Πρώτον δεν ήταν συμβατή με την αριστοτελική φυσική και συγκεκριμένα με τη θεωρία της φυσικής κίνησης. Δεύτερον δεν συμφωνούσε με τις παρατηρήσεις αφού η συνδυασμένη διπλή κίνηση της Γης θα είχε εμφανή αποτελέσματα στις καθημερινές κινήσεις των γήινων σωμάτων.(βλ. εικόνα 1.8) Τρίτον η περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο θα είχε ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η γωνιακή απόσταση δυο οποιονδήποτε αστερών, όταν αυτοί παρατηρούνται από διαφορετικά σημεία της τροχιάς της. Αυτό είναι το γνωστό φαινόμενο της αστρικής παράλλαξης, αλλά με τα μέσα που διέθεταν τότε ήταν αδύνατον να παρατηρηθεί.(βλ. εικόνα 1.9) Τέλος η κίνηση της Γης δεν συμβάδιζε με τις θρησκευτικές πεποιθήσεις της εποχής που σχετίζονταν με τον ιερό χαρακτήρα που της απέδιδαν ως κέντρο της θεϊκής πρόνοιας.

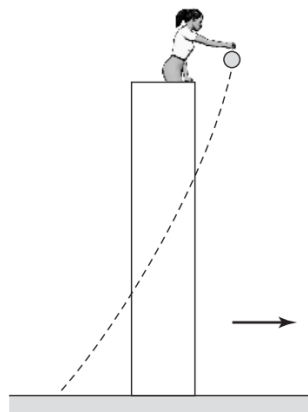


**Εικόνα 1.8** Η διπλή κίνηση της Γης λογικά θα εκτόξευε όλα τα αντικείμενα από την επιφάνεια της (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).



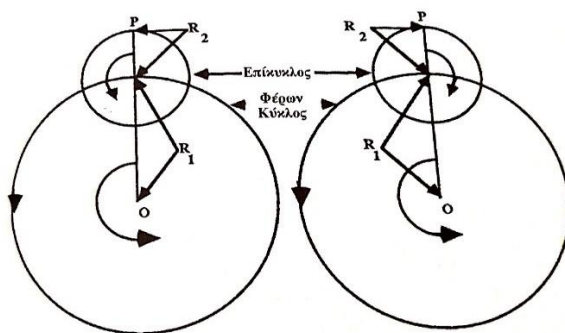
**Εικόνα 1.9** Το φαινόμενο της αστρικής παράλλαξης (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Προτού γίνει ανάλυση στο έργο του Κλαύδιου Πτολεμαίου αξίζει να αναφερθεί το όνομα ενός επίσης μεγάλου Έλληνα αστρονόμου και δεν είναι άλλος από τον Ίππαρχο. Ο Ίππαρχος (190-120 π.Χ.) καταγόταν από την Νίκαια της Μ. Ασίας και έδρασε στη Ρόδο ασχολούμενος με την αστρονομία, τα μαθηματικά και τη γεωγραφία. Στα επιτεύγματα του συγκαταλέγεται η ανακάλυψη 85 αστερών και η οργάνωσή τους σε κατάλογο μέσω παρατήρησης και χρήσης της διόπτρας. Το πλανητικό σύστημα που παρουσίασε ήταν πρόδρομος του πτολεμαϊκού συστήματος και βασίστηκε στη γεωκεντρική υπόθεση εξηγώντας τις κινήσεις των άστρων με τα γεωμετρικά εργαλεία των έκκεντρων και επίκυκλων. Επίσης αντιτάχθηκε σθεναρά στην ηλιοκεντρική υπόθεση του Αρίσταρχου υποστηρίζοντας την θεωρία των φυσικών κινήσεων του Αριστοτέλη και θεωρώντας συγχρόνως τη Γη ως το κέντρο βαρύτητας των σωμάτων. Ακόμη υποστήριξε ότι αν η Γη περιστρέφονταν γύρω από τον άξονα της ημερησίως θα έπρεπε να έχει τόσο μεγάλη ταχύτητα περιστροφής, που ένα αντικείμενο αν έπεφτε από ένα ψηλό κτήριο στην επιφάνειά της, όπως φαίνεται στην εικόνα 10, τότε θα έμενε πίσω, μη μπορώντας να ακολουθήσει την γήινη κίνηση (Grego & Mannion, 2010; Weinberg, 2016).



**Εικόνα 1.10** Ένα αντικείμενο θα έμενε πίσω, εάν η Γη κινούνταν με μεγάλη ταχύτητα, σύμφωνα με το επιχείρημα του Ίππαρχου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Ο Ίππαρχος ήταν από τους πρώτους Έλληνες αστρονόμους που απαίτησε την ποσοτική συμφωνία θεωρίας και παρατήρησης, αποδίδοντας αυστηρές αριθμητικές τιμές στις παραμέτρους των γεωμετρικών μοντέλων που χρησιμοποίησε. Σύμφωνα με το σχήμα της εικόνας 1.11 ο πλανήτης περιστρέφεται ομαλά σε μικρό κύκλο που ονομάζεται επίκυκλος. Το κέντρο αυτού κινείται επίσης ομαλά σε ένα άλλο μεγαλύτερο κύκλο που ονομάζεται φέρων κύκλος. Ο παρατηρητής βρίσκεται στο κέντρο  $O$  του δεύτερου κύκλου, που συμπίπτει με τη Γη. Ο φέρων κύκλος κινείται αντίθετα από την φορά των δεικτών του ρολογιού ενώ το σημείο  $P$  στην πρώτη περίπτωση κινείται αντίθετα και στην δεύτερη περίπτωση με την φορά των δεικτών του ρολογιού.  $R_1$  και  $R_2$  είναι αντιστοίχως οι ακτίνες του φέροντος κύκλου και του επίκυκλου (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).



*Εικόνα 1.11 Επίκυκλοι και φέροντες κύκλοι (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).*

Αυτός ο γεωμετρικός μηχανισμός εξηγεί την κύρια ανωμαλία της φαινόμενης κίνησης των πλανητών κατά μήκος του ζωδιακού, λόγω στάσεων και αναδρομήσεων στην προς ανατολάς πορείας τους. Ένα άλλο πρόβλημα που έπρεπε να εξηγηθεί ήταν η ανισότητα των εποχών εξαιτίας της φαινόμενης μεταβολής της ταχύτητας του Ήλιου. Γι' αυτό το λόγο επινοήθηκε το έκκεντρο μοντέλο. Σύμφωνα με αυτό το ουράνιο σώμα κινείται ομαλά στην περιφέρεια ενός κύκλου αλλά το κέντρο του δεν συμπίπτει με τη Γη. Η ανισότητα των εποχών εξηγείται από την ανισότητα των αντίστοιχων τόξων που σχηματίζονται από τις ισημερίες, ηλιοστάσια, απόγειο και περίγειο (Modinos, 2014). Παρά το γεγονός ότι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εξηγούνται ικανοποιητικά από τα δυο μοντέλα, τα ποσοτικά, προκειμένου να προσδιοριστεί με ακρίβεια η μελλοντική θέση ενός πλανήτη, δεν ήταν δυνατά. Αυτό θα επιτευχθεί τον 2ο αιώνα π.Χ. με την εισαγωγή του γεωμετρικού μηχανισμού του εξισωτή από τον Πτολεμαίο (Vigoureux, 2006).

Άξιο αναφοράς στο σημείο αυτό αποτελεί η φυσική θεωρία του Στράτωνα του Λαμψακηνού και η αστρονομική σημασία του έργου του Ερατοσθένη του Κυρηναίου.



Ο Στράτωνας (335-268 π.Χ.) γεννήθηκε στην Λάμψακο και ασχολήθηκε με τη φυσική φιλοσοφία, διατελώντας μάλιστα διευθυντής του Λυκείου μετά τον Θεόφραστο. Η κοσμοθεωρία του δεν περιλαμβάνει δημιουργό για το Σύμπαν και υποστηρίζει ότι συγκροτήθηκε από ενδογενείς δυνάμεις της φύσης. Επίσης είναι από τους πρώτους που αναφέρουν την έννοια της επιτάχυνσης ως συνέπεια της πτώσης των σωμάτων σύμφωνα με την φυσική κίνηση του Αριστοτέλη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα που αναφέρει είναι ότι το νερό που πέφτει από ύψος διασπάται σε σταγόνες, ως απόδειξη ότι τα αντικείμενα κατά την πτώση τους αυξάνουν την ταχύτητά τους. Παρά το γεγονός ότι ήταν υποστηρικτής του αριστοτελισμού αντικαταχθηκε στη θεωρία του αιθέρα και στην θεώρηση του χρόνου ως μετρήσιμο μέγεθος της κίνησης, διαχωρίζοντας τον παράλληλα από αυτή. Τέλος συμφωνούσε με την ατομική θεωρία του Δημόκριτου, αλλά όχι με την ύπαρξη του κενού χώρου και της κίνησης των σωμάτων εντός αυτού (Vegetti, 2000; Weinberg, 2016).

Ο Ερατοσθένης (276-194 π.Χ.) γεννήθηκε στην Κυρήνη και έλαβε εκπαίδευση από τον Ζήνωνα, τον ακαδημικό Αρκεσίλαο και τον περιπατητικό Αρίστωνα. Ακόμη έγινε διευθυντής της Βιβλιοθήκης συμβάλλοντας στην ανάπτυξη της γεωγραφίας και της αστρονομίας. Διατύπωσε μια πρωτότυπη θεωρία για τις παλίρροιες, αιτιολογώντας την σύνδεση των ωκεανών και ως γνωστόν έδωσε πολλές πληροφορίες για τις διαστάσεις και το σχήμα της Γης, μετρώντας την περιφέρεια της και αποδεικνύοντας την σφαιρικότητα της με απλούς αλλά ακριβείς γεωμετρικούς υπολογισμούς. Η τιμή της περιφέρειας της Γης που υπολόγισε (39,690 Km) είναι πολύ κοντά στην σημερινή τιμή (40.000 Km) και αποτελεί μεγάλο επίτευγμα για τα δεδομένα της εποχής (Τριανταφυλλόπουλος, 1999; T.Cushing, 2003).

## **1.5 Το γεωκεντρικό σύστημα του Πτολεμαίου**

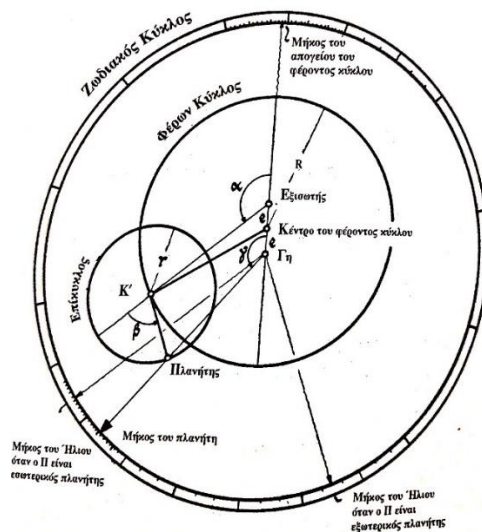
Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος γεννήθηκε στην Αίγυπτο και έζησε στην Αλεξάνδρεια στα μέσα του 2ου αιώνα μ.Χ. Ασχολήθηκε κυρίως με τα μαθηματικά, την αστρονομία, την αστρολογία και την γεωγραφία, οργανώνοντας παράλληλα όλη την μέχρι τότε αστρονομική γνώση της εποχής. Το σημαντικότερο έργο του «Μαθηματική σύνταξις» ή κοινώς γνωστή στα αραβικά «Αλμαγέστη», αποτελείται από οκτώ βιβλία που συγκεντρώνουν τις γνώσεις για το πλανητικό σύστημα, είναι βασισμένο σε παρατηρήσεις του Ίππαρχου. Ακόμη έγραψε και άλλα έργα αστρονομικού περιεχομένου όπως οι «φάσεις αστέρων», «πίνακες», «υποθέσεις των πλανώμενων», «Περί αναλήματος και Πλανίσφαιρον» καθώς και ένα εγχειρίδιο αστρολογίας που περιλαμβάνεται σε τέσσερα βιβλία στην γνωστή «Τετράβιβλο». Αυτό το εγχειρίδιο προσπαθεί να δώσει επιστημονική υπόσταση στην αστρολογία, που ασχολείται

με την πρόβλεψη της μοίρας βάσει της παρατήρησης των άστρων. Η πρακτική αυτή ήταν πολύ διαδεδομένη στην Ανατολή, στην Αίγυπτο και μετέπειτα στην Ρώμη (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Ο Πτολεμαίος παρουσιάζοντας το πλανητικό μοντέλο, αντλεί από τον Εύδοξο την θεωρία των αστρικών σφαιρών και υποστηρίζει ότι τα ουράνια σώματα κινούνται από ενδογενείς δυνάμεις, σε αντίθεση με την θεωρία των εξωτερικών κινούντων του Αριστοτέλη. Επιπλέον δανείζεται από τον Απολλώνιο και τον Ίππαρχο τους μηχανισμούς των επίκυκλων και έκκεντρων τροχιών, τροχιών κυκλικών και άρα αποδεκτών με βάση τις αρχές της εποχής με τη διαφορά ότι το κέντρο τους δεν συμπίπτει με τη Γη. Αυτό είναι απαραίτητο για να εξηγήσει τις ανωμαλίες των πλανητικών κινήσεων που αντιλαμβάνεται ένα παρατηρητής στον πλανήτη μας. Τέλος δεν κάνει καμία αναφορά στην ηλιοκεντρική υπόθεση του Αρίσταρχου και συντάσσεται με την ιδέα της σφαιρικότητας, της ακινησίας της Γης αλλά και της κεντρικής θέσης της Γης στον κόσμο (T.Cushing, 2003).

Η συνεκτικότητα του συστήματος του Πτολεμαίου δεν πηγάζει από θεωρίες αλλά από την ακρίβεια των παρατηρήσεων. Ο Πτολεμαίος χρησιμοποίησε τον αστρολάβο για να προσδιορίσει την θέση των άστρων και εφάρμοσε ένα μαθηματικό μηχανισμό για τον υπολογισμό των τροχιών, γνωστό ως «λογισμό των χορδών», στηριζόμενος στις αρχές της σύγχρονης τριγωνομετρίας. Αυτή η μέθοδος δίνει στο έργο του μαθηματική ακρίβεια, που οι αποδείξεις του θεωρούνται αδιάψευστες.

Προκειμένου να περιγράψει τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων χρησιμοποιεί πολλούς γνωστούς γεωμετρικούς μηχανισμούς αλλά καινοτομεί στην εισαγωγή του εξισωτή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.12 ο πλανήτης Π κινείται πάνω στον επίκυκλο, το κέντρο Κ' του οποίου κινείται συγχρόνως στην περιφέρεια του φέροντος κύκλου. Εν συνεχεία το γεωμετρικό κέντρο Κ του φέροντος δεν συνάδει με το σημείο Γ που θεωρείται η Γη και ο παρατηρητής, αλλά απέχει μια απόσταση ΓΚ από αυτή. Η απόσταση αυτή ονομάζεται εκκεντρότητα του φέροντος κύκλου και η ευθεία που διέρχεται από τα σημεία Γ και Κ είναι σταθερή προς τους απλανείς αστέρες όπως και το εκλειπτικό μήκος του απογείου του φέροντος κύκλου (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).



Εικόνα 1.12 Το πτολεμαϊκό σύστημα (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

Η κίνηση του πλανήτη Π διέπεται από κάποιες βασικές αρχές. Αρχικά το κέντρο  $K'$  του επίκυκλου εκτελεί κίνηση αντίθετη της φοράς των ρολογιών και ομαλή κυκλική, όχι όμως ως προς το γεωμετρικό κέντρο  $K$ , ούτε ως προς τη  $\Gamma\eta$  αλλά ως προς ένα άλλο σημείο  $E$  που ονομάζεται εξισωτής. Ωστόσο το  $E$  είναι συμμετρικό του  $\Gamma$  ως προς το  $K$ , πράγμα που σημαίνει ότι η γωνία  $\alpha$  αυξάνει κάθε μέρα κατά το ίδιο ποσό. Ο πλανήτης  $\Pi$  κινείται επί του επίκυκλου εκτελώντας και αυτός ομαλή κυκλική κίνηση με αποτέλεσμα και η γωνία  $\beta$  να αυξάνει κάθε μέρα κατά το ίδιο ποσό. Εάν λοιπόν είναι γνωστές οι τιμές των  $\alpha$  και  $\beta$  σε μια δεδομένη χρονική στιγμή καθώς και τους ρυθμούς αύξησης τους ημερησίως, μπορούν να βρεθούν οι τιμές τους σε οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή.

Ο Πτολεμαίος με την χρήση του εξισωτή ουσιαστικά μειώνει την απαίτηση της ομαλής κίνησης, αναφερόμενη στο σημείο  $E$ , που είναι διαφορετικό από τη  $\Gamma\eta$  και έτσι εξηγεί με ακρίβεια τις παρατηρούμενες μεταβολές της ταχύτητας των πλανητών. Η ασθενέστερη αυτή μορφή ομαλής κίνησης θα δεχτεί σφοδρή κριτική αργότερα από τον Κοπέρνικο, όμως το πλανητικό του μοντέλο είναι τόσο σύμφωνο με τις παρατηρήσεις που θα διώξει όλες τις επιφυλάξεις για απαίτηση ισχυρής ομαλής κίνησης. Υπενθυμίζεται ότι μέχρι και τον 16ο αιώνα το κριτήριο για την ορθότητα των αστρονομικών θεωριών ήταν κατά πόσο υπήρχε συμβατότητα με την πλατωνική αρχή του «σώζειν τα φαινόμενα» (Vigoureux, 2006).

Σύμφωνα με την αρχή αυτή μια θεωρία θεωρούνταν επιστημονικά ορθή αν ήταν απλή, αν συμφωνούσε με τις παρατηρήσεις και αν υπολόγιζε τις μελλοντικές θέσεις των ουράνιων σωμάτων. Η επικρατούσα αντίληψη της εποχής δεν έδινε σημασία στην αιτιολόγηση της φυσικής πραγματικότητας και αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι η αστρονομία είχε

διαφορετικό αντικείμενο και μεθοδολογία από αυτό της σημερινής Φυσικής. Συγκεκριμένα, η αστρονομία μελετούσε τις κινήσεις θεϊκών οντοτήτων(ουράνιων σωμάτων), των οποίων η πραγματική θέση δεν είναι γνωστή, σε αντίθεση με την φυσική που μελετάει τις γήινες κινήσεις των σωμάτων, των οποίων η φύση είναι κατανοητή (Weinberg, 2016).

Έτσι λοιπόν η αρχή του «σώζειν τα φαινόμενα» δεν επιζητεί να γνωρίσει την αληθινή φύση των ουράνιων σωμάτων γι' αυτό και οι μαθηματικές-γεωμετρικές κατασκευές των φερόντων, επίκυκλων, έκκεντρων και εξισωτών δεν ήταν απαραίτητο να έχουν φυσική υπόσταση. Σημασία έχει ότι ο τα αστρονομικά επιτεύγματα της εποχής και η τελειότητα της θεωρητικής δομής κατέστησαν το γεωκεντρικό σύστημα πετυχημένο και αδιαμφισβήτητο, που μαζί με την αριστοτελική φυσική θα χρειαστεί να έρθουν αντιμέτωποι οι αστρονόμοι των νεότερων χρόνων και κυρίως ο Μπράχε, ο Κέπλερ και ο Γαλιλαίος (Varvoglis, 2014).

## **1.6 Οι σημαντικότερες αστρονομικές μελέτες από τη βυζαντινή περίοδο μέχρι τον Μεσαίωνα**

Μετά τον 2ο και 3ο αιώνα μ.Χ. η αρχαία ελληνική επιστήμη παρακμάζει εξαιτίας της φθοράς των κρατικών μηχανισμών της αυτοκρατορίας και της αποδυνάμωσης των πολιτισμικών θεσμών όπως αυτής του Μουσείου με παράλληλη μείωση της κρατικής υποστήριξης. Επιπροσθέτως ο ορθός λόγος, όπως εκφράζεται από τα αριστοτελική και πλατωνική θεωρία δίνει τη θέση του σε φιλοσοφίες επικεντρωμένες στην ηθική, την βούληση και την προσωπική ευδαιμονία. Κατά τους πρώτους χριστιανικούς αιώνες γίνεται μια περιθωριοποίηση της Επιστήμης προς όφελος του ορθού λόγου των θρησκειών, που δίνει έμφαση στη μελέτη της σχέσης ανθρώπου-Θεού. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι η νεοπλατωνική φιλοσοφία είχε έντονη θεολογική κατεύθυνση και από το γεγονός ότι από τη στιγμή που ο χριστιανισμός έγινε η επίσημη θρησκεία του κράτους, η Εκκλησία ως θεσμός απέκτησε μεγάλη δύναμη. Αυτή βασισμένη σε δόγματα έθεσε εμπόδια στην εξέλιξη της επιστημονικής σκέψης (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Μέσα σε αυτό το κλίμα η δραστηριότητα των λόγιων περιορίζεται στην συγγραφή σχολίων για έργα του παρελθόντος και την διάσωση της προφορικής παράδοσης. Παρόλα αυτά δεν έλλειψαν αξιόλογοι επιστήμονες όπως ο Διόφαντος, που με το σημαντικό μαθηματικό του έργο θα συμβάλει στην γέννηση της Άλγεβρας και του μαθηματικού φορμαλισμού, επηρεάζοντας τους επιστήμονες του 16ου και 17ου αιώνα. Η πρωτοβυζαντινή περίοδος αποτελεί συνέχεια της ύστερης αρχαιότητας, με σημαντικές σχολές να βρίσκονται τον

3ο αιώνα μ.Χ. και μετά στην Αθήνα, την Αλεξάνδρεια και την Κωνσταντινούπολη (Χριστιανίδης, Διαλέτης, Παπαδόπουλος, & Γαβρόγλου, 2000).

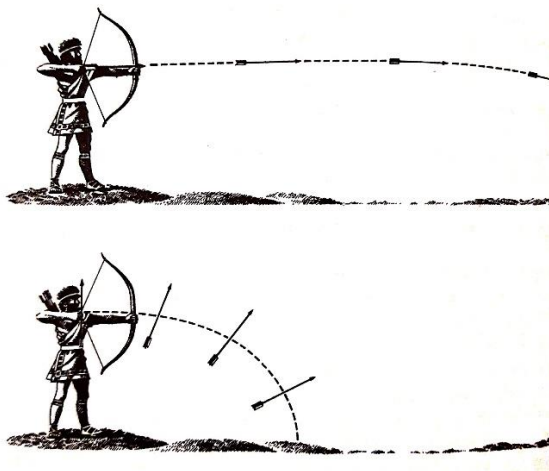
Εξέχουσα προσωπικότητα της περιόδου αποτελεί ο Ιωάννης ο Φιλόπονος, ο οποίος ήταν από τους ευρυμαθέστερους λόγιους κατά τη μεταβατική περίοδο από την ελληνιστική στη βυζαντινή επιστήμη. Ο Ιωάννης ο Φιλόπονος γεννήθηκε το 490 π.Χ. στην Καισαρεία, έγινε αργότερα επίσκοπος της Αλεξάνδρειας και παρότι χριστιανός εμπνεύστηκε όσο από τη νεοπλατωνική όσο και από την αριστοτελική φιλοσοφία. Όσον αφορά την κοσμοθεωρία του υποστηρίζει ότι η ύλη του σύμπαντος αποτελείται από το ίδιο είδος και στην υποσελήνια περιοχή και σε αυτή των άστρων, που μάλιστα δεν είναι αιώνια. Με αυτό τον τρόπο η χριστιανική θεωρία για τη δημιουργία του κόσμου από το Θεό φαίνεται εύλογη και είναι το πρώτο παράδειγμα εναρμόνισης αστρονομικών θεωριών με αριστοτελικά, χριστιανικά και νεοπλατωνικά στοιχεία (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Ο Ιωάννης ο Φιλόπονος μέσω των σχολίων του ασκεί έντονη κριτική σε σημεία της θεωρίας του Αριστοτέλη και αυτά έχουν να κάνουν με την αιωνιότητα του κόσμου, το αδύνατο της κίνησης στο κενό, τον συσχετισμό της κινούσας δύναμης με την κίνηση, την διανυόμενη απόσταση, τον χρόνο και την αντίσταση του υλικού μέσου. Ο Αριστοτέλης όπως έχει αναφερθεί θεωρούσε ότι κατά την πτώση των σωμάτων ο χρόνος είναι αντιστρόφως ανάλογος των βαρών των σωμάτων. Ο φιλόπονος διατύπωσε την θέση, η οποία στηρίζεται σε πειράματα που έκανε, ότι ο χρόνος πτώσης για σώματα με μικρή διαφορά βάρους σε μέσο που έχει αντίσταση, θα είναι σχεδόν ο ίδιος (Varvoglis, 2014).

Επίσης ξεχωριστή σημασία για την Ιστορία Φυσικών Επιστημών έχει η κριτική που έκανε ο Φιλόπονος στην αριστοτελική θεωρία της αντιπερίσπασης. Ένα γνωστό παράδειγμα που αποδίδεται στον Αριστοτέλη για να υποστηρίξει τη συγκεκριμένη θεωρία είναι αυτό του βέλους που εκτοξεύεται από την χορδή του τόξου. Το βέλος απομακρυνόμενο από την χορδή, συνεχίζει να κινείται εξαιτίας του αέρα που διαδραματίζει τον ρόλο του κινούντος και καθώς απωθείται από το μπροστινό μέρος του βέλους μετακινείται στη συνέχεια πίσω από αυτό.

Ο Φιλόπονος επικαλείται συντριπτικά επιχειρήματα από την καθημερινή εμπειρία για να απορρίψει την θεωρία του Αριστοτέλη και διατυπώνει ότι η κίνηση του βέλους αφού απομακρυνθεί από τη χορδή οφείλεται σε μια ωθητική δύναμη που εντυπώνεται σε αυτό από αυτή. Μια παρόμοια ιδέα για ωθητική δύναμη είχε εκφράσει και ο Ίππαρχος παλιότερα. Ο αέρας λοιπόν στο συγκεκριμένο παράδειγμα (βλ. εικόνα 1.13) όχι μόνο δεν κινεί το βέλος αλλά προβάλλει και αντίσταση στην κίνηση του. Αιτία της κίνησης είναι η κινητική δύναμη που μεταφέρεται στο βέλος, η οποία μετατρέπεται σε εσωτερικό στοιχείο του κινούμενου

σώματος και διαρκεί μέχρι να εξαντληθεί τόσο από το βάρος του αέρα, όσο και από το βάρος του σώματος (Narlikar, 1999).



*Εικόνα 1.13 Ένα βέλος αν ριφθεί οριζόντια πέφτει πιο μακριά σε σχέση με την κάθετη ρίψη του. Αυτό το παράδειγμα αντικρούει την αριστοτελική άποψη περί ώθησης του αέρα (Narlikar, 1999).*

Ο Φιλόπονος εδώ εκτός από το γεγονός ότι εισάγει την έννοια της δύναμης και της ενέργειας προσεγγίζει και τη σύγχρονη ιδέα της αδράνειας. Οι ιδέες του και η μεθοδολογία των συμπερασμάτων του ήταν επαναστατικές για την εποχή και είχαν μεγάλη απήχηση στους αραβικούς φιλοσόφους αλλά και στους δυτικούς λόγιους κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα (Boccalletti, 2016).

Κατά τη βυζαντινή περίοδο η αστρονομία ανανεώθηκε χάρη στις περσοαραβικές επιδράσεις ενώ η πραγματική ανάπτυξη επιτεύχθηκε από τους λόγιους της Τραπεζούντας που συνέκριναν και συνέθεσαν τα συγγράμματα των Αρχαίων Ελλήνων με έργα των Περσών και των Πρώσων βασισμένα μεν στον Πτολεμαίο αλλά και εμπλουτισμένα με νεότερες παρατηρήσεις.

Η χιλιετία που παρεμβάλλεται ανάμεσα από την πτώση της Ρώμης και την επιστημονική επανάσταση του 16ου και 17ου αιώνα χαρακτηρίζεται από διανοητική στασιμότητα, έντονη θρησκοληψία και έλλειψη νέων ιδεών. Αυτή η χρονική περίοδος δεν είναι άλλη από τον Μεσαίωνα, κατά τη διάρκεια του οποίου τα επιτεύγματα της αρχαία και ελληνιστικής αστρονομίας διατηρήθηκαν και βελτιώθηκαν σε κάποιες περιπτώσεις στα πνευματικά κέντρα του Ισλάμ και των Ευρωπαϊκών πανεπιστημίων. Αυτή η προσπάθεια συνίσταται στη μετάφραση και διάσωση έργων του Αριστοτέλη, του Πλάτωνα, του Ευκλείδη και του Πτολεμαίου από Άραβες αστρονόμους και μαθηματικούς (Vigoureux, 2006).

Η αραβική επιστήμη αναπτύχθηκε κυρίως στη Βαγδάτη, την Αίγυπτο, το Μαρόκο και άλλες περιοχές της Περσίας και της κεντρικής Ασίας. Οι Άραβες σημείωσαν μεγάλες

επιτυχίες στην μαθηματική επιστήμη με την εισαγωγή της Άλγεβρας, αλλά δεν είχαν τα χαρακτηριστικά της σκέψης του Φιλοσόφου, όπως αυτή αποτυπώθηκε από τους αρχαίους Έλληνες. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι ο Αλ-Χουαρίζμι, που χρησιμοποιώντας ινδουιστικά δεδομένα συνέταξε αστρονομικούς πίνακες και ο Αλ-Φαργκάνι, ο οποίος έγραψε μια περιληπτική εκδοχή της Αλμαγέστης συμπληρώνοντας και κάποια δικά του στοιχεία.

Ο Αλ-Μπατανί, αστρονόμος της βόρειας Μεσοποταμίας, μέτρησε με ακρίβεια τη γωνία ανάμεσα στη διαδρομή του Ήλιου στον ζωδιακό και τον ουράνιο ισημερινό καθώς και τη διάρκεια των εποχών και του έτους, υπολογίζοντας παράλληλα τη μετάπτωση των ισημεριών. Επίσης εισήγαγε από την Ινδία το τριγωνομετρικό μέγεθος του ημιτόνου και αυτό αποδεικνύεται από τις αναφορές που κάνει στο έργο του ο Κοπέρνικος αργότερα.

Ο Αλ-Μπιρουνί διερεύνησε την περιστροφή της Γης περί του άξονα της και υπολόγισε με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον Ερατοσθένη την περιφέρεια της. Ακόμη ασχολήθηκε με υπολογισμούς γεωγραφικών μηκών και πλατών αρκετών πόλεων καθώς και με μετρήσεις του ειδικού βάρους στερεών και ρευστών.

Ο Αλ-Ζαρκαλί τον 11ο αιώνα δρώντας στο Τολέδο της μουσουλμανικής Ισπανίας υπολόγισε τη μετάπτωση της φαινομενικής τροχιάς του Ηλίου γύρω από τη Γη και συνέταξε τους γνωστούς πίνακες του Τολέδου, αποτελώντας ορόσημο στην Ιστορία της αστρονομίας. Ο υπολογισμός της μετάπτωσης στα 12,9 δευτερόλεπτα του τόξου ανά έτος αφορά επί της ουσίας την τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο, φαινόμενο που οφείλεται, με βάση τα σημερινά δεδομένα, στη βαρυτική έλξη ανάμεσα στη Γη και τους άλλους πλανήτες (Weinberg, 2016).

Οι αστρονόμοι Αλ-Τουσί και Αλ-Σατίρ επέκτειναν τις γνώσεις σχετικά με τη σφαιρική γεωμετρία και τη θεωρία των πλανητικών κινήσεων. Ο πρώτος μελέτησε την κίνηση της σφαίρας των απλανών και ο δεύτερος αξιοποιώντας τις γνώσεις του αντικατέστησε τον εξισωτή του Πτολεμαίου με ένα ζεύγος επίκυκλων, γνωστό ως «ζεύγος Τουσί», ικανοποιώντας ταυτόχρονα το αίτημα για ομαλή κυκλική κίνηση των πλανητών. Αυτή η παρέμβαση θα ήταν αρκετή για να αντιμετωπιστούν οι περιπλοκές που οφείλονταν στις ελλειπτικές τροχιές των πλανητών και την έκκεντρη θέση του Ήλιου, αλλά δεν το γνώριζαν ούτε αυτοί ούτε ο Κοπέρνικος στη συνέχεια (Narlikar, 1999).

Τέλος δυο Ινδοί αστρονόμοι του 5ου αιώνα μ.Χ. ο Αριαμπάτα και ο Βραχμαγκούπτα παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τα έργα τους στην αστρονομία και τα μαθηματικά. Ο Αριαμπάτα ανέπτυξε ένα ηλιοκεντρικό σύστημα και αντιτέθηκε στην ιδέα της ακίνητης Γης, υποστηρίζοντας ότι η κίνηση των απλανών αστερών είναι μια ψευδαίσθηση που οφείλεται

στην ημερήσια περιστροφή της Γης. Ο Βραχμαγκούπτα από την άλλη είναι από τους πρώτους που προσδιόρισε τη βαρύτητα ως ελκτική δύναμη που οδηγεί τα σώματα στο φυσικό τους τόπο, χρησιμοποιώντας τον όρο «έλξη του βάρους». Επίσης ήταν υπέρμαχος του πλανητικού μοντέλου του Αραμπιάτα και συνέβαλε σε πολλούς υπολογισμούς εκλείψεων και μεταβαλλόμενων θέσεων των πλανητών (Anjum & Mishra, 2020; Kochhar, 2010).

Οι Ευρωπαίοι στις αρχές του Μεσαίωνα όντας επικεντρωμένοι στις θεοκρατικές αντιλήψεις της εποχής δεν γνώριζαν τίποτα για τα επιστημονικά επιτεύγματα των Αρχαίων Ελλήνων. Σε αυτό το πλαίσιο ο Ζαν Μπουριντάν γεννήθηκε το 1296 στη Γαλλία και πέρασε μεγάλο μέρος της ζωής του ως κληρικός στο Παρίσι. Μάλιστα εκλέχθηκε δυο φορές πρότανης του ομώνυμου πανεπιστημίου και έχοντας νοοτροπία εμπειριστή, απέρριπτε τη λογική αναγκαιότητα των επιστημονικών αρχών.

Αν και δεν πραγματοποίησε πειράματα, έδινε μεγάλη έμφαση στην καθημερινή παρατήρηση και άσκησε μεγάλη κριτική στην εξήγηση της οριζόντιας κίνησης του Αριστοτέλη. Αναφερόμενος στο παράδειγμα της κίνησης του βέλους, αφού εκτοξευτεί από το τόξο, υποστήριξε ο περιβάλλον αέρας αντιστέκεται στην κίνηση του βέλους παρά συμβάλλει σε αυτή. Έτσι διατύπωσε τη θεωρία της ώθησης, παρόμοια με αυτή του Φιλόπονου και προάγγελος του φυσικού μεγέθους της ορμής, το οποίο θα οριστεί ξεκάθαρα από τον Νεύτωνα αργότερα. Ο Μπουριντάν συμφωνούσε με την ιδέα του Αριστοτέλη ότι υπάρχει κάτι που διατηρεί την κίνηση αλλά δεν ήταν ο αέρας όσο η αφηρημένη έννοια της ώθησης που όριζε ως ποσότητας δύναμης που απαιτείται για να σταματήσει ένα κινούμενο σώμα σε ένα πεπερασμένο χρόνο. Σημαντικό είναι επίσης ότι επέκτεινε την ιδέα της ώθησης και την κυκλική κίνηση, υποθέτοντας ότι οι πλανήτες διατηρούν την κίνηση τους λόγω της ώθησης που τους δίνεται από τον Θεό. Με αυτό τον τρόπο πέτυχε και ένα συμβιβασμό της επιστήμης με τη θρησκεία, ωστόσο σήμερα είναι γνωστό ότι η διατήρηση της ορμής από μόνη της δεν θα ήταν ικανή να συγκρατήσει τους πλανήτες σε καμπύλες τροχιές αλλά θα απαιτούνταν μια πρόσθετη δύναμη που θα αναγνωρισθεί από τον Νεύτωνα και είναι αυτή της βαρύτητας (Boccalletti, 2016; Narlikar, 1999).

Επιπροσθέτως ο Μπουριντάν υποψιαζόταν την ιδέα της ημερήσιας περιστροφής της Γης από τη Δύση προς την Ανατολή, η οποία παλιότερα είχε διατυπωθεί από τον Ηρακλείδη. Υπέθεσε ότι όπως ο ουρανός περιστρέφεται γύρω από την ακίνητη Γη, θα μπορούσε να ισχύει και το αντίθετο χωρίς να έχει κάποια συνέπεια στις παρατηρήσεις. Τελικά όμως απέρριψε την ιδέα αυτή στηριζόμενος στη λογική ότι ένα βέλος εκτοξευτεί κατακόρυφα προς τα πάνω, θα έπεφτε δυτικά του τοξοβόλου, επειδή η Γη θα είχε μετακινηθεί προς την φορά της κίνησης του. Ειρωνεία εδώ αποτελεί το γεγονός ότι ο Μπουριντάν λαμβάνει υπόψιν



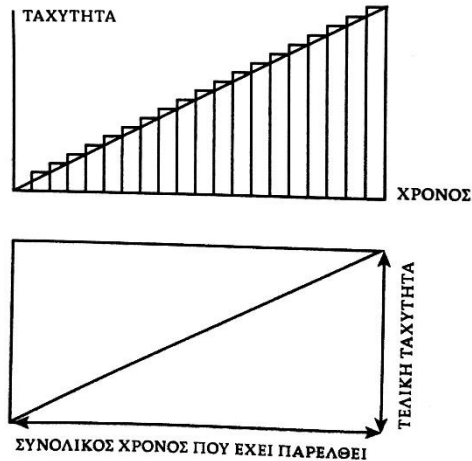
μόνο την κάθετη συνισταμένη του βέλους και όχι την οριζόντια λόγω περιστροφής της Γης με αποτέλεσμα να οδηγηθεί σε αυτό το λογικό σφάλμα (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Τέλος ο Μπουριντάν απέρριψε την ιδέα της ύπαρξης του κενού στηριζόμενος σε εμπειρικά παραδείγματα που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική πίεση, χωρίς όμως να είναι γνωστή τότε ακόμη. Όπως και να έχει η έννοια της ώθησης έγινε αποδεκτή εκείνη την εποχή και άσκησε μεγάλη επιρροή στους μετέπειτα επιστήμονες μέχρι την εποχή του Γαλιλαίου (Weinberg, 2016).

Το έργο του Μπουριντάν συνεχίστηκε από τον Αλβέρτο της Σαξονίας και τον Νικόλαο Ορέσμιο. Ο Ορέσμιο ήταν φιλόσοφος, μαθηματικός και επίσκοπος της Νορμανδίας και αρχικά υποστήριξε την περιστροφή της Γης, αναφερόμενος στο παράδειγμα του βέλους του Αριστοτέλη. Σύμφωνα με αυτή την ιδέα το βέλος μαζί με τον τοξοβόλο, όπως και καθετί πάνω στη Γη μετακινούνται μαζί της εξαιτίας της ημερήσιας κίνησής της. Ωστόσο την ιδέα αυτή την εγκατέλειψε αργότερα για θρησκευτικούς λόγους. Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι προέβλεψε και μια πτυχή της βαρυτικής θεωρίας του Νεύτωνα λέγοντας ότι η κίνηση των βαρέων σωμάτων δεν έχει πάντα κατεύθυνση προς τη Γη σε περίπτωση που βρίσκεται κοντά σε άλλο ουράνιο σώμα (Hecht, 2019).

Τον 12ο αιώνα μ.Χ. στην Οξφόρδη της Αγγλίας ιδρύθηκε από τον Λόρδο Ουόλτερ Μέρτον ένα κολλέγιο, στο οποίο εκπονήθηκε τον 14ο αιώνα το θεώρημα της μέσης ταχύτητας. Το έργο αυτό αποτελεί την πρώτη μαθηματική περιγραφή της μεταβαλλόμενης κίνησης. Ήδη ο Ουίλιαμ Χεϊτςμπερί είχε προσδιορίσει την ομαλή επιτάχυνση ως κίνηση με μεταβαλλόμενη ταχύτητα που αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό σε ίσα χρονικά διαστήματα.

Το θεώρημα Μέρτον καθορίζει ότι στην περίπτωση της ομαλής επιταχυνόμενης κίνησης η απόσταση που διανύεται σε ένα χρονικό διάστημα είναι ίση με αυτή που θα είχε διανύσει αν το σώμα κινούνταν με το μέσο όρο της πραγματικής ταχύτητας (Boccalletti, 2016). Το θεώρημα αυτό αποδείχθηκε από τον Ορέσμιο με έναν ενδιαφέρων γεωμετρικό τρόπο(βλ. εικόνα 1.14), συνδέοντας τον υπολογισμό της απόστασης με τον υπολογισμό του εμβαδού του ορθογωνίου τριγώνου που προκύπτει από την αναπαράσταση σε άξονες συντεταγμένων της ταχύτητας και του χρόνου. Κατά τον Weinberg εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι δεν εφαρμόστηκε το θεώρημα αυτό στην κίνηση των σωμάτων με ελεύθερη πτώση. Ήταν γνωστό από τον Στράτωνα ότι τα σώματα που πέφτουν ελεύθερα επιταχύνονται προς τα κάτω, όμως δεν ήταν προφανές ότι η ταχύτητα ενός σώματος στην περίπτωση αυτή αυξάνεται με τον χρόνο και όχι με την απόσταση (Weinberg, 2016).



*Εικόνα 1.14 Η μέθοδος του Ορέσμιου σχετικά με το θεώρημα της μέσης ταχύτητας (Weinberg, 2016).*

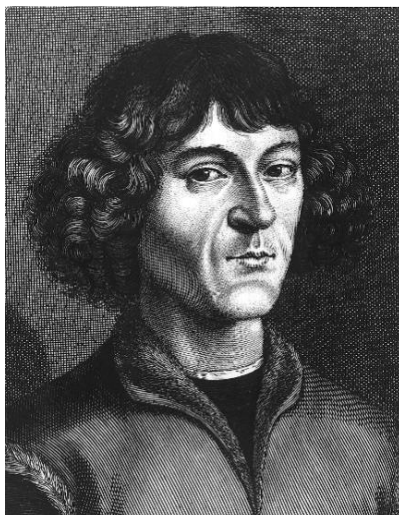
Αργότερα ο Εκατονταετής πόλεμος ανάμεσα στη Γαλλία και την Αγγλία θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά της επιστημονικής δράσης από τις εμπλεκόμενες χώρες στην Γερμανία και την Ιταλία κυρίως. Εκείνη την εποχή επίσης παρατηρείται ένας διαχωρισμός των μαθηματικών και αστρονόμων, οι οποίοι ακολουθούν το Πτολεμαϊκό μοντέλο και των γιατρών-φιλοσόφων που τάσσονται υπέρ της θεωρίας του Αριστοτέλη. Το μοντέλο των ομόκεντρων σφαιρών του Αριστοτέλη ενέχει το σφάλμα της τοποθέτησης των αστερών στην ίδια απόσταση από τη Γη, πράγμα το οποίο δεν μπορούσε να εξηγήσει την αυξομείωση της λαμπρότητας τους καθώς κινούνται γύρω από τη Γη. Τουναντίον, το Πτολεμαϊκό μοντέλο αδυνατούσε να εξηγήσει με μαθηματικό τρόπο την λαμπρότητα της θεωρούμενης τότε αυτόφωτης Αφροδίτης και μέχρι την εποχή του Γαλιλαίου δεν θα επιλυθεί. Τελικά η αντιπαράθεση των δυο αστρονομικών θεωριών με τις ιδέες μελετητών που επανέφεραν στο προσκήνιο τις ιδέες του Αρίσταρχου, έλαβε μεγάλες διαστάσεις τότε αν και σε γενικές γραμμές επικρατούσε η αντίληψη της περιφοράς των ουράνιων σωμάτων γύρω από την ακίνητη Γη (T.Cushing, 2003).

## **1.7 Το ηλιοκεντρικό σύστημα του Κοπέρνικου**

Η Επιστημονική επανάσταση τον 16ο και 17ο αιώνα μ.Χ. επηρεάστηκε από τα πνευματικά κινήματα της Αναγέννησης και του Διαφωτισμού συντελώντας σε αλλαγές σε όλα τα πεδία της Φυσικής, οι οποίες με την σειρά τους έδωσαν σε αυτή τη σημερινή της μορφή. Μέχρι τότε η Επιστήμη στηριζόταν σε θεολογικές και φιλοσοφικές αρχές ενώ παράλληλα δεν είχε αυστηρά προσδιορισμένη σχέση με τα Μαθηματικά. Από τον 17ο αιώνα και έπειτα όμως, η Φυσική και η Αστρονομία αναζητά απρόσωπους νόμους εκπεφρασμένους με μαθηματικό

τρόπο, που επιτρέπουν ακριβείς προβλέψεις για ένα ευρύ φάσμα φαινομένων. Επίσης σημαντικό προαπαιτούμενο για οποιαδήποτε θεωρία αποτελούσε η δυνατότητα επαλήθευσης των υποθέσεων και των προβλέψεων με την παρατήρηση αλλά και το πείραμα.

### 1.7.1 Σύντομη βιογραφία



*Εικόνα 1.15 Προσωπογραφία του Κοπέρνικου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).*

Όλη αυτή η προσπάθεια ξεκίνησε με τον Νικόλαο Κοπέρνικο, ο οποίος γεννήθηκε στην Πολωνία το 1473. Παρά το γεγονός ότι έχασε τον πατέρα του όταν ήταν 10 χρονών, δέχτηκε μεγάλη στήριξη από τον θείο του, που ήταν αρχιεπίσκοπος στην Βαρμία. Σπούδασε αρχικά στο πανεπιστήμιο της Κρακοβίας και είχε την δυνατότητα να ασχοληθεί με την αστρονομία, κάνοντας παρατηρήσεις ως βοηθός του γνωστού για την εποχή αστρονόμου Νοβάρα. Αργότερα μετακόμισε στην Ιταλία και συγκεκριμένα στην Μπολόνια, όπου ανακηρύχθηκε ιερέας του εκκλησιαστικού συμβουλίου του Φραούενμπεργκ, εξασφαλίζοντας έτσι κάποια χρήματα από τη εκτέλεση των εκκλησιαστικών καθηκόντων του. Εν συνεχεία σπούδασε Νομική στο πανεπιστήμιο της Φεράρας και Ιατρική στην Πάντοβα, ενώ το 1510 επέστρεψε στην Πολωνία και κατασκεύασε ένα μικρό αστεροσκοπείο για να κάνει κάποιες αστρονομικές παρατηρήσεις. Αυτές αποτέλεσαν αφορμή για την συγγραφή του έργου του «Μικρή Ερμηνευτική Πραγματεία» σχετικά με τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων.

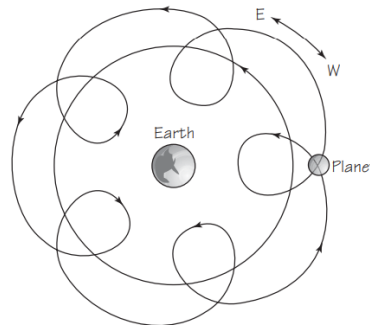
Μέσα από αυτές τις υποθέσεις και παρατηρήσεις πρότεινε ένα ηλιοκεντρικό σύστημα το οποίο περιγράφεται λεπτομερώς στο επόμενο έργο του με τίτλο «De revolutionibus», που ολοκληρώθηκε το 1543. Σε αυτό το έργο, το οποίο ο Κοπέρνικος αφιέρωσε στον Πάπα Παύλο τον Γ' παρουσίασε τα πλεονεκτήματα του ηλιοκεντρικού μοντέλου έναντι του Πτολεμαϊκού τεκμηριώνοντας απόψεις που είχε εκφράσει στην «Μικρή Ερμηνευτική Πραγματεία», η οποία σημειωτέων εκδόθηκε μετά τον θάνατό του. Από την άλλη

πλευρά το «De revolutionibus» εκδόθηκε χάρι στην συμβολή δυο ιερέων, του Ρέτικους και του Οσιάντερ, οι οποίοι το παρουσίασαν ως μια υποθετική εργασία, για να επιλυθούν ορισμένες δυσκολίες του γεωκεντρικού συστήματος.

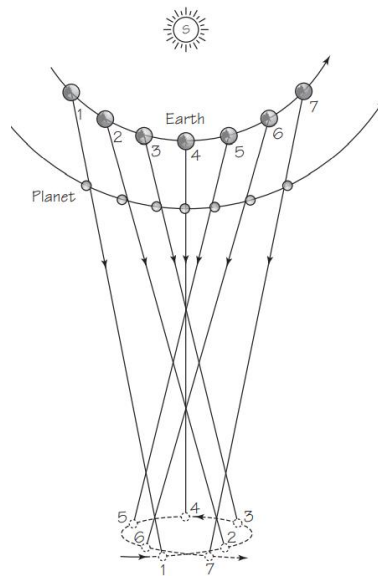
Αργότερα όμως το κοπερνίκειο σύστημα συνάντησε αντιδράσεις κυρίως από τους υποκινητές της προτεσταντικής μεταρρύθμισης τον Λούθηρο και τον Καλβίνο. Αυτοί θεώρησαν τις ιδέες του Κοπέρνικου αιρετικές, επικαλούμενοι χωρία της Αγίας Γραφής περί ακινησίας της Γης. Για αρκετό καιρό και τα δυο έργα του Κοπέρνικου είχαν συμπεριληφθεί στα «απαγορευμένα βιβλία» της Καθολικής εκκλησίας και χαρακτηριστικό παράδειγμα του θρησκευτικού φανατισμού της εποχής αποτέλεσε η εκτέλεση το 1600 από την Ιερά Εξέταση του Ιταλού ιερέα Τζορνάνο Μπρούνο, που τόλμησε να υπερασπιστεί, εκτός των άλλων, και τις κοπερνίκειες ιδέες (Singham, 2007; Τριανταφυλλόπουλος, 1999; Vigoureux, 2006).

### 1.7.2 Η περιγραφή του Κοπερνίκειου συστήματος

Ο Νικόλαος Κοπέρνικος διατύπωσε στα έργα του κάποιες επαναστατικές για την εποχή υποθέσεις, που προέκυψαν από αστρονομικές παρατηρήσεις του ίδιου. Σύμφωνα με αυτές κοινό κέντρο όλων των τροχιών των ουράνιων σωμάτων αποτελεί ο Ήλιος, ενώ παράλληλα το κέντρο της Γης δεν είναι το κέντρο του σύμπαντος αλλά μόνο το κέντρο της Σελήνης και της έλξης των γήινων σωμάτων της επιφάνειας της. Επίσης όλα τα ουράνια σώματα εκτός της Σελήνης περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο εκτελώντας ομαλή κυκλική κίνηση. Η φαινόμενη κίνηση των άστρων από τους γήινους παρατηρητές οφείλεται στην ημερήσια περιστροφή της Γης περί του άξονα της, ενώ η φαινόμενη κίνηση του Ήλιου οφείλεται στην διπλή κίνηση όχι μόνο της Γης αλλά και όλων των πλανητών. (βλ. εικόνες 1.16, 1.17) Επιπροσθέτως η απόσταση Γης-Ηλίου είναι μικρότερη σε σχέση με την απόσταση Γης-απλανών αστερών και οι ανάδρομες κινήσεις συμβαίνουν όταν ο Άρης, ο Δίας και ο Κρόνος κινούνται παράλληλα με τη Γη ή όταν ο Ερμής και η Αφροδίτη διασχίζουν την τροχιά της (Grego & Mannion, 2010; Milsom, 2018).



**Εικόνα 1.16** Η ερμηνεία της ανάδρομης κίνησης ενός πλανήτη βάσει του πτολεμαϊκού μοντέλου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).



**Εικόνα 1.17** Η ερμηνεία της ανάδρομης κίνησης ενός πλανήτη βάσει του κοπερνίκειου μοντέλου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Μέσα από αυτές τις ιδέες αναβιώνεται το ηλιοκεντρικό σύστημα του Αρίσταρχου, όμως ο Κοπέρνικος δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει μαθηματικά τα δεδομένα του σε σχέση με το επικρατές Πτολεμαϊκό μοντέλο. Το πλεονέκτημα της Κοπερνίκειας θεωρίας ήταν ότι εξηγούσε με απλό τρόπο πληθώρα φαινομένων χωρίς να κάνει προσαρμογές κέντρων και επίκυκλων. Στο Πτολεμαϊκό μοντέλο η φαινόμενη κίνηση των πλανητών εξαρτάται από την αναλογία των ακτινών του επίκυκλου και του φέροντος κύκλου για κάθε πλανήτη. Έτσι τα μεγέθη των πλανητών υπολογίζονται από μια σύμβαση που είναι αυθαίρετη. Ο Κοπέρνικος από την άλλη θεώρησε ότι η αναλογία της ακτίνας της κάθε πλανητικής τροχιάς ως προς την τροχιά της Γης έπρεπε να είναι συγκεκριμένη. Με αυτή τη βάση η σειρά των πλανητών όσο απομακρυνόμαστε από τον Ήλιο έπρεπε να συμπίπτει με την αύξουσα σειρά των τροχιακών περιόδων τους. Πρώτα τοποθετεί τον Ερμή με ετήσια περιφορά διάρκειας 3 μηνών,

έπειτα την Αφροδίτη με 9 μήνες, μετά τη Γη με 1 έτος, μετά τον Άρη με 2,5 έτη, τον Δία με 12 έτη και τελευταίο τον Κρόνο με 30 έτη (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Modinos, 2014; Vigoureux, 2006).

Ο Κοπέρνικος αφού δεν ήταν δυνατόν να υπολογίσει την ταχύτητα περιφοράς του κάθε πλανήτη, έκανε την εύλογη υπόθεση ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τροχιά του καθενός τόσο πιο αργά περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο, μια πρόταση όμως που δεν βασίζεται σε επιστημονικά κριτήρια και πειραματικές αποδείξεις. Ένα άλλο σημείο, άξιο αναφοράς αποτελεί η απόρριψη της ιδέας του εξισωτή μένοντας συγχρόνως πιστός στην απαίτηση για ομαλή κυκλική κίνηση. Αυτό φυσικά το πέτυχε με την εισαγωγή περισσότερων επικύκλων για κάθε πλανήτη και συγκεκριμένα 6 για τον Ερμή, 3 για την Σελήνη, και 4 για την Αφροδίτη, τον Άρη, τον Δία και τον Κρόνο (T.Cushing, 2003).

Συνοπτικά σύμφωνα με τον Κοπέρνικο κάθε πλανήτη διαγράφει κυκλική τροχιά γύρω από τον Ήλιο με σταθερή ταχύτητα και κέντρο όλων τον ίδιο τον Ήλιο χωρίς κανένα επίκυκλο. Αυτό ισοδυναμεί με μια απλούστερη εκδοχή του Πτολεμαϊκού μοντέλου ορίζοντας ένα μόνο επίκυκλο για κάθε πλανήτη, κανένα για τη Γη και τον Ήλιο και αφαιρώντας τους έκκεντρους και τους εξισωτές. Μια τέτοια εικόνα όμως δεν θα συμφωνούσε με τις παρατηρήσεις λόγω του γεγονότος ότι οι τροχιές δεν είναι κύκλοι αλλά ελλείψεις, οι πλανήτες δεν περιφέρονται με σταθερή ταχύτητα και ο Ήλιος δεν είναι ακριβώς το κέντρο αλλά ένα άλλο σημείο έκκεντρο και γνωστό ως εστία. Ειρωνεία αποτελεί η υπόθεση ότι αν ο Κοπέρνικος είχε εισάγει ένα έκκεντρο και ένα εξισωτή για κάθε τροχιά συμπεριλαμβανομένης και της Γης, η συμφωνία με τα παρατηρούμενα δεδομένα θα ήταν εκπληκτική και πολύ δύσκολο να αποδομηθεί (Narlikar, 1999; Weinberg, 2016).

## 2 Κεφάλαιο 2. Η ανάδυση της βαρύτητας μέσα από την εκτέλεση πειραμάτων και ο προσδιορισμός της με τη χρήση των Μαθηματικών

### 2.1 Οι παρατηρήσεις του Τύχο Μπράχε

Το μοντέλο του Κοπέρνικου παρά την περιθωριοποίηση που υπέστη λόγω των ιδεών που αντιτίθενται στο θρησκευτικό οικοδόμημα της εποχής, άρχισε να αποκτά κύρος το 1551 εξαιτίας του Ράινχολντ, που το χρησιμοποίησε για να συνθέσει τους Πρωσικούς πίνακες, μέσω των οποίων επιτρέπονταν ο υπολογισμός των θέσεων των πλανητών σε οποιαδήποτε ημερομηνία. Οι βελτιώσεις τους σε σχέση με τους προγενέστερους Αλφόνσειους πίνακες στηρίζονταν όχι τόσο στην ανωτερότητα της κοπερνίκειας θεωρίας, όσο στην απλότητα του ηλιοκεντρικού μοντέλου που πρόσβευε. Το 1568 ο Κάσπαρ Πόισερ, καθηγητής της Βιτεμβέργης υποστήριξε ότι με κάποιους μαθηματικούς μετασχηματισμούς, θα ήταν εφικτή η επαναδιατύπωση της κοπερνίκειας θεωρίας ώστε να είναι συμβατή με την ακινησία της Γης. Αυτό θα επιτευχθεί αργότερα από ένα μαθητή του τον Τύχο Μπράχε.



Εικόνα 2.1 Το πορτρέτο του Τύχο Μπράχε (Milsom, 2018).

Ο Τύχο Μπράχε ήταν από τους πιο καλούς αστρονομικούς παρατηρητές στην Ιστορία μέχρι και την ανακάλυψη του τηλεσκοπίου. Γεννήθηκε στη Δανία το 1546 από οικογένεια ευγενών και σπούδασε στην Κοπεγχάγη έχοντας μεγάλο πάθος για την αστρονομία. Το 1560 προέβλεψε επιτυχώς μια μερική ηλιακή έκλειψη και πέρασε από πολλά πανεπιστήμια της Γερμανίας και της Ελβετίας στην προσπάθεια του να μελετήσει και να κατανοήσει τους

Πρωσικούς πίνακες. Το 1572 επέστρεψε στην δανική επαρχία Εκονέ, όπου παρατήρησε ένα νέο αστερισμό την Κασσιόπη. Με όργανα δικής του κατασκευής και με δική του μεθοδολογία ανακάλυψε ότι ο αστερισμός δεν παρουσίαζε την αναμενόμενη αστρική παράλλαξη λόγω της ημερήσιας περιστροφής της Γης. Έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αυτός βρίσκεται πολύ πιο πέρα από τη Σελήνη.

Το 1576 ο βασιλιάς της Δανίας Φρειδερίκος ο Β' έδωσε στον Τύχο την κυριότητα του νησιού Βεν στη Βαλτική θάλασσα. Επίσης του έδωσε οικονομική στήριξη για την κατασκευή ιδιωτικής κατοικίας και επιστημονικών εγκαταστάσεων. Με αυτό τον τρόπο ο Μπράχε έφτιαξε το Ουράνιμποργκ, ένα κτίριο που περιλάμβανε βιβλιοθήκη, αστεροσκοείο, εργαστήριο χημείας και τυπογραφείο. Το 1577 παρατήρησε ένα κομήτη, ο οποίος δεν είχε όπως και ο αστερισμός την παρατηρήσιμη αστρική παράλλαξη. Αυτό το γεγονός τον οδήγησε στην υπόθεση ότι περνάει από όλες τις ομόκεντρες σφαίρες του Αριστοτέλη ή τις αντίστοιχες του Πτολεμαίου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Vigoureux, 2006).

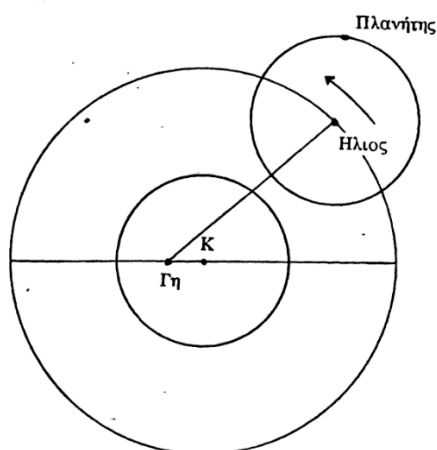
Ο διάδοχος του Φρειδερίκου Β', Χριστιανός Δ' δεν ενδιαφερόταν για την αστρονομία όσο ο προκάτοχος του, γεγονός που οδήγησε τον Μπράχε να εγκατασταθεί στην Πράγα, ως αυτοκρατορικός μαθηματικός του Ροδόλφου Β', της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας. Εκεί εργάστηκε για την δημιουργία ενός νέου συνόλου πινάκων, των Ροδόλφειων και μάλιστα είχε και στενή συνεργασία με τον Γιοχάνες Κέπλερ, ο οποίος μετά τον θάνατο του Μπράχε το 1601 συνέχισε το έργο.

Όσον αφορά το έργο του Μπράχε, παρόλο που δεν ήταν υπέρμαχος του κοπερνίκειου συστήματος, παρουσίασε μια προσωπική εκδοχή του συμπαντικού μοντέλου ως μέση οδό ανάμεσα στο ηλιοκεντρικό και το γεωκεντρικό σύστημα. Στο τυχόνειο σύστημα που δημοσιεύτηκε το 1588 η Γη θεωρείται ακίνητη και μη περιστρεφόμενη, ενώ ο Ήλιος και η Σελήνη περιφέρονται γύρω από αυτή. Οι υπόλοιποι πέντε γνωστοί πλανήτες της εποχής, όμως, περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο. Φυσικά η διατύπωση αυτή μόνο τυχαία δεν είναι αφού σκοπός των λεπτομερών παρατηρήσεων του ήταν ακριβώς να βρει απαντήσεις σε δεδομένα που δεν καλύπτονταν εξ' ολοκλήρου από τα δυο προϋπάρχοντα μοντέλα (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Αρχικά ο Τύχο Μπράχε με τις παρατηρήσεις του αστερισμού και του κομήτη καταρρίπτει την Αριστοτελική θεωρία της αμεταβλητότητας της υπερσελήνιας περιοχής, εφόσον αυτά τα αντικείμενα βρίσκονται με μετρήσεις μέσω της μεθόδου της παράλλαξης πολύ πέρα από τη Σελήνη. Επιπλέον η τυχονική θεωρία είναι πανομοιότυπη με το Πτολεμαϊκό μοντέλο στο σημείο όπου οι φέροντες κύκλοι των εσωτερικών πλανητών ταιριάζουν με την τροχιά του Ήλιου γύρω από τη Γη και οι επίκυκλοι των εξωτερικών πλανητών έχουν την ίδια ακτίνα



με την ίδια τροχιά. Οι ταχύτητες όμως των ουράνιων σωμάτων καθώς και οι γωνιακές αποστάσεις αντιστοιχούν με τη θεωρία του Κοπέρνικου, με τη διαφορά της ακινησίας του Ήλιου για τον Κοπέρνικο και της μη περιστρεφόμενης Γης για τον Μπράχε. Ένα επιπλέον σημείο είναι ότι κατέστησε την θεωρία του Ορέμ και του Μπουριντάν περιττή, καθώς ήταν ένα πρόβλημα που είχε απασχολήσει πολλούς μελετητές λόγω της περιστροφής της Γης (Grego & Mannion, 2010; Milsom, 2018).



**Εικόνα 2.2** Στο τυχόνειο σύστημα οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο σε επίκυκλους και εν συνεχεία μαζί με αυτούς γύρω από τη Γη (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).

Ένας λόγος που ο Μπράχε δεν αποδέχεται τον ηλιοκεντρισμό είναι οι θρησκευτικές του πεποιθήσεις και ένας άλλος ότι η ιδέα της κίνησης της Γης δεν συμφωνεί με την καθημερινή εμπειρία. Ακόμη δεν θεωρούσε σημαντικό να ασχοληθεί με ένα σύστημα που εν τέλει δεν είναι και πολύ πιο απλό από αυτό του Πτολεμαίου και έχει και σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις πραγματικές θέσεις των πλανητών. Άρα προκειμένου να κρατήσει τα προσχήματα και τις θρησκευτικές ιδεολογίες του τοποθετεί τον Ήλιο στο κέντρο του σύμπαντος αλλά η Γη παραμένει ταυτόχρονα το κέντρο του κόσμου. Μάλιστα προκειμένου να αποδείξει το δικό του σύστημα επιδίδεται σε καθημερινές μετρήσεις ακριβείας της θέσης των πλανητών και των ουράνιων σωμάτων με σκοπό να αποδείξει την ακινησία της Γης (Vigoureux, 2006).

Συμπερασματικά ο Τύχο Μπράχε δεν συνέβαλε στην αστρονομία για την θεωρία του, όσο για την πρωτοφανή, με βάση τα παρατηρητικά μέσα της εποχής, ακρίβεια των παρατηρήσεων και κυρίως για την περίπτωση του Άρη, που ο Κέπλερ θα αξιοποιήσει τα μέγιστα για να διατυπώσει τους νόμους του. Τέλος ένα άλλο σημείο που πρέπει να τονιστεί είναι η επιστημονική στάση και μεθοδολογία του Μπράχε ως προς τη λύση ενός φυσικού προβλήματος, που περιλαμβάνει ακριβείς μετρήσεις με αυστηρό τρόπο και όχι επικλήσεις θρησκευτικών και φιλοσοφικών ερμηνειών.

## 2.2 Οι νόμοι του Κέπλερ

### 2.2.1 Σύντομη βιογραφία

Ο ηλιοκεντρισμός δεν άλλαξε την παγιωμένη, από την εποχή του Αριστοτέλη, αντίληψη των ανθρώπων ότι ο ουρανός και η Γη διέπονται από διαφορετικούς φυσικούς νόμους. Επικρατεί ακόμη η άποψη ότι τα γήινα σώματα κατά την πτώση τους κινούνται ευθύγραμμα, ενώ τα ουράνια σώματα δεν εκτελούν κάποια πτώση και περιφέρονται αιώνια με σταθερή ταχύτητα σε κυκλικές τροχιές. Εκείνη την εποχή και συγκεκριμένα το 1571 ταξιδιώτες και έμποροι διαδίδουν ακόμη και στις επαρχίες το κατόρθωμα του Μαγγελάνου να κάνει το περίπλου της Γης, εδραιώνοντας την ιδέα της σφαιρικότητας της. Αυτή η ανακάλυψη σε συνδυασμό με την εφεύρεση της τυπογραφίας από τον Γουτεμβέργιο, επιτρέπουν την ταχεία διάδοση των ιδεών ανοίγοντας νέους ορίζοντες για την Ευρωπαϊκή Ιστορία (Weinberg, 2016).



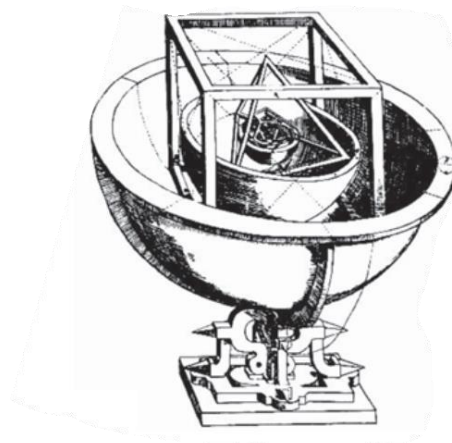
*Εικόνα 2.3 Έγχρωμη προσωπογραφία του Γιοχάνες Κέπλερ (Singham, 2007).*

Μέσα σε αυτό το κλίμα το 1571 γεννήθηκε ο Γιοχάνες Κέπλερ στο Βάλ ντερ Στατ της Γερμανίας. Έζησε δύσκολα και σκληρά παιδικά χρόνια αποτελώντας μέλος μιας πολύ-τεκνης οικογένειας που αντιμετώπιζε πολλά προβλήματα και δυστυχίες. Παρά τις αστάθειες της οικογένειας του τον τροφοδότησαν με πλούσιες γνώσεις για την αστρονομία, ενισχύοντας την περιέργεια του και την παρατηρητικότητα του. Με αυτόν τον τρόπο μεγαλώνει με αιχμηρή ευφύια, ανήσυχο πνεύμα και υπαρξιακές αναζητήσεις.

Στα είκοσι του χρόνια ο Κέπλερ σπούδασε στο πανεπιστήμιο του Τύμπιγκεν, ερχόμενος σε επαφή με το Κοπερνίκειο μοντέλο χάρη στον καθηγητή και αστρονόμο Μίκαελ Μεστλίν, πείθοντας τον παράλληλα για την ορθότητα του. Εν συνεχεία διορίζεται στο Γκράτς της Αυστρίας ως καθηγητής διδάσκοντας μαθηματικά. Εκεί ο Κέπλερ αποκτάει μεγάλη φήμη συντάσσοντας αστρολογικά ημερολόγια και κάνοντας προβλέψεις για τον καιρό

και τα πολιτικά. Αυτό όμως που πραγματικά τον ενδιαφέρει είναι να αποκωδικοποιήσει τον τρόπο λειτουργίας του ουράνιου στερεώματος (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Προχωράει έτσι στην συγγραφή του έργου «Κοσμολογικό Μυστήριο» στο οποίο κάνει μια γεωμετρική προσέγγιση των κινήσεων των πλανητών επηρεασμένος από την Πλατωνική και Πυθαγόρεια φιλοσοφία. Αρχικά συνέλαβε τις τροχιές των πλανητών όχι ως δυσδιάστατες αλλά ως λεπτές ουράνιες σφαίρες, με τις εσωτερικές και εξωτερικές ακτίνες να προσδιορίζουν την ελάχιστη και τη μέγιστη απόσταση από τον Ήλιο. Επίσης υπέθεσε ότι οι ακτίνες των σφαιρών είχαν την ιδιότητα να εγγράφονται στο εσωτερικό ενός από τα πέντε κανονικά στερεά, καταλαμβάνοντας χώρο έξω από αυτά. Έτσι η σφαίρα του Ερμή αντιστοιχούσε στο οκτάεδρο, της Αφροδίτης στο εικοσάεδρο, της Γης στο δωδεκάεδρο, του Άρη στο τετράεδρο, του Δία στον κύβο και του Κρόνου σε μια εφαπτόμενη σφαίρα σε αυτόν (Τριανταφυλλόπουλος, 1999).



*Εικόνα 2.4 Το μοντέλο του Κέπλερ μέσα από την ιδέα του ότι οι τροχιές των έξι γνωστών πλανητών μπορεί να προσδιοριστούν βάσει των πέντε κανονικών στερεών του Πλάτωνα (Milsom, 2018).*

Οι υπολογισμοί του Κέπλερ όμως δεν ανταποκρίνονται στις παρατηρήσεις, αλλά δεν απογοητεύεται καθώς είναι πεισματάρης και άνθρωπος που μαθαίνει γρήγορα από τα λάθη του. Συνειδητοποιώντας τη γεωμετρική ανεπάρκεια των υποθέσεων του στρέφεται στην ιδέα του Πυθαγόρα, αναζητώντας την μηχανική του σύμπαντος στους αριθμούς και τη μουσική αρμονία, που αυτοί εκφράζουν. Ωστόσο για να κάνει περαιτέρω διερεύνηση χρειάζεται εμπειρικά δεδομένα, τα οποία δεν έχει στην κατοχή του. Γι' αυτό το λόγο στέλνει αντίτυπα του έργου του στο Μεστλίν, τον καθηγητή μαθηματικών της Πάντοβας Γαλιλαίο και τον αστρονόμο Τύχο Μπράχε, αναλύοντας τη μεθοδολογία που ακολουθεί για να καταλήξει στα συμπεράσματά του. Οι δυο πρώτοι δεν δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το έργο του, σε αντίθεση με τον Μπράχε που ενθουσιάζεται και τον προσκαλεί στο Ουράνιμποργκ, αλλά ο Κέπλερ δεν μπορεί να υποστηρίξει οικονομικά το ταξίδι (Vigoureux, 2006).

Σύντομα όμως λόγω της θρησκευτικής διαμάχης στην Ευρώπη ο Κέπλερ μένει χωρίς δουλειά και μετακομίζει στην Πράγα δεχόμενος την πρόταση του Τύχο να δουλέψει ως βοηθός του. Οι χαρακτήρες των δυο αστρονόμων ήταν τελείως διαφορετικοί, από την μια ο Κέπλερ ήταν φτωχός και ταπεινός, ενώ ο Μπράχε πάμπλουτος και υπεροπτικός. Κοινό χαρακτηριστικό τους όμως ήταν η σχολαστικότητα και η λεπτολογία στο έργο τους, όπως και η συμπληρωματικότητα των επιδιώξεών τους. Ο Κέπλερ χρειάζεται ακριβή δεδομένα για να συνεχίσει το έργο του και ο Τύχο χρειάζεται ένα θεωρητικό για να αποδείξει την ορθότητα του συστήματος του.

Μετά τον θάνατο του Τύχο, διορίζεται ως βοηθός του ο Κέπλερ στη θέση του αυτοκρατορικού μαθηματικού και έχει πρόσβαση στο τεράστιο αρχείο από σχολαστικές και πολυετείς παρατηρήσεις του Δανού αστρονόμου. Ο Κέπλερ μετά από πολλά χρόνια αδιάκοπης εργασίας κυρίως λόγω των δυσκολιών της σύνθετης κίνησης του Άρη ομαδοποιεί και επεξεργάζεται τα δεδομένα που θα τον οδηγήσουν στην διατύπωση των τριών νόμων, που διέπουν τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων. Ακόμη μέσα σε πολύ δυσμενείς οικογενειακές και επαγγελματικές συνθήκες, δημοσιεύει τα έργα του «Νέα Αστρονομία» το 1609 και «Η Αρμονία του κόσμου» το 1619 ενώ ολοκληρώνει το 1627 τους Ροδόλφειους πίνακες, οι οποίοι υπερτερούν σε ακρίβεια σε σχέση με τους Πρωσικούς. Τέλος προέβλεψε το 1631 την διάβαση του Ερμή μπροστά από τον Ήλιο, παρατήρηση που δεν θα δει καθώς αναγκάζεται να εγκαταλείψει ως προτεστάντης την καθολική Αυστρία και πεθαίνει στο Ρέγκενσπουργκ από μια ασθένεια το 1630 (Weinberg, 2016).

Συνολικά μπορεί να ειπωθεί ότι το έργο του Κέπλερ συνδυαστικά με την θεωρία του Κοπέρνικου έδωσαν στο ηλιοκεντρικό σύστημα μια σημαντική θέση, βασιζόμενη στη μαθηματική απλότητα και συνάφεια και όχι τόσο στη μεγαλύτερη συμφωνία με τις παρατηρήσεις.

### 2.2.2 Ο τρόπος ανακάλυψης και η διατύπωση των νόμων του Κέπλερ

Ο Γιοχάνες Κέπλερ έχοντας στα χέρια του τις ακριβείς παρατηρήσεις του Τύχο Μπράχε προσπαθεί να βρει με μαθηματικό τρόπο μοτίβα στις κινήσεις των πλανητών, ώστε να καταλήξει σε συμπεράσματα που να ισχύουν για όλους. Με αυτό τον τρόπο θα έκανε πραγματικότητα το όνειρο του, που ήταν να ξεκλειδώσει τους νόμους της ουράνιας μηχανικής.

Ο Κέπλερ μελετώντας τα δεδομένα για την τροχιά του Άρη και προσπαθώντας με επιμονή να εξηγήσει τις ανωμαλίες στην κίνηση του, θα οδηγηθεί σε συλλογισμούς που και

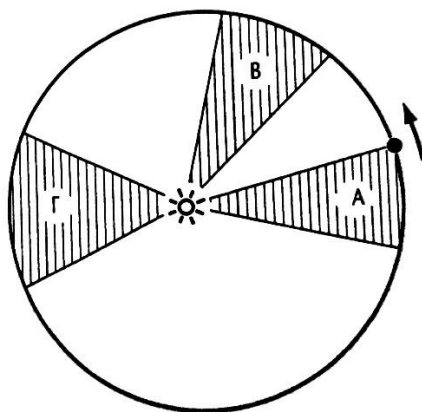
ο ίδιος θα δυσκολευτεί να αποδεχτεί. Οι δυσκολίες στην μελέτη του πλανήτη αυτού οφείλονται στην έντονη ελλειπτικότητα της τροχιάς του. Ο Κέπλερ για να αναλύσει την κίνηση του αρχικά χρησιμοποιεί το Πτολεμαϊκό σύστημα μέσω της χρήσης έκκεντρων κύκλων, που όμως οδηγούσαν σε κενά σημεία του ουρανού χωρίς φυσική σημασία. Το Κοπερνίκειο σύστημα από την άλλη δεν διέφερε σε αυτό το σημείο, καθώς δεν θεωρούσε ως κέντρο της τροχιάς της Γης τον Ήλιο. Έτσι ο Κέπλερ απορρίπτει και τα δυο και δίνει ο ίδιος ενεργό ρόλο στον Ήλιο θεωρώντας τον ως κέντρο της τροχιάς, έστω και να αυτός είναι λίγο έκκεντρος (T.Cushing, 2003).

Αν ο Άρης περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο, τότε θεωρείται απαιτούμενο για τον Κέπλερ ότι ο προσδιορισμός της θέσης του πρέπει να έχει ως σημείο αναφοράς τον ίδιο τον Ήλιο και όχι ένα σημείο κενό χωρίς φυσική σημασία. Η επιλογή του Ήλιου μαθηματικά δεν έχει μεγάλη σημασία είναι σημαντική όμως για την ερμηνεία της φυσικής συνοχής των πραγμάτων. Αυτή η απαίτηση δυσκολεύει τρομερά τους υπολογισμούς του αλλά είναι ταυτόχρονα και αυτή που θα τον οδηγήσει στην διατύπωση των τριών νόμων του.

Από τα δεδομένα του Τύχο ο Κέπλερ αντιλαμβάνεται ότι η κίνηση του Άρη δεν είναι ομοιόμορφη και ο Ήλιος, όντας έκκεντρος, ασκεί σε κάθε σημείο της τροχιάς του διαφορετική επίδραση που εξαρτάται από την απόσταση του Άρη από αυτόν. Έτσι παρατηρεί ότι ο Άρης επιταχύνει όταν βρίσκεται κοντά στον Ήλιο και επιβραδύνει όταν βρίσκεται μακριά του, όπως με τον ίδιο τρόπο μειώνεται η λαμπρότητα του φωτός με την απόσταση. Έπειτα από εξαιρετικά δύσκολους υπολογισμούς που βασίζονται σε αδιαμφισβήτητα δεδομένα ο Κέπλερ αποδεικνύει ότι η τροχιά του Άρη μπορεί να περιγραφεί από ένα κύκλο, η ακτίνα του οποίου προσδιορίζεται από τη θέση του Ήλιου και ένα σημείο που κινεί τον Άρη με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς ακόμη και στο απλούστατο Κοπερνίκειο σύστημα χρειάζονταν τουλάχιστον πέντε επίκυκλοι για να περιγραφεί η ίδια κίνηση. Ωστόσο ο Κέπλερ αδυνατεί να εξηγήσει τη γωνιακή διαφορά που παρατηρείται, αν και έχει εξετάσει όλες τις πιθανές διορθώσεις και τους παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση του Άρη. Αυτό τον οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι υπολογισμοί ενέχουν λάθη που οφείλονται σε εσφαλμένες υποθέσεις για την κίνηση της Γης, καθώς από εκεί κάνει τις παρατηρήσεις. Ούτε η ταχύτητα της Γης είναι λοιπόν σταθερή και χάνεται έτσι οποιοδήποτε σημείο αναφοράς αφού πλέον η τροχιά της Γης είναι άγνωστη (Ebison, 1993; Hecht, 2019).

Από τα παραπάνω το μόνο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι Γη και Άρης δεν έχουν σταθερή ταχύτητα αλλά εξαρτάται από την απόσταση τους από τον Ήλιο και συγκεκριμένα οι τιμές της στο περιήλιο και στο αφήλιο είναι αντιστρόφως ανάλογες της απόστασης. Μόλις έχει ανακαλύψει αυτό που είναι γνωστό ως ο δεύτερος νόμος του Κέπλερ ή

αλλιώς ο νόμος των εμβαδών. Αυτός διατυπώνεται ως εξής: Η ευθεία γραμμή που ενώνει ένα πλανήτη με τον Ήλιο διαγράφει επιφάνειες ίσων εμβαδών σε ίσους χρόνους ή αλλιώς Η ευθεία γραμμή ανάμεσα σε ένα πλανήτη και τη δεύτερη εστία περιφέρεται με σταθερή ταχύτητα, διαγράφοντας ίσες γωνίες στην μονάδα του χρόνου. Όπως γίνεται αντιληπτό η ανακάλυψη αυτή προϋποθέτει τον ίδιο τον Ήλιο ως πηγή των αποστάσεων και όχι το κενό κέντρο των τροχιών (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Grego & Mannion, 2010).



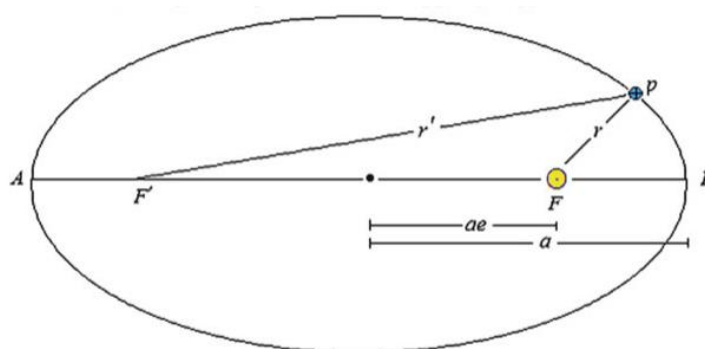
**Εικόνα 2.5** Ο δεύτερος νόμος του Κέπλερ επιβεβαιώνει ότι τα εμβαδά που σαρώνονται σε ίσους χρόνους από την επιβατική ακτίνα είναι ίσα. Ως εκ τούτου οι κυκλικοί τομείς A, B και Γ είναι ίσοι (Vigoureux, 2006).

Πάρα τη νέα πρόοδο οι υπολογισμοί του Κέπλερ για την τροχιά του Άρη, αποκλίνουν πολύ περισσότερο σε σχέση με τις παρατηρήσεις, πράγμα που τον οδηγεί σε απόγνωση για δεύτερη φορά. Η εμμονή του να βρει λύση και το πείσμα του θα τον ωθήσουν σε ένα νέο κύκλο δοκιμών και ελέγχων, αποτέλεσμα των οποίων θα είναι να πειστεί ότι πρέπει να εγκαταλειφθεί η ιδέα της κυκλικής τροχιάς των πλανητών. Εάν όμως οι τροχιές δεν είναι κύκλοι έπρεπε να είναι καμπύλες και για να μελετηθούν απαιτούν γνώση τριών σημείων σε σχέση με τον κύκλο. Τα δεδομένα του Μπράχε υπάρχουν οπότε θα χρειαστεί να εργαστεί πάνω από δυο χρόνια δοκιμάζοντας πολλά είδη τροχιών. Έως το 1603 οι προσπάθειές του δεν έχουν κάποιο αποτέλεσμα, ώσπου υποθέτει ότι οι τροχιές πρέπει να είναι τέλειες ελλείψεις έχοντας καταφύγει σε μελέτη των έργων του Απολλώνιου και του Αρχιμήδη. Τελικά δοκιμάζει πάνω από 180 θέσεις του Άρη και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι όντως η τροχιά του είναι ελλειπτική (Milsom, 2018; Vigoureux, 2006).

Η έλλειψη σύμφωνα με τους μαθηματικούς είναι ο γεωμετρικός τόπος σημείων των οποίων το άθροισμα των αποστάσεων από δυο σταθερά σημεία, τις εστίες, είναι σταθερό. Επίσης η έλλειψη περιγράφεται από δυο αριθμούς που αντιστοιχούν αφενός στο μήκος του μεγάλου άξονα, γνωστό και ως εκκεντρότητα, και αφετέρου στο μήκος του μικρού άξονα. Οι δυο εστίες της έλλειψης είναι σημεία πάνω στον μεγάλο άξονα που απέχουν άνισες αποστάσεις από το κέντρο της. Η απόσταση μεταξύ των εστιών ισούται με το γινόμενο της

εκκεντρότητας επί του μεγάλου άξονα της έλλειψης. Αυτό σημαίνει ότι μηδενική εκκεντρότητα αντιστοιχεί σε συγχώνευση των δυο εστιών σε ένα σημείο, αντιπροσωπεύοντας τον κύκλο (Χριστιανίδης , Διαλέτης, Παπαδόπουλος , & Γαβρόγλου, 2000). Έχοντας ο Κέπλερ όλα αυτά υπόψιν διατυπώνει αυτό που είναι γνωστό ως ο πρώτος νόμος του Κέπλερ ως εξής: Οι πλανήτες διαγράφουν κατά την κίνηση τους γύρω από τον Ήλιο ελλειπτικές τροχιές, των οποίων ο Ήλιος καταλαμβάνει τη μια από τις δυο εστίες.

Οι τροχιές των πλανητών έχουν μικρές εκκεντρότητες, δηλαδή ελάχιστα αποκλίνουν από τον κύκλο και αυτός είναι ο λόγος που οι απλουστευμένες θεωρίες ,αφενός του Κοπέρνικου, χωρίς επίκυκλους και αφετέρου του Πτολεμαίου με ένα επίκυκλο, δίνουν αρκετά καλά αποτελέσματα (Modinos, 2014).



**Εικόνα 2.6** Η δομή μιας ελλειπτικής τροχιάς. Στο σημείο  $F$  βρίσκεται ο Ήλιος και στο σημείο  $p$  ο πλανήτης.  $F'$  και  $F$  είναι οι εστίες της έλλειψης,  $A$  και  $P$  είναι το αφήλιο και το περιήλιο ενός πλανήτη αντίστοιχα ενώ  $a$  και  $r$  είναι ο μεγάλος ημιάξονας και η επιβατική ακτίνα αντίστοιχα. Το  $ae$  είναι η μετατόπιση από το κέντρο κάθε εστίας, όπου  $e$  είναι η εκκεντρότητα της έλλειψης (MacDougal, 2012).

Οι δυο πρώτοι νόμοι του Κέπλερ που μετά από πέντε χρόνια σκληρής δουλειάς διατυπώνει στην 'Νέα αστρονομία', έχουν κάποιες σημαντικές συνέπειες. Μια συνέπεια του πρώτου νόμου είναι ότι οι πλανήτες κινούνται σε ελεύθερες τροχιές στο κενό δίχως να είναι προσαρτημένοι σε περιστρεφόμενες σφαίρες, όπως πιστευόνταν μέχρι τότε. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός ότι οι κύκλοι μπορούν να παραχθούν από περιστροφή σφαίρας, ενώ οι ελλείψεις όχι. Μια άλλη συνέπεια είναι ότι ο εξισωτής του Πτολεμαίου δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια κενή εστία της έλλειψης. Έτσι ο Κέπλερ χάρη στα δεδομένα του Μπράχε εγκαταλείπει τους έκκεντρους τους εξισωτές και τις κυκλικές τροχιές. Ακόμη ο πρώτος νόμος ισχύει για όλα τα ουράνια σώματα που περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο, όχι μόνο για τους πλανήτες, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις μελέτες του Κέπλερ για τον κομήτη του 1572, χάρη στις σημειώσεις του Μπράχε (Modinos, 2014; T.Cushing, 2003).

Μια συνέπεια του δεύτερου νόμου του Κέπλερ είναι η διαπίστωση ότι όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος της τροχιάς ενός πλανήτη, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ταχύτητας του ανάμεσα στα σημεία του περιηλίου και του αφήλιου. Επίσης ο δεύτερος νόμος είναι

εφαρμόσιμος σε κάθε ουράνιο σώμα σε τροχιά αλλά και στο σύνολο των πλανητών. Επιπροσθέτως η γενίκευση του 2ου νόμου στην περιστροφική κίνηση οδηγεί στην αρχή διατήρησης της στροφορμής. Σήμερα τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από την κίνηση του Πλούτωνα και των κομητών, από τις επιλογές τροχιών των τεχνητών δορυφόρων, από τις θεωρίες για τις παλίρροιες και από περιπτώσεις σύνθλιψης αστερών όταν τελειώνουν τα πυρηνικά τους καύσιμα. Στην τελευταία περίπτωση όσο μικραίνει η ακτίνα του αστερά καθώς καταρρέει, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του περί του άξονά του (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Vigoureux, 2006).

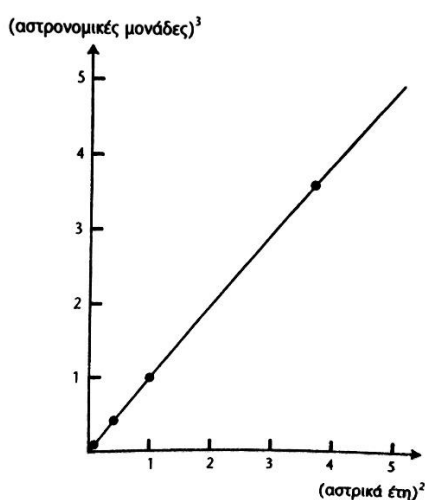
Ο δεύτερος νόμος του Κέπλερ έχει και μια τελευταία αλλά πολύ σημαντική συνέπεια, η οποία έγινε αντιληπτή από τον ίδιο τον Κέπλερ. Οι πλανήτες αφού αυξομειώνουν την ταχύτητα τους ανάλογα με την απόσταση τους από τον Ήλιο, πρέπει να κινούνται σε τροχιές λόγω κάποιας δύναμης που ασκείται από αυτόν. Ο Κέπλερ έχοντας εγκαταλείψει την επικρατούσα μέχρι τότε ιδέα της κινητήρια δύναμης του Θεού ως αιτία της περιφοράς των πλανητών, υποθέτει ότι ο Ήλιος έχει ενεργό ρόλο και ασκεί στους πλανήτες μια ελκτική μαγνητικού τύπου δύναμη από απόσταση και οι πλανήτες με μια δεύτερη δύναμη από την μεριά τους αντιστέκονται σ' αυτή την έλξη. Η ιδέα της εξ αποστάσεως δύναμης ήταν ήδη δημοφιλής τότε λόγω του έργου του Ουίλιαμ Γκίλμπερτ πάνω στην θεωρία του μαγνητισμού, γεγονός που θα βοηθούσε στην πιο εύκολη αποδοχή της ερμηνείας του Κέπλερ (Hecht, 2019).

Εν συνεχεία ο Κέπλερ παρά το γεγονός ότι είναι πεπεισμένος ότι οι δυο νόμοι που ανακάλυψε για τον Άρη είναι εφαρμόσιμοι σε όλα τα ουράνια σώματα, δεν εκφράζουν ένα γενικό νόημα για τη συνοχή του κόσμου, όπως την φανταζόταν. Μια τέτοια ενότητα θα απαιτούσε τα χαρακτηριστικά της τροχιάς ή της κίνησης ενός πλανήτη να έδιναν στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των άλλων πλανητών και θα μπορούσαν να γίνουν προβλέψεις για την μελλοντική τους κατάσταση. Ο Κέπλερ πιστεύει ότι η αρμονία του ουρανού κρύβεται στους αριθμούς των φυσικών ποσοτήτων των πλανητών και επιδιώκει να βρει την κρυμμένη αυτή σχέση. Μελετώντας τα δεδομένα αναρωτιέται αν υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ των αποστάσεων των πλανητών από τον Ήλιο και της διάρκειας του έτους τους, δηλαδή του χρόνου της πλήρους περιφοράς τους γύρω από αυτόν (Vigoureux, 2006).

Μια πρώτη παρατήρηση που κάνει είναι ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ένας πλανήτης τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια περιφοράς του γύρω από τον Ήλιο. Αυτό όμως αποτελεί απλά ένδειξη διάταξης και όχι έναν γενικευμένο νόμο που δείχνει τη σχέση μεταξύ τους. Στην συνέχεια σχηματίζει τους λόγους της διάρκειας περιφοράς των πλανητών και των αποστάσεων τους από τον Ήλιο και καταλήγει στο τρίτο νόμο του, ο οποίος διατυπώνεται το



1619 στην «Αρμονία του κόσμου» ως εξής: Για κάθε πλανήτη το τετράγωνο της διάρκειας του έτους του είναι ανάλογο προς τον κύβο του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς του γύρω από τον Ήλιο. Εναλλακτικά διατυπώνεται και ως: ο λόγος του τετραγώνου της αστρικής περιόδου ως προς τον κύβο του μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς είναι ίδιος για κάθε πλανήτη και ίσος με ένα σταθερό αριθμό. Ο μαθηματικός φορμαλισμός του νόμου αυτού έχει ως εξής:  $T^2/d^3 = 1$ , όπου  $T$  είναι η αστρική περίοδος ενός πλανήτη σε έτη και  $d$  το ήμισυ του μήκους μεγάλου άξονα της ελλειπτικής τροχιάς του σε αστρονομικές μονάδες (AU) (Weinberg, 2016).



**Εικόνα 2.7** Στο διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η σχέση αναλογίας που υπάρχει ανάμεσα στον κύβο του μεγάλου ημιάξονα των ελλειπτικών τροχιών των πλανητών, μετρημένων σε αστρονομικές μονάδες καθώς και του τετραγώνου της περιόδου περιφοράς τους περί τον Ήλιο, σε αστρικά έτη (Vigoureux, 2006).

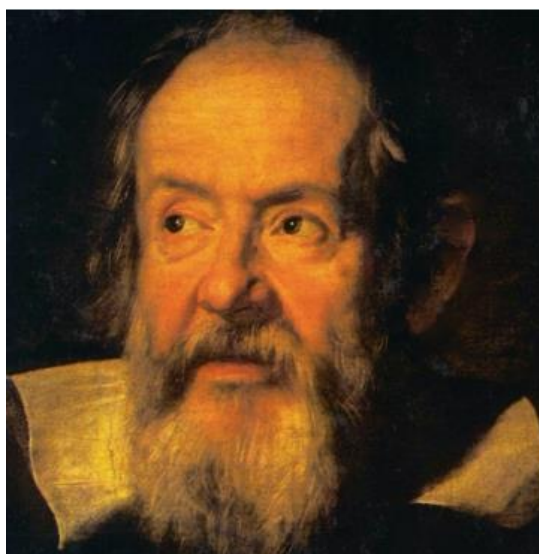
Ο Κέπλερ δεν γνωρίζει τη φυσική σημασία αυτού του νόμου και θα ενθουσιαζόταν αν μάθαινε ότι η σταθερός αυτός λόγος σχετίζεται με το άθροισμα της μάζας του Ηλίου και των υπό μελέτη πλανητών. Αυτό θα αποκάλυπτε όχι μόνο ότι ο Ήλιος δρα μέσω της μάζας του στους άλλους πλανήτες, αλλά και ότι σε ένα τροχιακό σύστημα το άθροισμα των μαζών των πλανητών, η αστρική περίοδος και το μήκος του μεγάλου ημιάξονα συναρτώνται. Αυτό εν τέλει θα σήμαινε ότι με την γνώση των δυο οποιονδήποτε παραπάνω παραμέτρων θα μπορούσε να βρεθεί ο τρίτος παράγοντας και να γίνουν ακριβείς προβλέψεις. Το όνειρό του για την αποκρυπτογράφηση της ουράνιας μηχανικής έχει επιτευχθεί αλλά επειδή λείπει ο παράγοντας της μάζας από τα στοιχεία του θα μείνει με την ιδέα του ακατανόητου, για το φυσικό κόσμο, 3ου νόμου και θα ολοκληρωθεί από τους μεταγενέστερους Φυσικούς (MacDougal, 2012).

Εν κατακλείδι ο Γιοχάνες Κέπλερ κατάφερε με πολύ κόπο και χάρις στην τεράστια συμβολή των παρατηρησιακών δεδομένων του Τύχο Μπράχε να διατυπώσει τους τρεις νόμους του, οι οποίοι περιγράφουν μεν την κίνηση των πλανητών αλλά δεν την εξηγούν. Η

καινοτομία της σκέψης του έγκειται στην τολμηρή αναθεώρηση των κυκλικών τροχιών και την άρνηση της ύπαρξης του κενού κέντρου του Ήλιου. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα ότι είναι ο πρώτος αστρονόμος που σκέφτεται με όρους Φυσικής και όχι Μαθηματικών. Ακόμη και ο ίδιος δυσκολεύτηκε να εναντιωθεί στην αυτονόητη θεωρία των κυκλικών τροχιών διάρκειας 2.000 χρόνων και άρρηκτα συνδεδεμένης με τις επικρατούσες θρησκευτικές αντιλήψεις. Αυτή μαζί με την ιδέα ότι ο Ήλιος είναι το φυσικό κέντρο του ουρανού, ασκώντας μαγνητικές δυνάμεις στους πλανήτες, γνωρίζει ότι θα τύχουν κακής αποδοχής από τις θρησκευτικές αρχές της εποχής. Συνολικά η προσπάθεια του Κέπλερ αποτελεί το πρώτο βήμα για την κατανόηση της βαρύτητας, αντιλαμβανόμενος ότι οι μάζες έλκονται αμοιβαία και εξ αποστάσεως και με την σειρά τους αυτοί αντιστέκονται σε αυτή την έλξη, ιδέα που αποτελεί έμμεση νύξη για την έννοια της αδράνειας.

## 2.3 Η συμβολή του Γαλιλαίου στη μελέτη της βαρύτητας

### 2.3.1 Σύντομη βιογραφία



*Εικόνα 2.8 Το πορτρέτο του Γαλιλαίου (Grego & Mannion, 2010).*

Ο Γαλιλαίος, γιός του μουσικού Βιντσέντζο Γαλιλέι, γεννήθηκε το 1564 στην Πίζα της Ιταλίας. Οι αρχικές του σπουδές ήταν σε ένα μοναστήρι της Φλωρεντίας και αργότερα ειδικεύτηκε στην Ιατρική στο πανεπιστήμιο της γενέτειρας πόλης του, όντας οπαδός της Αριστοτελικής θεωρίας. Τα ενδιαφέροντα του, όμως μετατοπίστηκαν από την Ιατρική στα μαθηματικά, με αποτέλεσμα να αναλάβει έδρα καθηγητή το 1589. Στην Πίζα λοιπόν ξεκίνησε να μελετά τις κινήσεις των γήινων σωμάτων και συγκεκριμένα την ελεύθερη πτώση τους, συσσωρεύοντας όλες τις παρατηρήσεις στο σύγγραμμά του «Περί κίνησης», που δεν δημοσιεύτηκε ποτέ. Σε αυτό το έργο του συμπέρανε ότι η ταχύτητα ενός σώματος σε πτώση

δεν εξαρτάται σημαντικά από το βάρος του, ενώ δεν υπάρχουν έγκυρες πηγές που να επιβεβαιώνουν το διάσημο πείραμα που φέρεται να έκανε πετώντας διάφορα βάρη από τον κεκλιμένο πύργο της Πίζας (Vigoureux, 2006).

Το 1591 μετακόμισε στην Πάντοβα λαμβάνοντας την έδρα του καθηγητή Μαθηματικών του ομώνυμου πανεπιστημίου και το 1597 έλαβε δυο αντίγραφα του «Κοσμολογικού Μυστηρίου» του Κέπλερ. Στην αλληλογραφία που είχε μαζί του εξέφρασε τις ιδέες του υπέρ του Κοπερνίκειου συστήματος χωρίς όμως να δημοσιεύσει κάτι και παρά την παρότρυνση του Κέπλερ να λάβει ξεκάθαρη θέση. Ο Γαλιλαίος ως καθηγητής δίδασκε με κύρος και ευφράδεια, προσελκύοντας πολλούς φοιτητές ενώ παράλληλα διακρινόταν για την ευφυΐα του, τα ρητορικά χαρίσματα και την αυτοπεποίθησή του. Θεωρούσε επίσης ότι η παραδοσιακή διδασκαλία ήταν ανασταλτικός παράγοντας για την εξέλιξη των Επιστημών και υποστήριζε με τόλμη ότι κάθε θεωρία έπρεπε να επαληθεύεται ,μέσα από συλλογισμούς και πειραματικές δοκιμές (Boccalletti, 2016).

Σύντομα θα βρεθεί σε σφοδρή αντιπαράθεση με τους Περιπατητικούς της Πάντοβας, που υποστήριζαν την ολότητα της θεωρίας του Αριστοτέλη, αντικρούοντας τις θέσεις τους δημόσια και γελοιοποιώντας τους πολλές φορές με τα επιχειρήματά του. Αυτά προέκυψαν από έρευνες που έκανε στηριζόμενες στην εμπειρία και στην παρατήρηση χάρη στην χρήση της αστρονομικής διόπτρας, της νέας εφεύρεσης του Ολλανδού Χάνς Λίπερσεϊ. Ο Γαλιλαίος κατάφερε να εξελίξει το τηλεσκόπιο προσθέτοντας δυο φακούς, ένα πρόσθιο κυρτό με μεγάλο εστιακό μήκος και ένα οπίσθιο κοίλο με μικρό εστιακό μήκος, με αποτέλεσμα να πετύχει μεγέθυνση οκτώ φορές μεγαλύτερη της αρχικής διόπτρας. Ο Γαλιλαίος έγινε διάσημος για αυτή του την προσπάθεια κερδίζοντας τον σεβασμό της Γερουσίας της Βενετίας, αφού χάρη στη νέα εκδοχή του τηλεσκοπίου τα πλοία μπορούσαν να εντοπιστούν δυο ώρες πριν γίνουν ορατά με γυμνό μάτι.

Μόλις κατάφερε να πετύχει με συνεχείς διορθώσεις μεγέθυνση 20 φορές άρχισε να χρησιμοποιεί το τηλεσκόπιο για αστρονομικές παρατηρήσεις, οι οποίες ήταν κομβικής σημασίας και καταγράφηκαν στο έργο του «Αγγελιοφόρος του Ουρανού». Το καλοκαίρι του 1610 μετακόμισε στην Φλωρεντία υπό τη προστασία του Κοζίμου Β' των Μεδίκων και την θριαμβευτική υποδοχή του κόσμου και των Ιησουιτών αστρονόμων, που επιβεβαίωσαν τις παρατηρήσεις του. Ωστόσο ακόμα δεν έχει ταχθεί υπέρ του ηλιοκεντρικού συστήματος δημόσια, ούτε κάνει κριτική σχετικά με τη ακινησία της Γης, γεγονός που τον προστατεύει από τον έλεγχο της Εκκλησίας (Grego & Mannion, 2010).

Μετά την έκδοση του βιβλίου του όμως δέχτηκε επίθεση από τους Περιπατητικούς σχετικά με τις νέες ιδέες που υποβόσκουν περί διπλής κίνησης της Γης, ενώ άλλοι υποστηρίζουν ότι το τηλεσκόπιο προκαλεί οφθαλμαπάτες. Οι αντίπαλοί του επίσης επιτέθηκαν στον μαθητή του Πατέρα Καστέλι επειδή υποστήριξε τον ηλιοκεντρισμό έναντι της Δούκισσας Χριστίνας της Λωραίνης. Ο Γαλιλαίος σε μια επιστολή του προς αυτή στις 21 Δεκεμβρίου 1613 υποστήριξε ότι δεν υπάρχει ασυμβατότητα στις νέες ιδέες και τη Βίβλο καθώς τα έργα του Θεού δεν αλληλοαναιρούνται και οι αντιθέσεις είναι φαινομενικές. Ακόμη διατύπωσε ότι δεν πρέπει να λογίζονται κατά γράμμα τα χωρία της Αγίας Γραφής, αφού ο Θεός προίκισε τους ανθρώπους με διάνοια για να τα ερμηνεύουν. Κλείνοντας την επιστολή του συμβουλεύει τους θεολόγους να μην ανακατεύονται σε θέματα της Επιστήμης που αγνοούν (Kuehn, 2015).

Ο Καρδινάλιος Μπαμπερίνι έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον για τις νέες ιδέες του Γαλιλαίου αλλά παράλληλα τον συμβούλεψε να μην αντλεί θεολογικά συμπεράσματα, υπερβαίνοντας τα όρια της Φυσικής και των Μαθηματικών. Ο Γαλιλαίος έτσι πείστηκε να αναγνωρίσει το Κοπερνίκειο σύστημα ως μαθηματική υπόθεση και προειδοποιήθηκε προφορικά από την Ιερά Εξέταση να τηρήσει αυτή τη στάση. Το 1616 το «De Revolutionibus» του Κοπερνίκου μπήκε στην λίστα των απαγορευμένων βιβλίων για τους Καθολικούς και πολλοί αστρονόμοι στράφηκαν στο τυχόνειο σύστημα που δεν μπορούσε να διαψευστεί από την παρατήρηση. Ο Γαλιλαίος ήλπιζε ότι η κατάσταση θα βελτιωθεί το 1624, έτος που ο Μπαμπερίνι έγινε Πάπας και στις συναντήσεις του μαζί του του παρουσίασε την θεωρία του για τις παλίρροιες προκειμένου να τον πείσει για τη διπλή κίνηση της Γης.

Η θεωρία αυτή ήταν ανυπόστατη, καθώς χωρίς την έννοια της βαρύτητας δεν μπορεί να εξηγηθεί και αντιτασσόταν στην ιδέα της αδράνειας που ο Γαλιλαίος είχε αναγνωρίσει. Έτσι ακολουθούν επτά χρόνια αποφυγής για τον ίδιο από κάθε δημόσια παρέμβαση και αναζητά αδιαμφισβήτητα επιχειρήματα υπέρ του ηλιοκεντρικού συστήματος. Οι ελλειπτικές τροχιές του Κέπλερ ήταν ένα από αυτά αλλά συνεχίζει να τις αγνοεί. Μέσα σε αυτό το κλίμα συνέταξε το βιβλίο με τίτλο «ο δοκιμαστής», στο οποίο κατακεραυνώνει το Πτολεμαϊκό σύστημα και κατηγορεί τους αντιπάλους του για έλλειψη αστρονομικών γνώσεων. Το 1630 ολοκλήρωσε το βιβλίο του «Διάλογος σχετικά με τα δυο συστήματα του κόσμου», στο οποίο η μορφή διαλόγων τον βοηθά να εκφράσει μέσω τρίτων τις ιδέες του (Milsom, 2018; Vigoureux, 2006).

Αυτό το έργο αποτέλεσε και παραβίαση της προφορικής διαταγής της Ιεράς Εξέτασης, η οποία σύντομα απαγόρευσε την πώληση του, ενόσω αυτό είχε εξαντληθεί λόγω αυξημένης ζήτησης. Στα 73 του χρόνια ο Γαλιλαίος θα κληθεί σε δίκη λόγω της παραπάνω

παραβίασης και υπό την απειλή βασανιστηρίων αναγκάστηκε να αποκηρύξει τις απόψεις του με αποτέλεσμα να καταδικαστεί σε ισόβια φυλάκιση. Αυτή στην συνέχεια μετατράπηκε σε κατ' οίκον περιορισμό από τον Πάπα Ουρβάνο Η', ποινή που εξέτισε στο εξοχικό του στην Φλωρεντία, ολοκληρώνοντας παράλληλα την εργασία του για την πτώση των σωμάτων.

Σε αυτές τις συνθήκες ο Γαλιλαίος πέθανε το 1642 ενώ η μνήμη του αποκαταστάθηκε τον 20ο αιώνα από την Εκκλησία, παραδεχόμενη ότι έσφαλε. Οι υπολογισμοί του μαζί με του Κοπέρνικου, του Μπράχε και του Κέπλερ έθεσαν τα θεμέλια της σύγχρονης Επιστήμης, αφού έδωσαν μια σωστή περιγραφή του ηλιακού συστήματος και κωδικοποιήθηκαν στους τρεις νόμους του Κέπλερ. Σε αυτήν την κληρονομιά θα στηριχθεί αργότερα ο Νεύτωνας για να εξηγήσει την αιτία που οι πλανήτες ακολουθούν αυτούς τους νόμους (T.Cushing, 2003).

### 2.3.2 Οι αστρονομικές παρατηρήσεις του Γαλιλαίου και η σημασία τους

Ο Γαλιλαίος με την βελτιωμένη εκδοχή του τηλεσκοπίου πραγματοποιεί έξι αστρονομικές ανακαλύψεις ιστορικής σημασίας, οι οποίες απομυθοποιούν όλες τις στρεβλωμένες αντιλήψεις για την δομή του ηλιακού συστήματος και την κίνηση των πλανητών. Η πρώτη από αυτές σχετίζεται με την επιφάνεια της Σελήνης, πάνω στην οποία παρατηρεί εδαφικές ανωμαλίες και βουνοκορφές. Μάλιστα υπολογίζει το ύψος των βουνών από την σκιά της προσπίπτουσας και ανακλώμενης από τον ήλιο ακτινοβολίας, επιβεβαιώνοντας παράλληλα ότι είναι ετερόφωτη και ότι δεν διαφέρει και πολύ από τη Γη.

Η δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με σμήνος άστρων στον αστερισμό του Ωρίωνα, που δεν ήταν δυνατόν να γίνει με γυμνό μάτι ενώ η τρίτη παρατήρηση επιβεβαιώνει την απόλυτα σφαιρική όψη των πλανητών και τη μεγάλη λαμπρότητα των αστερών. Επίσης παρατηρεί ότι το μέγεθος των αστερών δεν διαφέρει πολύ από τους πλανήτες αλλά δεν γνωρίζει κιόλας πως αυτή η διαπίστωση οφείλεται στην ατμοσφαιρική διάθλαση του φωτός.

Η τέταρτη παρατήρηση είναι και η πιο σημαντική διακρίνοντας τέσσερις μικρούς αστέρες κοντά στον Δία, που αρχικά θεώρησε ότι είναι απλανείς. Εν συνεχεία κατάλαβε ότι είναι οι δορυφόροι του και ακολουθούν την τροχιά του Δία όπως η Σελήνη τη Γη. Αυτό είναι ένα αδιάψευστο επιχείρημα υπέρ του Κοπερνίκειου συστήματος δίνοντας τέλος στις ενστάσεις των περιπατητικών για το αν η Γη κινείται.

Η πέμπτη παρατήρηση αφορά τις φάσεις τις Αφροδίτης, οι οποίες είναι ανάλογες με αυτές της Σελήνης. Σύμφωνα με την Πτολεμαϊκή θεωρία η Αφροδίτη βρίσκεται ανάμεσα

στη Γη και τον Ήλιο, οπότε δεν μπορεί να είναι ποτέ φωτισμένη κατά το ήμισυ, ενώ η Κοπερνίκεια προβλέπει ότι μπορεί να φωτίζεται πλήρως όταν είναι αντικριστά από τη Γη. Αυτό είναι άλλο ένα επιχείρημα υπέρ του ηλιοκεντρικού συστήματος.

Η έκτη και τελευταία παρατήρηση αφορά της μαύρες κηλίδες που βλέπει ο Γαλιλαίος κατά μήκος της επιφάνειας του Ήλιου, προβάλλοντας την εικόνα του τηλεσκοπίου σε ένα παραπέτασμα.

Συνολικά όλες αυτές οι παρατηρήσεις αποδεικνύουν την ορθότητα της Κοπερνίκειας θεωρίας, αμφισβητώντας ταυτόχρονα κάθε αναπαράσταση του κόσμου που είχε καθιερωθεί από τον Αριστοτέλη, στην οποία εμμένει σθεναρά η Εκκλησία. Ο ουρανός πλέον δεν είναι τέλειος, η Γη κινείται, χωρίς να είναι το κέντρο του κόσμου και κατ' επέκταση το Σύμπαν δεν δημιουργήθηκε για τον άνθρωπο (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Grego & Mannion, 2010; Weinberg, 2016).

### 2.3.3 Η θεωρία του Γαλιλαίου για την ελεύθερη πτώση των σωμάτων

Ο Γαλιλαίος διατύπωσε τη θεωρία του για την κίνηση των γήινων σωμάτων στο έργο του «Διάλογος σχετικά με δυο νέες επιστήμες», το οποίο ολοκλήρωσε το 1625 στο εξοχικό του στο Αρτσέτρι και ενώ βρισκόταν σε κατ' οίκον περιορισμό. Φυσικά η επιτροπή της καθολικής Εκκλησίας είχε απαγορεύσει τη δημοσίευση του. Οι διάλογοι γίνονται θεατρικά μεταξύ τρίτων προσώπων και το περιεχόμενο των συζητήσεων τους χωρίζεται χρονικά σε τέσσερις μέρες.

Την πρώτη μέρα η συζήτηση έχει ως σκοπό να αντικρούσει τη θεωρία του Αριστοτέλη για την πτώση των σωμάτων. Σε αυτό το τμήμα αποδεικνύεται ότι ο αέρας έχει βάρος, υπολογίζεται η πυκνότητα του και αναλύεται η κίνηση των σωμάτων σε μέσα που παρουσιάζουν αντίσταση. Επίσης μελετάται η κίνηση εκκρεμών, που αργότερα οδήγησε στην κατασκευή ρολογιών και κατ' επέκταση στην ακριβή μέτρηση του ρυθμού επιτάχυνσης των σωμάτων σε ελεύθερη πτώση.

Την δεύτερη μέρα των διαλόγων μελετάται η αντοχή των σωμάτων με διαφορετικό σχήμα ενώ την τρίτη μέρα ορίζεται η ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση με τον ίδιο τρόπο που τον 4ο αιώνα μ.Χ. είχε καταφέρει το κολέγιο Μέρτον της Οξφόρδης. Ακόμη παρουσιάζεται το θεώρημα της μέσης ταχύτητας του Ορέμ και επεκτείνεται για τα σώματα σε ελεύθερη πτώση, χωρίς όμως να εξηγείται η αιτία της.

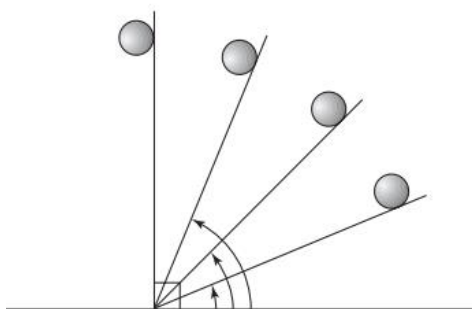
Τέλος την τέταρτη μέρα τίθεται το ζήτημα τη τροχιάς των σωμάτων, μέσα από πειράματα κεκλιμένου επιπέδου που εκτέλεσε ο Γαλιλαίος το 1608 και επιβεβαιώνονται οι απόψεις του για τη κίνηση και την ταχύτητα (Casper, 1977; Kuehn, 2015).

Ο Γαλιλαίος μελετά την κίνηση των σωμάτων κατά την πτώση τους με την ρίψη - κύλιση συμπαγών ομοιογενών σφαιρών, χρησιμοποιώντας παράλληλα διαφορετικά κεκλιμένα επίπεδα και επιδίδεται σε ακριβείς μετρήσεις φυσικών μεγεθών σχετικά με αυτή. Ο Λεονάρντο Ντα Βίντσι ένα αιώνα πριν προσπάθησε να εξηγήσει ορθολογικά τέτοιες κινήσεις αλλά οι παρατηρήσεις του δεν είχαν μεγάλο αντίκτυπο στην επιστημονική κοινότητα. Ο λόγος που ο Γαλιλαίος χρησιμοποιεί επίπεδα διαφορετικής κλίσης είναι για να επιβραδύνει την κίνηση των σφαιρών, ώστε να μελετήσει καλύτερα την κίνησή τους. Αυτό αποτελεί και ένα επιχείρημα για το αμφιλεγόμενο πείραμα της ρίψης σφαιρών από τον πύργο της Πίζας, καθώς δεν θα μπορούσε να βγάλει ασφαλή συμπεράσματα με τόσο μικρό χρόνο πτώσης και μάλιστα με τα διαθέσιμα όργανα μέτρησης της εποχής (Weinberg, 2016).

Αναφορικά με τα πειράματα κεκλιμένου επιπέδου μια εύλογη υπόθεση είναι ότι όσο πιο απότομη είναι η κλίση του επιπέδου, ανεξαρτήτως μήκους, τόσο πιο μεγάλη θα είναι η ταχύτητα της σφαίρας. Μια εξίσου λογική υπόθεση είναι επίσης ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της κλίσης τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ταχύτητα της σφαίρας. Ο Γαλιλαίος επιδιδόμενος σε διαδοχικά πειράματα διαπιστώνει αρχικά ότι μια σφαίρα που αφήνεται από το ίδιο ύψος σε διαφορετικά κεκλιμένα επίπεδα φτάνει στο έδαφος με την ίδια ταχύτητα. Ακόμη παρατηρεί ότι αυτή την ίδια ταχύτητα δεν την αποκτάνε όλες οι σφαίρες το ίδιο γρήγορα στα διαφορετικά επίπεδα. Από αυτό εξάγονται δυο συμπεράσματα, αφενός η ταχύτητα της σφαίρας εξαρτάται μόνο από τη διαφορά ύψους ανάμεσα σε σημείο εκκίνησης και σημείο άφιξης και αφετέρου ο τρόπος απόκτησης της ταχύτητας, δηλαδή η επιτάχυνση εξαρτάται μόνο από την κλίση του επιπέδου και μάλιστα ανάλογα (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Hawking, 2000).

Στην συνέχεια ο Γαλιλαίος ελέγχει εάν η μάζα των σφαιρών επηρεάζει το πείραμα. Η άποψη του Αριστοτέλη είναι ότι τα βαρύτερα σώματα πέφτουν πιο γρήγορα από τα ελαφρύτερα, εάν ριχθούν από το ίδιο ύψος. Έτσι ο Γαλιλαίος χρησιμοποιεί διαφορετικής μάζας σφαίρες αλλά ομογενείς για να μην επηρεάζονται από τις τριβές και εκτελεί το ίδιο πείραμα. Το αποτέλεσμα εκπλήσσει καθώς οι διαφορετικού βάρους σφαίρες πέφτοντας από επίπεδο ίδιας κλίσης, φτάνουν στο έδαφος στον ίδιο χρόνο. Αυτό αυτομάτως σημαίνει ότι η ταχύτητα και η επιτάχυνση είναι ανεξάρτητες από τη μάζα του σώματος. Μέχρι στιγμής τα συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής: πρώτον η ταχύτητα ενός σώματος κατά την πτώση είναι ανεξάρτητη της μάζας του αλλά εξαρτάται από την διαφορά του ύψους της αρχικής και τελικής θέσης του και δεύτερον τα σώματα που πέφτουν από το ίδιο ύψος αποκτούν ίδια ταχύτητα και αν η κλίση του επιπέδου είναι ίδια και αυτή, τότε θα αποκτήσουν και την ίδια επιτάχυνση (Ferraro, 2007; Vigoureux, 2006).

Η ελεύθερη πτώση ορίζεται ως η κίνηση που εκτελεί ένα σώμα όντας αρχικά ακίνητο με την επίδραση μόνο της δύναμης του βάρους του. Την εποχή του Γαλιλαίου δεν είναι γνωστή η έννοια της δύναμης, όμως η ελεύθερη πτώση αντιστοιχεί στην κύλιση μια σφαίρας σε κεκλιμένο επίπεδο με την μέγιστη κλίση, δηλαδή σχηματίζοντας με το έδαφος γωνία 90°. (βλ. εικόνα 2.9) Αυτό σημαίνει ότι σε κατακόρυφο κεκλιμένο επίπεδο τα σώματα που θα αποκτήσουν την ίδια μέγιστη επιτάχυνση. Εδώ ανατρέπεται ξεκάθαρα η θεωρία του Αριστοτέλη περί εξάρτησης της πτωτικής κίνησης των σωμάτων από την αναλογία των ριζωμάτων σε αυτά.



*Εικόνα 2.9 Τα πειράματα του Γαλιλαίου έγιναν σε κεκλιμένα επίπεδα με διαφορετική κλίση. Η ελεύθερη πτώση αντιστοιχεί στην κίνηση μια σφαίρας σε κεκλιμένο επίπεδο, που σχηματίζει με το έδαφος γωνία 90 μοιρών (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).*

Η καθημερινή εμπειρία όμως εξακολουθεί να στηρίζει αυτή την άποψη αφού αν αφηθούν από το ίδιο ύψος το φύλλο από ένα δέντρο και μια πέτρα, τότε η πέτρα θα φτάσει πιο γρήγορα. Αυτό όμως δεν οφείλεται στην διαφορετική μάζα των αντικειμένων αλλά στην αντίσταση που προβάλλει ο αέρας και η οποία επιδρά διαφορετικά στο φύλλο επιβραδύνοντάς το. Αν δεν υπήρχαν οι τριβές από τον αέρα τα σώματα θα έπεφταν στον ίδιο χρόνο στο έδαφος. Αυτό επιβεβαιώθηκε το 1971, όταν αστροναύτες στην Σελήνη, που δεν έχει ατμόσφαιρα, έριξαν από το ίδιο ύψος ένα βαρίδι και ένα φτερό και έφτασαν στο έδαφος της την ίδια στιγμή (Grego & Mannion, 2010).





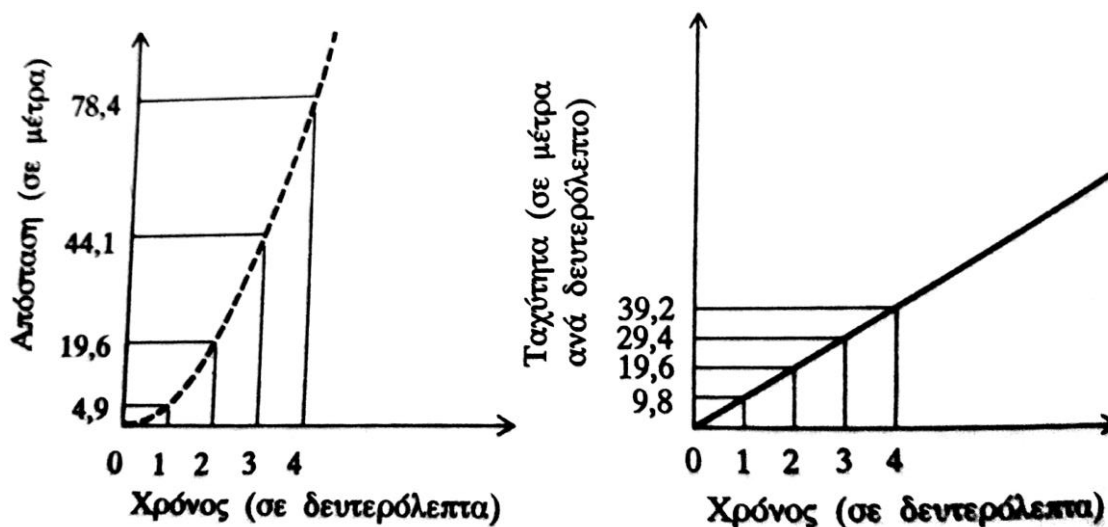
*Εικόνα 2.10 Στη Σελήνη που δεν έχει ατμόσφαιρα, ο αστροναύτης D.Scott ρίχνοντας ένα βαρίδι και ένα πούπουλο διαπίστωσε ότι φτάνουν στο έδαφος της στον ίδιο χρόνο (Hawking, 2000).*

Ο Γαλιλαίος αντιλαμβάνεται το φαινόμενο της αντίστασης του αέρα και διατυπώνει την άποψη ότι δεν είναι άυλος. Μάλιστα η αντίσταση του αέρα αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του αντικειμένου και με την αύξηση των διαστάσεων του και κατ' επέκταση της επιφάνειας του και του σχήματος του. Σε μικροσκοπικό επίπεδο οι τριβές εξηγούνται από το γεγονός ότι οι επιφάνειες όσο λείες και να φαίνονται μακροσκοπικά, εν τέλει είναι τραχιές με αποτέλεσμα να ασκούνται ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων τους και να επιβραδύνουν την κίνηση των σωμάτων σε επαφή. Σχετικά με την αντίσταση του αέρα, εάν το σώμα δεν πέφτει γρήγορα τα μόρια του έχουν τον χρόνο να παραμερίσουν και να κάνουν τον γύρο του σώματος, γεγονός που εξηγεί και την ρευστότητά του. Αν από την άλλη το σώμα πέφτει γρήγορα τα μόρια του αέρα συσσωρεύονται από κάτω από το σώμα και στροβιλιζόμενα δημιουργούν μια πτώση της πίεσης του συνολικά, η οποία το επιβραδύνει (Milsom, 2018).

Συμπερασματικά, εν απουσία τριβών όλα τα σώματα πέφτουν με τον ίδιο ρυθμό και μάλιστα με την ίδια επιτάχυνση. Αυτή η επιτάχυνση ονομάζεται επιτάχυνση της βαρύτητας και σε ένα μέσο γεωγραφικό πλάτος της Γης είναι ίση με  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Αυτό σημαίνει ότι κάθε δευτερόλεπτο η ταχύτητα ενός σώματος σε πτώση αυξάνεται σταθερά κατά  $9,81 \text{ m/s}$ . Επίσης κατά την ελεύθερη πτώση η ταχύτητα ενός σώματος είναι ανάλογη του χρόνου πτώσης και η διανυόμενη απόσταση είναι ανάλογη του τετραγώνου του χρόνου πτώσης. Ο μαθηματικός φορμαλισμός των παραπάνω συμπερασμάτων συνοψίζεται ως εξής: εάν το σώμα δεν έχει αρχική ταχύτητα πριν την πτώση τότε ισχύει  $U = g \cdot t$  και  $S = \frac{1}{2} g \cdot t^2$ , όπου  $U$  η ταχύτητα του σώματος,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $t$  ο χρόνος πτώσης και  $S$  η διανυόμενη απόσταση (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Varvoglis, 2014).

**Πίνακας 1** Ο νόμος πτώσης ενός σώματος στη Γη, το οποίο είναι αρχικά ακίνητο και χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η αντίσταση του αέρα. Στις στήλες του πίνακα φαίνονται κατά σειρά η διάρκεια πτώσης του, η κεκτημένη ταχύτητα του και η διανυθείσα απόσταση (Vigoureux, 2006).

Χρονική διάρκεια πτώσης σώματος	Ταχύτητα σώματος	Απόσταση που έχει διανύσει το σώμα
1 sec	9,8 m/sec	4,9 m
2 sec	19,6 m/sec	19,6 m
3 sec	29,4 m/sec	44,1 m
4 sec	39,2 m/sec	78,4 m



**Εικόνα 2.11** Τα διαγράμματα του νόμου πτώσης από τα δεδομένα του πίνακα 1. Στο αριστερό διάγραμμα φαίνεται η σχέση απόστασης συναρτήσει του χρόνου, ενώ στο δεξιό η σχέση ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου (Narlikar, 1999).

Εάν το σώμα έχει αρχική ταχύτητα πριν την πτώση τότε αν κινείται με φορά προς το κέντρο της Γης οι εξισώσεις γίνονται  $U=U_0 + g \cdot t$  και  $S= U_0 \cdot t + \frac{1}{2} g \cdot t^2$  ενώ αν κινείται με φορά αντίθετη προς το κέντρο της Γης γίνονται  $U=U_0 - g \cdot t$  και  $S= U_0 \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$  όπου  $U_0$  η αρχική ταχύτητα του σώματος. Η μαθηματοποίηση της μελέτης φυσικών κινήσεων δεν είναι κάτι καινούργιο την εποχή του Γαλιλαίου, αλλά κανείς πιο πριν δεν είχε δώσει τόσο μεγάλο βάθος σε μια τέτοια ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο αποδεικνύει στους πλατωνικούς και τους αριστοτελικούς ότι τα μαθηματικά δεν είναι μόνο για την μελέτη των ουράνιων σωμάτων επιβεβαιώνοντας την έκφραση «το βιβλίο της Φύσης είναι γραμμένο στη γλώσσα των μαθηματικών» (Casper, 1977; Lehavi & Galili, 2009).

### 2.3.4 Συνέπειες των συμπερασμάτων του Γαλιλαίου από την μελέτη της κίνησης των σωμάτων σε κεκλιμένα επίπεδα

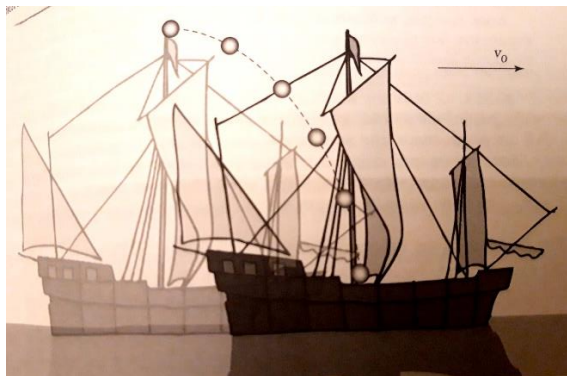
Από τις παρατηρήσεις των πειραμάτων σε κεκλιμένα επίπεδα ο Γαλιλαίος εξάγει το συμπέρασμα ότι η κλίση του επιπέδου καθορίζει την επιτάχυνση. Αυτό συνεπάγεται ότι μεγάλη κλίση οδηγεί σε μεγάλη επιτάχυνση, μικρή κλίση σε μικρή επιτάχυνση και μηδενική κλίση, που αντιστοιχεί σε οριζόντιο έδαφος, οδηγεί σε μηδενική επιτάχυνση.

Το τελευταίο συμπέρασμα είναι σημαντικό, γιατί μηδενική επιτάχυνση δεν ισοδυναμεί μόνο με ακινησία, ισοδυναμεί εξίσου και με κίνηση με σταθερή ταχύτητα επ' άπειρον, εν απουσία τριβών. Αυτός ο συλλογισμός δεν θα μπορούσε να εξαχθεί από την καθημερινή εμπειρία και αυτό αποδεικνύει την αξία του πειράματος.

Μια απορία που είχαν όλοι οι φιλόσοφοι από τα αρχαία χρόνια ήταν τι είναι αυτό που κρατάει τους πλανήτες σε κίνηση, και μάλιστα χωρίς αυτή να φθίνει. Ο Γαλιλαίος δίνει την απάντηση λέγοντας ότι αν τίποτα δεν ενεργεί σε ένα σώμα με αρχική ταχύτητα, τότε αυτό θα διατηρεί την κίνηση του ακολουθώντας κυκλική τροχιά. Αυτή η διατύπωση είναι η πρώτη συνέπεια των νόμων της ελεύθερης πτώσης και είναι γνωστή ως αρχή της αδράνειας. Φυσικά η πρόταση ενέχει ένα σφάλμα και αυτό είναι η φράση κυκλική τροχιά, το οποίο θα διορθώσει ο Καρτέσιος αργότερα αντικαθιστώντας την με την φράση ευθύγραμμη τροχιά. Όπως και να έχει η αδράνεια αποτελεί ένα χαρακτηριστικό που έχουν όλα τα σώματα με μάζα και εμφανίζεται στην περίπτωση της αλλαγής της κίνησης τους και όχι κατά την κίνηση τους. Έτσι ένα σώμα αρχικά ακίνητο αντιστέκεται στην αλλαγή της κατάστασης του, όταν τίθεται σε κίνηση και ένα σώμα που ήδη κινείται αντιστέκεται στην επιτάχυνση ή επιβράδυνση του. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα είναι διανυσματικό μέγεθος, οπότε αλλάζει και με την κατεύθυνση, πέρα από το μέτρο της (Narlikar, 1999).

Ο Γαλιλαίος μέσα από την αρχή της αδράνειας οδηγείται σε ένα δευτερογενή ορισμό της μάζας, αφού παρατηρεί ότι η αδράνεια, δηλαδή η αντίσταση στην αλλαγή κίνησης δεν είναι η ίδια σε όλα τα σώματα. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό με το νοητικό πείραμα αλλαγής της κινητικής κατάστασης ενός φορτηγού και ενός αυτοκινήτου. Τα δυο οχήματα δεν επιταχύνονται το ίδιο εύκολα, ούτε επιβραδύνονται το ίδιο εύκολα. Το διαφορετικό στοιχείο που έχουν και ευθύνεται για αυτό είναι η μάζα. Άρα η μάζα είναι το μέτρο της αδράνειας ενός σώματος. Έτσι δυο μάζες μπορούν να συγκριθούν μέσω της σύγκρισης των επιταχύνσεων ή επιβραδύνσεων τους. Η μάζα που ορίζεται με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται αδρανειακή μάζα ή μάζα αδράνειας (Weinberg, 2016).

Μια άλλη συνέπεια των νόμων της κίνησης των σωμάτων σε κεκλιμένα επίπεδα είναι η αρχή της σχετικότητας. Ο Γαλιλαίος είχε θέσει κάποια στιγμή ένα ερώτημα σε συνομιλητές του μέσω του οποίου αναρωτιόταν αν ένα ναύτης ρίξει από το θωράκιο ενός πλοίου, που κινείται με σταθερή ταχύτητα σε ήρεμη θάλασσα χωρίς άνεμο, μια πέτρα, σε ποιο σημείο του πλοίου θα πέσει. Επίσης αναρωτήθηκε που θα πέσει η πέτρα αν σε ίδιες συνθήκες το πλοίο αναπτύξει ξαφνικά ταχύτητα. Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι ότι όποια και αν είναι η ταχύτητα του πλοίου στην πρώτη περίπτωση, το διάνυσμα της θα είναι σταθερό και έτσι η πέτρα θα πέσει στην βάση του καταρτιού σαν να ήταν ακίνητο. Αυτό αποτελεί άμεση συνέπεια της αδράνειας καθώς το κατάρτι ως μέρος του κινούμενου πλοίου κινείται με την ίδια ταχύτητα με αυτό αλλά και η πέτρα μόλις αφεθεί θα κινείται με την ίδια ταχύτητα ακολουθώντας το κατάρτι.



**Εικόνα 2.12** Εάν ένας ναύτης ρίξει ένα βαρίδι από τα κατάρτι ενός πλοίου σε κίνηση με σταθερή ταχύτητα, τότε αυτό θα πέσει στη βάση του όμοια με την περίπτωση ακινησίας του πλοίου. Σε αυτό το παράδειγμα δεν υπολογίζεται επίσης η αντίσταση του αέρα (T.Cushing, 2003).

Αν από την άλλη το πλοίο δεν έχει σταθερή ταχύτητα αλλά επιταχύνει κατά την πτώση, η πέτρα θα έχει την δική της ταχύτητα σε σχέση με το κατάρτι, άρα και το πλοίο, με αποτέλεσμα να πέσει λίγο ή πολύ ανάλογα την επιτάχυνση, πίσω του. Στην περίπτωση φυσικά που επιβραδύνει, ανάλογα την επιβράδυνση, θα πέσει λίγο ή πολύ μπροστά από το κατάρτι (Vigoureux, 2006).

Αυτό το παράδειγμα στο σύνολο του έχει μια γενικότερη ισχύ για όλα τα μηχανικά πειράματα, που παρατηρούνται κινήσεις μαζών. Αυτή η ισχύς εκφράζεται μέσα από την αρχή της σχετικότητας, η οποία διατυπώνεται ως εξής: Είναι αδύνατο να γίνει διάκριση της κίνησης ενός φυσικού συστήματος, εάν αυτό κινείται με σταθερή ταχύτητα, μέσω ενός μηχανικού πειράματος που πραγματοποιείται εντός του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα και η τροχιά ενός σώματος είναι σχετική. Στο παράδειγμα του πλοίου η τροχιά της πέτρας είναι ευθύγραμμη για ένα παρατηρητή εντός του πλοίου ενώ για ένα εξωτερικό είναι παραβολική. Όμως η επιτάχυνση ή η επιβράδυνση είναι απόλυτες έννοιες αφού αλλάζουν τα αποτελέσματα του πειράματος και γίνονται αντιληπτές από όλους τους παρατηρητές. Το

γεγονός ότι η ταχύτητα και η τροχιά ενός αντικειμένου σε ένα σύστημα σε κίνηση, είναι σχετική συνεπάγεται ότι προσδιορίζεται σε σχέση με ένα εξωτερικό στοιχείο. Αυτό το στοιχείο ονομάζεται σύστημα αναφοράς και μάλιστα τα συστήματα που κινούνται με σταθερή ταχύτητα ή είναι ακίνητα ονομάζονται, προς τιμή του Γαλιλαίου, γαλιλαϊκά ή αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Τα επιβραδυνόμενα ή επιταχυνόμενα συστήματα ονομάζονται μη αδρανειακά ή μη γαλιλαϊκά. Οι νόμοι της Μηχανικής έχουν καθολική ισχύ στα αδρανειακά συστήματα, ενώ αργότερα ο Αϊνστάιν θα διευρύνει αυτή την αρχή για όλων των ειδών τα πειράματα (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Η ανακάλυψη της αρχής της σχετικότητας της ταχύτητας από τον Γαλιλαίο του δίνει πολλά επιχειρήματα σχετικά με τις ενστάσεις των αριστοτελικών για το Κοπερνίκειο σύστημα. Εάν η Γη κινείται ομοιόμορφα και με μεγάλη ταχύτητα κανένα πείραμα εντός της Γης δεν μπορεί να αποδείξει την κίνηση ή την ακινησία της. Σήμερα φυσικά γνωρίζουμε ότι η Γη είναι μη αδρανειακό σύστημα, αφού παρά το γεγονός ότι κινείται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, λόγω της ελλειπτικής τροχιάς αλλάζει συνεχώς κατεύθυνση. Αυτή η αλλαγή όμως είναι μόνο τρία χιλιοστά του χιλιοστού ανά χιλιόμετρο, με αποτέλεσμα να μην γίνεται αντιληπτή (T.Cushing, 2003).

Η συμβολή του Γαλιλαίου στην Επιστήμη αλλά και στην κατανόηση της βαρύτητας είναι τεράστια. Ο Κέπλερ μελέτησε την κίνηση ουράνιων σωμάτων και έδειξε ότι ο ουρανός υπόκειται σε γήινους νόμους, που έχουν μαθηματική έκφραση. Ο Γαλιλαίος μελέτησε τις κινήσεις των γήινων σωμάτων και έδειξε ότι και αυτές υπόκεινται σε μαθηματικούς νόμους όπως οι ουράνιες κινήσεις. Επιπλέον τόσο με τους νόμους της ελεύθερης πτώσης όσο και με τις παρατηρήσεις του τηλεσκοπίου έδωσε πολλά επιχειρήματα υπέρ του ηλιοκεντρικού συστήματος καταρρίπτοντας συθέμελα την αριστοτελική θεωρία, η οποία ήταν εδραιωμένη για αιώνες. Τέλος μια άλλη συνεισφορά είναι ότι εγκαθίδρυσε την επιστημονική μέθοδο. Η πορεία που πρέπει να ακολουθεί κάθε σοβαρός επιστήμονας από εδώ και πέρα πρέπει να περιλαμβάνει το τρίπτυχο παρατήρηση- συλλογισμός- πείραμα. Ο Γαλιλαίος έδειξε την αξία του πειράματος στην ανακάλυψη των φυσικών νόμων βγάζοντας ασφαλή συμπεράσματα. Έτσι, μαζί με τον Φρανσίσ Μπέικον αποτελούν τους θεμελιωτές της σύγχρονης επιστημονικής σκέψης (Modinos, 2014; Varvoglis, 2014).

## 3 Κεφάλαιο 3.Η θεωρητική θεμελίωση του Νόμου της βαρύτητας

### 3.1 Το έργο του Χόιχενς, του Καρτέσιου και του Μπέικον

Το έργο του Γαλιλαίου για την κίνηση των γήινων σωμάτων συνεχίστηκε από τον Ολλανδό Κρίστιαν Χόιχενς. Ο Χόιχενς γεννήθηκε στην Χάγη και σπούδασε μαθηματικά στο πανεπιστήμιο του Λέιντεν. Ασχολήθηκε επίσης με την Αστρονομία, κατασκευάζοντας δικά του τηλεσκόπια μέσω των οποίων ανακάλυψε ένα δορυφόρο του Κρόνου, τον Τιτάνα και μελέτησε τους δακτυλίους του πλανήτη. Ακόμη έγινε γνωστός για την παρουσίαση της κυματικής θεωρίας του φωτός ενώ παράλληλα στηριζόμενος στη θεωρία του Γαλιλαίου, μελέτησε την κίνηση εκκρεμών, με αποτέλεσμα να φτιάξει αργότερα ο ίδιος ρολόγια ακριβείας.

Το 1666 έγινε μέλος της Γαλλικής Ακαδημίας Επιστημών, όπου μελέτησε την κυκλική κίνηση των σωμάτων καταλήγοντας στην εξίσωση της φυγόκεντρου δύναμης, την οποία θα αξιοποιήσει αργότερα ο Νεύτωνας για να διατυπώσει τον Νόμο της παγκόσμιας έλξης. Ακόμη ανέλυσε την κίνηση μαζών κατά την κρούση μεταξύ τους, αναγνωρίζοντας τα φυσικά μεγέθη της κινητικής ενέργειας και της ορμής. Ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα του ήταν το γεγονός ότι μετρήσε με την βοήθεια ωρολογίων εκκρεμών την επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g$ ), πράγμα που ο Γαλιλαίος δεν μπόρεσε να κάνει με τα μέσα που διέθετε. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων του αντιστοιχούσε σε επιτάχυνση 32 ποδιών ανά δευτερόλεπτο το δευτερόλεπτο κατά την ελεύθερη πτώση ενός σώματος στην επιφάνεια της Γης (MacDougal, 2012; Varvoglis, 2014; Vigoureux, 2006).

Δυο ακόμη πρόσωπα που συνέβαλαν στην παγίωση της επιστημονικής μεθόδου που εισήγαγε ο Γαλιλαίος ήταν ο Φρανσίσ Μπέικον και ο Ρενέ Ντεκάρτ ή Καρτέσιος. Ο πρώτος γεννήθηκε το 1561 στην Αγγλία και στο έργο του «Νέο Όργανο» αναφέρει τις απόψεις του για την επιστημονική μελέτη. Σύμφωνα με αυτές οι ανακαλύψεις πρέπει να προκύπτουν με άμεσο τρόπο έπειτα από προσεκτική παρατήρηση και όχι μέσα από παραγωγικούς συλλογισμούς. Η πρόοδος των φυσικών επιστημών εξαρτάται από το συνδυασμό παρατήρησης και πειράματος, πρακτική που οδηγεί στη διατύπωση γενικών αρχών. Με αφετηρία τις αρχές αυτές μόνο, μπορούν να γίνουν παραγωγικοί συλλογισμοί, που εν συνεχεία οδηγούν σε νέες παρατηρήσεις, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται με πειράματα.

Ο Καρτέσιος γεννήθηκε το 1596 στη Γαλλία και ασχολήθηκε με τα μαθηματικά, τη Φυσική και τη φιλοσοφία συμβάλλοντας καθοριστικά στην ανάπτυξη του πνεύματος του Διαφωτισμού. Στα διάφορα έργα του υποστήριξε την αξία του μαθηματικού συλλογισμού

και τις αρχές που προκύπτουν μέσω της καθαρής σκέψης. Επίσης τόνισε ότι η εφαρμογή του συλλογισμού αυτού σε φυσικά συστήματα έχει ένα βαθμό αβεβαιότητας, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να γίνουν συνεχή πειράματα, αν κάποιος δεν γνωρίζει όλες τις παραμέτρους του συστήματος (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Ferraro, 2007).

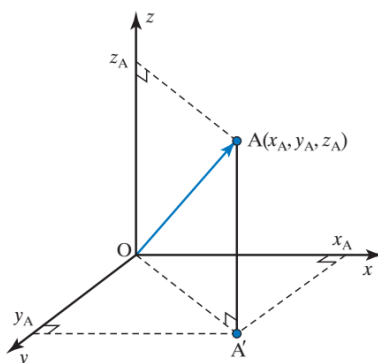
Επιπροσθέτως υποστήριξε λανθασμένα ότι το φως μεταδίδεται ακαριαία από τη πηγή και ότι ο διαστημικός χώρος είναι γεμάτος στροβίλους ύλης, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την κίνηση των πλανητών στις τροχιές τους. Στον τομέα της Οπτικής μελέτησε τους νόμους της διάθλασης ενώ σχετικά με την κίνηση των σωμάτων διατύπωσε και πάλι λανθασμένα την άποψη ότι η ταχύτητα ενός σώματος που εκτελεί ελεύθερη πτώση είναι ανάλογη της απόστασης που διανύεται (Milsom, 2018).

Στο έργο του «Αρχές της φιλοσοφίας» βελτίωσε την διατύπωση της έννοιας της ώθησης του Μπουριντάν και υποστήριξε ότι η κίνηση των σωμάτων διενεργείται κατά μήκος ευθείων γραμμών, πράγμα που τον οδήγησε στο συμπέρασμα ότι προκειμένου οι πλανήτες να κινούνται στις καμπύλες τροχιές τους, είναι απαραίτητη η άσκηση κάποιας δύναμης. Ο Καρτέσιος προσπάθησε να μετρήσει αυτή την δύναμη αλλά μόνο ο Νεύτωνας θα καταφέρει αργότερα να την εξηγήσει. Ακόμη διατύπωσε σωστά τον νόμο της αδράνειας του Γαλιλαίου διορθώνοντας τον ως εξής: αν τίποτα δεν ενεργεί σε ένα σώμα που κινείται ευθύγραμμα, τότε αυτό θα διατηρεί την ταχύτητα του αέναα επί της ευθείας αυτής γραμμής. Από αυτό το νόμο επαγωγικά κατέληξε σε ιδέες περί απειρότητας του Σύμπαντος και ταύτισης χώρου και ύλης. Γενικά ο Καρτέσιος θεωρούσε το Σύμπαν ως μια καλοκουρδισμένη μηχανή, που η κίνηση των μερών μεταδίδεται στα επιμέρους, ενώ συνολικά θεωρείται ένας εκτεταμένος χώρος από άπειρα διαιρετή ύλη, αμφισβητώντας συνάμα την ύπαρξη του κενού (Aiton, 1959).

Ένα ακόμη φυσικό μέγεθος που αναφέρει στο έργο του είναι αυτό της ορμής, ως ποσότητα κίνησης, που μεταφέρεται από το ένα σώμα στο άλλο κατά την κρούση, με τη συνολική ορμή του συστήματος να παραμένει σταθερή. Επιπλέον πρότεινε ένα τρόπο ποσοτικής μελέτης της κίνησης, όπου το κέντρο μάζας ενός συνόλου σωμάτων παραμένει σταθερό καθώς η ίδια μεταφέρεται από το ένα στο άλλο. Αυτό αποτέλεσε σωστή μεθοδολογία για τις έρευνες του Νεύτωνα για τη βαρύτητα.

Τέλος άξια λόγου είναι, φυσικά, η συνεισφορά του στα μαθηματικά και συγκεκριμένα στη χρήση μαθηματικών συμβόλων σε εξισώσεις καθώς και στην επινόηση μιας νέας μεθόδου, που είναι πρόδρομος του διαφορικού λογισμού, δηλαδή την αναλυτική γεωμετρία. Βέβαια, επινόησε και τις καρτεσιανές συντεταγμένες, οι οποίες συνίστανται σε αποστάσεις

ενός σημείου από ένα κέντρο και κατά μήκος ενός συστήματος κάθετων και σταθερών μεταξύ τους αξόνων (Vigoureux, 2006).

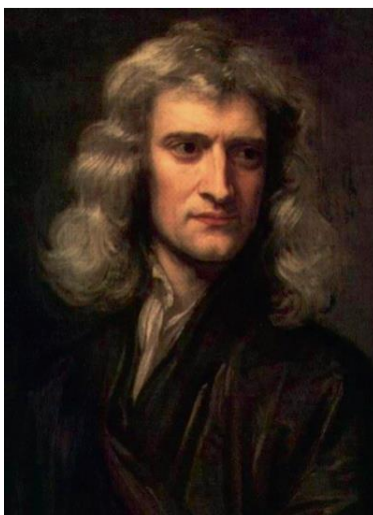


Εικόνα 3.1 Καρτεσιανές συντεταγμένες σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων  $(x, y, z)$  (Βρούλος & Καρνάβας, 2021).

## 3.2 Ο Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα

Οι ανακαλύψεις του Κέπλερ και του Γαλιλαίου δεν αλλάζουν την γενική δομή του Σύμπαντος, αφού Γη και Ουρανός συνεχίζουν να διέπονται από διαφορετικούς νόμους. Τα ουράνια σώματα περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο διαγράφοντας ελλείψεις και δεν εκτελούν ελεύθερη πτώση, ενώ από την άλλη τα γήινα σώματα υπόκεινται στους νόμους της πτώσης με ευθύγραμμη τροχιά, χωρίς να περιφέρονται. Στο σημείο αυτό ο Ισαάκ Νεύτωνας μέσω του έργου του κατά τον 17ο – 18ο αιώνα θα αποδείξει ότι οι δυο παραπάνω προτάσεις, αποτελούν απλώς δυο όψεις ενός καθολικού νόμου.

### 3.2.1 Σύντομη βιογραφία



Εικόνα 3.2 Προσωπογραφία του Ισαάκ Νεύτωνα (Grego & Mannion, 2010).



Το 1624 η Αγγλία βρίσκεται σε μια ταραχώδη περίοδο, λόγω του Εκατονταετούς πολέμου, της Προτεσταντικής μεταρρύθμισης και της εμφύλιας διαμάχης ανάμεσα σε κοινοβουλευτικούς και βασιλικούς. Μέσα σε αυτό το ασταθές και βίαιο πλαίσιο γεννήθηκε τα Χριστούγεννα του 1642, στο χωριό Γούλσθορπ της επαρχίας Λίνκολνσάιρ του Λονδίνου, ο Ισαάκ Νεύτωνας. Σημειωτέων έχουν περάσει δώδεκα χρόνια από το θάνατο του Κέπλερ και μερικοί μήνες από αυτόν του Γαλιλαίου.

Ο μικροκτηματίας πατέρας του Νεύτωνα έχει πεθάνει λίγο πριν τη γέννηση του και η μητέρα του έχει καταγωγή από εύπορη οικογένεια υψηλής κοινωνικής τάξης. Ωστόσο η ίδια ξαναπαντρεύτηκε, όταν ο Ισαάκ ήταν τριών ετών και αναγκάστηκε να φύγει από το Γούλσθορπ, αφήνοντας την ανατροφή του στην γιαγιά του. Ξεκίνησε τις βασικές του σπουδές σε ένα μονοθέσιο σχολείο της περιοχής και στα δεκαεπτά του χρόνια πήρε υποτροφία για το κολλέγιο Τρίνιτι, όπου διδάχθηκε την αριστοτελική θεωρία. Σε αυτό το διάστημα η μητέρα του επέστρεψε με τα τρία της παιδιά από το δεύτερο γάμο και ανέθεσε στον Νεύτωνα αγροτικές εργασίες της μικρής επιχείρησής τους, οι οποίες τον ανάγκασαν να διακόψει τις σπουδές του. Ο ίδιος, όμως δεν έδειξε ιδιαίτερο ζήλο γι' αυτές, με αποτέλεσμα να το παροτρύνουν οι δικοί του να συνεχίσει τις σπουδές στο πανεπιστήμιο του Κέιμπριτζ (Vigoureux, 2006).

Εκεί το 1663 έχοντας στενή συνεργασία με τον μαθηματικό και καθηγητή του Ισαάκ Μπάροου, ξεκίνησε το ερευνητικό του έργο στους τομείς της Οπτικής, των Μαθηματικών και της Δυναμικής. Το 1666 λόγω της επιδημίας της πανούκλας που ξέσπασε στην Αγγλία, το πανεπιστήμιο ανέστειλε τα μαθήματα του και ο Νεύτωνας επέστρεψε στο Γούλσθορπ συνεχίζοντας το έργο μόνος του. Δυο χρόνια αργότερα ο Μπάροου τον χρήζει διάδοχο του και το 1675 παρουσίασε στην Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου ορισμένα από τα αποτελέσματα της δουλειάς του. Σε αυτά συγκαταλέγονταν η εφεύρεση του κατοπτρικού τηλεσκοπίου, που πετύχαινε μεγέθυνση σαράντα φορές και η θεωρία του για την ανάλυση των χρωμάτων του λευκού φωτός μέσα από πρίσμα. Ο Νεύτωνας έγινε μέλος της Εταιρείας το 1672 και το 1675 έδωσε διάλεξη σε αυτή παρουσιάζοντας τη σωματιδιακή θεωρία του φωτός.

Η επιτροπή της Εταιρείας με επικεφαλής τον Ρόμπερτ Χούκ απέρριψε αυτή την θεωρία της φύσης του φωτός επειδή δεν παρείχε επαρκείς επιστημονικές αποδείξεις. Το ίδιο έκανε και ο Χόιχενς, ως μέλος της Εταιρείας, δεδομένου ότι η δική του κυματική θεωρία ήταν επικρατούσα εκείνη την εποχή, όπως και αυτή του Καρτέσιου. Ο Νεύτωνας αποθαρρύνθηκε από αυτή την συμπεριφορά και ζήτησε τη διαγραφή του από την Εταιρεία, αλλά

μετά από παρέμβαση του προέδρου της Ακαδημίας, Όλντεν Μπούργκ, δεν συνέβη. Η περίοδος εσωστρέφειας και απομόνωσης που ακολούθησε για τον Νεύτωνα του έδωσε τον χρόνο να ολοκληρώσει την εργασία του για την βαρύτητα (Ferraro, 2007).

Μέχρι εκείνη την εποχή υπήρχε η υπόνοια ότι κάποιου είδους δύναμη ευθύνεται για την πτώση των σωμάτων στη γη, η οποία μειώνεται με την αύξηση της απόστασης. Αυτή τη θεωρία είχε εκφράσει ο Ντάνς Σκότος και μια παρόμοια ο Ισμαέλ Μπουγιό αλλά δεν είχε συνδεθεί με την κίνηση των πλανητών. Μόνο ο Νεύτωνας μετά από εργασία πολλών χρόνων κατάφερε να δώσει πειστικά επιχειρήματα και να παρουσιάσει τον νόμο της παγκόσμιας βαρυτικής έλξης. Παράλληλα ο Ρόμπερτ Χούκ μελετούσε την σύνδεση κινήσεων και βαρύτητας αλλά όχι με μαθηματικούς όρους. Ορμώμενος από τη θεωρία της μείωσης της έντασης του φωτός αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση, προσπαθούσε να αποδείξει ότι αυτή η σχέση λειτουργεί και με την βαρύτητα. Μάλιστα είχε εκφράσει την επιθυμία του να συνεργαστεί με τον Νεύτωνα στο κομμάτι αυτό, αλλά αυτός αρνήθηκε (Weinberg, 2016).

Το 1681 στο Κέιμπριτζ ο Νεύτων δέχτηκε μια επίσκεψη από τον νεαρό τότε αστρονόμο Έντμουντ Χάλεϊ, ώστε να συζητήσουν για ένα μαθηματικό πρόβλημα, χωρίς να του αποκαλύψει την συνεργασία που είχε με τον Χούκ. Ο Χάλεϊ έχει αποδείξει ότι αν υποθεθεί ότι η τροχιά ενός πλανήτη είναι κυκλική, τότε ο τρίτος νόμος του Κέπλερ οδηγεί σε μια δύναμη αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Δεν μπορούσε όμως να εξηγήσει το αντίστροφο της πρότασης, δηλαδή ποιες είναι οι πιθανές τροχιές ενός σώματος που υφίσταται την επίδραση αυτής της δύναμης με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ο Νεύτωνας αφού τον αφογκράστηκε, του έδειξε τα αποτελέσματα της έρευνας του τα οποία δίνουν την εξήγηση με βάση την μέθοδο του ολοκληρωτικού λογισμού, που είχε ανακαλύψει. Ο Χάλεϊ έμεινε έκπληκτος καθώς στα γραπτά του υπήρχαν όλες οι αποδείξεις για τους νόμους του Κέπλερ, για την εξήγηση του σχήματος της Γης και για την ερμηνεία των παλιρροιών μέσα από ένα απλό μαθηματικό νόμο.

Ο Χάλεϊ πρότεινε στον Νεύτωνα να δημοσιεύσει το έργο του, αλλά εκείνος αρνήθηκε. Στην προσπάθειά του να τον μεταπεισει, όντας μέλος της Βασιλικής Εταιρείας, επιχείρησε να αποσπάσει κονδύλια για την έκδοση του έργου του, αλλά όταν ο Νεύτωνας υποχώρησε αυτά δεν ήταν διαθέσιμα. Εν συνεχεία ο ίδιος ο Χάλεϊ αναλαμβάνει με ίδια έξοδα το όλο εγχείρημα και τον Μάιο του 1682 τυπώθηκαν τριακόσια αντίτυπα των «Μαθηματικών Αρχών της Φυσικής Φιλοσοφίας», το οποίο γνώρισε τεράστια επιτυχία στην Αγγλία. Αυτό το έργο του Νεύτωνα αποτέλεσε το σπουδαιότερο βιβλίο στην Ιστορία της Επιστήμης (Vigoureux, 2006; Weinberg, 2016).

Έτσι η ζωή του πέρασε μετά από 20 χρόνια απομόνωσης, από το στάδιο της εσωστρέφειας στην πλήρη δημοσιότητα. Από μοναχικός ερευνητής του Κέιμπριτζ γίνεται πρόεδρος της Βασιλικής Εταιρείας και το 1694 διευθυντής του Νομισματοκοπείου με τίτλο Sir Isaac Newton. Κατά την θητεία του όμως έβγαλε στην επιφάνεια πολλά αρνητικά στοιχεία του χαρακτήρα του και κυρίως αυταρχισμό και καχυποψία για την κλοπή των ανακαλύψεων του. Ο Ρόμπερτ Χούκ παραπονέθηκε για την περιφρόνηση που έδειξε στις έρευνές του σχετικά με τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου, για τον οποίο ο Νεύτωνας δεν έδωσε καμία αξία και μάλιστα τον κατηγορήσε για λογοκλοπή. Αυτή είναι μόνο η αρχή καθώς αμέτρητες διαμάχες με συναδέλφους γέμισαν τη ζωή του Νεύτωνα.

Μια άλλη γνωστή διαμάχη ήταν αυτή με τον Γερμανό μαθηματικό Βίλχελμ Λάιμπνιτς σχετικά με το ποιος ανακάλυψε πρώτος τον ολοκληρωτικό λογισμό. Αυτή η μέθοδος αποτέλεσε μια άλλη μεγάλη συμβολή του Νεύτωνα στο πεδίο των Μαθηματικών. Αφού έλυσε πολλά προβλήματα με άπειρα σύνολα, βρήκε παραγώγους ταχυτήτων για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα και υπολόγισε εμβαδά που προκύπτουν από καμπύλες γραμμές. Το έργο όμως αυτό δεν έγινε γνωστό καθώς δεν το είχε δημοσιεύσει. Από την άλλη πλευρά ο Λάιμπνιτς, μαθητής του Χόιχενς, είχε βρει ανεξάρτητα από τον Νεύτωνα κάποια στοιχεία του ολοκληρωτικού λογισμού αν και είχε έρθει σε επαφή με την πρόοδο του Νεύτωνα, μέσω του μαθηματικού Τζόν Κόλινς, ο οποίος είχε επίσης στενή συνεργασία με τον Μπάροου. Στην δημοσιεύσεις των εργασιών του Λάιμπνιτς το 1684 και το 1685 δεν μνημονεύεται το όνομα του Νεύτωνα, γεγονός που δημιούργησε την κόντρα μεταξύ τους. Από τότε και έπειτα στην επιστημονική κοινότητα η απόφαση δημοσίευσης θεωρείται απαραίτητο κριτήριο αναγνώρισης (Modinos, 2014).

Η εικόνα που έδειχνε ο Νεύτωνας τα τελευταία χρόνια της ζωής του ήταν ενός ανθρώπου, που παρά την αξιοθαύμαστη ευφυΐα του, χαρακτηριζόταν από καχυποψία, δίψα για εξουσία και αναγνώριση ενώ παράλληλα η αδιαλλαξία του δεν τον εμπόδιζε να εξοντώνει τους αντιπάλους του ακόμη και με συνοπτικές διαδικασίες εκτέλεσης τους. Ύστερα από μια περίοδο μεγάλων ψυχολογικών προβλημάτων και κρίσεων πέθανε το 1727 από νεφρολιθίαση και η κηδεία του έγινε με δημόσια δαπάνη, τιμητικά, στο Αβαείο του Γουέστμινστερ, παρόλο που δεν ήταν κληρικός (Ferraro, 2007).

### 3.2.2 Συλλογισμοί και δεδομένα που οδήγησαν τον Νεύτωνα στον Νόμο της Παγκόσμιας έλξης

Σύμφωνα με την παράδοση και συγκεκριμένα ένα μύθο που διαδόθηκε από τον Βολταίρο ο Νεύτωνας οδηγήθηκε στην σύνθεση της επίγειας και της ουράνιας μηχανικής μέσω

του νόμου της παγκόσμιας έλξης, βλέποντας ένα μήλο να πέφτει στο περιβόλι του Γούλσθορν. Αυτό κυριολεκτικά αποτελεί ένα θρύλο, αφού η πτώση του μήλου διαρκεί κλάσματα του δευτερολέπτου οπότε δεν θα μπορούσε να μελετηθεί με τα μέσα της εποχής. Όμως είναι πολύ πιθανό να έγιναν από το Νεύτωνα με αφορμή αυτό το ερέθισμα κάποιοι συλλογισμοί που τον οδήγησαν σε αυτή την τεράστια ανακάλυψη.

Βλέποντας λοιπόν το μήλο να πέφτει και παρατηρώντας την Σελήνη καθισμένος στο περιβόλι, φέρεται να αναρωτήθηκε αφενός γιατί το μήλο δεν περιφέρεται όπως η Σελήνη γύρω από την Γη κατά την κίνηση του και αφετέρου γιατί η Σελήνη δεν πέφτει πάνω στη Γη, όπως το μήλο κατά την κίνησή της. Στην συνέχεια φέρεται να αναζήτησε αν υπάρχουν ομοιότητες στις δυο φαινομενικά διαφορετικές κινήσεις. Αν αφεθεί ένα μήλο ελεύθερα, πέφτει κάθετα, αν όμως ασκηθεί μεγαλύτερη δύναμη και ριφθεί οριζόντια πάει όλο και πιο μακριά. Με την ίδια λογική ίσως θα μπορούσε να υπάρξει τρόπος να ριφθεί με τέτοια δύναμη ώστε να πραγματοποιήσει το γύρο της Γης και να πέσει στο ίδιο σημείο. Επίσης ο Νεύτωνας σκέφτηκε την περίπτωση η Σελήνη να πέφτει όπως το μήλο, αλλά χωρίς να γίνεται αντιληπτή (Vigoureux, 2006).

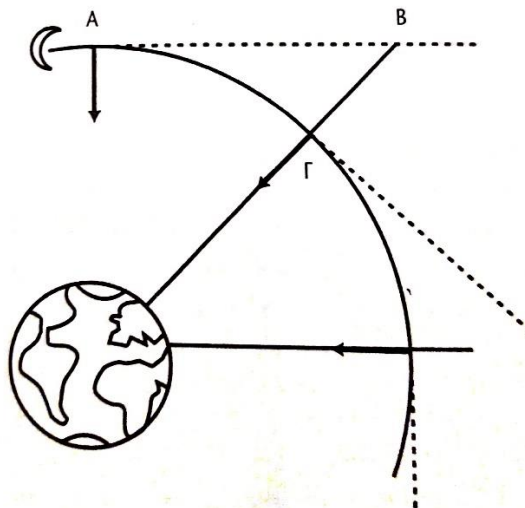
Με βάση τους παραπάνω συλλογισμούς ο Νεύτωνας κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ίσως και να μην υπάρχει τόσο μεγάλη διαφορά στις κινήσεις του μήλου και της Σελήνης. Ένα άλλο φαινόμενο, γνωστό από τον Γαλιλαίο επηρεάζει διαφορετικά τις δυο κινήσεις και δεν είναι άλλο από την αντίσταση του αέρα. Αυτή έχει την τάση να επιβραδύνει την κίνηση των γήινων σωμάτων αναγκάζοντας μετά την ρίψη τους να πέφτουν στο έδαφος. Σε μεγάλα υψόμετρα όμως που η ατμόσφαιρα είναι πιο αραιή, άρα οι τριβές αμελητέες ίσως να μην επηρέαζε την κίνηση του σώματος και αυτό να την διατηρούσε. Υπό αυτή την ανάλυση Σελήνη και μήλο έχουν την ίδια κίνηση πτώσης με την μόνη διαφορά τις αρχικές τους συνθήκες. Η Σελήνη έχει αρχική ταχύτητα και δεν υπάρχει η αντίσταση του αέρα για να μειώσει την ορμή της, ενώ το μήλο είναι ακίνητο και μόλις ξεκινήσει την πτώση του, μειώνεται η ορμή του από αυτήν (Brasch, 1962).

Έπειτα ένα άλλος συλλογισμός φέρεται να οδήγησε τον Νεύτωνα στον ρόλο και την συγκεκριμενοποίηση της έννοιας της δύναμης. Σύμφωνα με την αρχή της αδράνειας του Γαλιλαίου αν ένα σώμα που κινείται ευθύγραμμα μετατοπιστεί, αλλάζοντας την αρχική πορεία του, είναι γιατί κάτι εξωτερικό το αναγκάζει να το κάνει. Ομοίως αν ένα σώμα που διατηρεί την ταχύτητα του σταθερή, επιταχύνεται ξαφνικά ή επιβραδύνεται σημαίνει ότι κάτι το αναγκάζει να το κάνει. Αυτό το κάτι για τον Νεύτωνα είναι εξ' ορισμού μια δύναμη. Από τον Αριστοτέλη ήταν ήδη γνωστό ότι για να διατηρηθεί η κίνηση ήταν απαραίτητη μια δύναμη, που είχε το ρόλο του κινούν και ότι μόνο η ακινησία διατηρούνταν από μόνη της.

Η δύναμη όπως την εντοπίζει ο Νεύτωνας δεν έχει το ρόλο του ‘κινούν’ αφού τα σώματα διατηρούν από μόνα τους την ταχύτητα και απλώς παρεμβαίνει για να την μεταβάλλει. Επομένως η δύναμη σχετίζεται με την παραγωγή ή την τροποποίηση της κίνησης, πράγμα που σημαίνει ότι εάν ένα σώμα ήταν αρχικά ακίνητο, με την άσκηση δύναμης επιταχύνει ενώ αν κινείται, αυτή έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση ή παύση της κίνησης. Αυτές οι σκέψεις οδήγησαν τον Νεύτωνα στην σύλληψη του ρόλου των δυνάμεων όχι μόνο στην πτώση των σωμάτων αλλά σε όλες τις περιπτώσεις κίνησης καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι κάθε απόκλιση από την ευθύγραμμη και ομοιόμορφη κίνηση είναι ένδειξη δράσης κάποιας δύναμης (Pfister & King, 2015).

Η Σελήνη δεδομένου ότι δεν δέχεται κάποια εξωτερική επίδραση πάνω της, έπρεπε να κινείται ευθύγραμμα και να απομακρύνεται συνάμα από τη Γη. Αυτό όμως δεν παρατηρείται, οπότε κάποια δύναμη λογικά επιδρά πάνω της και την κρατά στην Γη. Ο Νεύτωνας για να εντοπίσει την δύναμη αυτή παραλληλίζει την κίνηση της Σελήνης με μια πέτρα που εκτελεί κυκλική κίνηση ενώ είναι δεμένη με σχοινί. Είναι προφανές ότι η τάση του σχοινοῦ εμποδίζει την πέτρα να απομακρυνθεί αφού έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς. Αυτό σημαίνει ότι μια ανάλογη δύναμη διατηρεί την Σελήνη στην τροχιά της και έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της Γης (Narlikar, 1999).

Εν συνεχεία ο Νεύτωνας σχηματοποιεί και αναλύει την κίνηση της σε μικρές διαδοχικές μετατοπίσεις και κατά τρόπο συνεχή. (βλ. εικόνα 3.3) Η απόσταση ΒΓ θεωρείται το ύψος πτώσης της Σελήνης προς τη Γη κατά την μετατόπιση της από το Α στο Γ. Ο σκοπός είναι να υπολογίσει την τιμή πτώσης της και να την συγκρίνει με την τιμή πτώσης ενός γήινου αντικειμένου που πέφτει οριζόντια. Η δεύτερη τιμή υπολογίζεται στα 5 μέτρα το πρώτο δευτερόλεπτο πτώσης. Ο ορισμός της πρώτης τιμής, όμως, έχει δυσκολίες αφού η έλξη της Γης γίνεται συνεχώς και όχι ανά τακτά διαστήματα. Η κίνηση της Σελήνης διαιρεί την τροχιά της σε ευθύγραμμα τμήματα, αλλά οι υπολογισμοί δίνουν διαφορετικές ταχύτητες οπότε ο Νεύτωνας δεν γνωρίζει ποιο μήκος ευθύγραμμου τμήματος να χρησιμοποιήσει. Η λύση έγκειται στη μέθοδο του διαφορικού λογισμού, αφού λόγω της συνεχούς έλξης πρέπει να χρησιμοποιήσει τμήματα τροχιάς απείρως μικρά και ταυτιζόμενα με στιγμές. Το αποτέλεσμα της μεθόδου του επιτρέπει να υπολογίσει την γήινη έλξη σε κάθε σημείο της τροχιάς και δίνει νόημα στον όρο της στιγμιαίας ταχύτητας κάθε χρονική στιγμή (Vigoureux, 2006).



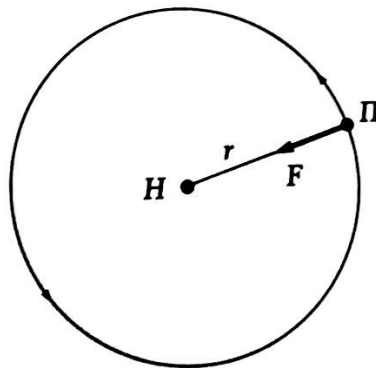
**Εικόνα 3.3** Σχηματοποίηση της κίνησης της Σελήνης σε διαδοχικές μετατοπίσεις. Η Σελήνη, βάσει της Αρχής της αδράνειας έπρεπε να ακολουθεί την ευθύγραμμη πορεία AB, όμως επειδή δέχεται μια δύναμη έλξης από τη Γη η τροχιά της παρεκκλίνει στο AG (Vigoureux, 2006).

Ο Νεύτωνας έχει επίσης σοβαρές υποψίες ότι η βαρύτητα έχει καθολικό χαρακτήρα, δηλαδή ισχύει για όλα τα σώματα του ηλιακού συστήματος και προσπαθεί να το αποδείξει. Αρχικά διατυπώνει ένα νόμο μεταβολής της βαρύτητας σχετικά με την απόσταση και στη συνέχεια βάσει αυτού, υπολογίζει την τιμή της έλξης της Γης στην απόσταση που βρίσκεται η Σελήνη. Εν συνεχεία με βάση αυτή την τιμή υπολογίζει την τροχιά που πρέπει να έχει ένα σώμα σε ελεύθερη πτώση, αν βρισκόταν στη θέση της Σελήνης. Τέλος συγκρίνει την θεωρητική με την πραγματική κίνηση της Σελήνης (MacDougal, 2012).

Για να καταλήξει στο νόμο του αντίστροφου τετραγώνου χρησιμοποιεί τον τύπο του Χόιχενς για τον υπολογισμό της φυγόκεντρης δύναμης στην περίπτωση της κυκλικής κίνησης  $\Delta u/\Delta t = u^2/r$ , όπου  $u$  η ταχύτητα και  $r$  η ακτίνα της τροχιάς του σώματος. Η φυγόκεντρος δύναμη είναι μια ψευδοδύναμη που συνίσταται στην αντίσταση λόγω αδράνειας ενός σώματος ενάντια στην κεντρομόλο επιτάχυνση του, όταν αυτό εκτελεί κυκλική κίνηση. Ο Νεύτωνας έχει αντιληφθεί ότι η επιτάχυνση δεν είναι απλά μια μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου αλλά ένα διάνυσμα με φορά στην συγκεκριμένη περίπτωση προς το κέντρο της κυκλικής κίνησης. Έτσι η κεντρομόλος επιτάχυνση ισούται με  $a = u^2/r$  και άρα η δύναμη που εμποδίζει το σώμα να εκτραπεί είναι ανάλογη προς αυτή, με βάση τον δεύτερο νόμο της κίνησης. (βλ. εικόνα 3.4)

Αν η ακτίνα ΗΠ σαρώνει ίσα εμβαδά σε ίσους χρόνους τότε με βάση τον 2ο νόμο του Κέπλερ ο πλανήτης Π εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση, δηλαδή με σταθερή ταχύτητα. Αν επίσης μια πλήρης περιφορά διαρκεί χρόνο  $T$ , τότε αυτή η σταθερή ταχύτητα ισούται με  $u = 2 \cdot \pi \cdot r / T$ . Η δύναμη όμως δεν έχει την κατεύθυνση της ταχύτητας, αλλά της επιτάχυνσης,

που έχει φορά προς το κέντρο της τροχιάς. Η κατεύθυνση της ταχύτητας είναι εφαπτομένη σε κάθε σημείο της τροχιάς της κίνησης. Επειδή  $F = m \cdot a$  όπου  $F$  η δύναμη,  $m$  η μάζα και  $a$  η επιτάχυνση, τότε στην συγκεκριμένη περίπτωση  $F = m \cdot u^2/r$ . Όμως  $u = 2 \cdot \pi \cdot r/T$  και έτσι η εξίσωση γίνεται  $F = m \cdot (2 \cdot \pi \cdot r/T)^2/r = 4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot r/T^2$ . Από τον 3ο νόμο του Κέπλερ ισχύει ότι  $T^2 = k \cdot r^3$ , όπου  $k$  σταθερός αριθμός. Συνδυάζοντας τις δυο εξισώσεις προκύπτει ότι  $F = 4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot r/k \cdot r^3 = 4 \cdot \pi^2 \cdot m/k \cdot 1/r^2$ . Αυτός ο μαθηματικός τύπος εκφράζει ότι η δύναμη έλξης που ασκεί ένα σώμα σε ένα άλλο ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης (Narlikar, 1999).



*Εικόνα 3.4 Η κεντρομόλος δύναμη  $F$  που δέχεται ένας πλανήτης από τον ήλιο σε απόσταση  $r$  (Narlikar, 1999).*

Για να τον θεμελιώσει αυτό τον νόμο ο Νεύτωνας θα μπορούσε να συγκρίνει την τιμή της βαρυτικής έλξης σε διάφορα υψόμετρα αλλά με τα μέσα της εποχής δεν ήταν δυνατό. Εναλλακτικά θα μπορούσε να τοποθετήσει θεωρητικά τη Σελήνη σε διαφορετικές αποστάσεις από τη Γη και να τη μελετήσει μαθηματικά. Όμως συνειδητοποιεί ότι ήδη οι πλανήτες βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από τον Ήλιο. Με αφορμή αυτό το συλλογισμό μεταφέρει το πρόβλημα Γης-Σελήνης σε σχέση Γης-Ηλίου αποκαλύπτοντας μια δύναμη έλξης με κέντρο τον Ήλιο πλέον. Αυτό τον οδηγεί στον νόμο των εμβადών του Κέπλερ και μάλιστα για να ικανοποιεί αυτή η δύναμη έλξης τις απαιτήσεις και των άλλων δυο νόμων του, έπρεπε να αποδειχθεί μόνο ότι είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης, όπως και έγινε. Ο Νεύτωνας με αυτό τον τρόπο αποδεικνύει και την καθολικότητα της δύναμης αυτής και επιβεβαιώνει και τους τρεις νόμους του Κέπλερ. Συνολικά, μπορεί να ειπωθεί ότι με ένα νόμο ο ίδιος ενοποίησε τη ουράνια με την επίγεια μηχανική (Grego & Mannion, 2010).

Ήταν γνωστό από την αρχαία εποχή ότι η απόσταση Γης-Σελήνης ισούται με 60 ακτίνες της Γης. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση είναι 60 φορές μεγαλύτερη από αυτή που χωρίζει ένα μήλο στην επιφάνεια της Γης από το εν λόγω κέντρο. Θεωρώντας ότι η δύναμη

της βαρύτητας είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, η έλξη που ασκεί η Γη επί της Σελήνης είναι 3.600 φορές μικρότερη από εκείνη που ασκεί στο μήλο. Επίσης δεν λαμβάνεται υπόψιν η διαφορά μάζας Σελήνης και μήλου εφόσον ο Γαλιλαίος έδειξε ότι χωρίς τριβές τα σώματα πέφτουν με το ίδιο τρόπο. Έτσι αφού ένα σώμα στη Γη πέφτει κατά 5 μέτρα το πρώτο δευτερόλεπτο στην απόσταση Γης-Σελήνης, η Σελήνης πρέπει να πέφτει κατά  $5/3600 = 0,0013\text{m}$  ή αλλιώς 1,3 mm. Μένει λοιπόν η σύγκριση των θεωρητικών υπολογισμών και της πραγματικής κίνησης της Σελήνης.

Δυστυχώς για τον Νεύτωνα δεν βρίσκει την τιμή πτώσης 1,3 mm και απογοητεύεται εγκαταλείποντας παράλληλα την έρευνα, αφού πρώτα είχε ελέγξει τόσο τις μετρήσεις όσο και τη μέθοδο. Ωστόσο εδώ το σφάλμα έγκειται στην χρήση λανθασμένης τιμής για την απόσταση Γης Σελήνης και το επιβεβαίωσε ο Πικάρ το 1671. Ο Νεύτωνα ενημερώθηκε γι' αυτό το 1682 και ξανακάνει τις μετρήσεις γνωρίζοντας πλέον ότι η Σελήνη απέχει από τη Γη 304.402km και διανύει το σύνολο της τροχιάς της σε 27,32 ημέρες. Το αποτέλεσμα δίνει ύψος πτώσης στον ίδιο χρόνο 1,3mm ακριβώς, επιβεβαιώνοντας ότι η βαρυτική έλξη είναι υπεύθυνη πέρα από την πτώση του μήλου και για την περιστροφική κίνηση της Σελήνης γύρω από τη Γη (Vigoureux, 2006).

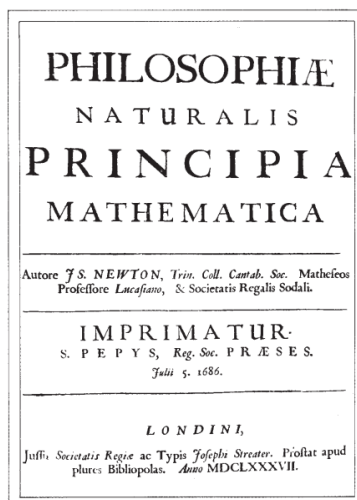
Ο θρίαμβος της ανακάλυψης του Νεύτωνα δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί αν οι προκάτοχοι του δεν είχαν δώσει τα στοιχεία που χρειαζόταν για να τα συνδυάσει μέσω της εξαιρετικής ευστροφίας του. Αυτός ο φόρος τιμής συνοψίζεται στη φράση του Νεύτωνα: «Αν κατάφερα να δω μακριά, είναι γιατί στάθηκα σε ώμους γιγάντων» (Weinberg, 2016). Προφανώς εδώ ο Νεύτωνα αναφέρεται στον Κοπέρνικο, τον Μπράχε, τον Κέπλερ και τον Γαλιλαίο.

Ο Κοπέρνικος κατήγγειλε τον διαχωρισμό του Σύμπαντος σε υποσελήνια και αστρική περιοχή, έθεσε τον Ήλιο στο κέντρο του ηλιακού συστήματος και τη Γη ανάμεσα στους πλανήτες. Το ηλιοκεντρικό σύστημα έδινε έμμεσα την ιδέα της ελκτικής δύναμης της βαρύτητας που συνέλαβε ο Νεύτωνα. Ο Τύχο Μπράχε μέσα από τις παρατηρήσεις του έδειξε ότι το ουράνιο στερέωμα διέπεται από συνεχείς μεταβολές ενώ ο Γιοχάνες Κέπλερ πέρα από την διαίσθηση που είχε για την ενότητα ουράνιων και γήινων νόμων, απέδιδε την σφαιρικότητα των ουράνιων σωμάτων στην αμοιβαία έλξη των μαζών. Ο Γαλιλαίος με τις παρατηρήσεις του και την μελέτη των κινήσεων των δορυφόρων του Δία και της πτώσης των γήινων σωμάτων έδωσε την ιδέα ότι Ουρανός και Γη είναι ίδιας φύσεως στα πλαίσια του ηλιακού συστήματος. Ο Νεύτωνα συγκεντρώνοντας και αξιοποιώντας εποικοδομητικά παραπάνω εναύσματα συσχέτισε και μαθηματοποίησε την κίνηση των πλανητών με τις γήινες δυνάμεις (Brasch, 1962; Ebison, 1993).



### 3.2.3 Διατύπωση των νόμων της κίνησης και του Νόμου της Παγκόσμιας Έλξης

Ο Ισαάκ Νεύτωνας στις 5 Ιουλίου του 1687 δημοσιεύει το έργο του «Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας», διατυπώνοντας την θεωρία του για την κίνηση των σωμάτων και τον νόμο της βαρύτητας γνωστό και ως Νόμο της Παγκόσμιας Έλξης. Στο βιβλίο του ξεκινάει με βασικούς ορισμούς εννοιών όπως η μάζα, η ορμή, η δύναμη, ο χώρος και ο χρόνος.



**Εικόνα 3.5** Το εξώφυλλο των Μαθηματικών Αρχών της Φυσικής Φιλοσοφίας, έργο του Νεύτωνα για τους νόμους της κίνησης και της Παγκόσμιας Έλξης (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Η μάζα ορίζεται ως η ποσότητα ύλης που προκύπτει από το γινόμενο της πυκνότητας και του όγκου ενός σώματος, όπως φαίνεται από τον γνωστό τύπο  $m=d \cdot v$ , όπου  $m$  η μάζα,  $d$  η πυκνότητα και  $v$  ο όγκος ενός σώματος. Επίσης η ορμή ορίζεται ως ποσότητα κίνησης με μέτρο, που προκύπτει από το γινόμενο της ταχύτητας και της μάζας σύμφωνα με τον τύπο  $p=m \cdot u$ , όπου  $p$  η ορμή,  $m$  η μάζα και  $u$  η ταχύτητα ενός σώματος. Στην συνέχεια ακολουθεί η συσχέτιση της μάζας με την αδράνεια και άρα με την αντίσταση που προβάλλει ένα σώμα, με σκοπό να διατηρήσει την κινητική του κατάσταση είτε αρχικά αυτή ήταν η ακινησία, είτε η ευθύγραμμη ομαλή κίνηση. Ακόμη η δύναμη ορίζεται ως η αιτία που ένα σώμα αλλάζει τις παραπάνω περιπτώσεις αρχικής κατάστασης. Έτσι προκύπτει και ένας δεύτερος ορισμός της έννοιας της μάζας, ως την ιδιότητα ενός σώματος να αντιτίθεται σε κάθε αλλαγή της κίνησης του. Βάσει αυτού του ορισμού ονομάζεται αδρανειακή μάζα (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Pfister & King, 2015).

Ο Νεύτωνας επίσης διατυπώνει ότι ο απόλυτος μαθηματικός και πραγματικός χρόνος κυλά ομαλά χωρίς να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες όπως και ο απόλυτος χώρος παρουσιάζεται ακίνητος και ομοιογενής δίχως εξωτερικές επιρροές. Εδώ αξίζει να

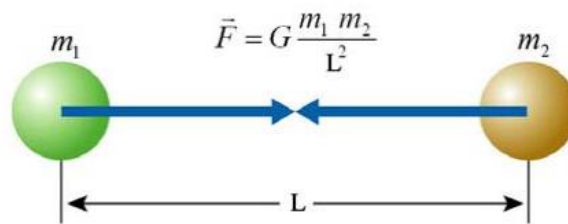
αναφερθεί ότι ο Λάμπνιτς και ο Μπέρκλεϊ επέκριναν αυτές τις θεωρήσεις του Νεύτωνα για τις δυο αυτές έννοιες υποστηρίζοντας ότι μόνο σχετικοί χαρακτηρισμοί έχουν σημασία σε αυτά τα μεγέθη. Ο Νεύτωνας είχε υποπτευθεί αυτή την σχετικότητα και συγκεκριμένα ότι μόνο η επιτάχυνση είναι μέγεθος απόλυτο, σε αντίθεση με την ταχύτητα και την μετατόπιση. Οι δυο απόψεις όμως θα συνδυαστούν και θα δοθεί επίσημη διατύπωση περί αυτών στις αρχές του 20ου αιώνα από τον Άλμπερτ Αϊνστάιν (Milsom, 2018).

Μετά τους ορισμούς στο βιβλίο των Αρχών ακολουθεί η διατύπωση των τριών νόμων της κίνησης από τον Νεύτωνα. Ο 1ος νόμος της κίνησης είναι γνωστός από τον Γαλιλαίο και τον Καρτέσιο ως αρχή της αδράνειας, ενώ παράλληλα αποτελεί άμεση συνέπεια του 2ου νόμου, που θα ακολουθήσει. Σύμφωνα με αυτόν ένα σώμα το οποίο αρχικά βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ή κινείται με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος ευθείας γραμμής, θα διατηρήσει την κατάσταση του και την ταχύτητα του κατά μέτρο και κατεύθυνση επ' αόριστον, εκτός αν ασκηθεί πάνω του κάποια εξωτερική δύναμη. Εδώ διαφαίνεται ένας έμμεσος προσδιορισμός της δύναμης, αφού αν ένα σώμα δεν ακολουθεί την αρχή της αδράνειας ή αλλιώς αν ένα σώμα παρουσιάσει κάποια επιτάχυνση ή επιβράδυνση, τότε γι' αυτό ευθύνεται μια ή και περισσότερες δυνάμεις (MacDougal, 2012).

Ο 2ος νόμος της κίνησης είναι γνωστός ως η Θεμελιώδης Αρχή της Μηχανικής επιδεικνύοντας πως μια δύναμη μεταβάλλει την κίνηση ενός σώματος και επιτρέποντας παράλληλα την μέτρηση αυτής της μεταβολής. Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο η μεταβολή της κίνησης είναι ανάλογη με το μέγεθος της δύναμης που ασκείται κατά μέτρο και κατεύθυνση και αντιστρόφως ανάλογη προς τη μάζα επί της οποίας μεταδίδεται. Ο Νεύτωνας σχετικά με τον όρο μεταβολή της κίνησης εννοεί τον ρυθμό μεταβολής της ορμής, που είναι ανάλογος της δύναμης που ασκείται σύμφωνα με τον τύπο  $\Delta p/\Delta t = m \cdot a$  ή αλλιώς το γινόμενο της μάζας με την επιτάχυνση ισούται με την δύναμη που την παράγει σύμφωνα με τον τύπο  $F = m \cdot a$ , όπου  $F$  είναι η δύναμη,  $m$  η μάζα και  $a$  η επιτάχυνση (T.Cushing, 2003). Εδώ μπορεί να συνδυαστεί και η έννοια της αδράνειας καθώς άμεση συνέπεια του νόμου αυτού από ποσοτική άποψη είναι ότι όσο μεγαλύτερη αδράνεια παρουσιάζει ένα σώμα, τόσο μεγαλύτερη δύναμη πρέπει να ασκηθεί για να αποκτήσει ένα σώμα μια δεδομένη επιτάχυνση. Εναλλακτικά, ασκώντας μια δεδομένη δύναμη μπορεί να παραχθεί μεγαλύτερη επιτάχυνση στο σώμα, το οποίο παρουσιάζει την μικρότερη αδράνεια.

Ο 3ος νόμος της κίνησης είναι γνωστός ως η αρχή της δράσης και της αντίδρασης. Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο σε κάθε άσκηση δύναμης (δράση) αντιστοιχεί μια ίση και αντίθετη κατεύθυνσης δύναμη (αντίδραση). Αυτή η διατύπωση επίσης οδηγεί στην αρχή διατήρησης της ορμής (Βρούλος & Καρνάβας, 2021).

Στην συνέχεια ο Νεύτωνας χρησιμοποιώντας τον 2ο και 3ο νόμο της κίνησης καταλήγει στον Νόμο της Παγκόσμιας Έλξης. Σύμφωνα με αυτόν ανάμεσα σε δυο σώματα, που έχουν μάζα, ασκείται μια δύναμη έλξης πάνω στην ευθεία που ενώνει τα κέντρα μάζας τους και η οποία είναι ανάλογη του μέτρου των γινομένων των εμπλεκόμενων μαζών και αντίστροφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης που τις χωρίζει. Αυτή η διατύπωση συνοψίζεται στον τύπο  $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ , όπου F η δύναμη της βαρυτικής έλξης,  $m_1$  η μάζα ενός σώματος,  $m_2$  η μάζα του δεύτερου σώματος, G η σταθερά του Νεύτωνα ή Παγκόσμια σταθερά ή Σταθερά της Παγκόσμιας Έλξης και r, η απόσταση που χωρίζει τα κέντρα των δυο μαζών (T.Cushing, 2003).

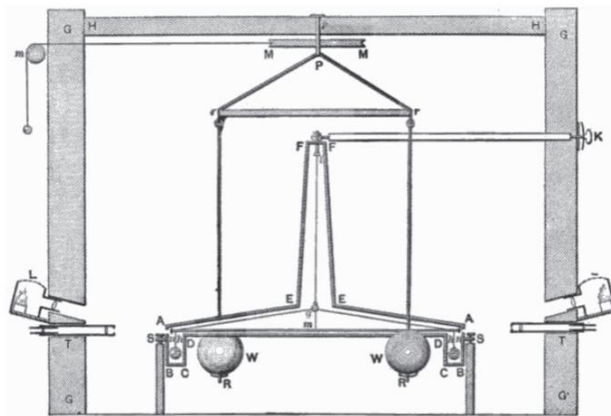


Εικόνα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση του νόμου Παγκόσμιας Έλξης μεταξύ δυο μαζών (Δεληκαράογλου, 2010).

Σε αυτόν τον νόμο παρατηρείται μια κεντρική δύναμη που ασκείται καθολικά στο Σύμπαν μεταξύ οποιονδήποτε μαζών, η οποία υπακούει στον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου. Χάρη σε αυτή την δύναμη οι δορυφόροι έλκονται από τους πλανήτες, οι πλανήτες έλκονται από τον Ήλιο και ένα μήλο ή οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο έλκεται από την Γη. Επίσης παρατηρείται ότι η ένταση της βαρυτικής δύναμης που ασκείται από το  $m_1$  στο  $m_2$  είναι ανάλογη και ίση με αυτή που ασκείται από το  $m_2$  στο  $m_1$  επειδή  $m_1 \cdot m_2 = m_2 \cdot m_1$ . Έτσι το μήλο για παράδειγμα έλκει την Γη με την ίδια δύναμη που έλκεται από αυτήν. Αυτό το συμπέρασμα αντιτίθεται στην κοινή λογική αφού θεωρείται ότι ένα ογκώδες σώμα είναι και πιο ενεργό. Ακόμη αυτή η δύναμη μεταξύ των μαζών δεν μπορεί να είναι μηδενική όσο και να ελαττωθεί η μεταξύ τους απόσταση ενώ αν εφαρμοστεί για ένα γήινο αντικείμενο μας δίνει αυτό που αποκαλείται βάρος του αντικειμένου και εκφράζεται με τον τύπο  $B = m \cdot g$ , όπου m η μάζα του αντικειμένου και g η επιτάχυνση της βαρύτητας στην Γη (Milsom, 2018; Vigoureux, 2006).

Μια άλλη παρατήρηση σχετικά με τον νόμο, είναι ότι στο βιβλίο των «Αρχών» δεν εμφανίζεται ακριβώς έτσι. Συγκεκριμένα λείπει η Παγκόσμια Σταθερά καθώς δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί, αφού ο Νεύτωνας δεν γνώριζε τις μάζες του Ήλιου και της Γης. Έτσι στο βιβλίο του η σταθερά εμφανίζεται ως ένας συντελεστής πολλαπλασιασμού της μάζας της Γης ή του Ήλιου ανάλογα με την περίπτωση. Η ακριβής τιμή της υπολογίστηκε το 1797 από

τον Γάλλο Χένρι Κάβεντις σε πείραμα εργαστηρίου, ως έκφραση του μέτρου της δύναμης με βάση ακριβείς μονάδες. Αν η μάζα μετρηθεί σε κιλά, η απόσταση σε μέτρα και ο χρόνος σε δευτερόλεπτα τότε  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . Μονάδα μέτρησης της δύναμης ορίστηκε το Newton (N) στο S.I. προς τιμή του Ισαάκ Νεύτωνα που ανακάλυψε αυτόν τον σημαντικό νόμο (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Salisbury, 1996).



**Εικόνα 3.7** Η πειραματική διάταξη, με την οποία ο Κάβεντις μέτρησε την Παγκόσμια Σταθερά της Βαρύτητας ( $G$ ) (Milsom, 2018).

Τα σύμβολα στην εξίσωση του Νόμου της Παγκόσμιας Έλξης εκφράζουν με απλό και συνοπτικό τρόπο ότι ο Νεύτωνας εξηγεί στις Αρχές σε πάρα πολλές σελίδες. Αυτό δικαιολογεί και τον τίτλο του βιβλίου του ‘Μαθηματικές Αρχές’ συνδέοντας άρρηκτα τα Μαθηματικά με την Φυσική. Ακόμη από αυτόν τον νόμο προκύπτει και ένας τρίτος ορισμός της έννοιας μάζας, ο οποίος αφορά τον τρόπο που αντιδρά ένα σώμα στην βαρυτική έλξη που ασκείται από ένα άλλο σώμα. Η μάζα ορισμένη με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται βαρυτική μάζα.

Τέλος ο Νεύτωνας επέλεξε το όνομα του νόμου αυτού από την λέξη «graviter», που σημαίνει «έχω βάρος», για να δηλώσει προκλητικά ότι τα ουράνια σώματα έχουν βάρος όπως και τα γήινα και μάλιστα κινούνται υπό την επίδραση της ίδιας και καθολικής στο Σύμπαν δύναμης της βαρύτητας. Πράγματι αυτός ο απλός νόμος εξηγεί ότι αυτή η δύναμη είναι υπεύθυνη για την πτώση των γήινων σωμάτων, την περιστροφή των πλανητών γύρω από τον Ήλιο, την περιστροφή των δορυφόρων γύρω από τους πλανήτες και την περιστροφή των αστερών γύρω από το κέντρο των γαλαξιών (Vigoureux, 2006).

### 3.2.4 Συνέπειες του Νόμου Παγκόσμιας Έλξης

Ο Νεύτωνας μέσω του νόμου της Παγκόσμιας έλξης και της απόδειξης μέσω του διαφορικού λογισμού ότι ένα σώμα έλκει κάθε άλλο ως αν όλη η μάζα του να είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο, έδωσε επιστημονικές εξηγήσεις για το σχήμα των ουράνιων σωμάτων, τις τροχιές τους και τις μεταπτώσεις τους καθώς και για το φαινόμενο της παλίρροιας.

Επίσης επιβεβαίωσε την θεωρία του Γαλιλαίου και έδωσε την δυνατότητα να υπολογιστούν μεγέθη της Γης, των πλανητών και του Ήλιου, που υπό άλλες συνθήκες θα ήταν αδύνατον να επιτευχθεί.

Αρχικά ο Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης έδωσε το έναυσμα στον Κάβεντις να μετρήσει πέρα από την Παγκόσμια Σταθερά, την μάζα, τον όγκο και την πυκνότητα της Γης. Επιπλέον η θεωρία του Γαλιλαίου για την πτώση των σωμάτων επιβεβαιώθηκε από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Γνωρίζοντας πόση είναι η βαρυτική δύναμη που ασκείται σε ένα γήινο σώμα, μπορεί να βρεθεί η επιτάχυνση του, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι άλλη από την επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g$ ), που μετρήθηκε στα  $9,81 \text{ m/s}^2$  σε μέσο γεωγραφικό πλάτος. Συνδυάζοντας τους μαθηματικούς τύπους της νευτώνειας θεωρίας προκύπτει ότι  $g = G \cdot M / R^2$ , όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $G$  η παγκόσμια σταθερά,  $M$  η μάζα της Γης και  $R$  η ακτίνα της Γης, για ένα σώμα στην επιφάνεια της. Ήδη από αυτόν τον τύπο φαίνεται ότι το  $g$  είναι ανεξάρτητο της μάζας του σώματος επιβεβαιώνοντας την διατύπωση του Γαλιλαίου ότι δυο σώματα χωρίς την αντίσταση του αέρα αν αφεθούν από το ίδιο ύψος θα φτάσουν στο έδαφος με την ίδια ταχύτητα. Αν η εξίσωση λυθεί ως προς  $M$  υπολογίζεται η μάζα της Γης  $M = g \cdot R^2 / G = 10^{21}$  τόνους. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η μάζα του Ήλιου που είναι ίση με  $10^{27}$  τόνους (Ebison, 1993; Grego & Mannion, 2010).

Εν συνεχεία από την νευτώνεια θεωρία προκύπτει ότι η δύναμη της βαρύτητας έχει την τάση να σφαιροποιεί τα σώματα δίνοντας εξήγηση για το σχήμα της Γης και των άλλων ουράνιων σωμάτων. Κάθε μέρος της επιφάνειας ενός ουράνιου σώματος ή αστέρα έλκεται από κάθε άλλο συγχρόνως. Έτσι ο Ήλιος έχει την τάση να συμπύκνει το ηλιακό σύστημα σε μια συμπαγή σφαίρα ενώ από την άλλη οι ελλειπτικές τροχιές των ουράνιων σωμάτων δείχνουν την αντίσταση τους σε αυτή την έλξη αποκρύπτοντας παράλληλα την πτώση τους λόγω αυτής. Ακόμη, το μέγεθος των μαζών των πλανητών αποκαλύπτει και το πόσο αποκλίνουν από το τέλειο σφαιρικό σχήμα. Αν είναι μικρές οι μάζες ο νόμος της βαρυτικής έλξης επιτρέπει αποκλίσεις από την τέλεια σφαίρα ενώ αν οι μάζες είναι μεγάλες επιτρέπει μικρότερες αποκλίσεις. Αυτό επιπροσθέτως εξηγεί γιατί στον Άρη, ο οποίος έχει 10 φορές μικρότερη μάζα από την Γη, η υψηλότερη κορυφή ενός βουνού είναι 16Km. Στην Γη κάτι τέτοιο δεν θα μπορούσε να συμβεί αφού λόγω μεγαλύτερης μάζας η βαρύτητα θα ασκούσε τέτοια πίεση ώστε να συνθλίψει το βουνό και να ρευστοποιήσει το έδαφος (Milsom, 2018; Narlikar, 1999).

Ένα ακόμη σημείο που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι στην Ατομική Φυσική η δύναμη της βαρύτητας είναι σχεδόν αμελητέα, παρά τις πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ των μορίων. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την θεωρία του Νεύτωνα και η αιτία έγκειται στο γεγονός ότι

στον μικρόκοσμο οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων είναι ισχυρότερες από την βαρύτητα με αποτέλεσμα να την επισκιάζουν. Συγκεκριμένα η ηλεκτρική έλξη πρωτονίου και ηλεκτρονίου είναι περίπου 1040 φορές μεγαλύτερη από την δύναμη βαρυτικής έλξης, που ασκείται μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2. Επίσης σε ατομική κλίμακα και συγκεκριμένα στο εσωτερικό του πυρήνα οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις είναι ακόμη μεγαλύτερες και από τις ηλεκτρομαγνητικές συνεπώς και από τις βαρυτικές, με αποτέλεσμα οι ατομικοί και πυρηνικοί φυσικοί να μην περιλαμβάνουν τις μετρήσεις της βαρύτητας στους υπολογισμούς τους (Al-Khalili, 2005).

**Πίνακας 2** Οι αλληλεπιδράσεις, η συγκριτική ισχύς τους, η εμβέλεια τους και τα σωματίδια που αφορούν (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; NCERT, 2021).

Αλληλεπίδραση	Σχετική Ισχύς	Εμβέλεια	Σωματίδια μεταξύ των οποίων ασκείται
Βαρυτική	$10^{-39}$	Άπειρη	Όλα τα σωματίδια που έχουν μάζα
Ηλεκτρομαγνητική	$10^{-2}$	Άπειρη	Σωματίδια που φέρουν ηλεκτρικό φορτίο
Ασθενής πυρηνική	$10^{-13}$	Περίπου μέχρι $10^{-16}$ m στο εσωτερικό του ατόμου	Λεπτόνια, κουάρκ και νετρίνα
Ισχυρή πυρηνική	1	Περίπου μέχρι $10^{-15}$ m στο εσωτερικό του πυρήνα	Κουάρκ, Γλοιόνια

### 3.2.5 Η επιβεβαίωση της Νευτώνειας θεωρίας

Μια επιστημονική θεωρία όσο καλά και να εξηγεί τα φαινόμενα σε μαθηματικό και θεωρητικό επίπεδο, για να γίνει αποδεκτή, πρέπει να επιβεβαιωθεί και να αντέξει στον χρόνο δίνοντας λύση σε πρακτικά ζητήματα. Μια πρώτη επιβεβαίωση της νευτώνειας θεωρίας της βαρύτητας αφορούσε το θέμα της ερμηνείας των κινήσεων των κομητών. Οι μέχρι τότε εξηγήσεις συνέδεαν το θέμα με την θρησκευτική αναγγελία των θελημάτων του Θεού ή με οφθαλμαπάτες οφειλόμενες στην διάθλαση του φωτός. Για τον Νεύτωνα οι κομήτες που διατρέχουν το ηλιακό σύστημα με φορά αντίθετη από αυτή των πλανητών αποτελούσαν μια σημαντική ένδειξη της ανυπαρξίας της καρτεσιανής ιδέας του αιθέρα. Από την άλλη πλευρά

οι καρτεσιανοί ζητούσαν μια καλύτερη επιστημονική εξήγηση για τους κομήτες με βάση την νευτώνεια θεωρία. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο αν αποδεικνύονταν ότι είναι ουράνια σώματα με ελλειπτική τροχιά και εμφανίζονται περιοδικά όπως οι πλανήτες (Vigoureux, 2006).

Η ιδέα αυτή αρχίζει να κερδίζει έδαφος όταν οι Κασίνι και Μοράλντι συγκρίνουν τα χαρακτηριστικά δυο κομητών, που εμφανίστηκαν το 1707 και το 1723 και εκτίμησαν πως πρόκειται για το ίδιο ουράνιο σώμα, ενώ υποστηρικτής της ίδιας ιδέας ήταν και ο Ρόμπερτ Χούκ. Τελικώς για το θέμα αποφάνθηκε οριστικά ο Έντμουντ Χάλεϊ καθώς στηριζόμενος σε ακριβή δεδομένα, προέβη στον υπολογισμό των τροχιών 24 κομητών. Ο Χάλεϊ συμπερανε ότι οι κομήτες κινούνται σε ελλειπτική τροχιά όπως οι πλανήτες εξαιτίας της βαρυτικής έλξης του Ήλιου με την διαφορά ότι λόγω της έκκεντρης τροχιάς τους, ο μεγάλος ημιάξονας τους είναι μεγαλύτερος από αυτόν των πλανητών με αποτέλεσμα να επανεμφανίζονται μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έτσι οι κομήτες που εμφανίστηκαν το 1456, 1531, 1607, 1682 δεν είναι τίποτα άλλο παρά επανεμφανίσεις του ίδιου ουράνιου σώματος με περίοδο 76 έτη, ο οποίος ονομάστηκε κομήτης του Χάλεϊ (Grego & Mannion, 2010; MacDougal, 2012). Μάλιστα ο Γάλλος μαθηματικός Αλέξις Κλαιρώ χρησιμοποιώντας την νευτώνεια θεωρία προέβλεψε ότι ο ίδιος κομήτης θα έφτανε στο περιήλιο τον Απρίλιο του 1758 και όντως 15 χρόνια μετά τον θάνατο του Χάλεϊ επιβεβαιώθηκε. Το θέμα των κομητών ήταν επίσημα ένα δεδομένο που αποδείκνυε την ορθότητα της θεωρίας του Νεύτωνα (Weinberg, 2016).

Ένα δεύτερο σημείο, το οποίο ήταν υψίστης σημασίας για την ναυσιπλοΐα ήταν η ερμηνεία της ανώμαλης τροχιάς της Σελήνης. Αυτό το πρόβλημα λόγω της μαθηματικής πολυπλοκότητας του κινητοποίησε πολλούς μαθηματικούς της εποχής και έγινε γνωστό ως το πρόβλημα των τριών σωμάτων. Από τεχνική άποψη το ζήτημα αφορούσε τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης ενός πλοίου στη θάλασσα. Η σύγκριση της ώρας που θα έδειχνε ένα ρολόι με την ηλιακή ώρα αναχώρησης του πλοίου από το λιμάνι θα έλυνε το πρόβλημα. Ωστόσο τότε δεν υπήρχαν ρολόγια που να δείχνου σταθερή ώρα κατά την διάρκεια του ταξιδιού, οπότε η κίνηση της Σελήνης διαδοχικά από γνωστά άστρα θα μπορούσε να το αντικαταστήσει και να γίνει η σύγκριση (Brasch, 1962; Kuehn, 2015).

Η κίνηση της Σελήνης όμως δεν είναι ομαλή και δεν την είχε αναλύσει κανείς ως το 1740. Η λύση δόθηκε από το τιτάνιο έργο του Γάλλου μαθηματικού Πιέρ Σιμόν Λαπλάς, που δημοσιεύτηκε το 1825 με τίτλο «Ουράνια Μηχανική». Στο πεντάτομο αυτό έργο ο Λαπλάς εφάρμοσε τις τελευταίες μαθηματικές τεχνικές προκειμένου να εξηγήσει την κίνηση

της Σελήνης αλλά και των πλανητών και των δορυφόρων με βάση τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις. Έτσι η θεωρία του Νεύτωνα έλαβε μια δεύτερη αναγνώριση με μεγάλη πρακτική σημασία για το εμπόριο της εποχής (Grego & Mannion, 2010).

Μια ακόμη δοκιμασία για τη νευτώνεια θεωρία αποτέλεσε η αντιπαράθεση Νεύτωνα και Κασίνι σχετικά με το σχήμα της Γης. Ο Νεύτων βάσει της θεωρίας του υποστήριζε ότι είναι πεπλατυσμένη στους πόλους και επιμηκυμένη στον Ισημερινό ενώ ο Κασίνι υποστήριζε ακριβώς το αντίθετο. Επειδή το θέμα είχε άμεση σχέση πάλι με την ναυσιπλοΐα έγιναν 7 μετρήσεις από επιστημονικές ομάδες την περίοδο 1701-1736 ενώ παράλληλα ο βασιλιάς Λουδοβίκος Ε΄ ζήτησε από την Ακαδημία να αποφανθεί οριστικά για το συγκεκριμένο θέμα με αποτέλεσμα να γίνουν περαιτέρω διερευνήσεις. Όλα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο συγκεκριμένο θέμα ο Νεύτωνας είχε δίκιο, οπότε προστίθεται μια τρίτη επιτυχία της βαρυτικής θεωρίας του (Milsom, 2018; Vigoureaux, 2006).

Το 1845 θα προστεθεί άλλη μια η οποία και θα οδηγήσει στην ανακάλυψη ενός νέου πλανήτη. Δυο αστρονόμοι ο Άγγλος Άνταμς και ο Γάλλος Λε Βεριέ παρατήρησαν, ανεξάρτητα ο καθένας, ανωμαλίες στην τροχιά του πλανήτη Ουρανού, του πιο απομακρυσμένου πλανήτη του τότε γνωστού ηλιακού συστήματος. Ο Ουρανός δεν ακολουθούσε την ακριβή ελλειπτική τροχιά που προέβλεπε η νευτώνεια θεωρία οπότε οι δυο αστρονόμοι υπέθεσαν ότι κάποιος άλλος άγνωστος πλανήτης πλησίον του την επηρεάζει λόγω βαρύτητας. Ο αστρονόμος Γκότφριντ Γκάλε του Αστεροσκοπείου του Βερολίνου λαμβάνοντας υπόψιν τις εργασίες των Άνταμς και Λε Βεριέ, εντόπισε τον νέο πλανήτη, οποίος ονομάστηκε Ποσειδώνας (Grego & Mannion, 2010).

Από τότε και μετά η θεωρία του Νεύτωνα επιβεβαιώνεται συνεχώς με αποκορύφωμα την χρησιμοποίησή της στην περίπτωση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου Σπούτνικ που τέθηκε σε τροχιά, στην επανδρωμένη αποστολή του Απόλλο 11 στη Σελήνη καθώς και σε όλες τις επόμενες μη επανδρωμένες αποστολές. Αυτά τα επιτεύγματα δεν θα γινόντουσαν πραγματικότητα χωρίς την νευτώνεια θεωρία και την εξέλιξη της τεχνολογίας (Narlikar, 1999).

Η θεωρία της βαρύτητας του Νεύτωνα παρά την σπουδαιότητα των αποτελεσμάτων και την πληθώρα των φαινομένων που εξηγούσε, συναντούσε αντιδράσεις. Μια πρώτη ένσταση ήταν η εξ αποστάσεως δράση των βαρυτικών δυνάμεων μέσα από το κενό. Η ιδέα του κενού ειδικά εκείνη την εποχή ήταν πολύ περίεργη και έπρεπε να αιτιολογηθεί. Από την άλλη πλευρά ο Καρτέσιος είχε προτείνει την ύπαρξη του αιθέρα αλλά ο ίδιος ο Νεύτωνας είχε υποστηρίξει ότι η υπόθεση ενός στοιχείου πειραματικά αναπόδεικτου και απόντος από τους μαθηματικούς υπολογισμούς, είναι παράλογη από μόνη της. Αυτό δεν σημαίνει βέβαια

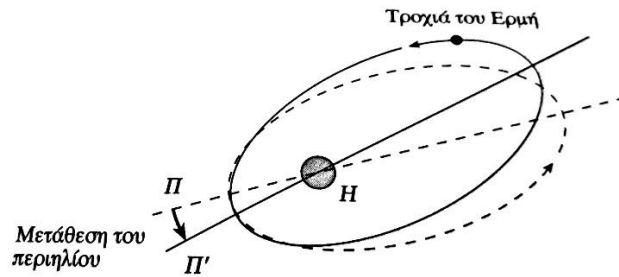


ότι ο Νεύτωνας δεν ήταν αμήχανος, όταν του ζητούνταν να εξηγήσει γιατί η βαρύτητα λειτουργεί με αυτό τον τρόπο. Η γνωστή φράση του «Δεν επινοώ υποθέσεις» δείχνει την ειλικρίνεια του και τα όρια της θεωρίας του στο να δώσει τελεολογικές απαντήσεις για την βαρύτητα. Έτσι οι φυσικοί για χρόνια θα πιστέψουν στην πραγματική ύπαρξη δυνάμεων, ενώ ουσιαστικά πρόκειται για αφηρημένες έννοιες που βοηθούν στην αναπαράσταση των φαινομένων, κάτι που το γνώριζε καλά ο Νεύτωνας. Με αυτό τον τρόπο η βαρύτητα θεωρήθηκε ως ιδιότητα της ύλης ενώ ο Αϊνστάιν αργότερα θα δείξει ότι είναι ιδιότητα του χώρου και όχι των μαζών (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Ebison, 1993).

Επίσης ο Νεύτωνας παρουσιάζει την θεωρία του ως Παγκόσμια αλλά δεν περιλαμβάνει ένα στοιχείο που συναντάται σε όλες τις περιπτώσεις φαινομένων και δεν είναι άλλο από το φως. Ακόμη δεν περιλαμβάνει στην θεωρία του την κίνηση των άστρων στον ουράνιο θόλο, κάτι που θα μελετηθεί αργότερα από τον Γουίλιαμ Χέρσελ. Ένα άλλο σημείο το οποίο είχε εντοπίσει και ο ίδιος ο Νεύτωνας είναι το γεγονός ότι αν η θεωρία του είναι σωστή, τότε αναπόφευκτα οδηγεί το Σύμπαν σε κοσμική καταστροφή. Εάν το Σύμπαν είναι άπειρο και γεμάτο άστρα τότε για να μην συνθλιβεί από τις αμοιβαίες βαρυτικές έλξεις πρέπει να μην είναι στατικό, αλλά να διαστέλλεται. Αυτή την σκέψη την είχε μοιραστεί ο Νεύτωνας στις ανταλλαγές επιστολών που είχε με τον Μπέρκλεϊ (Brasch, 1962).

Τέλος σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι η θεωρία του Νεύτωνα απέκλινε από τις παρατηρήσεις στην περίπτωση της τροχιάς του πλανήτη Ερμή, κάτι το οποίο έγινε αντιληπτό από συστηματικές παρατηρήσεις που έγιναν από το 1764 και έπειτα. Ο Ερμής όντας ο πιο κοντινός πλανήτης στον Ήλιο έχει ταυτόχρονα και την πιο έκκεντρη τροχιά τη οποία διατρέχει σε περίπου 88 μέρες κάνοντας μια πλήρη περιφορά γύρω από αυτόν. Έτσι όταν βρίσκεται στο περιήλιο, δηλαδή την πλησιέστερη στον Ήλιο θέση της τροχιάς, θεωρητικά μετά από 88 μέρες θα έπρεπε να επιστρέφει σε αυτή. Αυτό όμως δεν συμβαίνει αφού παρατηρήσεις έδειξαν ότι το περιήλιο του μετατοπίζεται με αριστερόστροφη κατεύθυνση και με αργό ρυθμό (Weinberg, 2016).

Η ευθεία που ενώνει τον Ερμή με τον Ήλιο στο περιήλιο περιφέρεται διαγράφοντας γωνία 575 δευτερολέπτων της μοίρας. Σε ένα αιώνα προοδευτικά το περιήλιο μετατοπίζεται κατά 9,58 λεπτά της μοίρας. Αυτή η ασυμφωνία, αν και μικρή, έχει αιτιολογηθεί σε περίπτωση άλλων πλανητών όπως ο Ουρανός και είχε βρεθεί ότι κάποιο άλλο ουράνιο σώμα επηρεάζει την τροχιά του. Στην περίπτωση του Ερμή όντως από τα 575 δευτερόλεπτα της μοίρας τα 532 αποδείχτηκε μετά από μετρήσεις ότι οφείλονται στην επίδραση άλλων πλανητών του ηλιακού συστήματος. Τα υπόλοιπα όμως 47 δευτερόλεπτα της μοίρας δεν μπορούν να ερμηνευθούν με βάση τη νευτώνεια θεωρία (Narlikar, 1999; T.Cushing, 2003).



*Εικόνα 3.8 Η μετάθεση του περιηλίου του Ερμή από το Π στο Π' καθώς περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο (Narlikar, 1999).*

Το 1860 το θέμα έλαβε τεράστιες διαστάσεις και έφερνε τους αστρονόμους σε πολύ δύσκολη θέση. Έτσι ο Λε Βεριέ υπέθεσε ότι υπάρχει κάποιος αθέατος πλανήτης στο εσωτερικό της τροχιάς του Ερμή. Όσες έρευνες και να έγιναν, δε βρέθηκε κάποιος πλανήτης και η ασυμφωνία παρατηρήσεων και νευτώνειας ερμηνείας παρέμεινε ανεξήγητη. Το ζήτημα αυτό που είναι γνωστό ως η μετατόπιση του περιηλίου του Ερμή, παρά το γεγονός ότι η απόκλιση των παρατηρήσεων από την θεωρία είναι μικρότερη του 8%, στάθηκε ικανό να δημιουργήσει αμφιβολίες για την εγκυρότητα του Νόμου της Παγκόσμιας Έλξης (Kuehn, 2015).

### 3.2.6 Εφαρμογές της Νευτώνειας θεωρίας

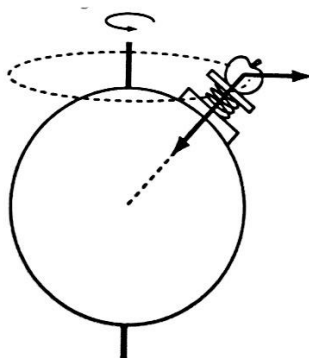
Από την μελέτη της νευτώνειας μηχανικής προκύπτουν τρεις έννοιες οι οποίες πολλές φορές συγχέονται στην καθημερινή ζωή, αλλά για την Επιστήμη της Φυσικής δεν είναι ταυτόσημες. Πρόκειται για τις έννοιες μάζα, βάρος, βαρυτική δύναμη και το φαινόμενο «βαρύτητα». Η μάζα είναι ένα μονόμετρο μέγεθος και εκφράζει την ποσότητα ύλης που περιέχεται σε ένα σώμα, αποτελώντας ταυτόχρονα το μέτρο της αδράνειας του αλλά και μέτρο της έλξης του από άλλες μάζες. Το βάρος είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που μετρείται με το μέγεθος της συμπίεσης ενός ελατηρίου, το οποίο κινεί μια βελόνα σε μια κατάλληλα βαθμονομημένη κλίμακα. Αυτή η διάταξη είναι το γνωστό δυναμόμετρο και διαφέρει από τον ζυγό σύγκρισης, που απλά συγκρίνει το βάρος ενός σώματος με ένα άλλο βάρος- μέτρο (Galili, Bar, & Brosh, 2016).

Τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούν το βάρος είναι πολλά. Το κυρίαρχο φαινόμενο είναι η βαρυτική έλξη ανάμεσα σε ένα αντικείμενο και μια πλανητική μάζα. Αυτή η έλξη εξαρτάται από το μέγεθος των εμπλεκόμενων μαζών και την απόσταση που τις χωρίζει από το κέντρο του πλανήτη. Αυτό σημαίνει ότι η βαρυτική έλξη ελαττώνεται με την αύξηση του υψόμετρου και είναι ο κύριος λόγος που τα ανώτατα ατμοσφαιρικά στρώματα της Γης είναι αραιά. Ακόμη εξαρτάται από τη μάζα του ουράνιου σώματος, καθώς ένας άνθρωπος στη

Σελήνη θα ένωθε 6 φορές ελαφρύτερος σε σχέση με την επιφάνεια της Γης χωρίς αυτό να σημαίνει ότι έχασε μάζα. Επίσης ο ίδιος άνθρωπος θα μπορούσε να πηδήσει 6 φορές ψηλότερα ή μακρύτερα σε σχέση με την εκτέλεση της ίδια κίνησης στη Γη, ενώ η απουσία ατμόσφαιρας συνδέεται πάλι με την μικρή βαρυτική έλξη του δορυφόρου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Hewitt P. G., 1997).

Ένα άλλο φαινόμενο που εμπλέκεται στην μελέτη του βάρους είναι η κεντρόφυγη δύναμη που υφίσταται ένα σώμα στην επιφάνεια της Γης. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην ημερήσια περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της και τείνει να εκτοξεύσει το σώμα λόγω αδράνειας στο Διάστημα. Η κεντρόφυγη δύναμη εξαρτάται από την μάζα του σώματος, την ταχύτητα περιστροφής του συστήματος στο οποίο βρίσκεται και την απόσταση του σώματος από τον άξονα περιστροφής. Ο τελευταίος παράγοντας ευθύνεται για την εξάρτηση και αλλαγή της τιμής του βάρους ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της Γης. Μάλιστα όσο πιο μακριά βρίσκεται ένα σώμα από τον άξονα περιστροφής τόσο μεγαλύτερη γίνεται η κεντρόφυγος δύναμη. Έτσι αυτή αυξάνεται βαθμιαία από τους Πόλους της Γης, όπου είναι μηδενική, έως το Ισημερινό, όπου είναι η μέγιστη.

Το φαινόμενο που αποκαλείται ‘βαρύτητα’ είναι ο συνδυασμός των δυο παραπάνω δυνάμεων, δηλαδή της βαρυτικής έλξης και της κεντρόφυγος δύναμης και ο λόγος για τον οποίο τα σώματα δεν εκτοξεύονται στο Διάστημα είναι γιατί μεταξύ των δυο επικρατεί η βαρυτική δύναμη. Μια πρώτη συνέπεια της συνδυασμένης δράσης των δυο δυνάμεων είναι ότι το τελικό διάνυσμα της συνισταμένης τους δεν είναι ακριβώς κάθετο σε σχέση με το κέντρο της Γης αλλά αποκλίνει λόγω της μικρής επίδρασης της κεντρόφυγος δύναμης. Επιπλέον αν η Γη περιστρέφονταν με 17 φορές μεγαλύτερη ταχύτητα η κεντρόφυγος θα αυξανόταν υπερβολικά με αποτέλεσμα οι δυο δυνάμεις στον Ισημερινό να βρίσκονταν σε ισορροπία. Αυτό θα σήμαινε ότι σε αυτό το σημείο θα υπήρχε έλλειψη βαρύτητας και η Ζωή εκεί θα ήταν αδύνατο να υπάρξει (Vigoureux, 2006).



**Εικόνα 3.9** Η συνδυασμένη δράση της βαρυτικής έλξης(προς το κέντρο) αλλά και της φυγόκεντρης δύναμης(προς τα έξω) που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής της Γης επηρεάζουν την μέτρηση του βάρους ενός σώματος (Vigoureux, 2006).

Μια δεύτερη συνέπεια της συνδυασμένης δράσης των δυο δυνάμεων σχετίζεται με το σχήμα της Γης. Το σχήμα της, ως γνωστό, δεν είναι τέλεια σφαίρα αλλά ελλειπτικό και ονομάζεται γεωειδές. Έτσι παρουσιάζεται πεπλατυσμένη στους Πόλους και εξογκωμένη στον Ισημερινό. Καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της, όλα τα σημεία του Ισημερινού δέχονται την ίδια δύναμη βαρυτικής έλξης με τις πολικές περιοχές αλλά η κεντροφυγος δύναμη είναι μεγαλύτερη στα πρώτα με αποτέλεσμα η ισημερινή ακτίνα να έχει τάσεις επιμήκυνσης και να παραμορφώνει το σχήμα της Γης. Ωστόσο αυτή η πεπλάτυνση που προκαλείται στους Πόλους είναι πολύ μικρή δεδομένου των διαστάσεων της Γης και γι' αυτό το λόγο η όψη της από το Διάστημα δεν την κάνει ευδιάκριτη.

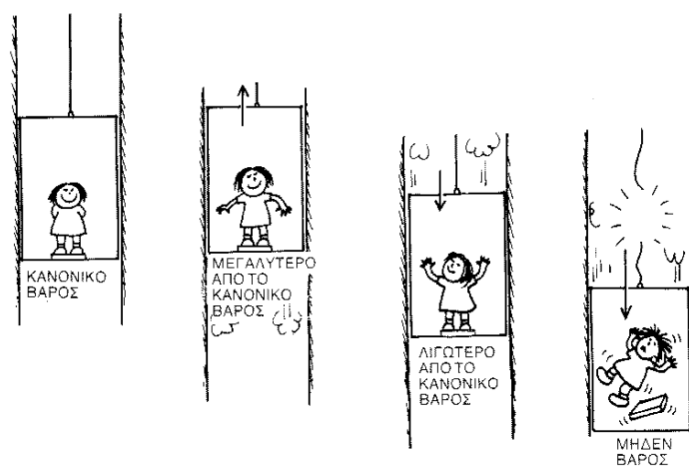


**Εικόνα 3.10** Το σχήμα της Γης είναι ελαφρώς πεπλατυσμένο στους Πόλους και διογκωμένο στον Ισημερινό, το οποίο ονομάζεται γεωειδές (Δεληκαράογλου, 2010).

Επιπροσθέτως αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το βάρος, όπως ο καταμερισμός των περιβαλλόντων μαζών και η κίνηση του συστήματος στο οποίο μετριέται αυτό. Όσον αφορά τον πρώτο το βάρος ενός σώματος θα έπρεπε λογικά να μειώνεται με το βάθος. Αυτό όμως δεν συμβαίνει και αυξάνεται βαθμιαία μέχρι τα 2.800 μέτρα κάτω από τη Γη εξαιτίας της υψηλότερης πυκνότητας των υλικών των εσωτερικών στρωμάτων της Γης σε σχέση με τα επιφανειακά. Μάλιστα στο παραπάνω βάθος η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας παίρνει την μέγιστη τιμή των  $10,4 \text{ m/s}^2$  και εν συνεχεία μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί στο κέντρο της Γης. Αυτά τα δεδομένα έχουν ευρεία εφαρμογή στην βαρυμετρική ανίχνευση κοιτασμάτων πετρελαίου, ρηγμάτων και πτυχώσεων του υπεδάφους καθώς και αρχαιολογικών ευρημάτων (Δεληκαράογλου, 2010).

Το βάρος επηρεάζεται και από εξωτερικές επιταχύνσεις του συστήματος μέτρησης. Αν για παράδειγμα ένας άνθρωπος μετρήσει το βάρος σε μια ζυγαριά τοποθετημένη σε ένα ανελκυστήρα, όταν αυτός εκτελεί ανοδική κίνηση το δυναμόμετρο δείχνει αύξηση της τιμής σε σχέση με την κατάσταση ακινησίας του. Από την άλλη αν ο ανελκυστήρας εκτελεί καθοδική κίνηση, η ένδειξη του βάρους είναι μικρότερη ενώ αν εκτελεί ελεύθερη πτώση, η

ανάλογη ένδειξη είναι μηδενική. Ο Γαλιλαίος είχε εντοπίσει αυτή την ιδέα γράφοντας στο βιβλίο του «Λόγοι και Μαθηματικές αποδείξεις» ότι ένας άνθρωπος νιώθει το βάρος ενός φορτίου που κουβαλάει επειδή ακριβώς το εμποδίζει από το να πέσει στο έδαφος. Αν ο άνθρωπος έπεφτε με την ίδια ταχύτητα με το φορτίο τότε αυτό δεν θα ασκούσε πίεση, ώστε να γίνεται αντιληπτό το βάρος του. Επίσης μέσα σε ένα τεχνητό δορυφόρο σε μέση τροχιά γύρω από την Γη οι άνθρωποι και τα αντικείμενα αιωρούνται όχι όμως επειδή ο δορυφόρος διαφεύγει της γήινης έλξης, αφού βρίσκεται στην εμβέλεια του βαρυτικού πεδίου της, αλλά επειδή κατά την κίνηση του επιταχύνεται προκαλώντας δυνάμεις που αντισταθμίζουν αυτή την έλξη (Vigoureux, 2006).



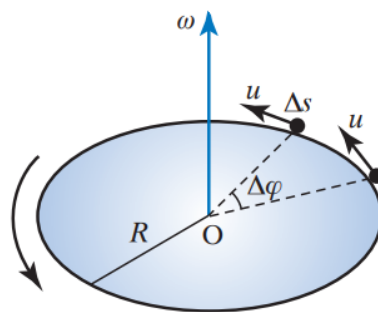
**Εικόνα 3.11** Σκίτσο, στο οποίο φαίνεται η επιρροή της επιτάχυνσης ενός ανελκυστήρα στις ένδειξεις ενός δυναμόμετρου, που μετρά το βάρος ενός ανθρώπου, σε σχέση με την ακινησία. Στην τελευταία περίπτωση ο ανελκυστήρας πέφτει ελεύθερα και όχι ελεγχόμενα (Hewitt P. G., 1997).

Ο Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα καθώς και οι τρεις νόμοι της κίνησης οδήγησαν στην δημιουργία και εξέλιξη του κλάδου της Δυναμικής. Η Δυναμική είναι ένα μέρος της Μηχανικής που μελετά τις κινήσεις διαφόρων σωμάτων, όταν πάνω τους ασκούνται δυνάμεις. Έτσι εισήχθησαν σταδιακά έννοιες οι οποίες έχουν ευρεία εφαρμογή σε προβλήματα Μηχανικής και θα γίνει μια σύντομη ανάλυση τους σε αυτό το σημείο (Hewitt P. G., 1997).

Δυο πρωταρχικές έννοιες της Δυναμικής είναι η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Η ταχύτητα είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της θέσης ενός σώματος συναρτήσει του χρόνου. Δίνεται από τον τύπο  $U=dx/dt$  και ενέχει πληροφορίες για το πόσο αργά ή γρήγορα κινείται ένα σώμα αλλά και για την διεύθυνση και την φορά της κίνησης αυτής. Η επιτάχυνση είναι επίσης ένα διανυσματικό μέγεθος που εκφράζει το ρυθμό μεταβολής του μέτρου της ταχύτητας ενός σώματος ή και της κατεύθυνσης του. Δίνεται από τον τύπο  $a= du/dt$  και στην περίπτωση της ευθύγραμμης κίνησης έχει την ίδια φορά και

διεύθυνση με το διάνυσμα της ταχύτητας. Στην περίπτωση της κυκλικής κίνησης ενός σώματος η επιτάχυνση αλλάζει συνεχώς ακόμη και αν έχει σταθερή τιμή εφόσον το σώμα αλλάζει κάθε στιγμή κατεύθυνση. Με την βοήθεια του απειροστικού λογισμού βρίσκεται ότι η επιτάχυνση στην κυκλική κίνηση έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς του σώματος και δίνεται από τον τύπο  $a=u^2/r$ , όπου  $r$  είναι η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς (Βρούλος & Καρνάβας, 2021).

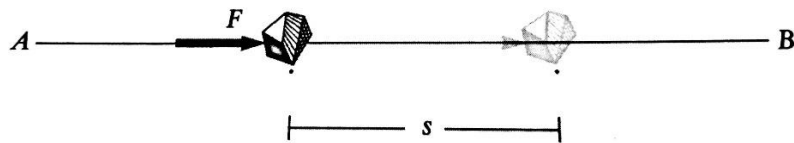
Ένας άλλο μέγεθος που χρησιμοποιείται στην κυκλική κίνηση είναι η γωνιακή ταχύτητα ενός σώματος και συνίσταται στο πόσο γρήγορα η ακτίνα που ενώνει το σώμα με το κέντρο της τροχιάς διαγράφει μια πλήρη γωνία. Δίνεται από τον τύπο  $\omega_{\text{γωνιακή}} = 360^\circ/t$ , όπου  $t$  ο χρόνος που διαρκεί μια πλήρη περιστροφή του σώματος. Επίσης έχει γίνει ήδη αναφορά στους ορισμούς των «Αρχών» του Νεύτωνα για το διανυσματικό μέγεθος της ορμής, ως ποσότητας κίνησης, που υπολογίζεται από το γινόμενο της ταχύτητας με την μάζα του σώματος, έχοντας ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα. Μια συγγενής έννοια αλλά στην περίπτωση της κυκλικής κίνησης είναι η έννοια της στροφορμής, που στην ουσία αποτελεί το άθροισμα των στροφορμών όλων των στοιχειωδών τμημάτων που συγκροτούν το υπό κίνηση σώμα. Δίνεται από το τύπο  $P_{\text{στροφορμή}} = m \cdot u \cdot r$  και εφόσον από τον Δεύτερο νόμο του Νεύτωνα προκύπτει η Αρχή της Διατήρησης της Ορμής για την ευθύγραμμη κίνηση, ισχύει και η Αρχή της Διατήρησης της Στροφορμής εάν φυσικά δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις που να επηρεάζουν την περιστροφική κίνηση. Όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια της εργασίας η Αρχή αυτή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και συντήρηση των αστροφυσικών συστημάτων (Βρούλος & Καρνάβας, 2021; Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).



**Εικόνα 3.12** Περίπτωση αριστερόστροφης κυκλικής κίνησης.  $\omega$  και  $u$  αντίστοιχα είναι τα διανύσματα της γωνιακής επιτάχυνσης και της ταχύτητας ενώ η κεντρομόλος επιτάχυνση και δύναμη έχουν ίδια κατεύθυνση προς το κέντρο της τροχιάς και διεύθυνση όμοια με την ακτίνα  $R$  (Βρούλος & Καρνάβας, 2021).

Άλλες έννοιες που χρησιμοποιούνται ευρέως στην Δυναμική είναι του Έργου και της Ενέργειας. Ο Γαλιλαίος και ο Νεύτωνα έδωσαν ξεκάθαρη εικόνα της σχέσης δύναμης και κίνησης, που μπορεί να παραλληλιστεί ως σχέση αιτίας-αιτιατού. Η έννοια του Έργου

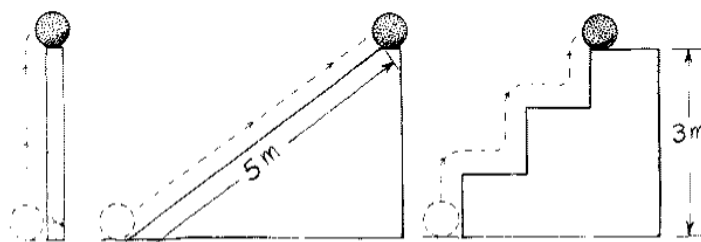
δηλώνει τι έχει επιτύχει μια δύναμη σε κάθε φάση της κίνησης. Αν  $s$  είναι η μετατόπιση ενός σώματος λόγω της άσκησης σε αυτό μιας σταθερής δύναμης  $F$ , τότε το Έργο δίνεται από τον τύπο  $W_{\text{Έργο}} = F \cdot s$ . Το Έργο επίσης εκδηλώνεται και ως επιτάχυνση λόγω εφαρμογής σταθερής δύναμης, πράγμα που σημαίνει ότι δεν πάει χαμένο αλλά δίνει στο σώμα μια ανάλογη ποσότητα, η οποία ονομάζεται Ενέργεια. Αν ένα σώμα βρισκόταν σε ηρεμία στην θέση  $A$  και εφαρμοστεί μια σταθερή δύναμη  $F$  τότε στην θέση  $B$  το σώμα θα έχει ταχύτητα  $u$  και θα ισχύει  $F \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^2$ . Το δεύτερο μέλος της εξίσωσης δίνει το μέτρο της κινητικής ενέργειας ενός σώματος.



**Εικόνα 3.13** Η σταθερή δύναμη  $F$  παράγει έργο κατά την μετατόπιση του αντικειμένου από το σημείο  $A$  στο  $B$  (Narlikar, 1999).

Ωστόσο οι δυνάμεις δεν παράγουν μόνο αλλά και καταναλώνουν έργο ανάλογα με την περίπτωση. Στην περίπτωση ενός αυτοκινήτου που βρίσκεται σε κίνηση, δηλαδή έχει αρχική ταχύτητα και κάποια στιγμή φρενάρει, η δύναμη της τριβής επιβραδύνει την κίνηση, άρα το αυτοκίνητο υφίσταται μείωση της κινητικής του ενέργειας. Συνεπώς η μεταβολή της κινητικής ενέργειας ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των έργων που παράγονται ή καταναλώνονται από εξωτερικές δυνάμεις. Αν αυτή η μεταβολή είναι αρνητική, τότε συνεπάγεται ότι η εξωτερική δύναμη καταναλώνει έργο, ενώ αν είναι θετική τότε παράγει έργο δρώντας υποστηρικτικά για την κίνηση (Narlikar, 1999).

Μια άλλη βασική μορφή ενέργειας, πέρα από την κινητική, είναι η δυναμική ενέργεια ή καλύτερα για το υπό μελέτη θέμα η βαρυτική δυναμική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια εξαρτάται από την μάζα και το ύψος στο οποίο βρίσκεται ένα σώμα εντός ενός πεδίου βαρύτητας. Η λέξη δυναμική εκφράζει ακριβώς το γεγονός ότι μια μάζα αναγκάζει τη δύναμη της βαρύτητας να παράγει έργο και δίνεται από τον τύπο  $E_{\text{δυναμική}} = m \cdot g \cdot h$ . Η μεταβολή της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας ισούται με το αρνητικό έργο του βάρους του σώματος κατά μήκος μιας διαδρομής. Σημαντική παρατήρηση εδώ είναι ότι αυτή η μεταβολή είναι ανεξάρτητη του μήκους της διαδρομής και επηρεάζεται μόνο από την κάθετη απόσταση της αρχικής και τελικής θέσης του σώματος, γεγονός που κατατάσσει τη δύναμη της βαρύτητας στην κατηγορία των συντηρητικών δυνάμεων (Καλκάνης, 2005).



**Εικόνα 3.14** Η βαρυτική δυναμική ενέργεια της σφαίρας είναι ίδια και στις τρεις περιπτώσεις, αφού το έργο που απαιτήθηκε για να ανυψωθεί στα 3m είναι το ίδιο. Η μεταβολή της είναι ανεξάρτητη από το μήκος της διαδρομής που θα ακολουθήσει (Hewitt P. G., 1997).

Αν υποθεθεί ότι μια μάζα εκτινάσσεται σε ένα βαρυτικό πεδίο, τότε αυτή ανάλογα με το μέγεθος της δύναμης που της ασκήθηκε θα φτάσει μέχρι κάποιο ύψος, καθώς κατά την ανοδική της πορεία και αγνοώντας την αντίσταση του αέρα, η δύναμη του βάρους της καταναλώνει έργο φθίνοντας σταθερά την ταχύτητά της. Αυτό συνεπάγεται ότι η κινητική ενέργεια της μειώνεται και αυξάνεται παράλληλα ισόποσα η δυναμική της ενέργεια λόγω του ύψους που αποκτά. Έτσι στο μέγιστο ύψος που θα φτάσει όλη η ενέργεια θα έχει μετατραπεί σε δυναμική ενώ η κινητική της θα είναι μηδενική. Εν συνεχεία κατά την κάθοδο θα αρχίζει και πάλι να αυξάνεται η κινητική ενέργεια της μάζας, διότι η δύναμη του βάρους της σε αυτή την περίπτωση παράγει έργο και η δυναμική της ενέργεια φθίνει. Φθάνοντας στο έδαφος θα έχει την μέγιστη κινητική ενέργεια ενώ παράλληλα θα έχει μηδενιστεί η αντίστοιχη δυναμική. Σε όλες τις φάσεις της κίνησης η μηχανική ενέργεια, δηλαδή το άθροισμα της κινητικής και δυναμικής της ενέργειας, αποτελεί ένα σταθερό ποσό. Αυτή η περιγραφή εκφράζει μια θεμελιώδη Αρχή της Φυσικής, την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας (Narlikar, 1999; Καλκάνης, 2005).

Με βάση τα παραπάνω χρησιμοποιείται και μια άλλη έννοια, αυτή του Φράγματος Δυναμικού της Βαρύτητας, η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε πλανήτη και ουράνιο σώμα. Το Φράγμα Δυναμικού υποδηλώνει το όριο του έργου που χρειάζεται να παραγάγει μια εξωτερική δύναμη σε μια μάζα ώστε αυτή να μπορέσει να διαφύγει από την βαρυτική έλξη του πλανήτη, στον οποίο βρίσκεται. Το έργο αυτό εξαρτάται από την ακτίνα του πλανήτη και από την επιτάχυνση της βαρύτητας του. Στην περίπτωση της Γης το ύψος όπου πρέπει να φτάσει ένα διαστημόπλοιο για να ξεφύγει της βαρυτικής έλξης της είναι 6.400 km, όσο η ακτίνα της Γης δηλαδή και άρα το έργο  $W$  που χρειάζεται να παραγάγουν οι κινητήρες του δίνεται από τον τύπο  $W = G \cdot M/R$  και επειδή η επιτάχυνση της βαρύτητας  $g = G \cdot M/R^2$ , τότε συνεπάγεται ότι το έργο  $W = g \cdot R$ . Από την εξίσωση αυτή φαίνεται ξεκάθαρα ότι το έργο δεν εξαρτάται από την μάζα του εκτοξευόμενου σώματος αλλά από την ακτίνα της Γης και την επιτάχυνση της βαρύτητας. Επομένως στην περίπτωση που θεωρηθεί ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας δεν μεταβάλλεται σημαντικά με το ύψος, το έργο που πρέπει να



δοθεί στο διαστημόπλοιο ισούται με το έργο ανύψωσης του από το έδαφος στα 6.400km (Βρούλος & Καρνάβας, 2021; Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Hewitt P. G., 1997).

Μια άλλη σημαντική έννοια της Δυναμικής που υπεισέρχεται στο σημείο αυτό είναι η ταχύτητα διαφυγής, η οποία αποτελεί έμμεση ένδειξη της έντασης της βαρύτητας στην επιφάνεια ενός πλανήτη και παράγοντας σύγκρισης της με άλλους πλανήτες. Η ταχύτητα διαφυγής είναι η ελάχιστη αρχική ταχύτητα που πρέπει να αποκτήσει ένα σώμα προκειμένου να αποδεσμευτεί από την βαρυτική έλξη ενός πλανήτη και δίνεται από τον τύπο

$U_{\text{διαφυγής}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$ . Από εδώ φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η έλξη ενός πλανήτη τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα διαφυγής ενός σώματος από την επιφάνεια του (Βρούλος & Καρνάβας, 2021; Hewitt P. G., 1997).

Για την περίπτωση της Γης η ταχύτητα διαφυγής ενός σώματος είναι 11,2 km/sec ή αλλιώς 40.000 km/h. (βλ. πίνακα 3) Σε ένα αστέρα νετρονίων η ταχύτητα αυτή θα έφτανε τα 3/5 της ταχύτητας του φωτός λόγω της τεράστιας πυκνότητας του αφού έχει ακτίνα περίπου 20 km και μάζα ίση με του δικού μας Ήλιου. Οι αστρονόμοι υπολόγισαν ότι ένα ουράνιο σώμα με ακτίνα που δίνεται από τον τύπο  $R = 2 \cdot G \cdot M / c^2$  θα είχε την μέγιστη ταχύτητα διαφυγής, η οποία θα ήταν ίση με την ταχύτητα του φωτός (T.Cushing, 2003). Οι υποθέσεις για ένα τέτοιο αστρονομικό αντικείμενο αφορούν τη μαύρη οπή και θα αναλυθεί η περίπτωση της σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

**Πίνακας 3** Προσεγγιστικές τιμές της ταχύτητας διαφυγής και της επιφανειακής επιτάχυνσης της βαρύτητας στον Ήλιο και τους 8 πλανήτες του Ηλιακού μας συστήματος (Δεληκαράογλου, 2010; Grego & Mannion, 2010; Narlikar, 1999).

Ουράνιο σώμα	Ταχύτητα διαφυγής σε km/sec	Επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια σε m/s <sup>2</sup>
Ήλιος	640	273
Ερμής	2,8	3,6
Αφροδίτη	8,6	8,5
Γη	11,2	9,8
Άρης	5	3,8
Δίας	60,8	26
Κρόνος	9	11,2
Ουρανός	7,8	9,4
Ποσειδώνας	11	15

Ένα θέμα το οποίο ο Νεύτωνας κατάφερε να εξηγήσει μέσω των αποτελεσμάτων της Μηχανικής του, αφορά τις παλίρροιες. Ως παλίρροια ορίζεται το φυσικό φαινόμενο της περιοδικής ανόδου και καθόδου της στάθμης του νερού μεγάλων λιμνών αλλά κυρίως θαλασσών και ωκεανών. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που εμφανίζεται δυο φορές την ημέρα. Η άνοδος της στάθμης των υδάτων ονομάζεται άμπωτη ενώ η κάθοδος της πλημμυρίδα (T.Cushing, 2003).

Το φαινόμενο αυτό είχε γίνει αντιληπτό μέχρι την εποχή του Νεύτωνα καθώς υπάρχουν σχετικές αναφορές από την αρχαιότητα, όμως κανείς μέχρι τότε δεν μπόρεσε να δώσει έγκυρες επιστημονικές εξηγήσεις περί αυτού. Στα αρχαία χρόνια λαϊκές δοξασίες έδιναν τελεολογικές ερμηνείες σχετικά με τις παλίρροιες, όπως ότι ο Θεός τις δημιουργεί με σκοπό να ανανεώνονται τα νερά των λιμανιών ή για να διευκολύνεται η δραστηριότητα του εμπορίου. Παρά τις απλοϊκές εξηγήσεις οι αρχαίοι είχαν εντοπίσει ότι η κορύφωση του φαινομένου συνέπιπτε με την Νέα Σελήνη ή την Πανσέληνο, όπως και την πενηντάλεπτη καθυστέρηση της, χωρίς όμως να την συνδέουν με την κίνηση του δορυφόρου.

Ο Πλάτωνας ανέφερε στα γραπτά του ότι για το φαινόμενο ευθύνονται ταλαντώσεις ρευστών που περιέχονται σε υπόγεια ύδατα, ενώ οι περιπατητικοί αναγνώριζαν ότι το ίδιο το φαινόμενο αποτελούσε ένα αίνιγμα που ο Αριστοτέλης δεν μπορούσε να ερμηνεύσει. Πολύ αργότερα ο Κέπλερ αναφέρθηκε σε πιθανή διαστολή υδάτων λόγω της ηλιακής επίδρασης και ο Γαλιλαίος χρησιμοποίησε το φαινόμενο των παλιρροιών για να αποδείξει, ανεπιτυχώς, τη διπλή κίνηση της Γης και να βρει επιχειρήματα υπέρ της ηλιοκεντρικής θεωρίας. Ο Καρτέσιος επίσης υποστήριζε ότι το πέρασμα της Σελήνης πάνω από ένα σημείο

του ωκεανού συμπίεζε τον αιθέρα, ο οποίος με την σειρά του ασκούσε πίεση στο νερό. Άλλοι ερευνητές αναφέρονταν σε πιθανή έλξη της θάλασσας από την Σελήνη εξαιτίας μια δύναμης παρόμοια με τον μαγνητισμό (Weinberg, 2016).

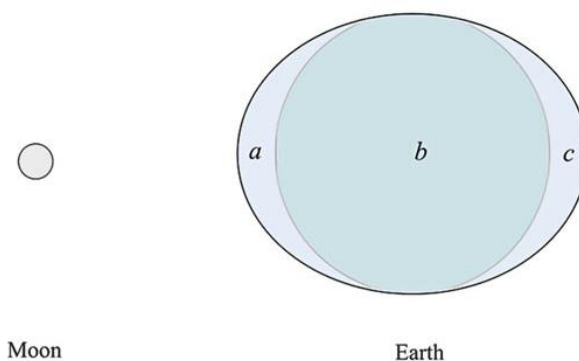
Από την πολύ σύντομη ιστορική αναδρομή περί του θέματος μόνο η καρτεσιανή ερμηνεία έχει κάποια λογική με την προϋπόθεση φυσικά ότι η έννοια του αιθέρα έχει πραγματική υπόσταση. Ο Νεύτωνας έχοντας ήδη έρθει σε αντιπαράθεση με τον Καρτέσιο γι' αυτό το θέμα, απέδειξε ότι οι παλίρροιες είναι μια άμεση συνέπεια του Νόμου της Παγκόσμιας Έλξης και του 3<sup>ου</sup> νόμου της κίνησης.

Η Γη έλκεται τόσο από τη Σελήνη όσο και από τον Ήλιο. Στο σύστημα Γη- Ήλιος η Γη υφίσταται την βαρυτική έλξη του δεύτερου αλλά λόγω της ημερήσιας περιστροφής της εμφανίζεται και η κεντρόφυγος δύναμη λόγω αδράνειας. Η ισότητα αυτών των δυο δυνάμεων στο κέντρο της Γης είναι ο λόγος που αυτή διατηρείται στην τροχιά της γύρω από τον Ήλιο. Αυτές οι δυο δυνάμεις δεν είναι ίσες σε όλα τα σημεία της επιφάνειας και οι παλίρροιες επηρεάζονται περισσότερο από τη δύναμη βαρυτικής έλξης, η οποία μάλιστα ελαττώνεται όταν αυξάνεται η απόσταση από τον Ήλιο. Συγκεκριμένα τα σημεία της γήινης επιφάνειας που εκτίθενται δέχονται μεγαλύτερη ελκτική δύναμη από τα σημεία πλησίον του κέντρου της, με αποτέλεσμα αυτή να υπερισχύει της κεντρόφυγου. Ανάλογα τα εκ διαμέτρου αντίθετα σημεία της επιφάνειας της Γης έλκονται με μικρότερη δύναμη από τον Ήλιο και άρα η κεντρόφυγος υπερισχύει εκεί. Η ίδια ανάλυση ισχύει και για την επιρροή της Σελήνης στο δυαδικό σύστημά τους (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Weinberg, 2016).

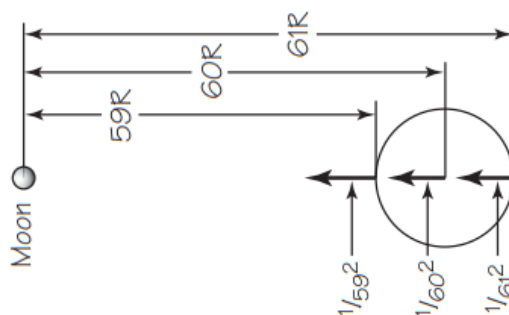
Σύμφωνα με τον Νεύτωνα αιτία των παλιρροιών δεν είναι η ίδια η ύπαρξη της δύναμης της βαρύτητας από τον Ήλιο και την Σελήνη αντίστοιχα αλλά η διαφορά της τιμής της στα διάφορα σημεία της Γης. Επίσης στο φαινόμενο συμβάλει πολύ περισσότερο η σεληνιακή έλξη παρά την τεράστια μάζα του Ήλιου διότι κομβικό ρόλο διαδραματίζει η απόσταση στην συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτό εξηγείται μαθηματικά καθώς η διαφορά δυνάμεων επιφάνειας-κέντρου μεταβάλλεται σύμφωνα με τον παράγοντα  $1/R^3$ , ενώ η βαρυτική έλξη μεταβάλλεται από τον Νόμο Παγκόσμιας Έλξης σύμφωνα με τον συντελεστή  $1/R^2$ . Έτσι οι διαφορές της τιμής της στα σημεία λόγω σεληνιακής έλξης είναι 2 φορές μεγαλύτερες σε σχέση με την ηλιακή έλξη (MacDougal, 2012).

Η βαρύτητα της Σελήνης προκαλεί διπλό εξόγκωμα στην επιφάνεια της Γης στην κατεύθυνση του άξονα Γης- Σελήνης. Εν συνεχεία το εξόγκωμα προκαλεί ένα στένεμα και καθώς η Γη περιστρέφεται ημερησίως, δημιουργούνται δυο παλίρροιες σε δεδομένο σημείο. Η πρώτη σχετίζεται με το σημείο που περνά κάτω από τη Σελήνη και η δεύτερη με την

διαμετρικά αντίθετη θέση. Η καθημερινή καθυστέρηση εξηγείται από το γεγονός ότι η Σελήνη εκτελεί μια πλήρη περιφορά γύρω από τη Γη σε 29,53 μέρες, ενώ η Γη σε μια μέρα. Έτσι στον ίδιο χρόνο η Σελήνη έχει διαγράψει το 1/30 της τροχιάς της και προηγείται κατά 48 λεπτά. Με άλλα λόγια η Σελήνη θα ξαναβρεθεί στο ίδιο σημείο όχι μετά από 24 ώρες αλλά μετά από 24 ώρες και 48 λεπτά. Αυτός ο χρόνος αποτελεί την περίοδο των παλιρροιών (T.Cushing, 2003).



Εικόνα 3.15 Παλίρροιες στο σύστημα Γης-Σελήνης. Στα σημεία *a* και *c* παρατηρούνται πλημμυρίδες (MacDougal, 2012).



Εικόνα 3.16 Οι αποστάσεις των σημείων *a*, *b*, *c* (της εικόνας 3.15), οι αποστάσεις και οι άνισες βαρυτικές έλξεις τους από τη Σελήνη (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Η θέση του Ήλιου καθώς και των άλλων πλανητών επηρεάζουν το φαινόμενο των παλιρροιών. Όταν Γη, Σελήνη και Ήλιος ευθυγραμμίζονται βρισκόμενοι στον ίδιο οριζόντιο άξονα, οι βαρυτικές επιδράσεις προστίθενται και η στάθμη των παλιρροιών είναι πολύ υψηλή. Αυτό συμβαίνει σε κάθε Νέα Σελήνη, δηλαδή στην περίπτωση που ο Ήλιος και η Σελήνη βρίσκονται από την ίδια πλευρά σε σχέση με τη Γη και σε κάθε Πανσέληνο, όταν Ήλιος και Σελήνη βρίσκονται σε διαμετρικά αντίθετα σημεία επί του ίδιου άξονα σε σχέση με τη Γη. Ωστόσο η ευθυγράμμιση των τριών ουράνιων σωμάτων δεν είναι ποτέ τέλεια, γιατί το επίπεδο περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο δεν συμπίπτει ακριβώς με την εκλειπτική της Σελήνης. Αυτό συνεπάγεται ότι η γωνία των τριών σωμάτων είναι μέγιστη την

χρονική στιγμή των ηλιοστασίων και μηδενική την στιγμή των ισημεριών. Έτσι οι παλίρροιας των ισημεριών είναι πάντα μεγαλύτερες, αφού οι βαρυτικές επιδράσεις έχουν μεγάλη προστιθέμενη αξία (MacDougal, 2012).

Ο Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης ενώ εξηγεί το φαινόμενο των παλίρροιας άψογα, δεν μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τις εκδηλώσεις του, όπως το ύψος των υδάτων, γιατί αυτό εξαρτάται και από το υποθαλάσσιο ανάγλυφο και τη μορφολογία του. Στο μέσο των ωκεανών το ύψος των παλίρροιας μπορεί να φτάσει τα 75cm, στις ακτές μπορεί να έχει μηδενικό ύψος και σε κλειστές θάλασσες ή ανοιχτούς όρμους μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 15m.

Οι παλίρροιας έχουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην διαμόρφωση των ακτογραμμών της Γης, όσο και στις ημερήσιες περιστροφές Γης και Σελήνης. Όταν η Σελήνη βρίσκεται πάνω από τον Ατλαντικό ωκεανό, οι διαφορές των βαρυτικών έλξεων παραμορφώνουν την γήινη υδατόμαζα προκαλώντας διπλό εξόγκωμα. Καθώς όμως η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της από τα δυτικά προς τα ανατολικά, οι ακτές της Αμερική συγκρούονται με αυτό το εξόγκωμα και παρεμποδίζεται η κίνηση τους κατά αυτή τη φορά λόγω της ακαμψίας του γήινου φλοιού. Αν το γεγονός αυτό αναλυθεί από ενεργειακή σκοπιά, οι τριβές που προκαλούν οι παλίρροιας επιτελούν μηχανικό έργο αλλάζοντας την μορφή των ακτών μέσω της διάβρωσης και της εναπόθεσης άμμου και βοτσάλων. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας στις ακτές αφαιρείται από την ενέργεια περιστροφής της Γης, έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα την επιβράδυνση της περιστροφής της και άρα την επιμήκυνση της διάρκειας της μέρας κατά 0,0016 δευτερόλεπτα ανά αιώνα.

Σύμφωνα με τον 3<sup>ο</sup> νόμο της κίνησης του Νεύτωνα την ίδια επίπτωση έπρεπε να έχουν οι παλίρροιας και στη Σελήνη. Αυτό όντως συμβαίνει αλλά επειδή αυτή έχει 81 φορές μικρότερη μάζα από τη Γη υφίσταται μεγαλύτερες αλλαγές, το αποτέλεσμα των οποίων κάνει ένα τμήμα της επιφάνειας της να μην είναι ορατό ποτέ από τη Γη. Μια άλλη επίπτωση είναι η προοδευτική αύξηση της απόστασης Γης-Σελήνης. Βάσει του νόμου διατήρησης της στροφορμής, κάθε φορά που η Γη επιβραδύνει την περιστροφή της, η μεταξύ τους απόσταση αυξάνεται κατά 3cm ανά έτος. Αυτό το γεγονός οδηγεί και στην επιμήκυνση του σεληνιακού μήνα και εξηγείται από τον 3<sup>ο</sup> νόμο του Κέπλερ. Όσο ένα ουράνιο σώμα απομακρύνεται από το κεντρικό σώμα γύρω από το οποίο περιφέρεται, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η περίοδος περιφοράς του (Hewitt P. G., 1997; Vigoureux, 2006).

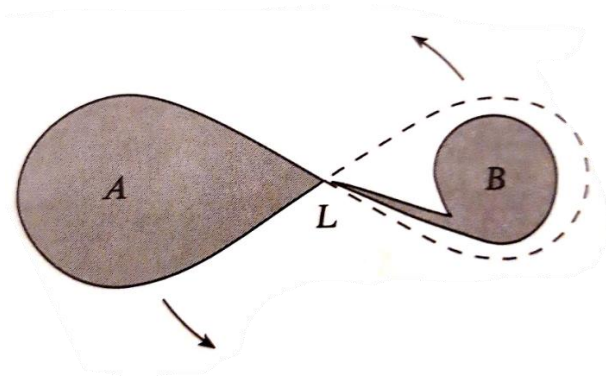
Οι συνέπειες των παλίρροιας δεν αφορούν μόνο το υγρό στοιχείο της Γης αλλά επηρεάζουν τόσο την ξηρά όσο και τον ατμοσφαιρικό αέρα. Μάλιστα ο φλοιός τη Γης σε κάθε εμφάνιση παλίρροιας παραμορφώνεται δυο φορές κατά 1mm, ενώ από την άλλη

πλευρά οι ατμοσφαιρικές παλίρροιες υφίστανται περιοδικά λόγω της θερμικής διαστολής των αερίων δημιουργώντας μεταβολές στην ατμοσφαιρική πίεση. Σε αυτό το φαινόμενο συμβάλλει εύλογα ο Ήλιος και μάλιστα η επίδραση του είναι 16 φορές μεγαλύτερη από αυτή της Σελήνης.

Το θέμα των παλιρροιών και των επιπτώσεων τους δεν περιορίζεται την γειτονιά της Γης αλλά επεκτείνεται στους άλλους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος ακόμη και στα δυαδικά συστήματα αστεριών και γαλαξιών. Με άλλα λόγια εφόσον ο νόμος της βαρύτητας έχει καθολική ισχύ, οι παλίρροιες πρέπει να υπάρχουν γενικά στο Σύμπαν και να ευθύνονται για φαινόμενα συγχρονισμού όπως στην περίπτωση της Σελήνης, που δείχνει πάντα την ίδια όψη της στη Γη.

Μια πολύ σημαντική έννοια για την μελέτη παλιρροιών στο Σύμπαν αποτελεί το όριο του Ρος. Αυτό εισήχθη τον 19<sup>ο</sup> αιώνα από τον Γάλλο μαθηματικό Έντουαρντ Ρος και αφορά την απόσταση πέραν της οποίας οι παλιρροϊκές δυνάμεις μεταξύ ενός ουράνιου σώματος που πλησιάζει ένα άλλο μεγαλύτερης μάζας, υπερिशύουν των ελκτικών δυνάμεων συνοχής του μικρού σώματος και τείνουν να το εξαρθρώσουν. Η απόσταση-όριο αυτή δίνεται από τον τύπο  $d = r \cdot (2M/m)^{1/3}$ , όπου  $d$  το όριο Ρος,  $r$  η ακτίνα του μικρού ουράνιου σώματος,  $M$  η μάζα του μεγάλου ουράνιου σώματος και  $m$  η αντίστοιχη του μικρού (Narlikar, 1999).

Αυτό το όριο επίσης αντιπροσωπεύει το σημείο όπου οι βαρυτικές δυνάμεις συνοχής του μικρού σώματος είναι ίση με την διαφορά βαρυτικής έλξης των σημείων του, λόγω του μεγάλου σώματος. Επομένως όταν το μικρό σώμα διαβεί αυτή την απόσταση πλησιάζοντας το μεγάλο, οι παλιρροϊκές δυνάμεις θα αρχίσουν να παραμορφώνουν το σχήμα του και η βαρυτική έλξη των μερών που το συγκροτούν, δεν θα είναι ικανή να τις αντισταθμίσει, με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Αυτό αποτελεί και μια ερμηνεία για την εμφάνιση δακτυλίων στον Κρόνο ή τον Δία, τα οποία πρέπει να αποτελούνται από δορυφόρους ή μετεωρίτες, οι οποίοι ξεπέρασαν το όριο του Ρος. Τα θραύσματα που είναι κοντά στο προς εξάρθρωση σώμα, λόγω διατήρησης της στροφορμής κινούνται ταχύτερα αρχικά και στο τέλος αιωρούνται σε τροχιά γύρω από το μεγάλο σώμα σχηματίζοντας ένα δακτύλιο. Στην περίπτωση όμως των δυαδικών αστεριών, των δυαδικών γαλαξιών και των μαύρων οπών τα αποτελέσματα είναι πιο καταστροφικά, αφού έλκουν γειτονικά σώματα και άστρα προς το μέρος τους (MacDougal, 2012; Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).



**Εικόνα 3.17** Ένα σύστημα διπλών αστέρων, περιφερόμενα σε ελλειπτικές τροχιές. Ο αστέρας A έχει διασταλεί με αποτέλεσμα να έχει γεμίσει τον λοβό Ρος (δηλαδή τη δική του διακεκομμένη γραμμή). Οι παλιρροϊκές δυνάμεις του άστρου B έπειτα από το σημείο L έχουν καταστρεπτικές συνέπειες, αποσπώντας ύλη από το A (Narlikar, 1999).

Πριν ολοκληρωθεί το υποκεφάλαιο αυτό, που σχετίζεται με τις κυριότερες εφαρμογές του νευτώνειου νόμου της βαρύτητας και των τριών νόμων της κίνησης στη Μηχανική και την Αστροφυσική, θα αναλυθεί και ο κομβικός ρόλος της βαρυτικής δύναμης στην γέννηση, συντήρηση και τελικό στάδιο της ζωής των άστρων.

Άστρο ονομάζεται το ουράνιο σώμα, που παράγει φως και θερμότητα από μόνο του, γι' αυτό λέγεται και αλλιώς στην Αστρονομία αυτόφωτο σώμα. Σε ένα τέτοιο άστρο, όπως ο Ήλιος του δικού μας ηλιακού συστήματος, η ενέργεια φωτός και θερμότητας προκύπτει χάρη στις πυρηνικές αντιδράσεις που γίνονται στο εσωτερικό του. Οι δυο γνωστές πυρηνικές αντιδράσεις στη Φυσική είναι η σχάση και η σύντηξη. Στον πυρήνα του άστρου συμβαίνει η δεύτερη και συνίσταται στην συνένωση ελαφριών στοιχείων, με αποτέλεσμα τη μετατροπή τους σε βαρύτερα (Varnoglis, 2014).

Το βασικό καύσιμο της παραπάνω διαδικασίας είναι το υδρογόνο(H) και μάλιστα ένα ισότοπό του, το δευτέριο. Το άτομο του δευτέρου αποτελείται από ένα θετικά φορτισμένο πρωτόνιο και ένα ουδέτερο νετρόνιο στον πυρήνα του, ενώ γύρω του περιφέρεται ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο. Η ακολουθία της πυρηνικής σύντηξης αναπαρίσταται συμβολικά ως εξής:  $4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu^e + \text{ενέργεια}$ . Έτσι τέσσερις πυρήνες υδρογόνου(H) συνενώνονται για να προκύψει ένα πυρήνας Ηλίου(He), δυο αντισωματίδια και ίδιας μάζας και αντίθετου φορτίου του ηλεκτρονίου( $\text{e}^+$ ), δυο ελάχιστης μάζας και χωρίς φορτίο νετρίνα του ηλεκτρονίου ( $\nu^e$ ) και απελευθέρωση ενέργειας, οπότε πρόκειται για εξώθερμη αντίδραση.

Στην παραπάνω αντίδραση επιβεβαιώνεται η Αρχή Διατήρησης του Ηλεκτρικού Φορτίου καθώς τα τέσσερα θετικά πρωτόνια των πυρήνων ηλίου των αντιδρώντων είναι ίσα με τα δυο θετικά πρωτόνια των πυρήνων ηλίου μαζί με τα δυο θετικά ποζιτρόνια των προϊόντων. Όσον αφορά όμως της Αρχή Διατήρησης της Μάζας υπάρχει ένα πρόβλημα. Αποδεικνύεται ότι η μάζα των προϊόντων είναι μικρότερη αυτής των αντιδρώντων και πρέπει να

δικαιολογηθεί. Ο Αϊνστάιν όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο δίνει την λύση σε αυτό το ζήτημα, αφού αποδεικνύει ότι το έλλειμα μάζας αντισταθμίζεται από ανάλογο κέρδος σε ενέργεια, η οποία υπάρχει στα προϊόντα. Αυτή η ενέργεια μάλιστα είναι περίπου 27MeV και χάρη σε αυτή εκπέμπουν φως και θερμότητα τα άστρα (Narlikar, 1999).

Οι πυρηνικοί φυσικοί προσπάθησαν να μιμηθούν αυτή τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας μέσω της κατασκευής θερμοπυρηνικών εργοστασίων σύντηξης. Ωστόσο υπήρξε το πρόβλημα της ελεγχόμενης αντίδρασης, ώστε ο ρυθμός της να είναι σταθερός και όχι εκρηκτικός. Για να επιτευχθεί αυτό θα έπρεπε να πυρηνικά καύσιμα να είναι σε περιορισμένο χώρο και σε σταθερή μορφή για μεγάλο διάστημα. Στα άστρα τον ρυθμιστικό αυτό ρόλο αναλαμβάνει η δύναμη της βαρύτητας λόγω της τεράστιας μάζας τους.

Η ιδέα ότι η βαρύτητα, ή πιο σωστά η βαρυτική δυναμική ενέργεια, είναι η κύρια πηγή της ακτινοβολούσας ενέργειας των άστρων είχε υποτεθεί από τους Κέλβιν και Βον Χέλμχολντς πολύ πριν ανακαλυφθούν οι πυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό τους. Τα άστρα σχηματίζονται από συμπυκνώσεις νεφών μεσοαστρικής ύλης, τα οποία βρίσκονται διάσπαρτα στο Διάστημα μέχρι το σημείο που κάποια εξωτερική αιτία, όπως κρουστικά κύματα εκρήξεων έχουν ως αποτέλεσμα ένα μέρος αυτών, να αποκτούν μεγαλύτερη πυκνότητα καθώς πλησιάζουν το ένα το άλλο. Στην συνέχεια μεταξύ των συστατικών των νεφών αρχίζει να ασκείται βαρυτική έλξη, η οποία παράγει έργο με την μορφή κινητικής ενέργειας. Έτσι τα μέρη των νεφών αυτών σε αέρια κατάσταση, ενώ αρχικά κινούνταν τυχαία, η συστολή που προκαλείται λόγω βαρύτητας τους αυξάνει την κινητικής ενέργεια, η οποία οδηγεί σε αύξηση της πίεσης των αερίων και έπειτα σε αύξηση της θερμοκρασίας τους. Είναι επίσης γνωστό ότι ένα αέριο σε υψηλή θερμοκρασία ακτινοβολεί. Συνοπτικά, λοιπόν, η βαρυτική δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των μορίων και σε ενέργεια ακτινοβολίας (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Οι αστρονόμοι όμως υπολόγισαν ότι η βαρύτητα ως πηγή ενέργειας θα επέτρεπε στον δικό μας Ήλιο να φωτοβολεί για 30 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Οι Γεωλόγοι επίσης υπολόγισαν ότι η ηλικία της Γης είναι 4,6 δισεκατομμύρια έτη και πρέπει να σχηματίστηκε προσεγγιστικά την ίδια χρονική περίοδο με τον Ήλιο. Εφόσον η ηλικία του Ήλιου είναι μεγαλύτερη από 30 εκατομμύρια έτη έπρεπε να βρεθεί και μια άλλη πηγή ενέργειας, πέρα από τη βαρύτητα, για να δικαιολογηθεί το ενεργειακό του απόθεμα (Narlikar, 1999).

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα βρέθηκε εν μέρει από τον Άγγλο αστρονόμο Άρθουρ Έντινγκτον κατά την τρίτη δεκαετία του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ο οποίος έδωσε ένα μοντέλο δομής, σχηματισμού εξέλιξης των άστρων μέσα από εξισώσεις. Η πρώτη εξίσωση αφορά την υδροστατική ισορροπία των άστρων υπό την επίδραση δυο αντιτιθέμενων δυνάμεων, αφενός της



βαρύτητας και αφετέρου της δύναμης των εσωτερικών πιέσεων. Οι εσωτερικές πιέσεις οφείλονται στο θερμό αέριο που υπάρχει στον πυρήνα του άστρου καθώς και στην εκπομπή ακτινοβολίας που προκύπτει από αυτό. Άρα η βαρύτητα τείνει να συστέλλει το άστρο και οι εσωτερικές πιέσεις τείνουν να το διαστέλλουν παράλληλα. Μάλιστα ο Άγγλος αστρονόμος έγινε γνωστός για το όριο Έντιγκτον, που περιγράφει την μάζα που πρέπει να έχει ένα άστρο ώστε οι δυο παραπάνω δυνάμεις να βρίσκονται σε ισορροπία και έτσι αυτό να διατηρεί την δομή και το σχήμα του σταθερό.

Η δεύτερη εξίσωση περιγράφει τη σχέση μάζας ενός άστρου με την πυκνότητα του και η τρίτη εξίσωση, που είναι γνωστή και καταστατική εξίσωση αερίων συνδέει την πίεση σε οποιοδήποτε σημείο του εσωτερικού του με την αντίστοιχη θερμοκρασία και πυκνότητα του. Το συνολικό αποτέλεσμα των τριών εξισώσεων δίνουν ένα μοντέλο για τον Ήλιο ως σφαίρα από αέριο με πολύ υψηλές θερμοκρασίες στο κέντρο του, οι οποίες προοδευτικά μειώνονται προς τα εξωτερικά στρώματα του. Στις παραπάνω προστίθεται μια άλλη εξίσωση που περιγράφει πως απορροφάται η ακτινοβολία των εσωτερικών θερμών περιοχών διαδιδόμενη προς τα έξω. Η απορρόφηση δεν είναι τέλεια οπότε ένα μικρό μέρος διαφεύγει από την ηλιακή επιφάνεια (Αντωνοπούλου & Μαστιχιιάδης, 2012).

Αστρονομικές μετρήσεις εκτίμησαν ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του είναι περίπου  $5.500^{\circ}\text{C}$  και βάσει αυτού ο Έντιγκτον υπολόγισε ότι η θερμοκρασία στο κέντρο του έπρεπε να είναι 2.000 φορές παραπάνω από την επιφανειακή. Επιπροσθέτως ο ίδιος υπέθεσε ότι ρέει συνεχώς ακτινοβολία από τον πυρήνα προς τα εξωτερικά στρώματα και άρα θα έπρεπε να υπάρχει μια άλλη πηγή ενέργειας, ώστε να αιτιολογηθεί η λαμπρότητα του. Απαραίτητα προϋπόθεση για να ισχύουν τα παραπάνω ήταν οι θερμοκρασίες στο κέντρο να είναι εξαιρετικά υψηλές. Οι ατομικοί φυσικοί της εποχής είχαν απορρίψει την ιδέα αυτή αλλά ο Έντιγκτον δικαιώθηκε αργότερα όταν αποδείχθηκε ότι οι θερμοκρασίες στο κέντρο των άστρων πρέπει να είναι της τάξεων των 10-40 εκατομμυρίων βαθμών, ώστε να συντηρούν πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης ελαφριών πυρήνων (Narlikar, 1999).

Αυτόματα λοιπόν εμφανίζεται και μια άλλη δύναμη της φύσης η ισχυρή πυρηνική δύναμη που είναι υπεύθυνη για την συνένωση των τεσσάρων πυρήνων υδρογόνου. Σύμφωνα όμως με τον νόμο του Κουλόμπ μεταξύ ομώνυμων φορτίων αναπτύσσονται ισχυρές απωστικές δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσεως οι οποίες αναιρούν την ιδέα της συνένωσης θετικά φορτισμένων πυρήνων. Εντούτοις σε πολύ μικρή εμβέλεια, όπως οι αποστάσεις στον πυρήνα, η ισχυρή πυρηνική δύναμη σχεδόν αγνοεί τις ηλεκτρικές δυνάμεις και υπερτερεί. Κλείνοντας αυτό το ζήτημα, το μοντέλο του Ήλιου ολοκληρώθηκε με μια πέμπτη

εξίσωση που διατυπώθηκε το 1938 από τον Γερμανό φυσικό Χάνς Μπέτε που εξηγεί τον ρυθμό παραγωγής ενέργειας στον πυρήνα ενός άστρου.

Οι παραπάνω πληροφορίες ήταν απαραίτητες για γίνουν κατανοητοί οι μηχανισμοί και οι δυνάμεις που συμμετέχουν στην μετατροπή ενός νέφους μεσοαστρικής ύλης σε άστρο αφού μέχρι στιγμής έχει αναλυθεί μόνο η φάση της συστολής του λόγω βαρύτητας. Για όσο χρονικό διάστημα και με πολύ αργό ρυθμό συμβαίνει η συστολή αυτή σιγά σιγά οι θερμοκρασίες της κεντρικής περιοχής του άστρου αποκτούν μια οριακή τιμή πέραν της οποίας σηματοδοτείται η έναρξη πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης. Η βαρύτητα περιορίζει το θερμό αέριο στο κέντρο και αυτό παράγει πυρηνική ενέργεια. Το άστρο βρίσκεται σε ισορροπία δυνάμεων βαρύτητας και πιέσεων και συνεχίζει να ακτινοβολεί για όσο υπάρχουν αποθέματα υδρογόνου και για όσο συντηρούνται οι συνθήκες αυτές (Αντωνοπούλου & Μαστιχιάδης, 2012).



*Εικόνα 3.18 Η ισορροπία δυο δυνάμεων, της βαρύτητας και αυτής που δημιουργείται λόγω της πίεσης του θερμού αερίου και της ακτινοβολίας στο εσωτερικό του, είναι η αιτία που τα άστρα δεν καταρρέουν, μέχρι τουλάχιστον να εξαντλήσουν τα πυρηνικά τους καύσιμα (Narlikar, 1999).*

Όταν όμως εξαντληθούν μετά από δισεκατομμύρια τα καύσιμα του, τότε ο θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας που λέγεται Ήλιος ή κάθε άστρο, θα σβήσει. Μια πρώτη συνέπεια είναι η μείωση της παραγωγής θερμότητας και η πτώση της πίεσης στην κεντρική περιοχή. Αυτό εν συνεχεία οδηγεί στην συστολή του κέντρου του άστρου και παράλληλα στην σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του μέχρι ένα όριο, έπειτα από το οποίο ξεκινούν και πάλι οι πυρηνικές αντιδράσεις αλλά με διαθέσιμο καύσιμο πλέον το ήλιο(He). Συγκριτικά το ήλιο χρειάζεται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από τον υδρογόνο προκειμένου να συντηχθεί. Κατά τη διαδικασία αυτή τρεις πυρήνες ηλίου συνενώνονται σε ένα διεγερμένο πυρήνα άνθρακα(C), ο οποίος μεταπίπτοντας στην κανονική του κατάσταση απελευθερώνει ενέργεια. Παράλληλα για να διατηρηθεί η ισορροπία του άστρου τα εξωτερικά του στρώματα διαστέλλονται και συνολικά το άστρο έχει φτάσει στην φάση του ερυθρού γίγαντα (Hewitt P. , 1997; Modinos, 2014).

Η διαστολή θα οδήγούσε στην ψύξη και άρα στην μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας από 5.550°C σε περίπου 3.500°C εάν επρόκειτο για τον Ήλιο μας, αλλάζοντας το χρώμα του από κίτρινο σε κόκκινο αλλά επιμηκύνοντας ταυτόχρονα τη διάρκεια ζωής του ως ακτινοβολούσα σφαίρα. Σε κάποια χρονική στιγμή που και το Ήλιο θα καταναλώνονταν οι αμέσως επόμενοι συνδυασμοί πυρήνων (σε οξυγόνο και έπειτα σε νέον) χαρακτηρίζονται πολύ ασταθείς. Κάθε φορά που ένα καύσιμο εξαντλείται, η κεντρική περιοχή συστέλλεται όλο και πιο πολύ αλλά και θερμαίνεται μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία που θα πυροδοτήσει την πυρηνική σύντηξη. Φυσικά στον αντίποδα η εξωτερική περιοχή διαστέλλεται όλο και πιο πολύ, για να διατηρήσει την μορφή του άστρου.

Η κατάσταση αυτή δεν θα συνεχίζεται επ' άπειρον καθώς διακόπτεται στην ομάδα πυρήνων σιδήρου(Fe), όπου ο κάθε πυρήνας αποτελείται από 56 νουκλεόνια και η περαιτέρω σύντηξη δεν παράγει ενέργεια. Τότε το άστρο αντιμετωπίζει μια καταστροφική φάση με τη θερμοκρασία της κεντρικής περιοχής να έχει φτάσει τους 10 δισεκατομμύρια βαθμούς και με την βαρύτητα να υπερισχύει. Η αστάθεια αυτή εκδηλώνεται με την ανατίναξη του εξωτερικού φλοιού, μια κατάσταση που είναι γνωστή ως έκρηξη σουπερνόβα ή υπερκαινοφανής αστέρας. Τα υπολείμματα της αποτελούνται από μια κατάσταση πλάσματος όπου ατομικοί πυρήνες, ηλεκτρόνια, νετρίνα και ακτινοβολία συγκροτούν τις λεγόμενες κοσμικές ακτίνες που ταξιδεύουν σε τεράστιες ποσότητες στους Γαλαξίες. Τα απομεινάρια της έκρηξης μπορούν να προκαλέσουν την γέννηση ενός άλλου άστρου ή να αποτελέσουν την πρώτη ύλη για τον σχηματισμό νεφών μεσοαστρικής ύλης. Ο ήλιος μας, οι πλανήτες και τα άλλα ουράνια σώματα του ηλιακού μας συστήματος είναι πιθανόν να γεννήθηκαν μέσα από τις παραπάνω διαδικασίες (Αντωνοπούλου & Μαστιχιάδης, 2012; Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).

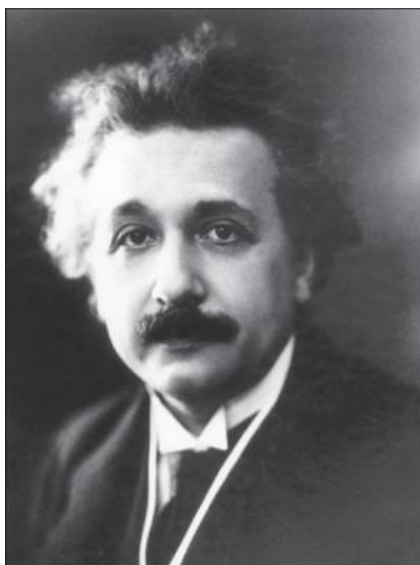


*Εικόνα 3.19 Το νεφέλωμα του Καρκίνου είναι ένα παράδειγμα υπολείμματος μιας έκρηξης σούπερνόβα. Η εικόνα κάνει εστίαση επίσης σε ένα Πάλσαρ που βρίσκεται μέσα σε αυτό (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).*

Τέλος σε αυτό το σημείο θα ήταν απορίας άξιο τι συμβαίνει στον πυρήνα του άστρου έχοντας πλέον χάσει αυτό το 80% περίπου της μάζας του. Ανάλογα με την αρχική μάζα του άστρου, το τελικό στάδιο του εναπομείναντος πυρήνα ποικίλει ανάμεσα στον σχηματισμό του σε λευκό νάνο, αστέρα νετρονίων, Πάλσαρ ή μαύρη τρύπα. Φυσιολογικά ο υπέρθερμος και πυκνότερος πυρήνας ενός άστρου με αρχική μάζα ίδια περίπου με του δικού μας Ήλιου μετά την κατάρρευση του καταλήγει σε λευκό νάνο και εν συνεχεία λόγω της συνεχούς ψύξης του, που μπορεί να διαρκέσει δεκάδες εκατομμύρια χρόνια, μετατρέπεται σε καφέ ή μαύρο νάνο (Hewitt P. , 1997; Narlikar, 1999). Οι υπόλοιποι σχηματισμοί θα μελετηθούν σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

### 3.3 Η θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν

#### 3.3.1 Σύντομη βιογραφία



*Εικόνα 3.20 Φωτογραφία του Άλμπερτ Αϊνστάιν (Lincoln, 2017).*

Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν γεννήθηκε στην Γερμανία και συγκεκριμένα στην πόλη Ούλμ. Η οικογένειά του είχε εβραϊκή καταγωγή και τα μέλη της δεν είχαν δώσει δείγματα ιδιαίτερης ευφυΐας. Ο πατέρας του ήταν μικρομεσαίος επιχειρηματίας ενώ ο ίδιος ο Άλμπερτ στα πρώτα του βήματα στο σχολείο δεν ήταν καλός μαθητής καθώς αντιπαθούσε το γερμανικό εκπαιδευτικό σύστημα, που κατά βάση στηριζόταν στην αποστήθιση. Η βασική του εκπαίδευση επιτεύχθηκε σε καθολικό σχολείο, έχοντας έφεση στην φυσική, τις κοινωνικές Επιστήμες και τα θρησκευτικά (Kuehn, 2015).

Στα μέσα της εφηβείας του μετακόμισαν οικογενειακά στο Μιλάνο της Ιταλίας και ολοκλήρωσε την δευτεροβάθμια εκπαίδευση στην Ελβετική Πολυτεχνική Σχολή. Σε αυτό το στάδιο ο Άλμπερτ ήρθε σε επαφή με τα έργα των Κιρκόφ, Μάξγουελ, Χέρτζ και Μπόλτςμαν, τα οποία του τόνωσαν το ενδιαφέρον για την Φυσική. Στα Μαθηματικά είχε ως καθηγητή τον πολύ γνωστό Χέρμαν Μινκόφσκι αλλά ο ίδιος δεν έδειχνε μεγάλο ενδιαφέρον γι' αυτά. Αφού αργότερα κατάλαβε την σημασία τους στον τομέα της θεωρητικής Φυσικής (Corry, 1998). Το 1900 πήρε το πτυχίο του αλλά επειδή δεν μπορούσε να βρει θέση σε πανεπιστήμιο, εργάστηκε, μετά από μεσολάβηση του φίλου του Γκρόσμαν, ως εξεταστής διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στην Βέρνη της Ελβετίας. Από αυτή τη θέση ήρθε σε επαφή με

εργασίες κορυφαίων επιστημόνων της εποχής και το 1905 δημοσίευσε και ο ίδιος κάποιες πολύ σημαντικές εργασίες (Ferraro, 2007; Modinos, 2014).

Μια από αυτές ήταν το πόνημα του για την κίνηση Μπράουν, δηλαδή την κίνηση στερεών μικροσκοπικών σωματιδίων που αιωρούνται σε στάσιμο υγρό, αποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη ατόμων. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων από στατιστικής άποψης αποδείκνυε ότι η κίνηση αυτή οφείλεται σε συγκρούσεις των στερεών κόκκων με τα μόρια του υγρού (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). Άλλη σημαντική εργασία για την οποία πήρε το 1921 βραβείο Νόμπελ ήταν η ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (Varvoglis, 2014). Η εργασία αυτή βοήθησε στην εδραίωση και ανάπτυξη της Κβαντικής Φυσικής στηριζόμενη στις υποθέσεις Πλάνκ σχετικά με την ερμηνεία της ακτινοβολίας μέλανος σώματος ενώ παράλληλα αποδείκνυε την διττή φύση του φωτός ως κύμα και σωματίδιο. Το παράξενο είναι ότι αργότερα εναντιώθηκε στην θεωρία των κβάντων καθώς δεν δεχόταν την τυχαιότητα των φυσικών νόμων της Κβαντικής Φυσικής λέγοντας μάλιστα την χαρακτηριστική έκφραση «Ο Θεός δεν παίζει ζάρια με τον κόσμο» (Smith D. , 2022). Το ίδιο έτος ο Αϊνστάιν στην εργασία «περί της ηλεκτροδυναμικής των κινούμενων σωμάτων» διατύπωσε την Ειδική θεωρία της Σχετικότητας, μια θεωρία για την κίνηση του φωτός, ανεξαρτοποιώντας το από τη κίνηση των παρατηρητών και επιβεβαιώνοντας την σταθερότητα της ταχύτητας του σε δεδομένο μέσο διάδοσης. Ακόμη σε ένα επόμενο άρθρο του απέδειξε την ισοδυναμία μάζας-ενέργειας ανοίγοντας τον δρόμο για την ανάπτυξη της Πυρηνικής Φυσικής (T.Cushing, 2003).

Η φήμη του Αϊνστάιν μέσα από αυτά τα έργα εκτοξεύτηκε απότομα και το 1909 διορίστηκε αναπληρωτής καθηγητής στο πανεπιστήμιο της Ζυρίχης. Ένα χρόνο αργότερα αναβαθμίστηκε σε τακτικό καθηγητή στην Πράγα και το 1915 του δόθηκε έδρα στο πανεπιστήμιο του Βερολίνου και έγινε μέλος της Πρωσικής Ακαδημίας Επιστημών. Εκεί ολοκλήρωσε ένα τιτάνιο έργο, που δημοσίευσε το 1916, η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας. Αυτή ήταν μια ριζοσπαστική θεωρία για την βαρύτητα, αφού πλέον η ίδια δεν λογίζεται ως αφηρημένη δύναμη αλλά ως αποτέλεσμα του γεγονότος ότι οι κινούμενες μάζες ακολουθούν την συντομότερη οδό στον καμπυλωμένο χωροχρόνο (Hawking, 2000). Μάλιστα στην μαθηματική της διατύπωση δέχτηκε μεγάλη βοήθεια από τους Μαθηματικούς Κωνσταντίνο Καραθεοδωρή, Χέρμαν Μινκόσφκι και Χίλμπερτ, με τους οποίους είχε πολύ καλή σχέση (Corry, 1998). Το 1919 και χάρη στην συμβολή και τις μετρήσεις του αστρονόμου Έντιγκτον κατά την διάρκεια μιας έκλειψης Ηλίου, έγινε η πρώτη πειραματική επιβεβαίωση της κάμψης των ακτίνων φωτός λόγω βαρυτικού πεδίου, που προέβλεπε η Γενική Σχετικότητα. Αυτό το γεγονός έκανε τον Αϊνστάιν πρόσωπο παγκόσμιας αναγνώρισης και έτσι μπόρεσε

ως δεδηλωμένος ειρηνιστής να προωθήσει τις απόψεις του κατά την περίοδο του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, δίνοντας διαλέξεις σε Ευρώπη, Η.Π.Α. και Ανατολή (Halpern, 2019; Smith D. , 2022).

Από την άλλη πλευρά η εβραϊκή του καταγωγή, η άρνηση της Βιβλικής άποψης περί Θεού και η υποστήριξη του Σιωνισμού τον έκαναν αντιδημοτικό και δημιούργησαν εχθρικό κλίμα εναντίον του την περίοδο που ανέλαβε την εξουσία τον Εθνικοσοσιαλιστικό κόμμα του Χίτλερ στη Γερμανία. Στις αρχές του 1930 το ναζιστικό καθεστώς άρχισε τις εκκαθαρίσεις των πανεπιστημιακών σχολών από εβραϊκά στελέχη αναγκάζοντας τον Άλμπερτ να φύγει από το Βερολίνο και να αναλάβει θέση καθηγητή στο Πρίνσετον, του Νιου Τζέρσι των Η.Π.Α. Τα έργα του μάλιστα κήκαν δημόσια μπροστά στην κρατική όπερα της Γερμανίας και ο ίδιος παραιτήθηκε από την Πρωσική Ακαδημία προκειμένου να μην φέρει σε δύσκολη θέση τον φίλο του Πλάνκ. Αξιοσημείωτο είναι ότι την περίοδο 1924-1933 ο Αϊνστάιν προσπάθησε με εξαιρετη υπομονή να διατυπώσει μια ενιαία θεωρία βαρύτητας και ηλεκτρομαγνητισμού χωρίς όμως αποτέλεσμα (Halpern, 2019).

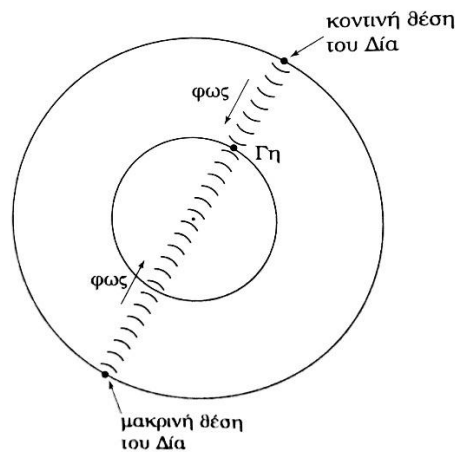
Το 1939 η ναζιστική απειλή οδήγησε τον Αϊνστάιν να εγκαταλείψει τις ειρηνιστικές του θέσεις γράφοντας ένα γράμμα στον Πρόεδρο Ρούσβελτ, μέσω του οποίου τον παρότρυνε να προχωρήσει στην κατασκευή της ατομικής βόμβας από φόβο μήπως οι Γερμανοί με τις προσπάθειες του Χάιζενμπεργκ το καταφέρουν πρώτοι. Ιστορικά είναι γνωστό ότι χάρη στον Οπερχάιμερ η Αμερική κέρδισε αυτό τον αγώνα δρόμου, γεγονός που οδήγησε στα θλιβερά γεγονότα της καταστροφής των ιαπωνικών πόλεων της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι, που τερμάτισαν και τον πόλεμο. ο Αϊνστάιν πριν την εκτόξευση της πρώτης, είχε προειδοποιήσει για τις συνέπειες ενός πυρηνικού πολέμου και βλέποντας τις εξελίξεις των γεγονότων είχε εκφράσει την άποψη ότι η ανθρωπότητα δεν ήταν έτοιμη να αξιοποιήσει τις νέες γνώσεις. Το 1940 ο Άλμπερτ πήρε αμερικανική υπηκοότητα και το 1952 που του προσφέρθηκε η προεδρία του Ισραήλ, την απέρριψε δηλώνοντας απογοητευμένος από την Πολιτική και ότι προτιμά να ασχοληθεί μόνο με την Φυσική. Στις 18 Απριλίου 1955 απεβίωσε στο Νιου Τζέρσι σε ηλικία 76 ετών από καρδιακό επεισόδιο (Halpern, 2019; Smith D. , 2022).

### 3.3.2 Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν

Προτού γίνει ανάλυση της πολύ σημαντικής αυτής εργασίας του Αϊνστάιν, πρέπει να δοθεί μια σύντομη αναφορά για ορισμένα θέματα που προηγήθηκαν χρονικά και βοηθούν

στην καλύτερη κατανόηση της ανάγκης για την διατύπωση της. Αυτά τα θέματα περιλαμβάνουν τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός από τον Ρέμερ, το πείραμα των Μίκελσον και Μόρλεϊ και τις απόψεις για τον χώρο και τον χρόνο μέχρι την εποχή του Νεύτωνα.

Το 1675 ο Δανός αστρονόμος Όλε Ρέμερ παρατήρησε ότι οι δορυφόροι του Δία κατά την κίνηση τους γύρω από αυτόν γίνονται μη ορατοί στο πίσω μέρος του, άλλες φορές νωρίτερα και άλλες φορές αργότερα, ιδωμένοι από τη Γη. Συγκεκριμένα το πρώτο γεγονός συμβαίνει όταν η Γη είναι πιο κοντά στον Δία ενώ το δεύτερο όταν βρίσκεται σε μακρινό σημείο της τροχιάς της. Το πιο λογικό για τα δεδομένα της εποχής θα ήταν να το αιτιολογήσει με βάση τη μη κανονικότητα της κίνησης των πλανητών, επηρεαζόμενος από τους νόμους του Κέπλερ. Ωστόσο ο Ρέμερ το απέδωσε στην πεπερασμένη ταχύτητα του φωτός, σκεπτόμενος ότι βλέπουμε ένα αντικείμενο, όταν το φως από αυτό φτάσει στα μάτια μας. Έτσι προσπάθησε να μετρήσει την χρονική διαφορά, για να προσδιορίσει την ταχύτητα του φωτός. Γνωρίζοντας την ακτίνα της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, την ακτίνα της Γης και τον χρόνο καθυστέρησης, υπολόγισε ότι η ταχύτητα του φωτός  $c$  είναι ίση με  $2,38 \cdot 10^5$  km/s (Ferraro, 2007; T.Cushing, 2003; Valtonen, Anosova, Kholshvnikov, Mylläri, & Orlov, 2016). Αυτή η τιμή είναι συγκρίσιμη με την σημερινή  $3 \cdot 10^5$  km/s έπειτα από μεταγενέστερες μετρήσεις του Μπράντλεϋ, Φιζώ και Φουκώ (Kuehn, 2015).



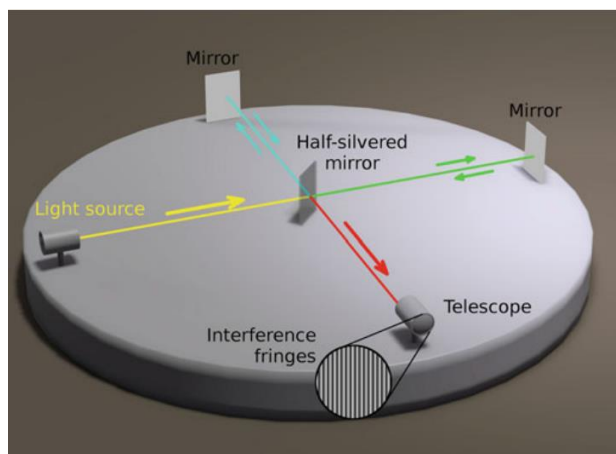
**Εικόνα 3.21** Ο Ρέμερ μέσα από την παρατήρηση των δορυφόρων του Δία συνειδητοποίησε ότι το φως δεν κάνει τον ίδιο χρόνο να φτάσει στη Γη, όταν αυτός βρίσκεται στην κοντινή θέση του σε σχέση με την μακρινή θέση της τροχιάς του (T.Cushing, 2003).

Το 1881 ο Αμερικανός φυσικός Άλμπερτ Μίκελσον μετά από παρότρυνση του Μάξγουελ σχεδίασε ένα πείραμα, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον αλλάζει η ταχύτητα του φωτός στις διάφορες κατευθύνσεις, δεδομένου ότι κινείται σε ένα μέσο, όπως όλα τα κύματα, εννοώντας τον αιθέρα. Αυτός θεωρούνταν ότι είναι διάχυτος στο κενό, άμαζος,



ελαστικός και τόσο αραιός ώστε να μην επηρεάζει τις τροχιές των πλανητών, στοιχεία που τον κάνουν να ανιχνεύεται δύσκολα, αν υπάρχει. Επίσης θεωρούνταν ότι οι πλανήτες και όλο το ηλιακό σύστημα κινείται μέσα σε αυτόν, οπότε θα μπορούσε να επιλεγεί ως απόλυτο σύστημα αναφοράς, για να μετρηθεί η ταχύτητα του φωτός (Swenson, 1970).

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη η οποία αποτελούνταν από μια πηγή μονοχρωματικής ακτινοβολίας, δυο κανονικά κάτοπτρα, ένα κεντρικό ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο και ένα συμβολόμετρο. (βλ. εικόνα 3.10) Το φως της πηγής θα υφίστατο ανάκλαση στο κεντρικό κάτοπτρο οδηγώντας μια δέσμη προς το πάνω κάτοπτρο και μια άλλη δέσμη λόγω διάθλασης, θα οδηγούνταν στο δεύτερο κάτοπτρο. Τελικώς και οι δυο δέσμες θα κατέληγαν στο συμβολόμετρο, όπου θα μετρούσε, εάν υπάρχει κάποια καθυστέρηση στην ταχύτητα των δεσμών, σχηματίζοντας κροσσούς συμβολής. Η ιδέα του πειράματος ήταν ότι εφόσον η διάταξη βρίσκεται στη επιφάνεια της Γης, που περιστρέφεται ημερησίως και ταυτόχρονα κινείται στον αιθέρα, θα έπρεπε να παρατηρηθεί μια καθυστέρηση στην επιστροφή της δέσμης κατά τη διεύθυνση ανατολής- δύσης σε σχέση με τη δέσμη βορράς-νότου. Η διάταξη επίσης είχε την δυνατότητα να περιστρέφεται κατά  $90^0$  ώστε να ελεγχθούν όλες οι κατευθύνσεις (Vecchiato, 2017).



Εικόνα 3.22 Σχηματική αναπαράσταση του συμβολόμετρου του πειράματος των Μίκελσον και Μόρλεϊ (Vecchiato, 2017).

Το αποτέλεσμα του πειράματος δεν έδειξε καμία απόκλιση για την ταχύτητα του φωτός, παρόλο που ο μηχανισμός ήταν τόσο ευαίσθητος, ώστε να διαθέτει την απαραίτητη ακρίβεια μετρήσεων. Επιπροσθέτως το πείραμα επαναλήφθηκε το 1887 με την συμμετοχή του Αμερικανού Έντουαρντ Μόρλεϊ χρησιμοποιώντας μια πιο εξελιγμένη τεχνολογικά διάταξη, αλλά και πάλι το αποτέλεσμα ήταν το ίδιο. Αυτή η εξέλιξη σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το πείραμα έγινε πολλές φορές μετέπειτα και σε οποιοδήποτε συνθήκες, προκάλεσε σύγχυση στους φυσικούς, καθώς δεν μπορούσαν να ερμηνεύσουν τα αποτελέσματά του.

Έτσι το πείραμα Μίκελσον-Μόρλεϊ έγινε διάσημο ως το πιο αποτυχημένο, σε σχέση με τις προβλέψεις, πείραμα στην Ιστορία των Φυσικών Επιστημών. Οι δυο Αμερικανοί πήραν βραβείο Νόμπελ το 1907 για την εφευρετική τους διάταξη καθώς και για το ότι παρείχε σημαντικά στοιχεία για την διατύπωση της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας από τον Αϊνστάιν (Swenson, 1970; Vecchiato, 2017).

Ένα άλλο θέμα που πρέπει να αναφερθεί για να γίνει κατανοητή η παραπάνω θεωρία του, είναι οι απόψεις για τον χώρο και τον χρόνο μέχρι της εποχή του Νεύτωνα, οπότε και εδραιώθηκε η Κλασική Μηχανική. Ο χώρος για την κοινή λογική είναι άπειρης έκτασης και άπειρα διαιρετός ή συνεχής, δεν έχει προτιμητέα κατεύθυνση, δηλαδή είναι ισοτροπικός και είναι ίδιος ιδωμένος από όλα τα σημεία, άρα είναι ομοιογενής. Με άλλα λόγια ο χώρος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα παθητικό «δοχείο» μέσα στο οποίο μπορεί να υπάρχει η ύλη (T.Cushing, 2003).

Ιστορικά ο χώρος στον αρχαίο Ινδουισμό ταυτιζόταν με τον Θεό, ενώ ο Δημόκριτος δεν τον διαχώριζε από το κενό, ως μια άπειρη έκταση που περιείχε την κίνηση της ύλης αλλά δεν ασκούσε επίδραση πάνω της. Ο Ρωμαίος ποιητής Λουκρήτιος υποστήριζε την απεριόριστη έκταση του στο Σύμπαν αλλά ο Πλάτωνας τον είχε εξισώσει με την ύλη λόγω της ισότητας φυσικών σωμάτων και γεωμετρικών μορφών. Ο Αριστοτέλης από την άλλη πίστευε ότι ο χώρος ασκεί ενεργή επίδραση στην ύλη, αφού βάσει της θεωρίας του καθορίζει τις φυσικές κινήσεις των σωμάτων αιτιακά, εξού και η άρνηση ύπαρξης του κενού (Ferraro, 2007).

Στην συνέχεια ο Ιωάννης ο Φιλόπονος υποστήριζε ότι ο χώρος είναι ένα σύνολο καθαρών διαστάσεων, το οποίο δεν ασκεί επιρροή στην ύλη, άρα διαχωρίζεται και από αυτή. Μετά τον Κοπέρνικο, Κέπλερ και Γαλιλαίο έγινε αποδεκτή η ιδέα του κενού και του ανεξάρτητου, άπειρου και χωρίς δομή, χώρου. Ο Καρτέσιος πίστευε στην ταύτιση της ύλης με την καθαρή Γεωμετρία λέγοντας, ότι η ύλη είναι η έκταση της φύσης ενός σώματος και μαζί με την κίνηση αποτελούν βασικές οντότητες του Σύμπαντος (Modinos, 2014).

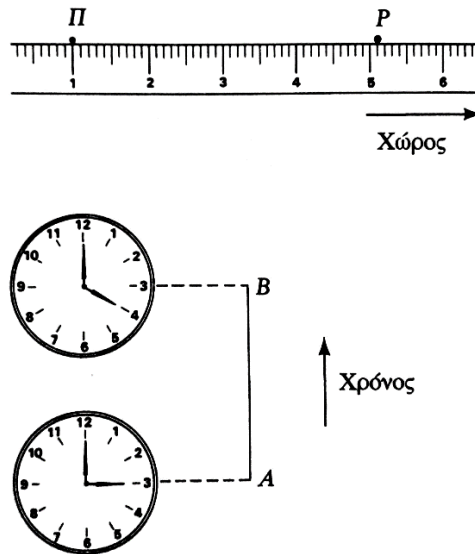
Ο Νεύτωνα ενσωμάτωσε τις δυο τελευταίες απόψεις στην θεωρία του αντιλαμβανόμενος τον χώρο και τη δομή του ως μέρος της εμπειρικής Επιστήμης της Μηχανικής. Έτσι γι' αυτόν ο απόλυτος μαθηματικός χώρος υπάρχει ανεξάρτητα από τα υλικά αντικείμενα ενώ διακρίνει παράλληλα, λόγω της αρχής της σχετικότητας του Γαλιλαίου, τον σχετικό χώρο, που προσδιορίζεται από την θέση των σωμάτων. Επιπροσθέτως ο Νεύτωνα είχε συνειδητοποιήσει ότι η απόλυτη κίνηση, η οποία είναι σχετική ως προς τον απόλυτο χώρο, δεν θα μπορούσε να ανιχνευτεί χωρίς της εξέταση των ενεργουσών δυνάμεων πάνω στα

σώματα. Τέλος, γι' αυτόν απαιτούνταν η ύπαρξη ενός απόλυτου χώρου, στον οποίο το κέντρο του Σύμπαντος θα βρίσκεται ακίνητο, ώστε να έχει λειτουργικό περιεχόμενο ο πρώτος νόμος της κίνησης (T.Cushing, 2003).

Ο Μπέρκλεϊ και ο Λάιμπνιτς διατύπωσαν στα γραπτά τους ότι ο χώρος χωρίς την ύλη δεν έχει νόημα και ότι οι απόλυτες έννοιες είναι απλά ψευδαισθήσεις του μυαλού των ανθρώπων. Σε αυτή την κατεύθυνση ο φυσικός και φιλόσοφος Έρνστ Μάχ θεώρησε ότι είναι αδύνατον να αδειάσουμε όλη την ύλη από το Σύμπαν (Ferraro, 2007).

Ο χρόνος από την άλλη πλευρά για την κοινή λογική θεωρείται η ακαθόριστη κίνηση της ύπαρξης και των γεγονότων στο παρελθόν, παρόν και μέλλον ως ενιαίο σύνολο. Ο Αριστοτέλης είχε συνειδητοποιήσει ότι η αντίληψη του χρόνου από τον άνθρωπο γίνεται με σημείο αναφοράς το παρόν, ως τέλος του παρελθόντος και ταυτόχρονα αρχή του μέλλοντος. Την ίδια άποψη συμμεριζόταν και ο Φιλόπονος θεωρώντας το παρόν, ποιητικό αίτιο του χρόνου, εφόσον τον προσδιορίζει. Τα διαδοχικά παρόντα είναι ιδεατά τομείς της χρονικής ροής, η οποία ενώ είναι σύγχρονη με την κίνηση δεν ταυτίζεται με αυτή και είναι ομοιόμορφη παντού, ανεξάρτητα από αυτή. Ο Νεύτωνας πίστευε στην ύπαρξη ενός απόλυτου χρόνου σε όλες της περιοχές του Σύμπαντος παραλληλίζοντας τον με ένα παγκόσμιο ρολόι, που κινείται με τον ίδιο ρυθμό για όλους (Anderson, 2017; Ferraro, 2007).

Με βάση τις παραπάνω ιδέες οι μετρήσεις των ποσοτήτων μήκους και χρόνου γίνονται μέσα από ράβδους και ρολόγια με απόλυτο τρόπο. (βλ. εικόνα 3.11) Η απόσταση δυο σημείων Π και Ρ γίνεται τοποθετώντας ένα χάρακα ή μια βαθμονομημένη ράβδο κατά μήκος της ευθείας γραμμής που ενώνει τα δυο σημεία. Τελικώς υπολογίζεται το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος ΠΡ, μέτρηση που υπάγεται στους νόμους της Ευκλείδειας Γεωμετρίας. Σχετικά με την μέτρηση του χρόνου από την στιγμή Α στην στιγμή Β, χρησιμοποιείται ο δείκτης του ρολογιού, όπου ο αριθμός των χτύπων του από το Α μέχρι το Β δίνει την χρονική διάρκεια ανάμεσα σε αυτές τις στιγμές. Τέτοιες μετρήσεις μήκους και χρόνου θεωρούνται απόλυτες καθώς δεν εξαρτώνται από τον παρατηρητή και την κίνησή του. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα υποθετικό παράδειγμα που ένα παρατηρητής ήταν ακίνητος και ένας κινούνταν με σταθερή ταχύτητα σε σχέση με τον πρώτο, θα έβρισκαν τα ίδια αποτελέσματα και στις δυο περιπτώσεις (Narlikar, 1999).

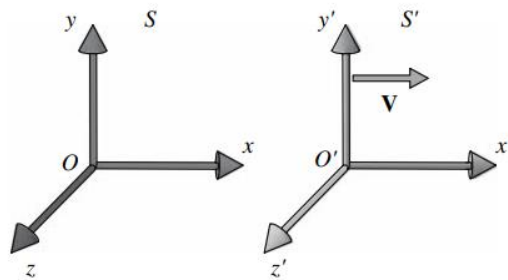


Εικόνα 3.23 Ο τρόπος μέτρησης του απόλυτου χώρου και χρόνου (Narlikar, 1999).

Όσον αφορά την μελέτη της κίνησης η Μηχανική χρησιμοποιεί καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων, στα οποία μετρούνται οι μετατοπίσεις των σωμάτων συναρτήσει του χρόνου. Έτσι σε αυτά ένα γεγονός καθορίζεται από ένα παρατηρητή που μετράει μέσω τριών χωρικών συντεταγμένων την απόσταση από την αρχή των αξόνων και μια χρονική συντεταγμένη που καταγράφεται από το ρολόι του (Ferraro, 2007). Τα συστήματα μελέτης από τους παρατηρητές χωρίζονται σε αδρανειακά αν είναι ακίνητα ή κινούνται με σταθερή ταχύτητα το ένα προς το άλλο και σε επιταχυνόμενα, αν το ένα από τα δυο κινείται με μεταβαλλόμενη ταχύτητα ή εκτελεί περιστρεφόμενη κίνηση (Χριστοδουλάκης & Κορφιιάτης, 2015). Έχει γίνει ήδη αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας για την αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου, σύμφωνα με την οποία σε αδρανειακά συστήματα αναφοράς ισχύουν οι νόμοι της Μηχανικής, παρά το ότι ο κινούμενος με σταθερή ταχύτητα παρατηρητής θα μετρήσει για ένα φυσικό γεγονός διαφορετικά το μήκος, την ταχύτητα και την τροχιά ενός αντικειμένου σε σχέση με έναν ακίνητο. Η διόρθωση γίνεται με ένα σύνολο μετασχηματισμών των εξισώσεων κίνησης που ονομάζονται μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου, έτσι ώστε οι νόμοι της Μηχανικής να παραμένουν αναλλοίωτοι στις δυο παραπάνω περιπτώσεις (Newburgh, 2007).

Έστω ότι δυο παρατηρητές, ένας ακίνητος και ένας κινούμενος ομαλά ως προς αυτόν βρίσκονται σε συστήματα συντεταγμένων και είναι εφοδιασμένοι με δυο ίδιες ράβδους μέτρησης της απόστασης και δυο συγχρονισμένα ρολόγια για την μέτρηση του χρόνου. (βλ. εικόνα 3.12) Για τον ακίνητο παρατηρητή ισχύει: Ο η αρχή των αξόνων,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  οι χωρικές συντεταγμένες μήκους, πλάτους και ύψους αντίστοιχα και  $t$  η ένδειξη του ρολογιού του. Από την άλλη για τον κινούμενο με σταθερή ταχύτητα παρατηρητή ισχύει: Ο' η αρχή των

αξόνων,  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  οι χωρικές συντεταγμένες και  $t'$  η ένδειξη του δικού του ρολογιού. Οι μετρήσεις των δυο παρατηρητών συνδέονται εάν μετασχηματιστούν από το ακίνητο σύστημα  $O(x, y, z)$  προς το κινούμενο σύστημα με σταθερή ταχύτητα  $v$   $O'(x', y', z')$  σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:  $x' = x - vt$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$  και  $t' = t$ , άρα για τις ταχύτητες ισχύει  $u' = u - v$  και για τις επιταχύνσεις  $a' = a$ . Σημειώνεται επίσης ότι το σύστημα  $O'$  κινείται μεταφορικά μόνο κατά την διεύθυνση  $x$  και  $u$ ,  $u'$  και  $a$ ,  $a'$  είναι οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις ενός υποτιθέμενου αντικειμένου στα δυο συστήματα, αντίστοιχα. Αντίστροφα οι μετασχηματισμοί από το  $O'$  στο  $O$  είναι:  $x = x' + vt'$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$  και  $t = t'$ , άρα για τις ταχύτητες ισχύει  $u = u' + v$  και για τις επιταχύνσεις  $a = a'$ .

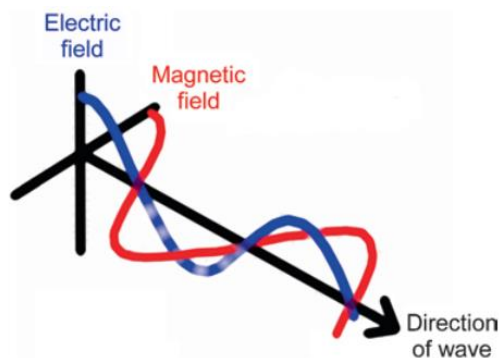


**Εικόνα 3.24** Μελέτη της κίνησης με καρτεσιανές συντεταγμένες σε ακίνητο σύστημα αναφοράς  $O$  και σε κινούμενο, με σταθερή ταχύτητα, σύστημα αναφοράς  $O'$  (Ferraro, 2007).

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι παρά το γεγονός ότι η θέση και ταχύτητα ενός αντικειμένου στα δυο συστήματα είναι σχετική, οι επιταχύνσεις είναι ίδιες και ο χρόνος απόλυτος, οπότε ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα ( $\Delta p / \Delta t = F = m \cdot a$ ) είναι αναλλοίωτος και στις δυο περιπτώσεις. Έτσι οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου είναι αυτοσυνεπείς ως προς τους νόμους της Μηχανικής (Ferraro, 2007; Newburgh, 2007; Pickover, 2016; Χριστοδουλάκης & Κορφιάτης, 2015).

Το 1865 ο Σκωτσέζος θεωρητικός φυσικός Τζέιμς Κλέρκ Μάξγουελ κατάφερε να ενοποιήσει τα οπτικά φαινόμενα με τα ηλεκτρικά και μαγνητικά σε μια ενιαία θεωρία, που περιγράφεται από τις τέσσερις διάσημες εξισώσεις του. Ο Μάξγουελ μέσα από πειράματα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο ταξιδεύει στον χώρο μέσω κυμάτων, με την ταχύτητα του φωτός (Pickover, 2016). Οι Φυσικοί που μελετούσαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ήρθαν αντιμέτωποι με ένα πρόβλημα, αφού οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου δεν ήταν αναλλοίωτοι για ένα κινούμενο παρατηρητή στις εξισώσεις Μάξγουελ λόγω των μεγάλων ταχυτήτων, που πλησίαζαν αυτές του φωτός. Ο Μάξγουελ για να ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα πίστευε στην ύπαρξη του αιθέρα, αφενός ως ένα μέσο διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και αφετέρου ως ένα απόλυτο σύστημα αναφοράς

για την συνέπεια των εξισώσεων του. Έτσι οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού δεν θα χρειαζόταν να υπάγονται στην αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου (Modinos, 2014).



*Εικόνα 3.25 Σχηματική αναπαράσταση της διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον χώρο. Με μπλε χρώμα φαίνεται η ηλεκτρική διαταραχή και με κόκκινο η μαγνητική διαταραχή (Grego & Mannion, 2010).*

Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω δεδομένα μαζί με το αρνητικό αποτέλεσμα του πειράματος των Μίκελσον και Μόρλεϊ, σκέφτηκε ότι ή το αναλλοίωτο των νόμων της Μηχανικής ως προς του Γαλιλαϊκούς μετασχηματισμούς συμβαίνει τυχαία ή είναι λανθασμένη η ηλεκτρομαγνητική θεωρία και πρέπει να προσαρμοστεί στους παραπάνω μετασχηματισμούς ή οι μετασχηματισμοί αυτοί είναι λανθασμένοι και πρέπει να βρεθούν άλλοι που να είναι συνεπείς και στην θεωρία του Νεύτωνα και σε αυτή του Μάξγουελ (Γραμματικοπούλου, 2006).

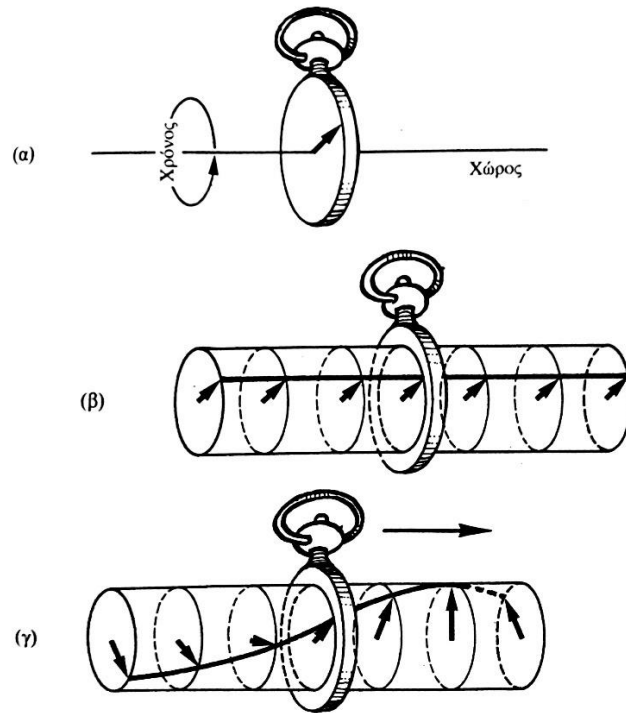
Το 1905 ο Αϊνστάιν βρήκε λύση διατυπώνοντας δυο αξιώματα που αποτελούν την γνωστή Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας (ΕΘΣ). Το πρώτο αξίωμα αναφέρει ότι η μορφή των νόμων της Φυσικής είναι ίδιοι σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς και το δεύτερο ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι το ανώτατο όριο ταχυτήτων στη Φύση και σταθερή για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές, ανεξάρτητα από την κίνηση της φωτεινής πηγής ή των παρατηρητών. Τα δυο αξιώματα αυτά περιέχουν δυο φαινομενικά αντιφατικές έννοιες, το αναλλοίωτο, δηλαδή την ακεραιότητα των φυσικών νόμων για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές και τη σχετικότητα, δηλαδή το γεγονός ότι διαφορετικοί παρατηρητές θα διαφωνήσουν στα αποτελέσματα των μετρήσεων τους. Όμως από τη σχετικότητα των μετρήσεων προκύπτουν νέες αναλλοίωτες ποσότητες, που δίνουν γενική ισχύ στους νόμους. Τα δυο αντιφατικά αξιώματα συμβιβάζονται πλήρως αν χρησιμοποιηθούν αντί για του Γαλιλαϊκούς, οι μετασχηματισμοί Λόρεντζ (Einstein, 2010; Hewitt P., 1997).

Αυτοί διατυπώθηκαν το 1904 από τον Ολλανδό φυσικό Χέντρικ Λόρεντζ προκειμένου να ερμηνευθεί το αποτέλεσμα του πειράματος των Μίκελσον-Μόρλεϊ. Η διαφορά με τους Γαλιλαϊκούς είναι ότι πέρα από την σχετικότητα θέσεων και ταχυτήτων ισχύει και η σχετικότητα του χρόνου. Έτσι στα συστήματα συντεταγμένων της εικόνας 53 ισχύει ότι οι

μετασχηματισμοί από το  $O$  στο  $O'$  είναι:  $x'=\gamma\cdot(x-v\cdot t)$ ,  $\psi'=\psi$ ,  $z'=z$  και  $t'=\gamma\cdot(t- v\cdot x/c^2)$ , άρα  $u'=u-v/1-u\cdot v/c^2$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $\gamma= 1/[1-(v/c^2)]^{1/2}$ , ο οποίος ονομάζεται συντελεστής Λόρεντζ. Αντίστοιχα οι μετασχηματισμοί από το  $O'$  στο  $O$  είναι:  $x=\gamma\cdot(x'+v\cdot t')$ ,  $\psi=\psi'$ ,  $z=z'$  και  $t=\gamma\cdot(t'+ v\cdot x'/c^2)$ , άρα  $u=u'+v/1+u'\cdot v/c^2$ . Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου δεν καταργούνται, απλά θεωρούνται υποπερίπτωση των μετασχηματισμών Λόρεντζ και παύουν να ισχύουν σε σχετικιστικές ταχύτητες αντικειμένων, δηλαδή σε αυτές που προσεγγίζουν την  $c$  (Pickover, 2016; Varvoglis, 2014).

Ο Αϊνστάιν με αυτή τη θεωρία δίνει νόημα στο πείραμα των Μίκελσον-Μόρλεϊ, συμπεριλαμβάνει σε αυτή τους νόμους του Μάξγουελ και συμπληρώνει ταυτόχρονα τους νόμους της κίνησης του Νεύτωνα, ώστε να ισχύουν και σε σχετικιστικές ταχύτητες σωμάτων. Επίσης ονομάζεται Ειδική θεωρία γιατί όλα τα παραπάνω ισχύουν μόνο σε αδρανειακά συστήματα αναφοράς και όχι σε επιταχυνόμενα, ενώ προκύπτουν και σημαντικές συνέπειες που αλλάζουν την κλασική θεώρηση κάποιων φυσικών εννοιών (Einstein , 2010).

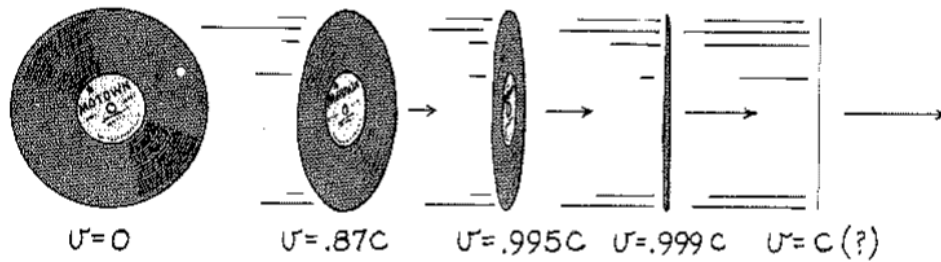
Μια πρώτη συνέπεια είναι ότι οι έννοιες του απόλυτου χώρου και του απόλυτου χρόνου πρέπει να εγκαταλειφθούν, αφού αντιφάσκουν ως προς την σταθερότητα της  $c$ . Συγχρόνως παύουν να νοούνται ως ανεξάρτητες οντότητες και ενοποιούνται στην έννοια του χωροχρόνου. Σύμφωνα με την ΕΘΣ ο χρόνος διαστélλεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα ενός αντικειμένου και θα γίνει άπειρος, δηλαδή θα ταυτίζεται με την αιωνιότητα, όταν αυτό φτάσει την ταχύτητα του φωτός (T.Cushing, 2003; Χριστοδουλάκης & Κορφιιάτης, 2015). Με άλλα λόγια ένα κινούμενο ρολόι προχωράει με πιο αργό ρυθμό κατά την ποσότητα  $\gamma$  του συντελεστή Λόρεντζ σε σχέση με ένα ακίνητο. Αυτή η διαστολή χρόνου λόγω κίνησης περιγράφεται από τη σχέση  $\Delta t'=\Delta t\cdot\gamma$ , όπου  $\Delta t'$  είναι ο σχετικός χρόνος και  $\Delta t$  ο χρόνος του κινούμενου παρατηρητή. Φυσικά ο κινούμενος παρατηρητής συμφωνεί και ότι ο χρόνος του ακίνητου διαστélλεται αλλιώς, εάν ίσχυε το αντίθετο, θα υπήρχε προτιμητέο σύστημα αναφοράς και δεν θα ίσχυαν τα βασικά αξιώματα της θεωρίας (Einstein , 2010).



**Εικόνα 3.26** Η διαστολή του χρόνου λόγω ταχύτητας. Στην πρώτη περίπτωση(α) φαίνεται ένα στάσιμο ρολόι που μετράει τον χρόνο σε μια συγκεκριμένη θέση του χώρου. Αν θεωρηθεί ότι αυτό το ρολόι επεκτείνεται στο χώρο(περίπτωση β), τότε μετρά τον χρόνο σε διαφορετικές θέσεις τους χώρου. Εφόσον είναι ακίνητο οι ενδείξεις του θα είναι ίδιες σε όλες τις διαφορετικές θέσεις του χώρου. Όμως στην τρίτη περίπτωση(γ) που κινείται προς τα δεξιά με μια ταχύτητα  $u$ , οι χρονικές ενδείξεις του είναι διαφορετικές στις διάφορες χωρικές θέσεις σε σχέση με την περίπτωση που ήταν ακίνητο. Η ΕΘΣ υποστηρίζει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα  $u$  ενός ρολογιού τόσο πιο αργά κυλάει ο χρόνος για το εκάστοτε ρολόι (Erstein, Εικόνες της Σχετικότητας: 1.Ειδική θεωρία, 1990).

Ακόμη το μήκος κατά τη διεύθυνση κίνησης ενός αντικειμένου μικραίνει κατά τον συντελεστή Λόρεντζ, σε σχέση με ένα ακίνητο, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του και θα γίνει μηδενικό, όταν αυτό φτάσει την ταχύτητα του φωτός. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως συστολή μήκους λόγω κίνησης ή συστολή Λόρεντζ και περιγράφεται από τη σχέση  $L = l_0/\gamma$ , όπου  $l_0$  το μήκος του αντικειμένου, όταν είναι ακίνητο και  $L$  η μέτρηση του μήκους από κινούμενο σύστημα παράλληλο στο μήκος αυτό. Προς αποφυγή παρανόησης στις περιπτώσεις συστολής μήκους και διαστολής χρόνου δεν αλλάζουν οι διαστάσεις ενός αντικειμένου ή τα ρολόγια αλλά οι μετρήσεις τους, λόγω παραμόρφωσης του χώρου και του χρόνου, που προκαλεί η κίνηση (Erstein, Εικόνες της Σχετικότητας: 1.Ειδική θεωρία, 1990; Χριστοδουλάκης & Κορφιάτης, 2015).



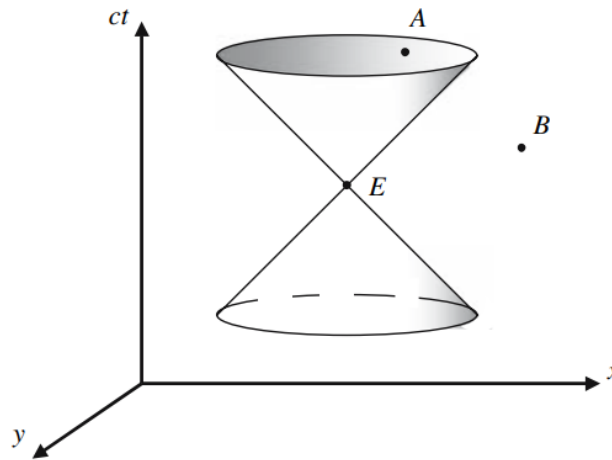


**Εικόνα 3.27** Η συστολή μήκους λόγω ταχύτητας. Στην εικόνα φαίνονται διαδοχικές περιπτώσεις ενός δίσκου αρχικά ακίνητου, που βαθμιαία αναπτύσσει ταχύτητα  $u$  προς τα δεξιά πλησιάζοντας την ταχύτητα του φωτός. Όταν είναι ακίνητος έχει το κανονικό μήκος του, καθώς όμως φτάνει σε ποσοστό κοντά στην ταχύτητα του φωτός τότε φαίνεται ότι το μήκος του μικραίνει προς την κατεύθυνση της κίνησης μόνο. Στην υποθετική περίπτωση που ο δίσκος φτάσει τη ταχύτητα του φωτός το μήκος του θα μηδενιστεί (Hewitt P., 1997).

Από την σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός προκύπτει και η σχετικότητα του ταυτόχρονου. Αυτό σημαίνει ότι ένα γεγονός που θεωρείται ταυτόχρονο για ένα ακίνητο παρατηρητή, δεν είναι ταυτόχρονο για ένα κινούμενο παρατηρητή. Επίσης στις καρτεσιανές συντεταγμένες πάνω στις οποίες μετριοούνται οι διαστάσεις ενός σώματος δεν έχει νόημα να μετρηθεί μόνο η επιφάνεια ή ο όγκος του αλλά και η χρονική διάρκεια ύπαρξής του, αφού αυτό είχε μια αρχή και ένα πιθανό τέλος, που θα τις τροποποιήσει. Υπό αυτή την έννοια δεν έχει νόημα η περιγραφή ενός γεγονότος στο Σύμπαν χωρίζοντας τον χώρο από τον χρόνο. Έτσι η ενοποίηση του χωροχρόνου είναι αναγκαία αλλά δημιουργεί πρόβλημα στις μετρήσεις. Αυτό λύθηκε χάρη στο αναλλοίωτο της ταχύτητας του φωτός, αφού ο χρόνος έγινε ισοδύναμος με τις άλλες διαστάσεις. Οι αποστάσεις μπορούν να μετρηθούν βάσει του χρόνου που κάνει το φως να τις διανύσει, χρησιμοποιώντας της σχέση  $d=c \cdot t$ , όπου  $d$ , η απόσταση και  $t$  ο χρόνος που κάνει το φως (Breton, 2011; Einstein, 2010).

Οι μετασχηματισμοί Λόρεντζ απαιτούν τέσσερις διαστάσεις για τον προσδιορισμό ενός γεγονότος, τρεις χωρικές και μια χρονική. Για λόγους απλοποίησης όμως χρησιμοποιούνται διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν χώρους δυο διαστάσεων εξελισσόμενους στον κάθετο άξονα του χρόνου. Με αυτό τον τρόπο ένα φωτεινό κύμα απλώνεται όσο περνά ο χρόνος προς όλες τις κατευθύνσεις σχηματίζοντας ένα κώνο, ο οποίος ονομάζεται κώνος φωτός. Εάν αγνοηθούν οι βαρυτικές επιδράσεις, για λόγους που θα εξηγηθούν αργότερα, για κάθε γεγονός στον χωροχρόνο κατασκευάζεται ένας κώνος φωτός, αντιπροσωπεύοντας το σύνολο των δυνατών διαδρομών για το φως και όλοι οι κώνοι έχουν την ίδια κατεύθυνση. Η κορυφή του κώνου συμπίπτει με την στιγμή εκπομπής του φωτεινού κύματος και αντιπροσωπεύει το παρόν. Ο κώνος που σχηματίζεται κάτω από την κορυφή αντιπροσωπεύει το παρελθόν και ο κώνος πάνω από αυτή, το μέλλον. Επίσης οι ταχύτητες πάνω στις επιφάνειες των κώνων είναι ίσες με αυτή του φωτός, στο εσωτερικό του μικρότερες και στις περιοχές εκτός κώνων μεγαλύτερες. Επειδή τίποτε δεν μπορεί να κινηθεί ταχύτερα από το φως, η

διαδρομή ενός αντικειμένου στο χωροχρόνο αναπαρίσταται από μια γραμμή εντός των κώνου φωτός (Ferraro, 2007; Hawking, 2000).

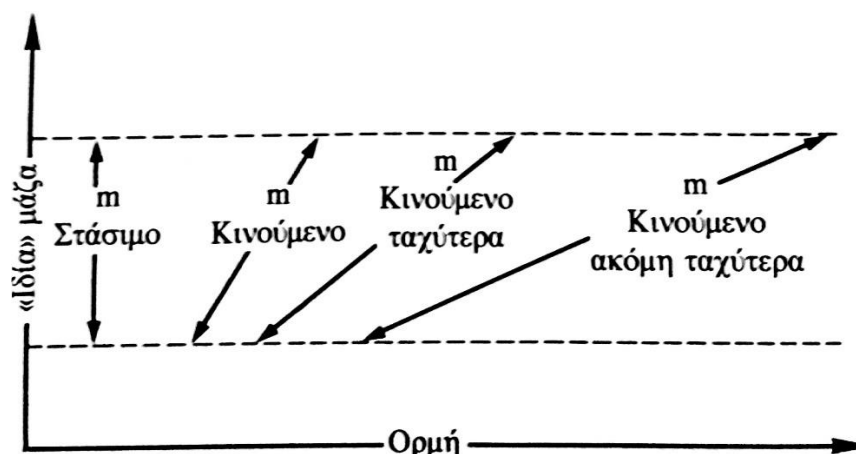


**Εικόνα 3.28** Χωροχρονικό διάγραμμα και κώνος φωτός. Εξαιτίας της σταθερότητας της ταχύτητας του φωτός( $c$ ) ο χρόνος γίνεται ισοδύναμος με τις άλλες χωρικές διαστάσεις, μέσω της ποσότητας  $c \cdot t$ . Η κατασκευή τετραδιάστατων χωροχρονικών διαγραμμάτων είναι εκτός αντίληψης της ανθρώπινης φυσιολογίας, οπότε για λόγους ευκολίας σχηματίζονται τρισδιάστατα χωρικά διαγράμματα, όπου παραλείπεται η διάσταση του ύψους στον κάθετο άξονα και στη θέση της μπαίνει η διάσταση του χρόνου. Το φως καθώς διαδίδεται σφαιρικά στον χώρο προς όλες τις κατευθύνσεις, σχηματίζει ένα κώνο φωτός στον χωροχρόνο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το γεγονός  $E$  αντιπροσωπεύει το παρόν και ο κώνος που σχηματίζεται αντίστοιχα κάτω και πάνω από αυτό ονομάζεται παρελθοντικός και μελλοντικός κώνος φωτός. Οτιδήποτε βρίσκεται εντός των δυο κώνων (όπως το σημείο  $A$ ) έχει ταχύτητες μικρότερες από αυτή του φωτός, ενώ το ίδιο το φως κινείται πάνω στις ημιευθείες με αρχή το  $E$ . Από την άλλη οτιδήποτε βρίσκεται εκτός κώνων φωτός (όπως το σημείο  $B$ ) έχει ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτή του φωτός και δεν γίνεται αντιληπτό ούτε από τις ανθρώπινες αισθήσεις, ούτε από τις μετρήσεις των διαφόρων οργάνων (Ferraro, 2007).

Τέλος, μια ακόμη συνέπεια της ΕΘΣ είναι η ενοποίηση δυο ακόμη ποσοτήτων που στην κλασική μηχανική θεωρούνταν ανεξάρτητες και αυτές δεν είναι άλλες από την μάζα και την ενέργεια. Η κλασική μηχανική υποστηρίζει ότι η δύναμη είναι ανάλογη με την αλλαγή ταχύτητας, ενώ για την ΕΘΣ όσο ένα σώμα πλησιάζει την  $c$ , τόσο πιο δύσκολο είναι να αυξηθεί αυτή περαιτέρω. Ένα σώμα ακίνητο έχει μάζα ηρεμίας αλλά όχι κινητική ενέργεια. Ένα σώμα αντιστέκεται περισσότερο στην κίνηση όχι μόνο λόγω της μάζας του αλλά και λόγω της κινητικής του ενέργειας ακόμη και αν πρόκειται για το ίδιο σώμα σε κίνηση. Αυτό σημαίνει ότι η κινητική ενέργεια έχει παρόμοια συμπεριφορά με την μάζα. Από αυτή την ισοδυναμία προέκυψε και ο γνωστός τύπος  $E=m \cdot c^2$ , όπου  $E$  η ενέργεια ενός σώματος σε ηρεμία,  $m$  η μάζα ηρεμίας ενός σώματος και  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Ο Αϊνστάιν συνειδητοποίησε ότι η ενέργεια που αποκτά ένα σώμα λόγω κίνησης προστίθεται στην μάζα του και γίνεται δυσκολότερο να αυξηθεί και άλλο η ταχύτητα του, ενώ τα φαινόμενα γίνονται σημαντικά όταν αυτό πλησιάσει την ταχύτητα του φωτός (Erstein, Εικόνες της Σχετικότητας:2.Γενική θεωρία, 1992; Okun, 1989).

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση ισοδυναμίας για την κίνηση άπειρης μάζας, χρειάζεται άπειρη ενέργεια, κάτι που απαγορεύεται και αυτός είναι ο λόγος που αντικείμενα με

εγγενή μάζα δεν μπορούν να φτάσουν την ταχύτητα του φωτός. Έτσι προκύπτει και ο τύπος της σχετικιστικής μάζας  $m=m_0\cdot\gamma$  και της σχετικιστικής ορμής  $p= m_0\cdot u\cdot\gamma$ , όπου  $m_0$  η μάζα ηρεμίας και  $\gamma$  ο συντελεστής Λόρεντζ. Από την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας προκύπτει ότι η σχετικιστική ολική ενέργεια  $E^2= (m_0\cdot c^2)^2+(p\cdot c)^2$ , πράγμα που σημαίνει ότι εάν η ορμή ενός σώματος είναι μηδέν, το σώμα έχει ενέργεια ηρεμίας  $m_0\cdot c^2$  ενώ αν η μάζα ενός σώματος είναι μηδέν, τότε έχει ενέργεια  $p\cdot c$ . Άρα, η ΕΘΣ επιτρέπει σε αντικείμενα χωρίς μάζα ηρεμίας, όπως φωτεινά ή άλλα κύματα να έχουν ορμή και να μπορούν να φτάσουν την  $c$  (Ferraro, 2007; Einstein , 2010; Lincoln, 2017).



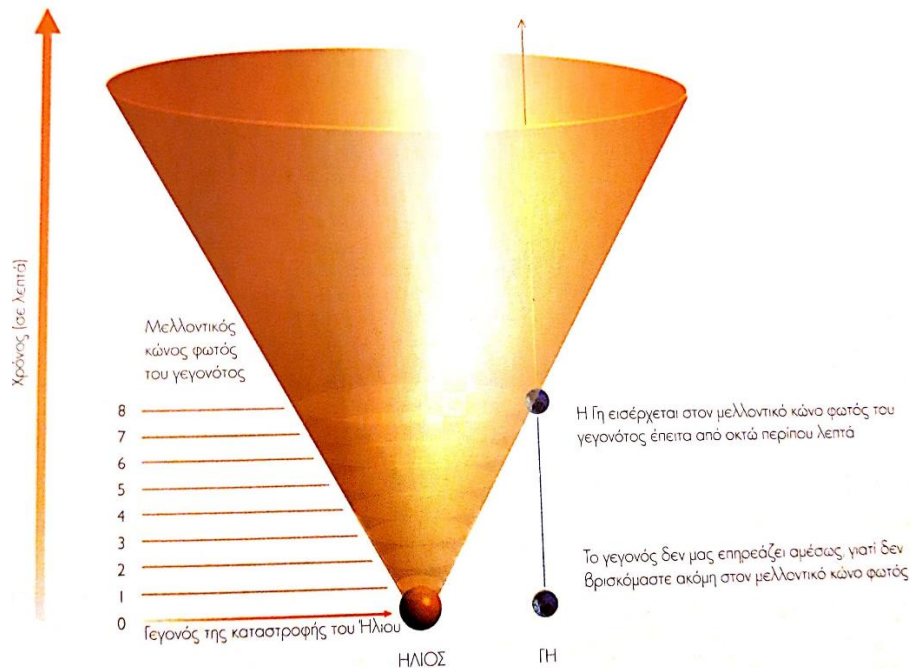
**Εικόνα 3.29** Διάγραμμα μάζας ηρεμίας και ορμής. Η μάζα ενός σώματος σε ακινησία ονομάζεται *ιδία μάζα* ή *αλλιώς μάζα ηρεμίας*. Καθώς όμως το σώμα αποκτά ολόένα και μεγαλύτερη ταχύτητα η μετρούμενη δυναμική μάζα, όπως ονομάζεται και η ορμή γίνεται μεγαλύτερη, όσο η ταχύτητα του σώματος πλησιάζει αυτή του φωτός. Στην περίπτωση που τη φτάσει, η δυναμική μάζα θα γίνει άπειρη (Eprstein, Εικόνες της Σχετικότητας:2.Γενική θεωρία, 1992).

### 3.3.3 Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν

Ο Αϊνστάιν με την ΕΘΣ ενοποίησε φυσικές ποσότητες, που στην κλασική μηχανική θεωρούνταν ανεξάρτητες και συγκεκριμένα τον χώρο με τον χρόνο σε αυτή του χωροχρόνου, την μάζα με την ενέργεια σε αυτή της υλοενέργειας. Επίσης με τους μετασχηματισμούς Λόρεντζ συμπεριέλαβε τους νόμους του Μάξγουελ και συμπλήρωσε τους νόμους της κίνησης του Νεύτωνα, ώστε να ισχύουν για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς και για σχετικιστικές ταχύτητες σωμάτων.

Στην συνέχεια προσπάθησε να κάνει μια άλλη γενίκευση, ώστε οι νόμοι της φύσης να ισχύουν και για τα επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς. Όμως εκεί συνάντησε πολλές δυσκολίες καθώς έπρεπε να λάβει υπόψιν του τη βαρύτητα και τον Νόμο Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα, κάτι το οποίο δεν απαιτούσε η ΕΘΣ. Μια κύρια δυσκολία ήταν η ακαριαία δράση της δύναμης της βαρύτητας από απόσταση. Σε ένα υποθετικό παράδειγμα όπου ο Ήλιος εξαφανιζόταν ξαφνικά, η Γη αυτόματα θα απελευθερωνόταν από την έλξη του και θα ακολουθούσε ευθύγραμμη πορεία εφαιπτόμενη της προηγούμενης τροχιάς, σύμφωνα με την

Νευτώνεια θεωρία. Η εξαφάνιση του Ήλιου από την άλλη θα γινόταν αντιληπτή στους μισούς κατοίκους της Γης σε περίπου 8 λεπτά, αφού τόσο χρόνο χρειάζεται το φως για να φτάσει από τον Ήλιο στη Γη. Το παράδοξο είναι ότι η πληροφορία της εξαφάνισης του Ήλιου μεταδίδεται πιο γρήγορα (ακαριαία δράση) μέσω της βαρύτητας πάρα μέσω του φωτός, κάτι που από την ΕΘΣ απαγορεύεται. Καμία κίνηση σώματος και καμία πληροφορία δεν μπορεί να διαδοθεί γρηγορότερα από την ταχύτητα του φωτός (Narlikar, 1999; Hawking, 2000).



**Εικόνα 3.30** Το υποθετικό γεγονός της καταστροφής του Ήλιου θα γίνει αντιληπτό από τους κατοίκους της Γης μετά από περίπου οκτώ λεπτά και όχι ακαριαία. Σύμφωνα με την ΕΘΣ αυτό θα συμβεί επειδή καμία πληροφορία δεν μπορεί να διαδοθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός. Έτσι το γεγονός θα γίνει αντιληπτό μόλις η Γη μπει στον μελλοντικό κώνο φωτός του (Hawking, 2000).

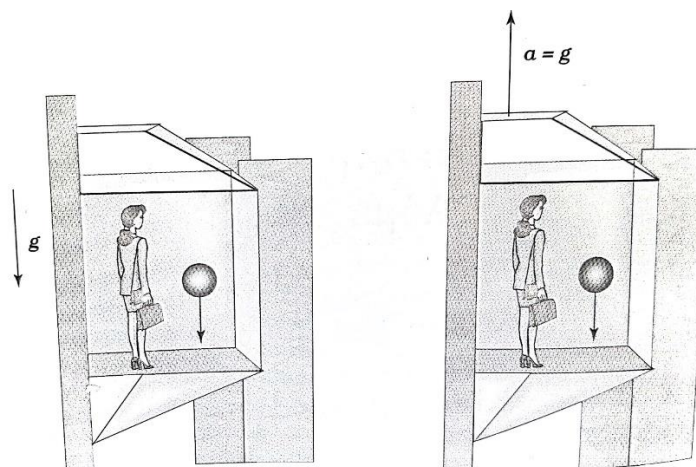
Μια άλλη δυσκολία συνάντησε στο ορισμό του αδρανειακού παρατηρητή. Σύμφωνα με την κλασική μηχανική είναι αυτός, που δεν του ασκείται καμία εξωτερική δύναμη. Αυτός όμως ο ορισμός δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες αφού η βαρύτητα είναι διάχυτη παντού. Ακόμη και να απελευθερωνόταν κάποιος από την έλξη της Γης, θα συναντούσε άλλη των ουράνιων σωμάτων ή του Ήλιου ή του γαλαξία κ.ο.κ. Επιπλέον σε περιπτώσεις που η επιβραδυντική δράση της τριβής είναι πολύ μικρή, δεν μπορεί κανείς να υποστηρίξει ότι δεν ασκούνται καθόλου δυνάμεις. Ο Αϊνστάιν διαπίστωσε ότι αυτά τα στοιχεία οδηγούσαν την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας σε πλήρη κατάρρευση και αναγκάστηκε να επανεξετάσει την βαρυτική θεωρία του Νεύτωνα αλλά και την φύση της ίδιας της βαρύτητας (Γραμματικοπούλου, 2006; Χριστοδουλάκης & Κορφιιάτης, 2015).

Τρία στοιχεία βοήθησαν τον Αϊνστάιν σε αυτό το έργο και αυτά είναι το πείραμα του Έτβες που είχε γίνει το 1890, η Αρχή του Έρνστ Μάχ και μια διαπίστωση του Μπέρναρντ Ρίμαν. Ο Ούγγρος φυσικός Ρόλαντ Έτβες στο πείραμα του χρησιμοποιώντας ζυγό στρέψης, μια συσκευή που περιστρέφεται με σκοπό την μέτρηση ασθενών δυνάμεων βαρύτητας μεταξύ μαζών στην επιφάνεια της Γης, απέδειξε ότι η αδρανειακή μάζα με την βαρυτική μάζα είναι ίσες με ακρίβεια  $1/10^8$ . Μάλιστα η συσκευή αυτή ήταν από τις καλύτερες της εποχής για την μέτρηση βαρυτικών πεδίων (Milsom, 2018; Pickover, 2016). Οι δυο εκφάνσεις της μάζας έχουν συζητηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και προκύπτουν από τους Νευτώνειους νόμους της κίνησης και της βαρύτητας. Παρά το ότι ο Νεύτωνας γνώριζε αυτή την ισότητα, δεν μπορούσε να την ερμηνεύσει θεωρώντας την ως απλή σύμπτωση. Ο Αϊνστάιν όμως, έχοντας ανήσυχο πνεύμα, είχε προβληματιστεί γι' αυτή την ισότητα καθώς αυτό σήμαινε κατ' επέκταση ότι οι δυνάμεις αδράνειας των επιταχυνόμενων συστημάτων έπρεπε να είναι ισοδύναμες με αυτών που δρουν στα βαρυτικά πεδία (Einstein , 2010).

Ο Αυστριακός Έρνστ Μαχ είχε δηλώσει προβληματισμένος για την μορφή των Νευτώνειων νόμων στα μη αδρανειακά συστήματα, επειδή η κατανομή ύλης στους απλανείς αστέρες καθορίζει τις αδρανειακές δυνάμεις στη Γη και άρα στην περίπτωση κενού Σύμπαντος δεν θα είχε νόημα η ύλη, η κίνηση και η αδράνεια (Anderson, 2017). Επιπροσθέτως ο Γερμανός Μαθηματικός Μπέρναρντ Ρίμαν, γνωστός για την ομώνυμη μελέτη μη ευκλείδειας Γεωμετρίας θετικής καμπυλότητας, υποστήριξε ότι η δομή του χώρου καθορίζεται από την ύλη και συνάμα η ύλη επηρεάζει την γεωμετρία του χώρου και κατά συνέπεια τα φυσικά φαινόμενα που εξελίσσονται σε αυτόν (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018).

Ο Αϊνστάιν συνθέτοντας όλα αυτά διατύπωσε το 1907 την Αρχή της ισοδυναμίας, η οποία αποτέλεσε βασικό αξίωμα της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας(ΓΘΣ), που δημοσιεύτηκε το 1915 (Pickover, 2016). Ένα νοητικό πείραμα θα βοηθήσει στην κατανόηση της πολύ σημαντικής Αρχής.(βλ. εικόνα 3.19) Στο αριστερό τμήμα της εικόνας φαίνεται ένας παρατηρητής σε ένα ανελκυστήρα σε κατάσταση ηρεμίας αλλά εντός ενός ομογενούς βαρυτικού πεδίου, δηλαδή τέτοιου, ώστε η ένταση του και η κατεύθυνση του να είναι ίδια. Αν ο παρατηρητής αφήσει μια μπάλα να πέσει στο πάτωμα, τότε αυτή θα έχει επιτάχυνση ίση με αυτή της ελεύθερης πτώσης λόγω βαρύτητας. Ο Γαλιλαίος έχει ήδη αποδείξει ότι διαφορετικές μάζες σε ομογενές πεδίο αποκτούν ίδια επιτάχυνση. Στο δεξί τμήμα της εικόνας ο ανελκυστήρας είναι τοποθετημένος στον χώρο χωρίς βαρύτητα και επιταχύνεται προς τα πάνω με τιμή ίδια με την επιτάχυνση της βαρύτητας. Σε αυτή την περίπτωση πάλι η μπάλα θα πέσει με τον ίδιο τρόπο, ενώ αν ήταν ακίνητος ο ανελκυστήρας, απλά θα αιωρούνταν λόγω συνθηκών έλλειψης βαρύτητας. Η μεγαλοφυής διαπίστωση του Αϊνστάιν έγκειται στο

ότι αν οι δυο ανελκυστήρες δεν έχουν παράθυρα, τότε δεν υπάρχει κανένα πείραμα, που να αποδεικνύει, μέσω της κινηματικής τους κατάσταση, εάν βρίσκονται σε ένα ομογενές βαρυτικό πεδίο ή σε ένα ομαλά επιταχυνόμενο σύστημα στον κενό χώρο (T.Cushing, 2003).



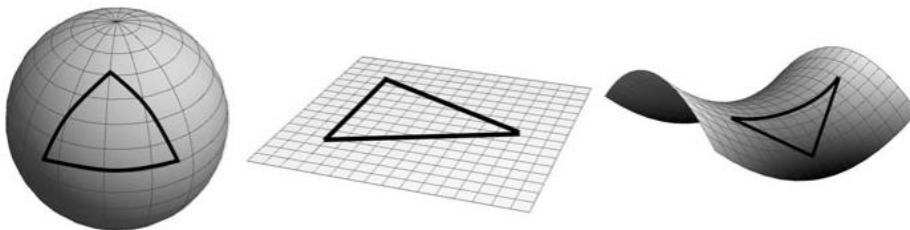
Εικόνα 3.31 Η Αρχή της ισοδυναμίας αδρανειακών και μη αδρανειακών συστημάτων αναφοράς (T.Cushing, 2003).

Η Αρχή της ισοδυναμίας πάνω στην οποία στηρίχθηκε η ΓΘΣ αναφέρει ότι σε μια μικρή περιοχή του χωροχρόνου είναι αδύνατον να γίνει διάκριση ενός συστήματος σε ηρεμία και ενός επιταχυνόμενου συστήματος εν απουσία βαρύτητας. Άλλη διατύπωση είναι ότι ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς χωρίς βαρύτητα είναι ισοδύναμο με ένα σύστημα που εκτελεί ελεύθερη πτώση σε ομογενές βαρυτικό πεδίο. Αυτό επίσης σημαίνει ότι τα βαρυτικά φαινόμενα είναι ισοδύναμα με τα φαινόμενα που οφείλονται σε επιταχύνσεις, άρα δεν μπορεί να βρεθεί απόλυτο αδρανειακό σύστημα (Egdall, 2009).

Ο Αϊνστάιν χρησιμοποίησε την Αρχή της ισοδυναμίας μαζί με τα φαινόμενα διαστολής χρόνου και συστολής Λόρνεντζ της ΕΘΣ και συμπέρανε ότι οι ιδιότητες του χώρου και του χρόνου εξαρτώνται από το δυναμικό βαρύτητας. Επί της ουσίας βλέποντας ότι η βαρύτητα είναι πανταχού παρούσα, προσπάθησε ιδιοφυώς να τη συνδέσει με μια άλλη οντότητα που έχει την ίδια ιδιότητα, τον χωροχρόνο και με συνδετικό κρίκο την Γεωμετρία (Kersting & Steier, 2018). Στα Μαθηματικά η έννοια του χώρου οποιονδήποτε διαστάσεων είναι αφηρημένη και δεν έχει σχέση με τον υλικό κόσμο. Οι μαθηματικές μορφές τριών διαστάσεων εκφράζονται μέσα από μαθηματικές σχέσεις, χωρίς γραφικό αντίστοιχο. Από την άλλη οι φυσικοί μελετούν μορφές, που έχουν την ιδιότητα της ύλης. Έτσι σχετικά με τις δυο Επιστήμες, στα μεν Μαθηματικά βασική έννοια είναι ο χώρος με πρωταρχική ιδιότητα την καμπυλότητα και στη δε Φυσική βασική έννοια είναι η ύλη με πρωταρχικές ιδιότητες την μάζα, το βάρος και την πυκνότητα. Ο Αϊνστάιν ένωσε αυτούς τους δυο κόσμους συνειδητοποιώντας ότι η καμπυλότητα είναι ισοδύναμη με την πυκνότητα υλοενέργειας.

Κάθε διάσταση του χώρου καμπυλώνεται ως προς τις υπόλοιπες με οποιοδήποτε γωνία, αλλά επιλέγεται η καθετότητα, για να διευκολύνει τους υπολογισμούς μέσω της τριγωνομετρίας. Επίσης βασική τους ιδιότητα είναι ότι ταυτίζονται με τους βαθμούς ελευθερίας των μαθηματικών σημείων εντός τους και ότι είναι όλες ομοειδείς και ισοδύναμες, πράγμα που σημαίνει πως έχουν την ίδια μονάδα μέτρησης. Με αυτό τον τρόπο η Γεωμετρία μπορεί να περιγράψει τις ιδιότητες ενός χώρου ανεξάρτητα του αριθμού των διαστάσεων του (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018). Αυτόν το ρόλο διαδραμάτιζε στην κλασική μηχανική η Ευκλείδεια Γεωμετρία, που περιγράφει επίπεδους χώρους τριών διαστάσεων, όπως δηλαδή τους αντιλαμβάνεται και η ανθρώπινη φυσιολογία. Σε αυτή την Γεωμετρία ισχύει ότι δυο παράλληλες αν επεκταθούν, δεν συναντώνται ποτέ, διατηρώντας σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους και το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου είναι ακριβώς  $180^{\circ}$ . Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει αναφερθεί ότι τα αξιώματα του Ευκλείδη στα οποία στηρίζεται η Γεωμετρία δεν μπορούν να αποδειχθούν, οπότε με αυτή την έννοια μπορούν να επινοηθούν και άλλες Γεωμετρίες που να είναι λογικά αυτοσυνεπείς.

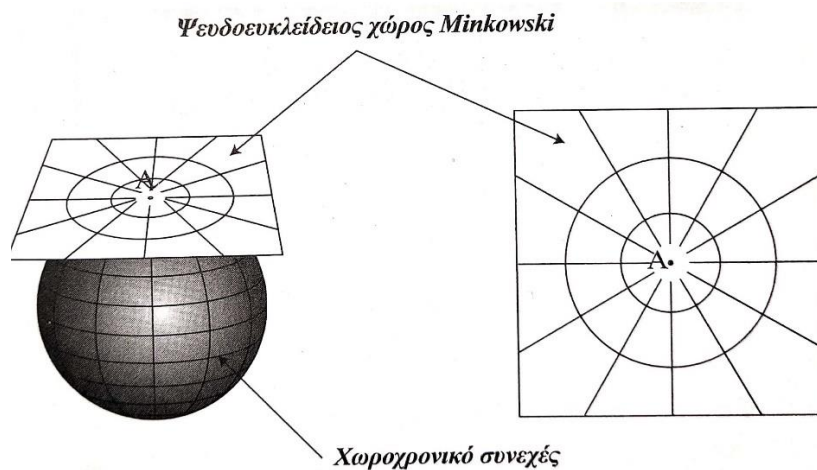
Ο Ρώσος μαθηματικός Λομπατσέφσκι συνέβαλε καθοριστικά στην γέννηση της υπερβολικής γεωμετρίας, όπου δυο παράλληλες εάν επεκταθούν, δεν συναντώνται αλλά αποκλίνουν, ώστε οι μεταξύ τους αποστάσεις να είναι άνισες και κατά συνέπεια το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου να είναι μικρότερο από  $180^{\circ}$ . Από την άλλη ο Γερμανός Μαθηματικός Ρίμαν μελέτησε την σφαιρική γεωμετρία, όπου δυο παράλληλες συγκλίνουν άρα το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου είναι μεγαλύτερο από  $180^{\circ}$ . Στις δυο αυτές γεωμετρίες οι ευθείες ορίζονται διαφορετικά από την επίπεδη Ευκλείδεια γεωμετρία, αφού οι χώροι είναι καμπύλοι (Ferraro, 2007).



**Εικόνα 3.32** Τρία είδη Γεωμετρίας του χωροχρόνου. Κατά σειρά απεικονίζονται από αριστερά προς τα δεξιά η σφαιρική, η επίπεδη και η υπερβολική Γεωμετρία. Στη σφαιρική Γεωμετρία, που χαρακτηρίζεται από θετική καμπυλότητα, το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου είναι μεγαλύτερο από  $180^{\circ}$ . Στην επίπεδη Γεωμετρία, που χαρακτηρίζεται από μηδενική καμπυλότητα, το αντίστοιχο άθροισμα είναι ακριβώς  $180^{\circ}$ , ενώ στην υπερβολική Γεωμετρία, που χαρακτηρίζεται από αρνητική καμπυλότητα, είναι μικρότερο από  $180^{\circ}$  (Valtonen, Anosova, Kholshchikov, Mylläri, & Orlov, 2016).

Η πραγματική γεωμετρία του Σύμπαντος υπόκειται στην τετραδιάστατη γεωμετρία, όπως περιγράφεται από τον Ρίμαν. Ο χώρος αυτής της γεωμετρίας είναι το χωροχρονικό

συνεχές, το οποίο αν διαιρεθεί σε κομμάτια χώρου και χρόνου, αυτά δεν παρουσιάζουν καμία από τις ιδιότητες του συνεχούς. Αυτό σημαίνει ότι ο Ριμάνειος χώρος είναι καθαρά αφηρημένη έννοια και δεν μπορεί να γίνει αντιληπτός από τον τρισδιάστατο περιορισμό των ανθρώπινων αισθήσεων, άρα δεν μπορεί να μελετηθεί και με επιστημονικά όργανα. Αυτή η δυσκολία τερματίζει οποιαδήποτε μελέτη της Συμπαντικής δομής και περιορίζει τη Φυσική στην μελέτη των γήινων κινήσεων (Ferraro, 2007). Ωστόσο ένα άλλος Γερμανός μαθηματικός ο Χέρμαν Μινκόφσκι διαπίστωσε ότι ο τετραδιάστατος Ριμάνειος χώρος έχει μια σημαντική, αλλά παράξενη ιδιότητα. Εάν αποκοπεί τοπικά ένα πολύ μικρό κομμάτι αυτού του χώρου ή αλλιώς αν φέρουμε ένα εφαπτομενικό τρισδιάστατο χώρο με περιορισμένη έκταση γύρω από το σημείο επαφής του τετραδιάστατου χώρου, τότε τα γεγονότα του χωροχρόνου προβάλλονται σε αυτόν ως εικόνες και λειτουργεί προσεγγιστικά ως Ευκλείδειος χώρος. Το παραπάνω αναλογεί με την τομή ενός τόξου κύκλου πολύ μεγάλης ακτίνας. Εάν αποκοπεί ένα πολύ μικρό κομμάτι της περιφέρειας του, τότε αυτό προσεγγιστικά θεωρείται ευθύγραμμο (Kuehn, 2015).



**Εικόνα 3.33** Η προβολή του τετραδιάστατου χωροχρονικού συνεχούς της Ριμάνειας Γεωμετρίας στον ψευτοευκλείδειο χώρο Μινκόφσκι (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018).

Ο αποκομμένος λοιπόν αυτός χώρος ονομάζεται ψευτοευκλείδειος χώρος Μινκόφσκι και διαθέτει το πλεονέκτημα του διαχωρισμού χώρου και χρόνου, ώστε να μελετηθεί χωριστά το καθένα (Vecchiato, 2017). Ταυτόχρονα αποτελεί και τον αισθητό από την ανθρώπινη φυσιολογία χώρο, ως καθρέφτισμα του πραγματικού και μη αισθητού Σύμπαντος. Ο χώρος Μινκόφσκι χρησιμοποιείται στην Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας καθώς γεωμετριοποιεί τον χρόνο και χάρη στην σταθερότητα της  $c$ , γίνεται ομότιμος με την απόσταση λόγω του γινομένου  $c \cdot t$  ή αντίστροφα, η απόσταση μπορεί να μετρηθεί ως χρόνος λόγω του πηλίκου  $x/c$ . Μάλιστα η χρήση διαγραμμάτων δυο χωρικών διαστάσεων, μιας χρονικής και των κώνων φωτός που περιλαμβάνουν τους μετασχηματισμούς Λόρεντζ, λειτουργεί άψογα

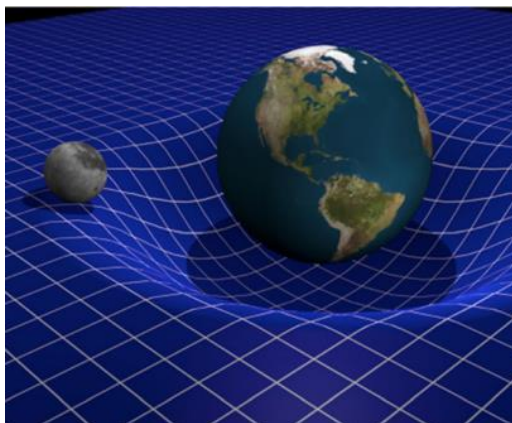


για την μελέτη σχετικιστικών κινήσεων (Semon, Malin, & Wortel, 2009). Επίσης το πόσο μικρός πρέπει να είναι ο αποκομμένος χώρος γύρω από τον παρατηρητή για να είναι ευκλείδειος, καθορίζεται από την ταχύτητα. Με άλλα λόγια οι λόγοι των διαστάσεων  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  προς την τέταρτη  $dt$  πρέπει να είναι μικρότεροι ή ίσοι με την τιμή 300.000. Η ταχύτητα είναι μέτρο της καμπυλότητας του χώρου και άρα κριτήριο απόκλισης από την ευκλείδεια γεωμετρία (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018).

Η ΕΘΣ όμως ισχύει μόνο αν αγνοηθούν οι βαρυτικές επιδράσεις και μάλιστα ο χώρος Μινκόφσκι πάνω στον οποίο μελετάται είναι αναλλοίωτος, μόνο αν οι προβολές του τετραδιάστατου χώρου και σε αυτόν έχουν σταθερή καμπυλότητα. Όταν ο Αϊνστάιν συνειδητοποίησε, όπως προαναφέρθηκε, ότι η πυκνότητα υλοενέργειας, δηλαδή αυτό που παρουσιάζεται ως μάζα, είναι ταυτόσημη με την καμπυλότητα τότε και η βαρύτητα ως ιδιότητα του πυκνώματος, είναι ιδιότητα της καμπυλότητας του χώρου. Τότε προκύπτει ότι οποιαδήποτε μορφή ενέργειας, είτε κινητική(ταχύτητα) είτε η ενέργεια ηρεμίας(μάζα) καμπυλώνει τον χωροχρόνο. Αυτό σημαίνει ότι ο πραγματικός χώρος είναι πολυκαμπυλωμένος και αποτελεί μια επιφάνεια που κατά τόπους είναι επίπεδη και κατά τόπους καμπυλώνεται προς την τέταρτη διάσταση, σχηματίζοντας ένα πηγάδι, το βάθος του οποίου, είναι διαφορετικό για κάθε καμπύλωση σε κάθε περιοχή. Από αυτό συνεπάγεται ότι η γεωμετρία της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, είναι η γεωμετρία Ρίμαν (Einstein , 2010).

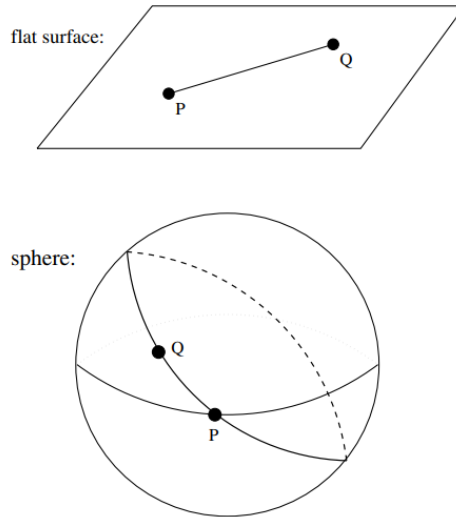
Η ΓΘΣ είναι μια θεωρία για την βαρύτητα που περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιοχών διαφορετικής καμπυλότητας, ως ιδιοτήτων του χώρου του αισθητού Σύμπαντος. Κατ' αυτόν τον τρόπο η ύλη είναι ένα είδος τοπικής ιδιομορφίας του χώρου. Η ροή του χρόνου επίσης, μεταβάλλεται ανάλογα με την κυρτότητα της περιοχής, άρα και με την κατανομή της μάζας. Η αυξομείωση της καμπυλότητας των τριών διαστάσεων προς της τέταρτη εκφράζεται στην Φυσική ως μεταβολή της πυκνότητας υλοενέργειας σε μια περιοχή. Αυτές οι μεταβολές δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα από τους ανθρώπους αλλά με ένα ισοδύναμο και παραγόμενο από αυτές μέγεθος, την διάρκεια ανάπτυξης και φθοράς της πυκνότητας υλοενέργειας, ή με άλλα λόγια τον κύκλο της ζωής. Ο άνθρωπος μέσα από επινοήσεις σταθερών μονάδων μέτρησης, όπως το ημερονύκτιο βάσει της περιστροφής της Γης και το έτος βάσει της περιφοράς της γύρω από τον Ήλιο, δεν μετρά την τέταρτη διάσταση και τις μεταβολές της, αλλά το παραγόμενο μέγεθος της διάρκειας ζωής ενός υλικού γεγονός. Εναλλακτικά και ισοδύναμα μετρά την τοπική καμπυλότητα του χώρου, όταν αυτή είναι μέσα σε τιμές εντός ορίων αντίληψης από την φυσιολογία του (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018).

Η επαναστατική ιδέα του Αϊνστάιν στο νέο τρόπο θεώρησης της βαρύτητας είναι ότι πλέον δεν αποτελεί μια αφηρημένη δύναμη που έλκει τις μάζες, αλλά συνέπεια του γεγονότος ότι ο χωροχρόνος δεν είναι επίπεδος, άλλα στρεβλωμένος από την ύπαρξη μάζας και ενέργειας σε αυτόν. Σε αυτό το καμπυλωμένο χωροχρόνο της ριμάνειας γεωμετρίας δεν υπάρχει η έννοια της ευθείας όπως πηγάζει από την Ευκλείδεια γεωμετρία, δηλαδή ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο σημείων. Συνεπώς στους καμπύλους χώρους η ευθεία ορίζεται ως ένα τμήμα μέγιστου κύκλου ή αλλιώς η διαδρομή μέγιστου κανονικού χρόνου γι' αυτό και ονομάζεται χρονοειδής γεωδαισιακή. Το όνομα της συνδέεται με τις μετρήσεις στην σφαιρική επιφάνεια της Γης, όπου οι ευθείες είναι τόξα μέγιστων κύκλων, που τα επίπεδα τους διέρχονται από το κέντρο της και αυτοί είναι ο Ισημερινός και οι μεσημβρινοί (Gould, 2016; Pfister & King, 2015).



**Εικόνα 3.34** Μοντέλο αναπαράστασης της καμπύλωσης του χωροχρόνου που προκαλεί η Γη λόγω της μάζας της. Στη ΓΘΣ η βαρύτητα είναι η ίδια η παραμόρφωση του χωροχρόνου που αναγκάζει τη Σελήνη να περιφέρεται γύρω από αυτή. Η Σελήνη αντίστοιχα προκαλεί λόγω της μικρότερης μάζας της μια αντίστοιχα μικρότερη καμπύλωση στο χωροχρόνο γύρω της (δεν φαίνεται στην εικόνα), που ερμηνεύει τη δική της βαρυτική έλξη. Σημειώνεται τέλος, ότι αυτό το μοντέλο αναπαράστασης προορίζεται μόνο για εκπαιδευτικούς σκοπούς, καθώς η καμπύλωση του χωροχρόνου είναι μη ορατή από την φυσιολογία των ανθρώπων. Στην πραγματικότητα είναι αυτό που ερμηνεύεται ως βαρύτητα (Kersting & Steier, 2018).

Έτσι τα ουράνια σώματα δεν κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές λόγω αδρανειακών ή βαρυτικών κεντρικών δυνάμεων αλλά ακολουθούν τις ευθείες διαδρομές του χωροχρόνου, που είναι οι γεωδαισιακές. Στον τρισδιάστατο χώρο φαίνονται καμπύλες ενώ οι ευκλείδειες ευθείες στερούνται φυσική σημασίας, αφού η απουσία βαρύτητας είναι αδύνατο σενάριο. Επίσης η καμπύλωση του χωροχρόνου προκαλεί την επιταχυνόμενη κίνηση των σωμάτων όπως στον 2ο νόμο του Νεύτωνα και υπό αυτή την έννοια τα αντικείμενα που ακολουθούν τις γεωδαισιακές, εκτελούν ελεύθερη πτώση και δεν εξαρτώνται από τη μάζα τους. Στην περίπτωση των πλανητών το μέγεθος της κυρτότητας του χωροχρόνου μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τον Ήλιο και έτσι εξηγούνται και οι λιγότερο έκκεντρες τροχιές τους που παρατηρούνται, όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν (Gould, 2016).



**Εικόνα 3.35** Ο ορισμός της ευθείας σε επίπεδη και σφαιρική Γεωμετρία. Στην πρώτη περίπτωση είναι η συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων  $P$  και  $Q$ , ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο μέγιστος κύκλος μεταξύ των ίδιων σημείων. Οι μέγιστοι κύκλοι ονομάζονται γεωδαισιακές και είναι οι 'ευθείες' διαδρομές του τετραδιάστατου χωροχρόνου που ακολουθούν τα αντικείμενα δεχόμενα την βαρυτική έλξη μιας μάζας (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009).

Η ΓΘΣ γεωμετροποίησε και το φαινόμενο της βαρύτητας καθώς η δομή ή το σχήμα του χώρου επηρεάζει την κίνηση των σωμάτων εντός αυτού και αντίστροφα ο χώρος επηρεάζεται από την κατανομή ύλης και ενέργειας που βρίσκονται μέσα σε αυτόν (Breton, 2011). Η μέθοδος προσδιορισμού κάθε ποσοτικής λεπτομέρειας της μη ευκλείδειας γεωμετρίας γύρω από οποιαδήποτε μάζα, δίνεται από τις πεδιακές εξισώσεις του Αϊνστάιν. Οι διαφορικές αυτές εξισώσεις είναι κομψά και περιεκτικά διατυπωμένες δείχνοντας πως η κατανομή υλοενέργειας σχετίζεται με την γεωμετρία του χωροχρόνου, αλλά στην λύση τους είναι εξαιρετικά περίπλοκες. Η ΓΘΣ πέρα από την Αρχή της ισοδυναμίας έθεσε και την Αρχή του συναλλοίωτου, που ορίζει ότι οι νόμοι της Φυσικής πρέπει να εκφράζονται μέσα από εξισώσεις με τανυστική μορφή, ώστε να ισχύουν για κάθε σύστημα συντεταγμένων και παρατηρητών, εξού και ο όρος Γενική Σχετικότητα (Einstein , 2010). Οι τανυστές είναι μαθηματικά εργαλεία που αντιπροσωπεύουν σύνολα συναρτήσεων, στα οποία όταν οι συντεταγμένες μετασχηματίζονται, οι εξισώσεις δεν αλλάζουν μορφή. Μπορεί να ειπωθεί ότι έχουν την ίδια σημασία με τα διανύσματα στην Νευτώνεια θεωρία και αποτελούν γενικεύσεις τους, ώστε να μην εξαρτώνται από τις αλλαγές συντεταγμένων των συστημάτων αναφοράς (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009).

Σε αυτό το σημείο θα παρατεθεί η γενική μορφή των πεδιακών εξισώσεων και θα εξηγηθούν οι όροι τους, χωρίς να γίνει εμβάθυνση στο μαθηματικό σκέλος, καθώς δεν συνάδει, λόγω πολυπλοκότητας με το ύφος και τους σκοπούς της συγκεκριμένης εργασίας. Ο μαθηματικός φορμαλισμός των εξισώσεων σε συμπυκνωμένη μορφή είναι ο εξής:  $G_{\mu\nu} = \frac{8 \cdot \pi \cdot G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$ , όπου  $G_{\mu\nu}$  είναι ο τανυστής Αϊνστάιν,  $\pi$  η σταθερά του Αρχιμήδη,  $G$  η σταθερά

παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα,  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $T_{\mu\nu}$  ο τανυστής ενέργειας-ορμής. Ο τανυστής Αϊνστάιν ισούται με  $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \cdot R \cdot g_{\mu\nu}$ , οπότε η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \cdot R \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8 \cdot \pi \cdot G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$ , όπου  $R_{\mu\nu}$  είναι ο τανυστής Ρίμαν ή ο συμμετρικός του τανυστής Ρίτσι. Ακόμη το  $g_{\mu\nu}$  είναι ο μετρικός τανυστής και  $R$  η βαθμωτή καμπυλότητα (Pfister & King, 2015). Εδώ πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι δείκτες  $\mu$  και  $\nu$  αντιπροσωπεύουν τις διαστάσεις του χωροχρόνου παίρνοντας τιμές 0 για τον χρόνο και 1,2,3 για τις χωρικές διαστάσεις. Αυτό αυτόματα σημαίνει ότι όταν αναλύονται οι τανυστές σε πίνακες, προκύπτουν 16 εξισώσεις, από τις οποίες αφαιρούνται οι δέκα καθώς οι έξι είναι ταυτόσημες.

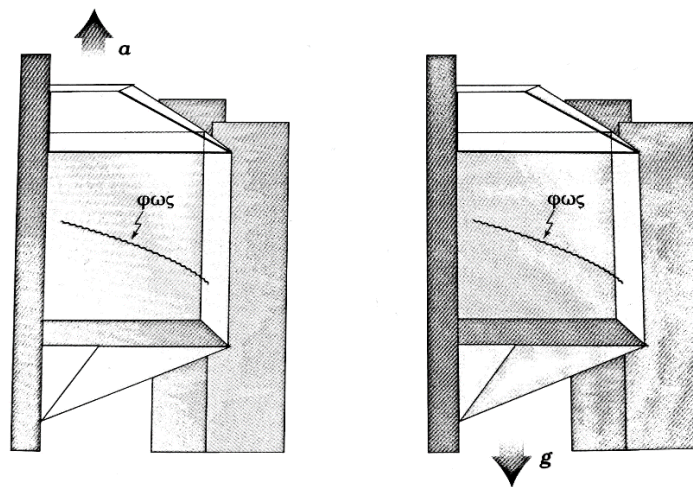
Το αριστερό μέλος της εξίσωσης περιγράφει την γεωμετρία του χωροχρόνου πάνω στον οποίο γίνεται η κίνηση των αντικειμένων υπό την επήρεια μόνο βαρυτικών επιδράσεων, ακολουθώντας τις γεωδαισιακές. Ο τανυστής Ρίμαν ή Ρίτσι ( $R_{\mu\nu}$ ) εκφράζει το μέτρο της καμπυλότητας του χωροχρόνου και έχει την φυσική σημασία της σχετικής επιτάχυνσης μεταξύ δυο σημείων σε ελεύθερη πτώση υπό την επιρροή βαρυτικού πεδίου. Μάλιστα όταν οι συνιστώσες του τανυστή αυτού είναι μηδέν, τότε ο χωροχρόνος είναι επίπεδος και περιγράφεται από την ψευτοευκλείδειο χώρο Μινκόφσκι της ΕΘΣ. Το βαθμωτό καμπυλότητας ( $R$ ) δεν είναι τανυστής, αφού δεν έχει χωροχρονικούς δείκτες και παίρνει μόνο αριθμητικές τιμές, εξαρτώμενο από τον τανυστή Ρίτσι. Στην περίπτωση που η τιμή του είναι ίση με την μονάδα, ο χώρος είναι ευκλείδειος ενώ αν η τιμή του είναι διάφορη του μηδενός, ο χώρος είναι καμπυλωμένος. Ο μετρικός τανυστής ( $g_{\mu\nu}$ ) είναι ένα μαθηματικό εργαλείο μέτρησης αποστάσεων στις διατάσεις του χωροχρόνου και αποτελεί διορθωτικό παράγοντα των τιμών, ώστε να ισχύει το πυθαγόρειο θεώρημα και σε καμπύλες επιφάνειες ενώ παράλληλα η φυσική του σημασία είναι ότι περιγράφει το βαρυτικό δυναμικό (Breton, 2011; Egdall, 2009; Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009).

Στο δεξί μέλος της εξίσωσης φαίνεται ότι η παρουσία ύλης και ενέργειας ευθύνεται για την καμπυλότητα του χωροχρόνου, αποτελώντας γενέτειρα της βαρύτητας. Επίσης η ποσότητα  $8 \cdot \pi \cdot G/c^4$  ονομάζεται και σταθερά  $K$ , στην οποία ο παράγοντας  $c^4$  προστέθηκε, ενώ δεν υπήρχε αρχικά, για την κανονικοποίηση των μονάδων μέτρησης. Ο Τανυστής ενέργειας-ορμής ( $T_{\mu\nu}$ ) ενσωματώνει όλες τις μορφές ενέργειας, περιέχοντας συνιστώσες ενέργειας ηρεμίας στην διάσταση του χρόνου και ορμής σε αυτή αλλά και στις χωρικές διαστάσεις με φυσική ερμηνεία ροής της ενέργειας, πυκνότητας της ορμής και πίεσης ροής της ορμής (Breton, 2011; Pfister & King, 2015).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η ΓΘΣ και οι πεδιακές εξισώσεις του Αϊνστάιν εμπεριέχουν και την Αρχή της Αντιστοιχίας. Αυτό σημαίνει ότι για ασθενή βαρυτικά και για κινήσεις αντικειμένων σε μικρές ταχύτητες σε σχέση με αυτή του φωτός, ισχύει η Νευτώνεια θεωρία ως υποπερίπτωση της ΓΘΣ και οι εξισώσεις πεδίου ανάγονται αποδεδειγμένα στην εξίσωση του Νόμου της Παγκόσμιας Έλξης. Αυτό επίσης συνεπάγεται ότι αν εξαιρεθούν οι δυο παραπάνω περιπτώσεις, ο χωροχρόνος τοπικά θεωρείται επίπεδος (Carozziello & De Laurentis, 2011).

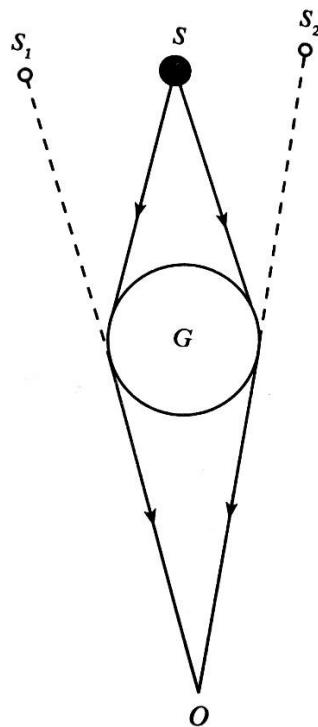
### 3.3.4 Συνέπειες της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας και η επιβεβαίωση της μέσα από τις προβλέψεις της.

Μια πρώτη συνέπεια της ΓΘΣ είναι η καμπύλωση που υφίστανται οι ακτίνες φωτός, όταν αυτές διέρχονται από ένα ισχυρό βαρυτικό πεδίο. Η Κλασική Φυσική και ο νόμος της βαρύτητας του Νεύτωνα δεν περιλαμβάνει το φως, καθώς λόγω της κυματικής του φύσης δεν έχει μάζα, συνεπώς δεν επηρεάζεται από τις βαρυτικές δυνάμεις έλξης και άρα διαδίδεται ευθύγραμμα (Hewitt P. , 1997). Η θεωρία όμως του Αϊνστάιν καταρρίπτει αυτή την παγιωμένη θεώρηση και την εξηγεί. Στην εικόνα 3.19 του νοητικού πειράματος της Αρχής της Ισοδυναμίας και συγκεκριμένα για έναν παρατηρητή εντός του ανελκυστήρα μια ακτίνα φωτός που εισέρχεται από μια οπή θα ακολουθούσε καμπύλη τροχιά. Αυτό είναι απολύτως λογικό, αφού πρόκειται για ένα επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς με φορά προς τα πάνω, χωρίς βαρυτικό πεδίο. Ένας εξωτερικός παρατηρητής ωστόσο θα έβλεπε την ακτίνα φωτός να ακολουθεί ευθεία γραμμή. Εάν η Αρχή της Ισοδυναμίας είναι σωστή, η καμπύλωση του φωτός θα πρέπει να ισχύει και για την περίπτωση ενός ομογενούς βαρυτικού πεδίου, εφόσον σύμφωνα με αυτή τα δυο συστήματα είναι ισοδύναμα (βλ. εικόνα 3.24) (T.Cushing, 2003).



**Εικόνα 3.36** Στο αριστερό σχήμα φαίνεται η τροχιά που θα ακολουθούσε το φως που διέρχεται από μια οπή ενός επιταχυνόμενου ανελκυστήρα με φορά προς τα πάνω χωρίς της επίδραση της βαρύτητας. Στο δεξί σχήμα φαίνεται ότι το ίδιο πρέπει να ισχύει και σε ένα ανελκυστήρα που επιταχύνεται εξαιτίας της βαρύτητας σε ομογενές πεδίο, αν η Αρχή της Ισοδυναμίας είναι σωστή (T.Cushing, 2003).

Κατά την ΓΘΣ το φως ακολουθεί τις γεωδαισιακές καμπύλες του χωροχρόνου, αφού κινείται διαμέσου αυτού. Ακόμη και στην περίπτωση του Ήλιου οι κώνοι φωτός πρέπει να έχουν μια κλίση προς τα μέσα λόγω της μάζας του (Erstein, Εικόνες της Σχετικότητας:2.Γενική θεωρία, 1992). Επίσης το φως που έρχεται από αυτόν ή τα άστρα θα αλλάζει κατά μικρή γωνία τη διεύθυνση διάδοσης του, όταν περνά από βαρυτικά πεδία και κατά συνέπεια για ένα παρατηρητή στη Γη θα τα εντοπίζει σε άλλη θέση από την πραγματική. Η μετατόπιση του ειδώλου ενός άστρου εξαιτίας της κύρτωσης του φωτός από τη βαρύτητα, ονομάζεται Δακτύλιος του Αϊνστάιν (Ferraro, 2007). Στην εικόνα 3.25 φαίνεται μια πηγή φωτός  $S$ , ένας παρατηρητής  $O$  και ένα ουράνιο αντικείμενο  $G$  μεγάλης μάζας. Επίσης φαίνονται οι δυο δυνατές διαδρομές του φωτός, λόγω της μη ευκλείδειας γεωμετρίας γύρω από τον χώρο του  $G$ . Ο παρατηρητής θα βλέπει δυο μετατοπισμένα είδωλα  $S_1$  και  $S_2$  του  $S$  και μάλιστα, αν υπάρχουν και άλλες πιθανές διαδρομές, θα βλέπει και περισσότερα. Στην περίπτωση της ευθυγράμμισης της πηγής  $S$ , του παρατηρητή  $O$  και του αντικειμένου  $G$ , η γεωμετρία εμφανίζει συμμετρία κατά μήκος τους κάθετου άξονα, όπως και τα είδωλα. Το σύνολο των ειδώλων είναι ο Δακτύλιος του Αϊνστάιν, ενώ η ίδια η πηγή της βαρύτητας ονομάζεται βαρυτικός φακός (Narlikar, 1999).

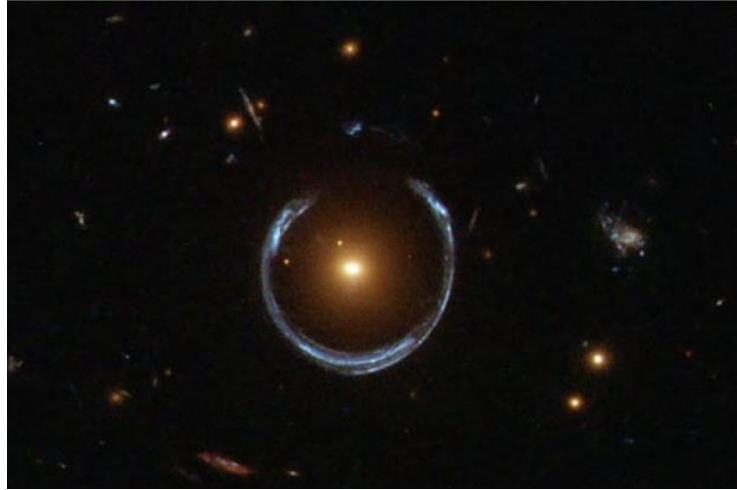


**Εικόνα 3.37** Τα μετατοπισμένα είδωλα της πηγής φωτός  $S$  λόγω της καμπύλωσης του φωτός από το βαρυτικό πεδίο της μάζας  $G$  (Narlikar, 1999).

Αυτά φυσικά αποτελούν προβλέψεις τη θεωρίας και για να έχουν ισχύ, έπρεπε να επιβεβαιωθούν από την παρατήρηση και το πείραμα. Το 1919 δυο Άγγλοι αστρονόμοι, ο

Έντινγκτον και ο Κότινγκαμ πήγαν στον νησί Πρινσίπε του κόλπου της Γουινέας, προκειμένου να μετρήσουν με τηλεσκόπιο την αλλαγή της διεύθυνσης του φωτός κατά την διάρκεια μιας ολικής έκλειψης Ηλίου, αφού σε αυτή τη σπάνια περίπτωση οι μετρήσεις ορατού φωτός θα ήταν ευκολότερες. Παράλληλα δυο άλλοι συνάδελφοί τους, οι Ντέιβιντσον και Κρόμελιν, πήγαν στο Σομπράλ της Βραζιλίας να πραγματοποιήσουν τις ίδιες μετρήσεις, ώστε συγκρινόμενα τα αποτελέσματα από διαφορετικές τοποθεσίες να είναι αντικειμενικά. Παρά το γεγονός ότι τα σφάλματα στις δυο μετρήσεις ήταν μεγάλα, υπέβησαν υπέρ της θεωρίας του Αϊνστάιν. Η αλλαγή της διεύθυνσης του φωτός πλησίον του Ήλιου είναι πολλή μικρή για να παρατηρηθεί εύκολα, μόλις 1,75 δευτερόλεπτα της μοίρας, ενώ η θεωρία του Νεύτωνα, αν εφαρμοστεί στην υπόθεση ότι το φως αποτελείται από σωματίδια, προέβλεπε ακριβώς την μισή τιμή (Einstein , 2010; Modinos, 2014).

Ακόμη και αν δεν είχε σχηματιστεί κατηγορηματική άποψη από τα παραπάνω για την ΓΘΣ, ήταν μια πρώτη ένδειξη ότι ήταν βιώσιμη ως θεωρία. Αστρονομικές παρατηρήσεις που έγιναν από το 1975 και έπειτα μαζί με την επιλογή ακτινοβολίας μικροκυμάτων λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας των ραδιοτηλεσκοπίων, δεν άφηναν κανένα περιθώριο αμφισβήτησης. Συγκεκριμένα το 1979 μια ομάδα αστρονόμων αποτελούμενη από τους Γουόλς, Κάρσγουελ και Γουέιμαν μελέτησαν δυο κβάζαρ, που φαίνονταν πολύ κοντά το ένα στο άλλο. Δεδομένου ότι τα δίδυμα κβάζαρ είναι σπάνια, αυτό φάνηκε πολύ περίεργο. Έπειτα όμως από προσεκτική μελέτη οι αστρονόμοι διαπίστωσαν ότι το κβάζαρ ήταν ένας γαλαξίας και απλά λόγω της θέσης του, δημιουργούσε την οφθαλμαπάτη του βαρυτικού φακού. Η συγκεκριμένη ανακάλυψη πέρα του ότι επιβεβαιώνει την πρόβλεψη της ΓΘΣ για την βαρυτική κύρτωση των φωτεινών ακτίνων, έδειξε ότι οι αστρονόμοι στο μέλλον έπρεπε να είναι πιο προσεκτικοί, καθώς τέτοιου είδους φαινόμενα μπορεί να στρεβλώσουν σοβαρά τις παρατηρήσεις (Ferraro, 2007; Narlikar, 1999).



*Εικόνα 3.38 Ένας γαλαξίας (στο κέντρο) λειτουργεί ως βαρυτικός φακός στο φως που προέρχεται από ένα πιο μακρινό γαλαξία, προκαλώντας γύρω του έναν Δακτύλιο Αϊνστάιν (Varvoglis, 2014).*

Μια άλλη συνέπεια της ΓΘΣ είναι η ύπαρξη βαρυτικής ακτινοβολίας ή αλλιώς βαρυτικών κυμάτων. Η κριτική του Αϊνστάιν πάνω στον Νόμο Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα στηρίχθηκε στην ακαριαία δράση της βαρύτητας και την διάδοση της στην ουσία με άπειρη ταχύτητα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την ΕΘΣ, που δεν επιτρέπει καμία αλληλεπίδραση ή πληροφορία να διαδίδεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός. Έτσι εφόσον αυτό δεν ισχύει πλέον, ο Αϊνστάιν έπρεπε να δώσει λεπτομέρειες για το τρόπο διάδοσης της βαρύτητας από ένα σημείο σε ένα άλλο και ειδικά σε περιπτώσεις ισχυρών βαρυτικών πεδίων (Ciufolini & Matzner, 2010; Hewitt P. , 1997). Η απάντηση που έδωσε μπορεί να παραλληλιστεί με την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτά, ως γνωστόν από τον Μάξγουελ, παράγονται έπειτα από ταλαντώσεις ηλεκτρικών φορτίων, τα οποία προκαλούν ηλεκτρικές και μαγνητικές διαταραχές μεταδιδόμενες ακτινικά στον χώρο με την ταχύτητα  $c$ . Οι διαταραχές αυτές μεταφέρουν την ενέργεια, η οποία προέρχεται από την κίνηση των φορτίων. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση αυτή φθίνει κατά την διάρκεια της εκπομπής τους, λόγω των ενεργειακών απωλειών (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005). Αντίστοιχα η πρόβλεψη της ΓΘΣ είναι ότι ένα σύστημα άστρων, που περιφέρεται το ένα γύρω από το άλλο, προκαλούν διαταραχές στην γεωμετρία του χωροχρόνου, οι οποίες διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις με την ταχύτητα  $c$ . Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά ενέργειας πρέπει να οδηγεί σε απόσβεση της κίνησης του συστήματος, με σμίκρυνση των τροχιών τους και αύξηση της γωνιακής ταχύτητας τους (Cervantes-Cota, Galindo-Uribarri, & Smoot, 2016; Σκαρά, 2018).





*Εικόνα 3.39 Καλλιτεχνική απεικόνιση της διάδοσης βαρυτικών κυμάτων στον χωροχρόνο από δυο στροβιλιζόμενα άστρα μεγάλης μάζας (Hawking, 2000).*

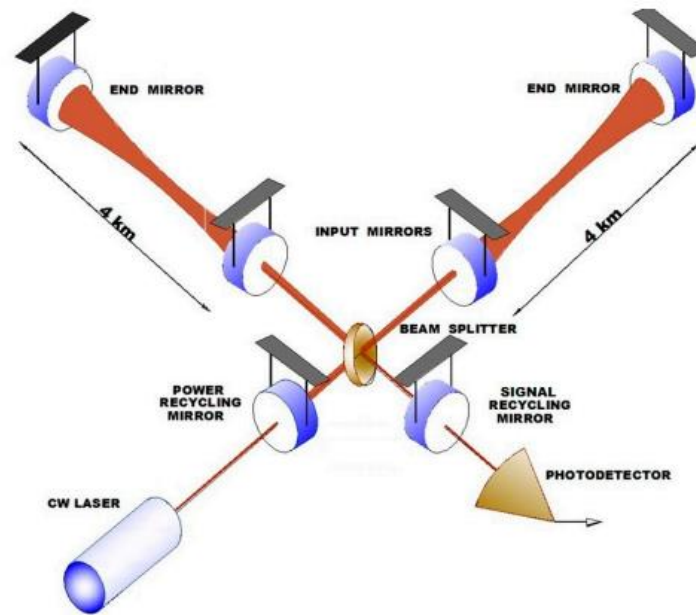
Πάλι αυτή η πρόβλεψη έπρεπε να επιβεβαιωθεί, ωστόσο η βαρυτική ακτινοβολία είναι πολύ ασθενής σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική και ο άμεσος εντοπισμός της απαιτεί ευαίσθητα και τεχνολογικά εξελιγμένα όργανα εργαστηρίων. Στις αρχές του 1979 Οι αστρονόμοι Φάουλερ, Τέιλορ και Μακ Κάλοκ σε παρατηρήσεις που έκαναν από το ραδιοτηλεσκόπιο του Πουέρτο Ρίκο, ανέφεραν ότι η κίνηση ενός διπλού πάλσαρ εμφάνιζε χαρακτηριστικά, που ταίριαζαν με την εκπομπή βαρυτικών κυμάτων. Μάλιστα η τροχιακή περίοδος του συστήματος ελαττωνόταν με ρυθμό, που προέβλεπε η ΓΘΣ εκπέμποντας παλμούς με απόλυτη κανονικότητα. Αυτό ήταν άλλη μια έμμεση επιβεβαίωση της θεωρίας, αν και η τεχνολογία της εποχής δεν επέτρεπε την άμεση ανίχνευσή τους (Narlikar, 1999).

Τα βαρυτικά κύματα μεταδιδόμενα στον χωροχρόνο σταδιακά εξασθενούν με την απόσταση και προκαλούν μικρές αλλαγές στις χωρικές και χρονικές μετρήσεις. Ο Τζότζεφ Βέμπερ ήταν από τους πρωτοπόρους της ανάπτυξης τεχνολογίας βαρυτικών ανιχνευτών. Η κύρια σκέψη του ήταν ότι όταν ένα βαρυτικό κύμα διαπερνά μια μεταλλική ράβδο, τότε αυτό μεταβάλλει την χωρική απόσταση δυο σημείων πάνω σε αυτή. Η μεταβολή αυτή με μια ευρηματική διάταξη μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα και στην συνέχεια να μετρηθεί. Ο ραβδόμορφος ανιχνευτής Βέμπερ είχε όμως όρια στην ευαισθησία του και ήταν αποτελεσματικός στην ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων συγκεκριμένης ενεργειακής κλίμακας, όπως αυτά που εκπέμπονται από διπλούς αστέρες (Breton, 2011; Ciufolini & Matzner, 2010).



*Εικόνα 3.40 Φωτογραφία του Τζότζεφ Βέμπερ με την ευρηματική του κατασκευή, τον ραβδόμορφο ανιχνευτή βαρυτικών κυμάτων (Ciufolini & Matzner, 2010).*

Το 1980 μια νέα τεχνολογία, βασισμένη στην συμβολομετρία με χρήση λέιζερ, έδινε μεγαλύτερη ακρίβεια και έγινε δημοφιλής. Η αρχή λειτουργίας της είναι παρόμοια με το συμβολόμετρο του πειράματος των Μίκελσον και Μόρλεϊ, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.29. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής εκτείνεται σε μήκος πολλών χιλιομέτρων και στις δυο διευθύνσεις. Οι διαστάσεις του μεταβάλλονται ελαφρώς όταν ένα βαρυτικό κύμα διαπεράσει την διάταξη και οδηγεί σε φαινόμενα συμβολής δεσμών λέιζερ, που μπορούν να καταγραφούν. Η δέσμη λέιζερ πρέπει να έχει σωστή διεύθυνση, σχήμα και μήκος κύματος και να διαδίδεται σε σωλήνες υψηλού κενού. Στην συνέχεια τα λαμβανόμενα δεδομένα υφίστανται μια πολύπλοκη μαθηματική ανάλυση, ώστε να εξαχθεί το ασθενές βαρυτικό σήμα από το υπόβαθρο του έντονου θορύβου. Το 2016 εντοπίστηκαν βαρυτικά κύματα από τα δυο παρατηρητήρια LIGO στις Η.Π.Α, κάνοντας χρήση της παραπάνω τεχνολογίας και επιβεβαιώνοντας άμεσα την συγκεκριμένη πρόβλεψη της ΓΘΣ (Cervantes-Cota, Galindo-Uribarri, & Smoot, 2016).

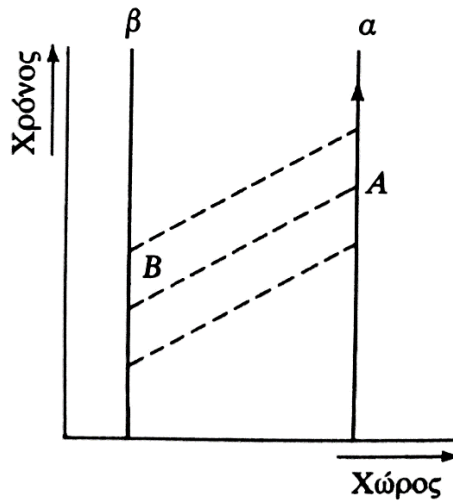


**Εικόνα 3.41** Το συμβολόμετρο του LIGO έχει τις ίδιες αρχές λειτουργίας με το αντίστοιχο του πειράματος των Μίκελσον και Μόρλεϊ, με την διαφορά ότι έχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και εκτείνεται σε μήκος αρκετών χιλιομέτρων (Cervantes-Cota, Galindo-Uribarri, & Smoot, 2016).



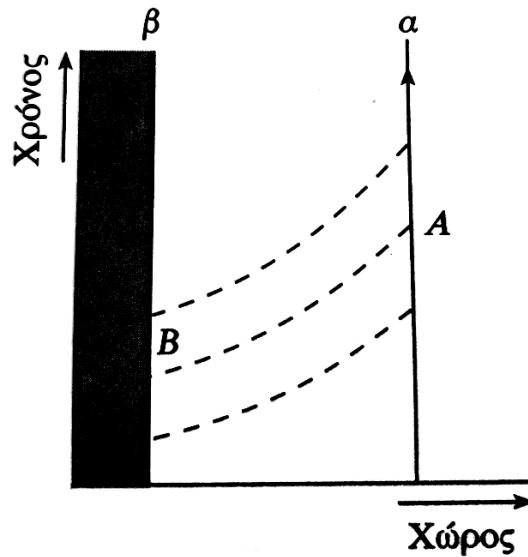
**Εικόνα 3.42** Πανοραμική φωτογραφία του LIGO στις Η.Π.Α. Εκεί το 2016 εντοπίστηκαν για πρώτη φορά τα βαρυτικά κύματα επιβεβαιώνοντας την ΓΘΣ (Ciufolini & Matzner, 2010).

Μια τρίτη συνέπεια της ΓΘΣ, είναι η βαρυτική μετατόπιση της συχνότητας του φωτός προς το ερυθρό και η βαρυτική διαστολή του χρόνου (Einstein , 2010). Οι μετρήσεις του χρόνου επηρεάζονται από τα αποτελέσματα της βαρύτητας στην γεωμετρία του χωροχρόνου. Στην εικόνα 3.31 φαίνεται ένα χωροχρονικό διάγραμμα στην περίπτωση που δεν υπάρχει βαρύτητα. Οι ευθείες α και β είναι οι κοσμικές γραμμές των παρατηρητών Α και Β που βρίσκονται σε ηρεμία. Ο Β στέλνει φωτεινά σήματα στον Α, κάθε δευτερόλεπτο, σύμφωνα με το ρολόι του και ο Α λαμβάνει αυτά τα σήματα ανά δευτερόλεπτο σύμφωνα με το δικό του ρολόι. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις χωροχρονικές τροχιές των ακτίνων από τον Β στον Α.



**Εικόνα 3.43** Απλουστευμένο διάγραμμα χώρου-χρόνου στην υποθετική περίπτωση που δεν υπάρχει βαρύτητα. Οι παρατηρητές *A* και *B* είναι ακίνητοι σε μια απόσταση *αβ* μεταξύ τους και στέλνουν φωτεινά σήματα ο ένας στον άλλο ενώ παράλληλα είναι εφοδιασμένοι με δυο συγχρονισμένα ρολόγια. Οι κοσμικές γραμμές των παρατηρητών (*α*, *β*) δείχνουν φυσικά ότι παρόλο που δεν κινούνται στον χώρο, ο χρόνος περνάει γι' αυτούς. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι χωροχρονικές τροχιές του φωτός, που στέλνουν διαδοχικά ο ένας στον άλλο ανά δευτερόλεπτο. Η έλλειψη βαρύτητας έχει ως συνέπεια ο χωροχρόνος να είναι επίπεδος(ευκλείδειος), οπότε δεν υπάρχουν χρονικές διαφορές στην διάρκεια αποστολής-λήψης των σημάτων από τον ένα στον άλλο. Αυτό είναι λογικό, αφού το φως διανύει την ίδια απόσταση για να φτάσει από τον ένα στον άλλο, έχοντας παράλληλα σταθερή ταχύτητα (Narlikar, 1999).

Στην εικόνα 3.32 αποτυπώνεται το ίδιο παράδειγμα αλλά σε καμπύλο χωροχρόνο γύρω από ένα αντικείμενο μεγάλης μάζας. Ο παρατηρητής *B* που εκπέμπει σήματα βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του αντικειμένου ενώ ο *A* βρίσκεται σε μια απόσταση. Οι *A* και *B* είναι ακίνητοι ως προς το αντικείμενο. Τα διαστήματα *α* και *β* στις κοσμικές γραμμές δείχνουν τον χρόνο που μετράει ο καθένας στο ρολόι του, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν πάλι τις τροχιές των ακτίνων από τον *B* στον *A*. Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι τα χρονικά διαστήματα, που ορίζουν την κοσμική γραμμή του *A*, είναι μεγαλύτερα από αυτά του *B*. Αυτό σημαίνει ότι ενώ ο *B* στέλνει σήματα κάθε δευτερόλεπτο σύμφωνα με το ρολόι του, ο *A* χρειάζεται περισσότερο από 1 δευτερόλεπτο για να το λάβει σύμφωνα με το δικό του ρολόι. Αν συμβολιστεί ως *z* αυτή η αύξηση, τότε αυτή αποτελεί την μετατόπιση προς το ερυθρό. Αυτό προκύπτει από την θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής  $c = \lambda \cdot f$ , όπου *c* η ταχύτητα του σήματος, *λ* το μήκος κύματος και *f* η συχνότητα του.

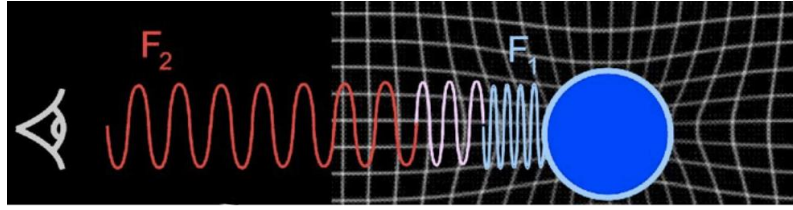


**Εικόνα 3.44** Απλουστευμένο διάγραμμα χώρου-χρόνου στην υποθετική περίπτωση που ο ένας παρατηρητής(B) βρίσκεται στην επιφάνεια ενός άστρου πολύ μεγάλης μάζας(μαύρο παραλληλόγραμμα) και ο άλλος παρατηρητής(A) σε μια απόσταση  $αβ$ , χωρίς να κινείται στον χώρο. Στην περίπτωση αυτή η βαρύτητα του άστρου παραμορφώνει τον χωροχρόνο γύρω του και ως εκ τούτου τα σήματα που στέλνει ο B δεν έχουν την ίδια χρονική διάρκεια για τον A, αφού το φως χρειάζεται να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με το παράδειγμα της εικόνας 3.31. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Γεωμετρία του χωροχρόνου δεν είναι πλέον επίπεδη λόγω του ισχυρού βαρυτικού πεδίου του άστρου (Narlikar, 1999).

Η συχνότητα του φωτεινού σήματος από τον B προς τον A ελαττώθηκε κατά τον παράγοντα  $1+z$  και άρα το μήκος κύματος αυξήθηκε κατά τον ίδιο. Αν ο B εξέπεμπε φως σε όλη την ορατή περιοχή του φάσματος, ο A θα λάμβανε όλα τα μήκη κύματος μετατοπισμένα προς το ερυθρό, αφού από όλα τα χρώματα του ορατού το ερυθρό έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος. Ακόμη επειδή αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην δράση της βαρύτητας του αντικείμενου, ονομάζεται βαρυτική μετατόπιση προς το ερυθρό (Narlikar, 1999). Η αδιάστατη μεταβλητή  $z$  της μεταβολής του μήκους κύματος δίνεται από τον μαθηματικό τύπο  $z = \lambda_0 - \lambda_e / \lambda_e$ , όπου  $\lambda_0$  το μήκος κύματος μετρημένο από τον παρατηρητή και  $\lambda_e$  το αντίστοιχο μήκος μετρημένο από την πηγή εκπομπής. Ομοίως για την μεταβολή της συχνότητας ισχύει  $z = f_e - f_0 / f_0$ , όπου  $f_e$  η συχνότητα του σήματος μετρημένη από τον παρατηρητή και  $f_0$  η συχνότητα μετρημένη από την πηγή εκπομπής.

Στην γενική του μορφή ισχύει ότι  $z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot G \cdot M}{R \cdot c^2}}} - 1$ , όπου  $G$  η παγκόσμια βαρυτική

σταθερά,  $M$  η μάζα του ουράνιου σώματος από το βαρυτικό πεδίου του οποίου περνά το φωτεινό σήμα,  $R$  η ακτίνα του ουράνιου σώματος και  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Αν  $z > 0$  τότε το σήμα εμφανίζει μετατόπιση προς το ερυθρό, ενώ αν  $z < 0$  τότε το σήμα εμφανίζει μετατόπιση προς το κυανό (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009).



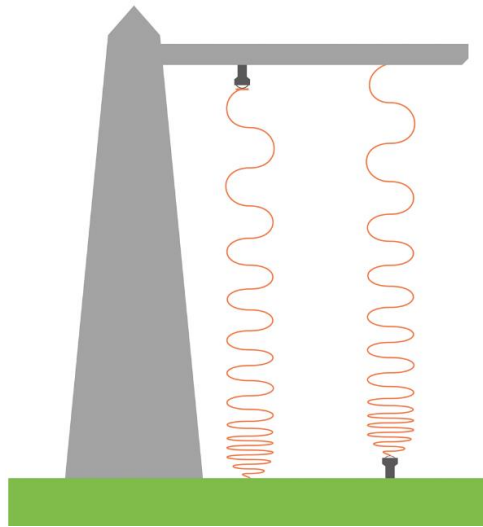
**Εικόνα 3.45** Σχέδιο που απεικονίζει την εκπομπή φωτός ενός πολύ θερμού άστρου σε σχέση με τον γνωστό μας Ήλιο. Το άστρο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του εκπέμπει μπλε φως με συχνότητα  $F_1$  (μικρού μήκους κύματος). Καθώς όμως το ισχυρό βαρυτικό του πεδίο έχει καμπυλώσει τον χωροχρόνο γύρω του, τα φωτόνια στην πορεία της διάδοσης τους χάνουν ενέργεια και η συχνότητα του κύματος μειώνεται, ενώ παράλληλα το μήκος κύματος τους αυξάνεται. Το αποτέλεσμα είναι το φως να φτάνει ένα παρατηρητή μακριά με μια συχνότητα  $F_2$  (μικρότερη της αρχικής), που έχει μετατοπιστεί προς το ερυθρό φάσμα του φωτός (Kaiser, 2016).

Επίσης η ΓΘΣ προβλέπει ότι ο χρόνος περνάει πιο αργά κοντά σε σώματα με μεγάλη μάζα, φαινόμενο που είναι γνωστό ως βαρυτική διαστολή του χρόνου. Το φως όταν κινείται σε ένα βαρυτικό πεδίο, χάνει ενέργεια και έτσι μικραίνει η συχνότητα του. Αυτό συνεπάγεται ότι το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο φωτεινών κυμάτων, που περνούν από ένα σημείο του πεδίου, μεγαλώνει. Αναλογικά για ένα παρατηρητή, που βρίσκεται σε ένα ύψος από την πηγή του βαρυτικού πεδίου, ο χρόνος κυλάει πιο γρήγορα σε σχέση με έναν παρατηρητή, ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια της πηγής του πεδίου. Με άλλα λόγια το πεδίο βαρύτητας συμπιέζει το χώρο και τον χρόνο, επιβραδύνοντας τα ρολόγια, όπως στην περίπτωση κίνησης με μεγάλη ταχύτητα λόγω της ΕΘΣ. Σε πολύ ισχυρά πεδία βαρύτητας ο χρόνος σταματά, όμοια με ένα σώμα, που φτάνει την ταχύτητα  $c$  (Erstein, Εικόνες της Σχετικότητας:2.Γενική θεωρία, 1992). Ο μαθηματικός φορμαλισμός της βαρυτικής διαστολής χρόνου εκφράζεται από τη σχέση  $\Delta t' = \Delta t_0 \cdot [1 - (2 \cdot G \cdot M / R \cdot c^2)]^{1/2}$ , όπου  $\Delta t'$  ο χρόνος μετρούμενος σε βαρυτικό πεδίο,  $\Delta t_0$  ο ιδιοχρόνος ή ο χρόνος μετρούμενος χωρίς βαρυτικό πεδίο,  $G$  η παγκόσμια βαρυτική σταθερά,  $M$  η μάζα του σώματος που παράγει το πεδίο,  $R$  η απόσταση από την πηγή του πεδίου (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009; Kalinski, 2020).

Σημαντική μεταβλητή στην ΓΘΣ αποτελεί το δυναμικό βαρύτητας, που ορίζεται ως η δυναμική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ενός σώματος. Το δυναμικό βαρύτητας σε ένα σημείο του πεδίου δίνεται από τον τύπο  $U = -G \cdot M / r$ , στον οποίο το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι, για να απομακρυνθεί μια μάζα από το πεδίο, πρέπει να καταναλωθεί έργο. Επίσης τα χρονικά διαστήματα συνδέονται με τις μεταβολές της δυναμικής ενέργειας όπως δηλώνει ο τύπος  $(\Delta t_2 - \Delta t_1) \cdot \Delta t = U_2 - U_1 / c^2 = \Delta U / c^2$ . Έτσι τα μεγαλύτερα δυναμικά βαρύτητας, αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (Ευαγγελόπουλος, 2001).

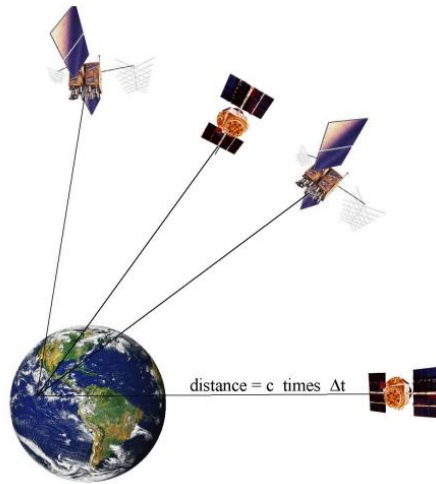
Η πρόβλεψη της βαρυτικής μετατόπισης προς το ερυθρό της ΓΘΣ επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1959 από τους Ρόμπερτ Πάουντ και Γκλέν Ρέμπκα (Pickover, 2016). Στο πείραμα αυτό τοποθετήθηκε στην κορυφή του πύργου Τζέφερς, ύψους 23 μέτρων του πανε-

πιστημίου του Χάρβαρντ μια πηγή φωτός, χρησιμοποιώντας εύρος συχνοτήτων ενός ισότοπου του σιδήρου. Ένας ρυθμιζόμενος δέκτης τοποθετήθηκε επίσης στην βάση του πύργου, έτσι ώστε να λαμβάνει σήματα από την πηγή. Στην συνέχεια συγκρίθηκε η συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος από εκείνη του εκπεμπόμενου. Το αποτέλεσμα ήταν ότι τα φωτόνια που έφτασαν στο έδαφος είχαν μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια, άρα και συχνότητα, επομένως το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών φωτεινών κυμάτων μικραίνει, πράγμα που σημαίνει ότι ο χρόνος κυλάει έστω και κατά μια ελάχιστη τιμή πιο γρήγορα στην κορυφή σε σχέση με την βάση (Hawking, 2000; Huggins, 2010).



**Εικόνα 3.46** Οι Πάουντ και Ρέμπκα επιβεβαίωσαν με το πείραμα τους την ΓΘΣ. Τα φωτόνια που έφτασαν στον ανιχνευτή κοντά στο έδαφος είχαν μικρότερο μήκος κύματος από τα αντίστοιχα την στιγμή της εκπομπής τους και το αντίστροφο. Από αυτό προκύπτει ότι ο χρόνος κυλάει πιο αργά στο έδαφος, όπου το βαρυντικό πεδίο είναι πιο ισχυρό σε σχέση με την κορυφή του πύργου, όπου το βαρυντικό πεδίο είναι ασθενέστερο (Pound-Rebka experiment, n.d.).

Μια άλλη επιβεβαίωση της βαρυντικής διαστολής του χρόνου προκύπτει από την λειτουργία του συστήματος GPS στη σύγχρονη εποχή. Η διαφορά στον ρυθμό των ρολογιών σε διαφορετικά υψόμετρα από τη Γη πρέπει να υπολογίζεται από τα προγράμματα πλοήγησης, αφού αυτά βασίζονται σε λήψεις σημάτων από δορυφόρους. Μια μονάδα GPS χρησιμοποιεί την ταχύτητα του φωτός, για να μετατρέψει τις χρονικές καθυστερήσεις των σημάτων σε αποστάσεις, ώστε να υπολογιστεί η θέση ενός δέκτη στη Γη. Αν αγνοηθούν οι συνδυασμένες προβλέψεις της ΕΘΣ και της ΓΘΣ για τις χρονικές μετρήσεις, οι θέσεις που υπολογίζονται έχουν απόκλιση αρκετών χιλιομέτρων από τις πραγματικές (Kaku, 2022).

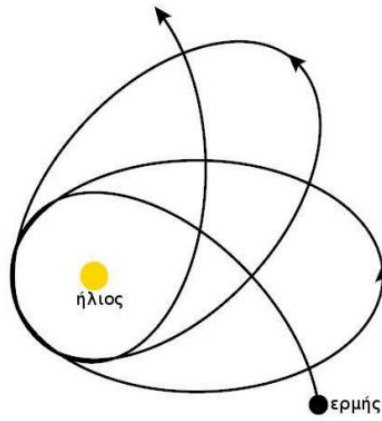


**Εικόνα 3.47** Η λειτουργία του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης στηρίζεται στις αρχές της ΕΘΣ και της ΓΘΣ. Αν δεν υπολογιστούν οι χρονικές διαφορές λόγω κίνησης των δορυφόρων και διαφορετικής τιμής της βαρύτητας σε σχέση με τη Γη, οι αποκλίσεις στον υπολογισμό των θέσεων των δεκτών θα ήταν μεγάλες (Ashby, 2017).

Τέλος άλλη μια συνέπεια της ΓΘΣ σχετίζεται με την τροχιακή μετάπτωση των περιηλίων και αφηλίων των ουράνιων σωμάτων. Σύμφωνα με την θεωρία οι τροχιές των πλανητών δεν είναι ακριβώς ελλειπτικές αλλά μετατοπίζονται ελαφρώς προς μια κατεύθυνση. Αυτή η πρόβλεψη εξηγεί και την μετάπτωση του περιηλίου του Ερμή, ένα θέμα που η Νευτώνεια θεωρία αδυνατούσε να εξηγήσει με ακρίβεια, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας. Ο Ερμής κινούμενος σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο βρίσκεται περιοδικά σε περιοχές μικρότερου ή μεγαλύτερου δυναμικού βαρύτητας και λόγω της Αρχής της ισοδυναμίας υφίσταται περιοδικές μεταβολές στον χωροχρόνο (Ευαγγελόπουλος, 2001).

Η ΓΘΣ προβλέπει ότι η τροχιά του κατά το πέρασμα του χρόνου θα έχει μια αργή μετάπτωση κατά τρόπο, ώστε δυο διαδοχικές τροχιές του να είναι κάθε φορά διαφορετικές. Φυσικά αυτό οφείλεται και στην επίδραση των βαρυτικών επιδράσεων των άλλων πλανητών, αλλά η ΓΘΣ δίνει βάση της θεωρίας και μια επιπλέον μετάπτωση 0,010 ανά αιώνα. Αυτό ταιριάζει απόλυτα με την αργή περιστροφή της ελλειπτικής του τροχιάς κατά περίπου 43 δευτερόλεπτα της μοίρας ανά αιώνα. Σε αυτό το σημείο η ΓΘΣ δείχνει την ισχύ της ακόμη μια φορά δίνοντας ακριβείς προβλέψεις, για ένα θέμα που απασχολούσε χρόνια τους αστρονόμους, παρά την μικρή τιμή των αποκλίσεων σε σχέση με την Νευτώνεια θεωρία (Einstein, 2010; T.Cushing, 2003).





**Εικόνα 3.48** Η ΓΘΣ ερμήνευσε την τροχιακή μετάπτωση του περιηλίου των ουράνιων σωμάτων με αποτέλεσμα να δίνει ακριβείς τιμές για την περίπτωση του Ερμή, που αδυνατούσε να εξηγήσει η νευτώνεια θεωρία (Λάιος, 2018).

## 4 Κεφάλαιο 4. Σύγχρονες θεωρίες και η ανάγκη ενοποίησης της βαρύτητας με τις άλλες αλληλεπιδράσεις

Η ΓΘΣ, ως μια ριζικά αναθεωρημένη θεωρία για την βαρύτητα πέρα από τις προβλέψεις της, οι οποίες ολοένα και επιβεβαιώνονται με την πάροδο του χρόνου, έδωσε και μια διαφορετική εικόνα για την δημιουργία και εξέλιξη του Σύμπαντος, συνολικά. Υπενθυμίζεται ότι και ο Νεύτωνας το 1690 εφάρμοσε τον Νόμο της Παγκόσμιας Έλξης, για να δώσει μια ανάλογη περιγραφή. Η αρχική του υπόθεση ήταν ότι η ύλη του Ηλίου των πλανητών και γενικά όλων των αστρονομικών αντικειμένων είναι ισομερώς κατανομημένη σε αυτό. Επιπλέον εάν ο χώρος είναι πεπερασμένος, τότε η ύλη στις εξωτερικές περιοχές θα έτεινε λόγω βαρύτητας προς το σύνολο της ύλης των εσωτερικών περιοχών. Το αποτέλεσμα θα ήταν η κατάρρευση όλης της ύλης προς τις περιοχές του κέντρου, δημιουργώντας μια μεγάλη σφαιρική μάζα. Αυτό θα συνέβαινε καθώς η ομοιόμορφη κατανομή δεν επιτρέπει σε δυνάμεις πίεσης να έχουν εξισορροπητικό ρόλο όπως στην περίπτωση της κατάρρευσης των άστρων, που έχει περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Από την άλλη πλευρά αν το Σύμπαν είναι άπειρο στον χώρο η κατάρρευση δεν θα είχε συγκεκριμένη κατεύθυνση, αφού σε άπειρο και ομοιογενές Σύμπαν δεν υπάρχει κεντρική θέση και κάθε σημείο του έλκεται με την ίδια δύναμη από άλλα σε όλες τις κατευθύνσεις και παραμένει στατικό. Ένα τέτοιο Σύμπαν για τον Νεύτωνα θα ήταν ασταθές, επειδή κάθε απόκλιση από την ομοιομορφία θα το κατακερμάτιζε σε πεπερασμένα τμήματα ύλης, τα οποία θα κατέρρεαν βαρυτικά (Narlikar, 1999).

Το 1917 ο Άλμπερτ Αϊνστάιν, έχοντας ήδη διατυπώσει την ΓΘΣ, προσπάθησε, εφαρμόζοντας την, να φτιάξει, όπως και ο Νεύτωνας, ένα μοντέλο για το Σύμπαν. Η αρχική του υπόθεση, που το 1933 ονομάστηκε από τον Έντουαρντ Μίλνερ Κοσμολογική Αρχή, συνίστατο στο ότι το Σύμπαν στην μακροσκοπική του δομή, ήταν στατικό (Pickover, 2016). Αυτό, για να ίσχυε, έπρεπε η συνολική μάζα να είναι ομοιογενώς και ισότροπα κατανομημένη. Η ομοιογένεια συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει προτιμητέα αρχή των αξόνων και ότι το Σύμπαν από όποια γωνία και να ιδωθεί, φαίνεται το ίδιο. Επίσης ισότροπο Σύμπαν σημαίνει ότι δεν υπάρχει προτιμητέα κατεύθυνση, όσον αφορά την παρατήρηση στην δομή του (Carozziello & De Laurentis, 2011). Η εικόνα αυτή είναι άρδην διαφορετική από την κοσμολογία των αρχαίων Ελλήνων, που έδιναν ξεχωριστή σημασία και ως εκ τούτου κεντρική θέση στη Γη.

Στην συνέχεια ο Αϊνστάιν προκειμένου να καθορίσει τις ποσοτικές λεπτομέρειες, έθεσε σε εφαρμογή την ΓΘΣ. Κάθε μορφή παρατηρούμενης ύλης και ενέργειας επηρεάζει

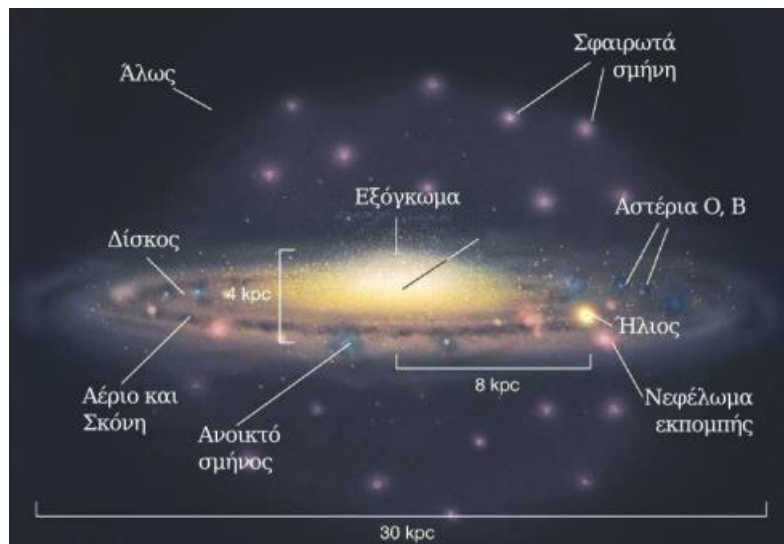
την γεωμετρία του χωροχρόνου, κάνοντας την μη ευκλείδεια (Einstein , 2010). Προς μεγάλη έκπληξη οι λύσεις των εξισώσεων της ΓΘΣ έδιναν αποτελέσματα, που αντιστοιχούσαν σε μοντέλα ομογενή και ισότροπα για το Σύμπαν, αλλά δεν ήταν στατικά, όπως αρχικά είχε υποθέσει ο Αϊνστάιν. Έτσι η ίδια δυσκολία που είχε προκύψει στον Νεύτωνα σχετικά με το πώς η κατανομή της ύλης μένει αμετάβλητη παρά την ιδιοβαρύτητα της, εμφανίζεται και στην προσπάθεια του Αϊνστάιν. Ο ίδιος όμως δεν δέχτηκε αυτή την εικόνα του Σύμπαντος και επινόησε μια απωστική δύναμη γνωστή και ως κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ , την οποία πρόσθεσε αυθαίρετα στις εξισώσεις του. Αυτή η άπωση αυξανόταν ανάλογα με την απόσταση δυο ποσοτήτων ύλης, αντιστεκόταν στην βαρυτική έλξη και διατηρούσε το Σύμπαν στατικό, αν αυτό ήταν πεπερασμένο και χωρίς σύνορα (Ferraro, 2007). Οι τροποποιημένες εξισώσεις πεδίου είχαν τον παρακάτω μαθηματικό φορμαλισμό:  $G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \cdot \Lambda = \frac{8 \cdot \pi \cdot G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$ , όπου  $\Lambda$  είναι η Κοσμολογική σταθερά, αντιπροσωπεύοντας μια απωστική δύναμη παντού στον χώρο (Vecchiato, 2017).

Η εικόνα αυτή του Σύμπαντος αντιστοιχεί σε μια υπερσφαίρα τεσσάρων διαστάσεων με τον τρισδιάστατο χώρο να έχει όγκο  $V=2 \cdot \pi^2 \cdot R^3$  και για να διαγραφεί μια ευθεία σε αυτόν, δηλαδή ένας μέγιστος κύκλος, πρέπει να διανυθεί απόσταση  $2 \cdot \pi \cdot R$ . Μάλιστα το  $R$  καθορίζεται συναρτήσει της Κοσμολογικής σταθεράς  $\Lambda$ , από την σχέση  $R = \frac{c}{\sqrt{3 \cdot \Lambda}}$  και το  $\Lambda$  σχετίζεται με την μέση πυκνότητα ύλης, από την σχέση  $\Lambda = \frac{4 \cdot \pi \cdot G \cdot \rho}{3}$ , όπου  $\rho$  η μέση πυκνότητα της ύλης. Οι αστρονομικές μετρήσεις της εποχής έδειξαν ότι η μέση πυκνότητα της ορατής ύλης είναι περίπου  $3 \cdot 10^{-31} \text{ gr/cm}^3$ , άρα η ακτίνα του Σύμπαντος  $R$  είναι περίπου  $6 \cdot 10^{28} \text{ cm}$ , γεγονός που σημαίνει ότι στο Σύμπαν του Αϊνστάιν για να διαγράψει ένας πλήρης κύκλος πρέπει να διανυθούν 350 δισεκατομμύρια έτη φωτός (Narlikar, 1999). Η εικόνα αυτή, που προκύπτει από την προσπάθεια του Αϊνστάιν, αποτέλεσε την αρχή της σύγχρονης Κοσμολογίας, οδηγώντας σε μελέτες για τη δομή του Σύμπαντος, βασισμένες σε θεωρίες Φυσικής. Ωστόσο, το στατικό Σύμπαν του Αϊνστάιν κράτησε μόνο δώδεκα χρόνια, αφού αργότερα βρέθηκαν αδιάψευστα στοιχεία για την επιταχυνόμενη, κίολας, διαστολή του και θα αναλυθούν στην συνέχεια.

## 4.1 Ο Νόμος του Χάμπλ, τα μοντέλα Φρίντμαν και η Θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης

Παρατηρώντας κάποιος τον ουρανό την νύχτα θα αντίκρυζε φωτεινά αντικείμενα αποτελούμενα από πλανήτες και απλανείς ακίνητους αστέρες. Υπενθυμίζεται ότι τα άστρα

είναι αστρονομικά αντικείμενα, παρόμοια με τον δικό μας Ήλιο. Κατά την κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο, κάποια από αυτά φαίνονται, να μετακινούνται σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αυτό και μόνο δείχνει ότι δεν είναι απλανή, όπως είχαν ονομαστεί στην αρχαιότητα. Από την άλλη η περιφορά της Γης γύρω από τον άξονα της συμβάλει στον να παρατηρούνται από διαφορετικές θέσεις, πράγμα που βοηθάει στην μέτρηση των αποστάσεων τους από αυτή. Συγκεκριμένα, όσο πολύ φαίνεται να κινούνται, τόσο πιο κοντά στη Γη βρίσκονται και αν και υπάρχουν προς όλες τις κατευθύνσεις τα περισσότερα ορατά άστρα, εν τούτοις βρίσκονται συγκεντρωμένα σε μια φωτεινή λωρίδα σε σχηματισμό δίσκου, που ονομάζεται Γαλαξίας. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώθηκε από τον αστρονόμο Χέρσελ μετά από συλλογή στοιχείων από εκατοντάδες άστρα και επικράτησε στις αρχές του 20ου αιώνα (Δεληβοριάς, 2018).



**Εικόνα 4.1** Η δομή του Γαλαξία μας, με τον δίσκο, το εξόγκωμα, την αλώ και τη θέση του Ήλιου σε αυτόν. Η διάμετρος του είναι 30 kpc (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).

Σε αυτή έπαιξε σημαντικό ρόλο το έργο του Αμερικανού αστρονόμου Έντουιν Χάμπλ, ο οποίος εργαζόταν στο αστεροσκοπείο του όρους Γουίλσον της Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Το 1924 ο Χάμπλ απέδειξε ότι ο δικός μας Γαλαξίας δεν είναι ο μοναδικός, αλλά υπάρχουν πολλοί στο Σύμπαν, με τεράστιες εκτάσεις κενού χώρου μεταξύ τους. Φυσικά αυτό το απέδειξε, προσπαθώντας με έμμεσες μεθόδους να προσδιορίσει μετρήσιμες ποσότητες, που σχετίζονται με αυτούς. Αρχικά η φαινομενική φωτεινότητα ενός άστρου εξαρτάται από την ποσότητα φωτός που το ίδιο ακτινοβολεί και από την απόσταση του από τον παρατηρητή. Για άστρα που βρίσκονται σχετικά κοντά, μπορεί να μετρηθεί η φαινομενική φωτεινότητα και η απόσταση και έτσι να υπολογιστεί η λαμπρότητα τους. Αντίστροφα, εάν είναι γνωστή η λαμπρότητα μακρινών αστέρων, θα μπορούσαν να υπολογιστούν και τα άλλα δυο μεγέθη (Grego & Mannion, 2010).



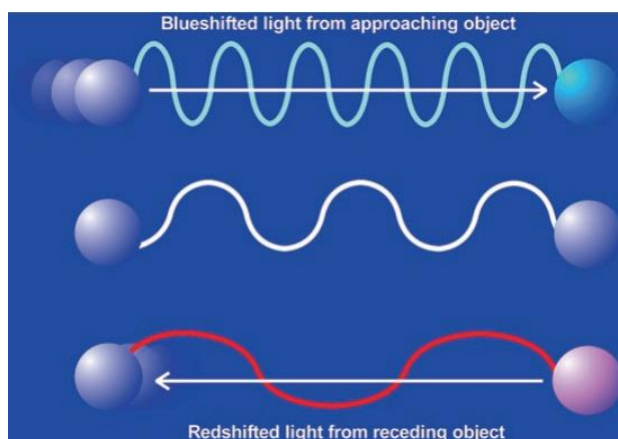
*Εικόνα 4.2 Φωτογραφία του Έντουιν Χάμπλ (NASA, n.d.).*

Αξιοποιώντας αυτές τις γνώσεις, ο Χάμπλ υπολόγισε αποστάσεις εννέα γαλαξιών και βρήκε ότι ο δικός μας γαλαξίας έχει διάμετρο περίπου 100.000 έτη φωτός και περιστρέφεται αργά (T.Cushing, 2003). Τα άστρα σε σπειροειδείς γαλαξίες εκτελούν μια πλήρη περιφορά γύρω από το κέντρο τους σε μια περίοδο εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών. Επίσης βρέθηκε ότι ο Ήλιος μας δεν είναι, παρά ένα μετρίου μεγέθους άστρο, σε σχέση με άλλα στο Σύμπαν. Σχετικά με την διάκριση των τύπων αστέρων υπάρχει ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα, που την επιτρέπει και αυτό είναι το χρώμα του φωτός, το οποίο εκπέμπουν. Όπως ο Νεύτωνας μελέτησε την ανάλυση του φάσματος του φωτός, όταν αυτό διέρχεται μέσα από ένα τριγωνικό πρίσμα, έτσι και οι αστρονόμοι, εστιάζοντας ένα τηλεσκόπιο σε κάποιο άστρο ή γαλαξία, μπορούν να αναλύσουν το φάσμα του φωτός που εκπέμπουν.

Τα άστρα έχουν διαφορετικά φάσματα, όμως η σχετική φωτεινότητα των διαφόρων χρωμάτων είναι η ίδια για όλα αυτά. Επίσης, το χαρακτηριστικό φάσμα ενός άστρου δεν εξαρτάται από την σύσταση των στοιχείων του ή την δομή του, αλλά από την θερμοκρασία του. Αυτό σημαίνει ότι από το φάσμα ενός άστρου αυτομάτως βγαίνουν συμπεράσματα για την θερμοκρασία του. Επιπλέον είναι γνωστό ότι από τα φάσματα λείπουν κάποια χρώματα και οι ελλείψεις αυτές, είναι διαφορετικές για κάθε άστρο. Γνωρίζοντας ότι κάθε χημικό στοιχείο απορροφά ένα σύνολο συγκεκριμένων χρωμάτων, αν αντιστοιχιστεί η απορρόφηση των εκλιπόντων χρωμάτων, μπορούν να βρεθούν τα χημικά στοιχεία της ατμόσφαιρας του άστρου (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).

Το 1920 διάφοροι αστρονόμοι εξέτασαν φάσματα από γαλαξίες και άστρα και βρήκαν ότι το σύνολο των εκλιπόντων χρωμάτων είναι ίδιο με αυτά του δικού μας γαλαξία. Μια άλλη παρατήρηση έδειχνε ότι όλα τα φάσματα ήταν μετατοπισμένα προς το ερυθρό (Hawking, 2000). Αυτή η παρατήρηση εξηγείται από το φαινόμενο Ντόπλερ, το οποίο έχει

αποδειχθεί για τα ηχητικά κύματα. Μια πηγή φωτός εκπέμπει φωτεινά κύματα σε σταθερή απόσταση από τον παρατηρητή σε σταθερή συχνότητα. Τα κύματα που φτάνουν στον παρατηρητή έτσι, έχουν ίδια συχνότητα με την πηγή. Εάν όμως το άστρο απομακρύνεται από τον παρατηρητή, ο χρόνος άφιξης των κορυφών των κυμάτων θα είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την κατάσταση ακινησίας του. Αυτό δείχνει ότι το πλήθος κυμάτων το δευτερόλεπτο θα είναι μικρότερο, άρα η συχνότητα που θα φτάσει στον παρατηρητή θα είναι μεγαλύτερη. Για το ορατό φως αυτό σημαίνει ότι θα μετατοπίζονται προς το ερυθρό, ενώ στην αντίθετη περίπτωση που θα πλησίαζε το άστρο, θα μετατοπίζονταν προς το κυανό (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015).

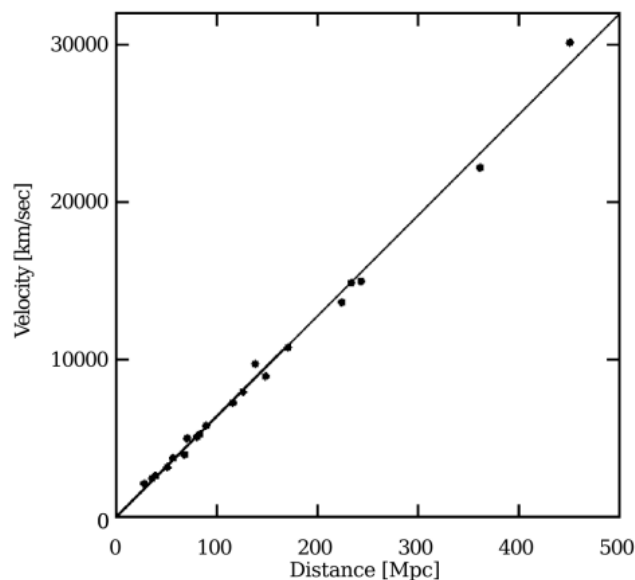


**Εικόνα 4.3** Η μετατόπιση του φωτός προς το κυανό και το ερυθρό λόγω του φαινομένου Ντόπλερ (πάνω και κάτω τμήμα εικόνας), σε σχέση με την περίπτωση ακινησίας δυο άστρων (μεσαίο τμήμα εικόνας) (Grego & Mannion, 2010).

Ο Έντουιν Χάμπλ ασχολήθηκε διεξοδικά με την ταξινόμηση των αποστάσεων των γαλαξιών βάσει των παρατηρούμενων φασμάτων τους. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα των παρατηρήσεων θα ήταν οι γαλαξίες να κινούνται σε τυχαίες κατευθύνσεις και άρα να λαμβάνει φάσματα μετατοπισμένα άλλοτε στο ερυθρό και άλλοτε προς το κυανό. Προς μεγάλη έκπληξη, όμως, διαπίστωσε ότι οι περισσότεροι γαλαξίες είχαν φάσματα μετατοπισμένα προς το ερυθρό. Αυτό μεταφράζεται στο γεγονός ότι σχεδόν όλοι οι γαλαξίες απομακρύνονται από τη Γη. Τέτοιες παρατηρήσεις επιβεβαιώθηκαν και από άλλους αστρονόμους το 1912 και το 1925.

Το 1929 και έπειτα από διεξοδική μελέτη των στοιχείων από τις παρατηρήσεις, ο Χάμπλ διαπίστωσε ότι το μέγεθος της μετατόπισης προς το ερυθρό δεν γίνονταν με τυχαίο τρόπο αλλά συνδεόταν ανάλογα με την απόσταση του κάθε γαλαξία από τη Γη. Έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ένα γαλαξίας, τόσο πιο πολύ απομακρύνεται από τη Γη. Η ανακάλυψη αυτή είναι γνωστή ως ο Νόμος του Χάμπλ και θεωρείται από τις μεγαλύτερες επιστημονικές επαναστάσεις του 20ου αιώνα. Ο Νόμος αυτός εκφρά-

ζεται μαθηματικά ως εξής  $c \cdot z = H_0 \cdot L$ , όπου το γινόμενο  $c \cdot z$  δίνει την ταχύτητα απομάκρυνσης ενός γαλαξία αν η μετατόπιση προς το ερυθρό  $z$  οφείλεται στην σχετική κίνηση του, δηλαδή αποδίδεται στο φαινόμενο Ντόπλερ. Συνοπτικά μπορεί να γραφεί ως  $V_{\text{απομάκρυνσης}} = H_0 \cdot L$ , όπου  $L$  είναι η απόσταση που δηλώνει ένα οριζόντιο μέχρι τον οποίο μπορούμε να παρατηρήσουμε (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015). Η κοσμική απόσταση που μετρείται από τον χρόνο που κάνει μια ακτίνα φωτός να ταξιδέψει ανάμεσα σε δυο σημεία σταθερά στον χώρο ποικίλει, γιατί  $L = R(t) \cdot r$ , όπου  $R(t)$  είναι ο παράγοντας κλίμακας που συσχετίζει τις δυο μετρήσεις της απόστασης (T.Cushing, 2003). Το  $H_0$  ονομάζεται σταθερά του Χάμπλ και έχει τη φυσική σημασία της ταχύτητας κίνησης ενός γαλαξία σε δεδομένη απόσταση και ο ίδιος ο Χάμπλ υπολόγισε ότι  $1/H_0 = 1,9$  δισεκατομμύρια έτη, πράγμα που σημαίνει ότι μετρείται σε μονάδες χρόνου. Σύγχρονες μετρήσεις δίνουν αυτή την τιμή 5 με 10 φορές παραπάνω, δηλαδή παίρνει τιμές ανάμεσα στα 10-15 δισεκατομμύρια έτη (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018).



**Εικόνα 4.4** Διάγραμμα ακτινικής ταχύτητας Γαλαξιών (σε Km/sec) στον κάθετο άξονα συναρτήσει της απόστασης τους (σε Mpc) στον οριζόντιο άξονα. Η αναλογική σχέση μεταξύ τους αναπαριστά γραφικά τον Νόμο του Χάμπλ (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).

Ο νόμος του Χάμπλ πέρα από το γεγονός ότι αποδεικνύει ότι η αμυδρότητα του φωτός των αστεριών είναι ένδειξη μεγαλύτερης απόστασης, έχει σημαντικές συνέπειες για την γενικότερη εικόνα του Σύμπαντος. Η εικόνα αυτή δίνει ένα δυναμικό Σύμπαν, όπου οι γαλαξίες απομακρύνονται, ο ένας από τον άλλο, ευθέως ανάλογα με την απόσταση, που τους χωρίζει. Η φυγή αυτή των γαλαξιών περιγράφεται με τον όρο, διαστολή του Σύμπαντος. Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος διαστέλλεται συνεχώς και οι αποστάσεις των γαλαξιών συνεχώς

αυξάνουν, όπως ένα μπαλόνι που φουσκώνει. Εάν για παράδειγμα υπάρχουν πάνω του κουκίδες σημειωμένες με μαρκαδόρο, καμιά από αυτές δεν έχει ξεχωριστή θέση στο μπαλόνι(βλ. εικόνα 4.5) (Δεληβοριάς, 2018). Μάλιστα το 1988 αποδείχθηκε από τους Αμερικανούς Πέρλμουτερ, Σμιτ και Ρις, μέσα από μελέτες εκρήξεων σουπερνόβα, ότι το Σύμπαν διαστέλλεται με επιταχυνόμενο ρυθμό. Οι παραπάνω επιστήμονες πήραν βραβείο Νόμπελ το 2011 για αυτή την ανακάλυψη (Lorenzi, 2014).



*Εικόνα 4.5 Η διαστολή του χώρου, όπως προκύπτει από την συνεχή αύξηση της απόστασης των γαλαξιών μπορεί να παρομοιαστεί με ένα μπαλόνι που φουσκώνει σταδιακά (Δεληβοριάς, 2018).*

Ο Νεύτωνας είχε αντιληφθεί ότι ένα στατικό Σύμπαν θα συστελλόταν από την επίδραση της βαρύτητας και θα οδηγούσε σε μια καταστροφική εκδοχή. Η ανακάλυψη του Χάμπλ ότι διαστέλλεται, δεν δίνει σαφές προβλέψεις για το μέλλον του, αφού αυτές εξαρτώνται από το ρυθμό διαστολής του. Εάν διαστέλλεται με αργό ρυθμό, τότε κάποια στιγμή η βαρύτητα θα το ακινητοποιήσει και εν συνεχεία θα ξεκινήσει η συστολή του. Εάν όμως διαστέλλεται με ένα ρυθμό πέρα από μια κρίσιμη τιμή, τότε θα συνεχίσει επ' άπειρον την διαστολή του (Hawking, 2000). Αυτή η υπόθεση μπορεί να παρομοιαστεί και με το παράδειγμα ενός αντικειμένου, που προσπαθεί να σπάσει το φράγμα δυναμικού της βαρύτητας και έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αν το αντικείμενο φτάσει την ταχύτητα διαφυγής, τότε το ξεπερνάει και απελευθερώνεται από την βαρυτική έλξη του πλανήτη ενώ αν δεν φτάσει αυτή την ταχύτητα, τότε αυτή θα το επιστρέψει στην επιφάνειά του.

Τα δεδομένα αυτά δείχνουν ότι η διαστολή του Σύμπαντος θα μπορούσε να προβλεφθεί και από τον ίδιο τον Νεύτωνα, όμως η πεποίθηση για ένα στατικό Σύμπαν ήταν τόσο ισχυρή, που ανάγκασε ακόμη και τον Αϊνστάιν να αλλάξει τις εξισώσεις της ΓΘΣ, προσθέτοντας τον αυθαίρετο παράγοντα  $\Lambda$ , ως μια δύναμη αντιβαρύτητας χωρίς υλική αιτία. Αργότερα ο ίδιος παραδέχθηκε ότι αυτή η ενέργεια ήταν το μεγαλύτερο λάθος της ζωής του, συγχάironτας συνάμα τον Χάμπλ το 1931 για το έργο και την ανακάλυψη του. Ο μόνος



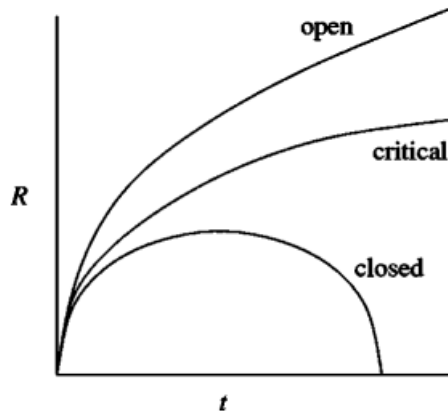
επιστήμονας που επέμεινε στις αρχικές εξισώσεις του Αϊνστάιν, ήταν ο Ρώσος φυσικός Αλεξάντερ Φρίντμαν (Triay, 2010).

Ο Φρίντμαν το 1922 διερεύνησε την αιτία αυτής της διαστολής μέσα από λύσεις των εξισώσεων της ΓΘΣ και δεχόμενος τις ιδέες της Κοσμολογικής Αρχής περί ομοιογενούς και ισότροπου Σύμπαντος. Από την άλλη πλευρά, απέρριψε την ιδέα της στατικότητας του, θεωρώντας την Κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$  περιττή. Αυτό όμως συνεπαγόταν ότι η βαρύτητα έμενε, ως ο μοναδικός ενεργός παράγοντας στο κοσμολογικό μοντέλο. Το έργο του Φρίντμαν στηρίχθηκε σε δυο υποθέσεις. Η πρώτη ήταν ότι το Σύμπαν φαίνεται ίδιο από οποιαδήποτε κατεύθυνση παρατήρησης και η δεύτερη ήταν ότι το ίδιο θα ίσχυε, ακόμη και αν άλλαζε η τοποθεσία της παρατήρησης. Βάσει αυτών, πρότεινε τρία πιθανά μοντέλα για την εξέλιξη του Σύμπαντος, τα οποία είναι γνωστά ως μοντέλα Φρίντμαν (Hawking, 2000). Σημειωτέων, ότι στα μοντέλα αυτά οι γαλαξίες απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο και η ταχύτητα απομάκρυνσης είναι ανάλογη της απόστασης, άρα και η παρατηρούμενη μετατόπιση προς το ερυθρό είναι ανάλογη αυτής, γεγονός που επιβεβαίωσε και ο Χάμπλ.

Το πρώτο μοντέλο Φρίντμαν περιγράφει ένα Σύμπαν που διαστέλλεται αργά και η βαρύτητα έχει το ρόλο της επιβράδυνσης, μέχρι κάποια στιγμή να σταματήσει αυτή η διαστολή και να αρχίσει η συστολή. Ένα τέτοιο Σύμπαν ονομάζεται κλειστό και έχει πεπερασμένο όγκο, χωρίς όρια ή άκρες, με την βαρύτητα να είναι ισχυρή και την γεωμετρία του χώρου να έχει θετική καμπυλότητα. Ο χρόνος είναι, επίσης, πεπερασμένος σε μια γραμμή αρχής και τέλους.

Στο δεύτερο μοντέλο Φρίντμαν το Σύμπαν διαστέλλεται πιο γρήγορα και η βαρυτική έλξη της ύλης, αν και το επιβραδύνει ελαφρώς, δεν πρόκειται σε καμία χρονική στιγμή να το ακινητοποιήσει, μόνο η ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξιών θα γίνει σταθερή. Ένα τέτοιο Σύμπαν ονομάζεται ανοιχτό, με τον χώρο να είναι άπειρος και τη γεωμετρία του να έχει αρνητική καμπυλότητα.

Στο τρίτο μοντέλο Φρίντμαν η διαστολή του Σύμπαντος είναι πάρα πολύ γρήγορη και αυξάνεται επ' άπειρον. Πιθανή συστολή αποφεύγεται με την ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξιών παράλληλα να μειώνεται, αλλά να μη μηδενίζεται ποτέ. Ένα τέτοιο Σύμπαν ονομάζεται και αυτό ανοιχτό με τον χώρο να είναι άπειρο και την γεωμετρία του να παρουσιάζει μηδενική καμπυλότητα, άρα ο ίδιος θα είναι επίπεδος (Gautreau, 2000; Triay, 2010).



**Εικόνα 4.6** Διάγραμμα απόστασης μεταξύ των γαλαξιών( $R$ ) σε συνάρτηση με τον χρόνο( $t$ ). Οι τρεις καμπύλες δείχνουν τις πιθανές εξελίξεις του Σύμπαντος σύμφωνα με τα μοντέλα Φρίντμαν (Baez & Bunn, 2005).

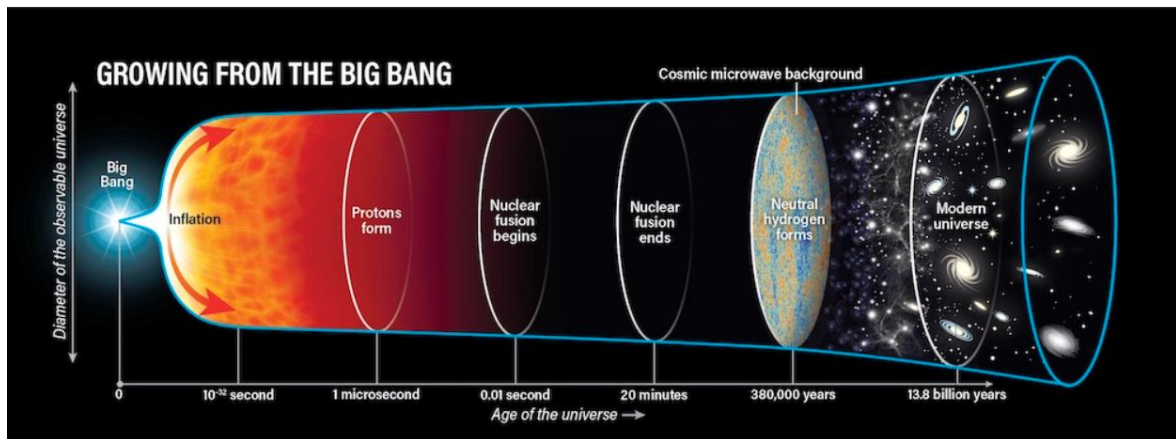
Η εύλογη ερώτηση που προκύπτει από τα υποθετικά μοντέλα αυτά είναι ποιο αντιστοιχεί στον δικό μας Σύμπαν. Οι παράγοντες που πρέπει να μετρηθούν, για να δοθεί απάντηση είναι ο σημερινός ρυθμός διαστολής, η μέση πυκνότητα της ύλης του Σύμπαντος και οι διαφορές στην γεωμετρία του χώρου, που επηρεάζουν τη διαστολή και είναι γνωστό ως παράγοντας κλίμακας. Αν η μέση πυκνότητα ύλης είναι μικρότερη ή ίση από μια κρίσιμη τιμή, τότε το Σύμπαν αντιστοιχεί στο δεύτερο ή τρίτο μοντέλο. Αν όμως αυτή υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή, τότε η εικόνα που αντιστοιχεί είναι αυτή του πρώτου μοντέλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα υλοενέργειας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η βαρυτική επίδραση στην επιβράδυνση της διαστολής (Hawking, 2000). Επομένως μεγάλη μέση πυκνότητα σε σχέση με την κρίσιμη, δίνει κλειστό μοντέλο, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, ανοιχτό μοντέλο. Η κρίσιμη τιμή πυκνότητας δίνεται από τη σχέση  $\rho_{\text{κρίσιμη}} = 3 \cdot H^2 / 8 \cdot \pi \cdot G$  με  $\pi$ ,  $G$  γνωστά και  $H$  η σταθερά του Χάμπλ. Εκείνη την εποχή οι αστρονόμοι δεν μπορούσαν να υπολογίσουμε με ακρίβεια ούτε την μέση πυκνότητα, ούτε γνώριζαν την ακριβή τιμή της σταθεράς του Χάμπλ (Vecchiato, 2017).

Ο ρυθμός διαστολής θα μπορούσε να υπολογιστεί μέσω της μέτρησης των ταχυτήτων απομάκρυνσης των γαλαξιών από το φαινόμενο Ντόπλερ. Επίσης ο ίδιος, εξαρτάται και από τον παράγοντα κλίμακας. Αν αυτός είναι ίσος με μηδέν, τότε το σύμπαν θα διαστέλλεται με μειωμένο ρυθμό χωρίς να προκύψει συστολή. Αν αυτός είναι μεγαλύτερος από το μηδέν, τότε η διαστολή θα σταματήσει και έτσι θα έχουμε την εικόνα ενός κλειστού και υπό κατάρρευση σύμπαντος ενώ αν ο παράγοντας κλίμακας είναι μικρότερος από μηδέν, το Σύμπαν θα είναι ανοιχτό και διαστελλόμενο για πάντα. Δεδομένου ότι οι αποστάσεις των γαλαξιών μετρούνται έμμεσα, ο υπολογισμός του ρυθμού διαστολής ενέχει πολλές πρακτικές δυσκολίες και το μόνο που είναι γνωστό είναι ότι το Σύμπαν διαστέλλεται κατά 5-10% κάθε ένα δισεκατομμύριο χρόνια (Narlikar, 1999).

Τα μοντέλα Φρίντμαν όμως παρουσιάζουν ένα κοινό χαρακτηριστικό και αυτό είναι ότι κάποιο στιγμή, παρελθοντικά, οι αποστάσεις των γαλαξιών ήταν μηδενικές. Η ΓΘΣ πάνω στην οποία βασίζονται τα μοντέλα Φρίντμαν προβλέπει ότι κάποιο στιγμή στο χωροχρόνο υπήρχε ένα μαθηματικό σημείο με άπειρη πυκνότητα άρα και καμπυλότητα, το οποίο ονομάστηκε ανωμαλία, σημειακή ιδιομορφία ή μοναδικότητα. Το παράδοξο είναι ότι εκεί παύουν να ισχύουν οι γνωστοί νόμοι της Φυσικής και ως εκ τούτου δεν μπορεί να μελετηθεί. Η συνολική εικόνα ήταν παρόμοια με μια κοσμική έκρηξη γι' αυτό και ο Φρίντμαν υπέθεσε ότι, στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος, δόθηκε σε αυτό άφθονη κινητική ενέργεια. Το Σύμπαν κατ' αυτόν δημιουργήθηκε από μια απότομη έκρηξη, κατά την οποία τα συστατικά της εκτινάχθηκαν επιταχυνόμενα προς όλες τις κατευθύνσεις και αυτό που παρατηρείται ως ύλη δεν είναι τίποτε άλλο, παρά θραύσματα του αρχικού γεγονότος (Thorne, 2019).

Στην συνέχεια δυο άλλοι επιστήμονες ο Βέλγος Ζώρζ Λεμαίτρ και ο Ουκρανός Τζόρτζ Γκάμοφ το 1927 και 1940, αντίστοιχα, μελετώντας τα δεδομένα, έδωσαν θεωρητικά στοιχεία για την κατάσταση του Σύμπαντος στα αρχικά στάδια, που ενοποιημένα σε μια θεωρία, είναι γνωστή ως η Θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης (Pickover, 2016). Ο Λεμαίτρ απέδειξε ότι το στατικό Σύμπαν του Αϊνστάιν ήταν ασταθές, οπότε πρότεινε μια θεωρία αρχέγονης έκρηξης για την προέλευση του. Σύμφωνα με αυτή, το Σύμπαν ξεκίνησε από μια πολύ πυκνή κατάσταση ενέργειας και ύλης σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και εν συνεχεία, για άγνωστη αιτία, μια έκρηξη οδήγησε στην διαστολή του. Καθώς διαστελλόταν και ψυχόταν, η αραιή ύλη συμπυκνώθηκε υπό την επίδραση της βαρύτητας, δημιουργώντας τους αστέρες και τους γαλαξίες.

Ο Γκάμοφ έδωσε και αυτός μια θεωρητική προσέγγιση της κατάστασης του Σύμπαντος λίγο μετά την Μ. Έκρηξη. Συγκεκριμένα, ξεκίνησε από το στάδιο που όλα τα στοιχειώδη σωματίδια, είχαν σχηματιστεί. Αυτά είναι τα κουάρκ και τα ηλεκτρόνια. Εξ' αυτών συντέθηκαν τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τα πρώτα άτομα. Αρχικά η θερμοκρασία ήταν πολύ υψηλή και τα σωματίδια κινούνταν σε ένα περιβάλλον δισεκατομμυρίων βαθμών. Στην φάση αυτή η ακτινοβολία υπερίσχυε της ύλης, σε αντίθεση με την σημερινή κατάσταση. Από το πρώτο έως το διακοσιοστό δευτερόλεπτο οι επικρατούσες θερμοκρασίες επέτρεπαν την δημιουργία χημικών στοιχείων όπως το δευτέριο, το ήλιο και μικρές ποσότητες ελαφρών πυρήνων. Τέλος ο Γκάμοφ υπέθεσε ότι πρέπει να υπάρχουν υπολείμματα αρχέγονης θερμικής ακτινοβολίας, παρατηρούμενη ως ψυχρή ακτινοβολία σημείου (Baez & Bunn, 2005; Hawking, 2000; T.Cushing, 2003).



**Εικόνα 4.7** Τα στάδια εξέλιξης του Σύμπαντος σύμφωνα με τη Θεωρία της Μ. Έκρηξης. Το Σύμπαν ξεκίνησε από μια έκρηξη άγνωστης αιτίας, όπου από μια σημειακή ιδιομορφία υπέρθερμης κατάστασης εξελίχθηκε, ψυχόμενο σταδιακά και αυξάνοντας παράλληλα την διάμετρο του, στο παρατηρήσιμο Σύμπαν μετά την πάροδο 13,8 εκατομμυρίων ετών (Neiland & Hooper, 2022).

Το 1948 οι αστρονόμοι Μπόντι, Χόιλ και Γκόλντ ανέπτυξαν μια εναλλακτική θεωρία, που είναι γνωστή ως η θεωρία της Σταθερής Κατάστασης. Σύμφωνα με αυτή, στον ενδιάμεσο κενό χώρο του Σύμπαντος δημιουργείται νέα ύλη, κατά την απομάκρυνση των γαλαξιών. Έτσι το Σύμπαν θα έμοιαζε ίδιο σε όλες τις χρονικές στιγμές και σημεία του χωροχρόνου, ενώ συγχρόνως θα απαιτούσε και τροποποίηση της ΓΘΣ λόγω της δημιουργίας νέας ύλης από το κενό. Επίσης, επειδή ο ρυθμός δημιουργίας ήταν πολύ μικρός, δεν ερχόταν σε αντίθεση με τα δεδομένα των παρατηρήσεων και έδινε προβλέψεις, που μπορούσαν να ελεγχθούν πειραματικά. Εκείνη την εποχή υπήρξε και μια άλλη εργασία από δυο Ρώσους αστρονόμους, οι οποίοι αντιτίθεντο στη θεωρία της Μ. Έκρηξης, αλλά τελικά αποδείχθηκε ότι τα επιχειρήματα δεν ευσταθούσαν και τελικώς, θα μπορούσε να έχει συμβεί η ίδια, όπως ακριβώς προβλέπει η ΓΘΣ (Hawking, 2000).

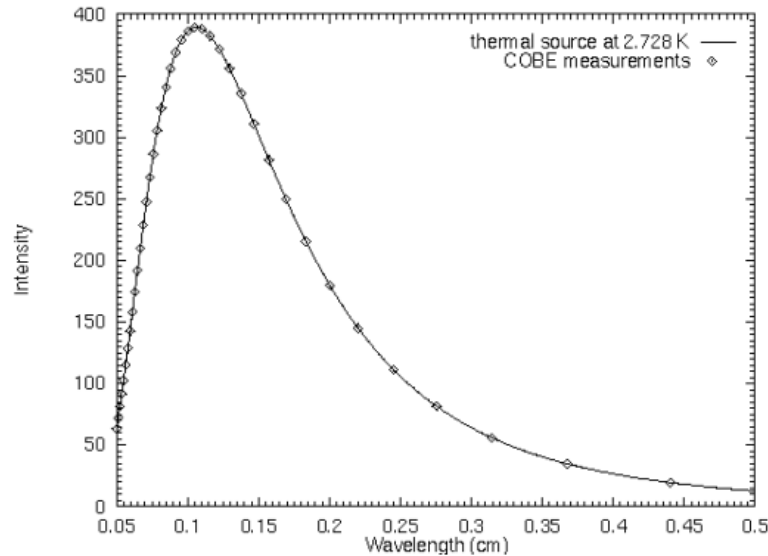
Επιπλέον το 1961 ο Άγγλος ραδιοαστρονόμος Μάρτιν Ράιλ με τους συνεργάτες του, ερευνώντας την κατανομή θέσεων πηγών ραδιοκυμάτων στο Σύμπαν, έφτασαν σε μια σπουδαία ανακάλυψη. Η υπόθεση ήταν ότι αν είναι σωστή η θεωρία της Μ. Έκρηξης, τότε η πυκνότητα των γαλαξιών θα έπρεπε να μειώνεται, όσο αυξάνεται ο χρόνος ζωής του Σύμπαντος. Ταυτόχρονα, επειδή, όπως έδειξε ο Χάμπλ, αυτό διαστέλλεται, έπρεπε ο όγκος του να αυξάνεται συνεχώς και η συνολική μάζα του να παραμένει σταθερή. Ο Ράιλ απέδειξε την παραπάνω υπόθεση, παίρνοντας βραβείο Νόμπελ το 1974 και δίνοντας σοβαρά επιχειρήματα υπέρ της Θεωρίας της Μ. Έκρηξης (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018).

Η απόδειξη του στηριζόταν σε μια σειρά από δεδομένα. Αρχικά το φως από τους μακρινούς γαλαξίες δεν μεταδίδεται ακαριαία, όπως απέδειξε η ΕΘΣ, αλλά χρειάζεται πεπερασμένο χρόνο για να φτάσει στη Γη. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση της πηγής από τη Γη, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος άφιξης του. Αυτό σημαίνει ότι η εικόνα

που σχηματίζεται από τους γαλαξίες δεν αντιστοιχεί στην τωρινή κατάσταση, αλλά σε μια παρελθοντική. Επομένως, αν μελετηθούν γαλαξίες διαφορετικών αποστάσεων, τότε είναι σαν να μελετάται το Σύμπαν σε διαφορετικές εποχές του παρελθόντος. Ο Ράιλ και οι συνεργάτες του βρήκαν ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από τη Γη, η πυκνότητα των γαλαξιών, που μετριέται, δείχνει αύξηση. Συνεπώς το Σύμπαν ήταν πιο πυκνό στο παρελθόν από ότι στη τωρινή του μορφή. Το εύρημα αυτό είναι γνωστό ως Φαινόμενο Ράιλ (Ryle, 1955; Hawking, 2000).

Οι θεωρίες όμως στη Φυσική, όπως και αυτή της Μ. Έκρηξης δεν χρειάζονται μόνο ενδείξεις για να επιβεβαιωθούν, αλλά και πειραματικά δεδομένα. Το 1965 έγιναν παρατηρήσεις, που επιβεβαίωναν την υπόθεση της Μ. Έκρηξης. Πρώτοι, οι Αμερικανοί αστρονόμοι Άρνο Πενζίας και Ρόμπερτ Ουίλσον ανίχνευσαν μικροκύματα, συλλέγοντας τα από συσκευή μεγάλης ευαισθησίας και διαπίστωσαν ότι έδιναν παραπάνω επίπεδα ‘θορύβου’ από ότι αναμενόταν. Αφού απέκλεισαν όλες τις πιθανές αιτίες και περιπτώσεις, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτά φαίνεται να προέρχονται από όλες τις κατευθύνσεις του Σύμπαντος. Όταν αυτή μετρήθηκε, βρέθηκε να αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 3,5 Κέλβιν (Grego & Mannion, 2010).

Μεταγενέστερες μετρήσεις μέσω του δορυφόρου COBE, το 1989, έδωσαν τελική τιμή 2,7 Κέλβιν, που αντιστοιχεί σε φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος (Narlikar, 1999). Η θεωρία της Μ. Έκρηξης και συνεπώς οι υποθέσεις του Γκάμοφ, του Φρίντμαν και άλλων υποστηρικτών όχι μόνο εξηγούν την ύπαρξη της, αλλά την θεωρούν και αναμενόμενη. Στα πρώιμα στάδια του Σύμπαντος, όπως έχει προαναφερθεί η πυκνότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ξεπερνούσε την πυκνότητα ύλης. Με την διαστολή όμως του Σύμπαντος και την επερχόμενη ψύξη, η ύλη επικράτησε της ακτινοβολίας και η θερμοκρασία της έπεσε στα 2,7 Κέλβιν, ως απομεινάρι της παλαιότερης περιόδου και μάλιστα έπρεπε να είναι και διάχυτη παντού, με βάση την Κοσμολογική Αρχή (Hawking, 2000). Οι Αμερικάνοι αστρονόμοι πήραν βραβείο Νόμπελ το 1978 για την ανακάλυψη της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου, όπως ονομάστηκε (Pickover, 2016).



**Εικόνα 4.8** Διάγραμμα της έντασης(κάθετος άξονας) σε σχέση με το μήκος κύματος(οριζόντιος άξονας) της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις του δορυφόρου COBE. Από αυτά προέκυψε ότι η θερμοκρασία της αντιστοιχεί σε 2,7 Κέλβιν (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).

Την ίδια εποχή οι αστρονόμοι Ντίκ και Πίμπλς συμφώνησαν με τις υποθέσεις Γκάμοφ λέγοντας ότι στο μακρινό παρελθόν το σύμπαν έπρεπε να ήταν θερμό και πυκνό και ότι σίγουρα θα υπήρχαν αποδείξεις της αρχέγονης ακτινοβολίας, με καθυστέρηση φυσικά, λόγω του πεπερασμένου της ταχύτητας του φωτός. Η εκδοχή του Γκάμοφ επίσης επιβεβαιώθηκε μέσω της μέτρησης μεγαλύτερων ποσοτήτων του στοιχείου ηλίου στο Σύμπαν απ' ότι είναι δυνατόν να παραχθεί από τα άστρα (Hawking, 2000).

Η θεωρία της Μ. Έκρηξης φαίνεται να επικρατεί εκείνη την εποχή, ως αποτέλεσμα συμφωνίας αρχικά της ΓΘΣ, των μοντέλων Φρίντμαν, του Νόμου του Χάμπλ, του Φαινομένου Ράιλ και των δεδομένων από την ακτινοβολία υποβάθρου και τις ποσότητες Ηλίου στο Σύμπαν. Δεδομένου ότι σύμφωνα με τη θεωρία αυτή ο Χρόνος είχε μια αρχή τη στιγμή της Έκρηξης, η Ρωμαιοκαθολική Εκκλησία οικειοποιήθηκε τα νέα ευρήματα διακηρύσσοντάς ότι συνάδουν με τις ιδέες περί Δημιουργίας του κόσμου από τον Θεό, όπως περιγράφονται στη Βίβλο. Όπως και να έχει, χάρη στο έργο του Αϊνστάιν, η Επιστήμη μπόρεσε να βγάλει συμπεράσματα και να μελετήσει τα αρχικά στάδια της προέλευσης του Σύμπαντος. Βέβαια δημιουργήθηκε και το πρόβλημα της κατάρρευσης των φυσικών θεωριών στη αρχή της σημειακής ιδιομορφίας, κάτι το οποίο οδήγησε, όπως θα περιγραφεί παρακάτω, στην δημιουργία μιας νέας γενικευμένης θεωρίας, που θα καλύπτει όλες τις περιπτώσεις στο Σύμπαν.

## 4.2 Οι μαύρες τρύπες και άλλες αστρονομικές δομές που προκύπτουν ως λύσεις των εξισώσεων της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας

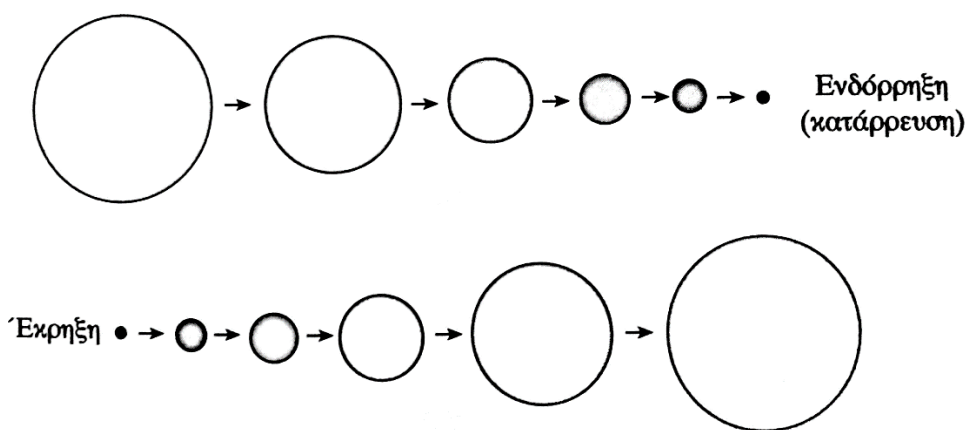
Μια πρόβλεψη, που προκύπτει από την λύση των εξισώσεων πεδίου της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας του Αϊνστάιν, είναι η ύπαρξη αστρονομικών αντικειμένων γνωστών ως μαύρες τρύπες ή μελανές οπές (Britzen, 2016). Ιστορικά, ο όρος αυτός επινοήθηκε για πρώτη φορά το 1967 από τον Αμερικανό αστρονόμο Τζόν Γουίλερ, ο οποίος εκτός των άλλων είχε συμβάλει και ενεργά στην κβαντική επανάσταση, που συντελούνταν εκείνη την εποχή (Ciufolini & Matzner, 2010). Η υπόθεση και περιγραφή, όμως, ενός τέτοιου αντικειμένου είχε επιτευχθεί πολύ παλαιότερα και συγκεκριμένα στα τέλη του 18ου αιώνα, από τον Άγγλο φυσικό Τζόν Μίτσελ. Αυτός, σε μια εργασία που δημοσίευσε στην Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου το 1783, υποστήριζε ότι το βαρυτικό πεδίο ενός άστρου συμπαγούς και με αρκετά μεγάλη μάζα, μπορεί να αναγκάσει σωματίδια φωτός που εκπέμπονται από την επιφάνεια του, να επιστρέφουν σε αυτό, χωρίς να είναι δυνατό να διαφύγουν. Ο Μίτσελ, μάλιστα, ανέφερε ότι αυτά θα μπορούσαν να γίνουν αντιληπτά από τις βαρυτικές επιδράσεις που θα είχαν στις γειτονικές τους περιοχές. Η ονομασία μαύρες παραπέμπει στην παρομοίωση τους με τα μαύρα κενά του διαστημικού χώρου.

Το 1799, την ίδια διατύπωση έκανε και ο Γάλλος μαθηματικός Πιέρ Σιμόν Λαπλάς στηριζόμενος στην Νευτώνεια θεωρία και τη σωματιδιακή φύση του φωτός. Οι μαθηματικές εργασίες του, τον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι, αν ένα ουράνιο αντικείμενο τεράστιας μάζας συμπιεστεί σε μικρό χώρο, η βαρύτητα του θα είναι τόσο ισχυρή, ώστε η ταχύτητα διαφυγής ενός σώματος από την επιφάνεια του, θα ήταν μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός. Φυσικά, για εκείνη την εποχή, οι διατυπώσεις αυτές δεν ήταν δυνατόν ούτε να μελετηθούν περαιτέρω, ούτε να παρατηρηθούν, εφ' ενός λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των διαθέσιμων οργάνων παρατήρησης και αφετέρου λόγω του γεγονότος ότι η Νευτώνεια θεωρία σε τέτοιες περιπτώσεις ισχυρής βαρύτητας, δεν δίνει ορθή περιγραφή των φαινομένων (Eisenstaedt, 2007).

Όπως αποδείχθηκε και στη συνέχεια η ΓΘΣ είναι η κατάλληλη θεωρία γι' αυτές τις περιπτώσεις και μάλιστα αυτό είναι και το μεγάλο πλεονέκτημα της έναντι της Νευτώνειας. Έχοντας αυτή διαθέσιμη, το 1965, ο Βρετανός μαθηματικός Ρότζερ Πένρόους στηριζόμενος στο πως συμπεριφέρονται οι κώνοι φωτός στην θεωρία του Αϊνστάιν και δεδομένου της, αποκλειστικά, ελκτικής φύσης της βαρύτητας έδειξε ότι ένα άστρο που καταρρέει, εγκλωβίζεται σε μια περιοχή του χωροχρόνου, όπου η έκταση της επιφάνειας του συρρικνώνεται

σε μηδενικό μέγεθος. Με άλλα λόγια όλη η ύλη του άστρου περιορίζεται σε μηδενικό όγκο, με συνέπεια η καμπυλότητα του χωροχρόνου και η πυκνότητα της ύλης σε αυτόν να απειρίζεται (Thorne, 2019).

Σε αυτή την περιοχή εμφανίζεται μια ανωμαλία, που δίνει την εικόνα της μαύρης τρύπας, περιγραφή παρόμοια με αυτή του μοντέλου της Μ. έκρηξης για την προέλευση του Σύμπαντος. Ωστόσο η μελέτη του Πενρόουζ αφορούσε αποκλειστικά τα υπό κατάρρευση άστρα, χωρίς να επιβεβαιώνει κάτι για την Μ. Έκρηξη. Την ίδια περίοδο, όμως, ο Άγγλος θεωρητικός φυσικός Στίβεν Χόκινγκ διαπίστωσε ότι εάν στην θεωρία του Πενρόουζ αντιστρέφονταν η κατεύθυνση του χρόνου, ώστε η συστολή να γίνει διαστολή, αυτή θα εξακολουθούσε να ισχύει και θα οδηγούσε σε ένα μοντέλο Φρίντμαν. Το 1970 επιβεβαιώθηκε ότι, με την προϋπόθεση ότι η ΓΘΣ ισχύει και το Σύμπαν περιέχει μόνο την παρατηρήσιμη ύλη, θα πρέπει να υπάρχει αυτή η ανωμαλία των μαύρων τρυπών και στην περίπτωση της Μ. Έκρηξης (Hawking, 2000).

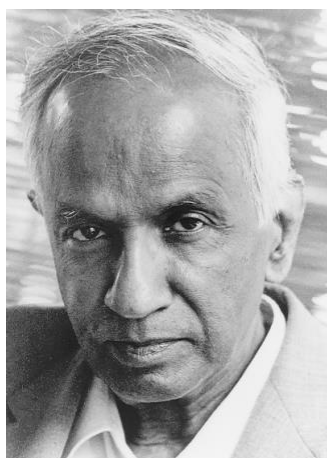


**Εικόνα 4.9** Η ακολουθία της βαρυτικής κατάρρευσης ενός άστρου (πάνω) λόγω εξάντλησης των πυρηνικών καυσίμων του, μοιάζει με την χρονοανεστραμμένη ακολουθία της Θεωρίας της Μ. Έκρηξης (κάτω) (Narlikar, 1999).

Επιστρέφοντας στο θέμα μετά τις σύντομες ιστορικές αναφορές για αυτό, ο σύγχρονος ορισμός της μαύρης τρύπας αφορά συγκεντρώσεις ύλης σε μικρό χώρο, από τον οποίο ούτε το φως αλλά και καμία πληροφορία γι' αυτόν δεν μπορεί να διαφύγει. Η τεράστια πυκνότητα και συνάμα το ισχυρό βαρυτικό πεδίο είναι η αιτία του παραπάνω φαινομένου (Breton, 2011). Σχετικά με τον τρόπο σχηματισμού της, η μαύρη τρύπα αποτελεί ένα από τα πιθανά τελικά στάδια της ύπαρξης ενός άστρου. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, όταν ένα άστρο εξαντλήσει τα πυρηνικά του καύσιμα, τότε μετατρέπεται σε ερυθρό γίγαντα, εκτοξεύοντας βίαια ύλη στον μεσοαστρικό χώρο ως έκρηξη σουπερνόβα. Από το στάδιο αυτό και έπειτα η μάζα του πυρήνα που απομένει, αποτελεί κριτήριο για την τελική του μορφή. Πιθανές εξελίξεις είναι να γίνει καφέ νάνος, αστέρας νετρονίων ή μαύρη τρύπα (Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).



Η τελική μορφή εξαρτάται από το αν η μάζα του εναπομείναντος πυρήνα είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από ένα όριο, συγκρινόμενο με την μάζα του δικού μας Ήλιου. Αυτό το όριο ονομάζεται Όριο Τσαντρασεκάρ, προς τιμή του Νομπελίστα το 1983, Ινδού αστρονόμου Σουμπραμανιάν Τσαντρασεκάρ, που το υπολόγισε. Το όριο αυτό ισούται με 1,5 φορές την μάζα του ήλιου μας. Αν ένα ψυχρό άστρο έχει μάζα μικρότερη από αυτό, τότε η συστολή του άστρου παύει και παραμένει σε ισορροπία λόγω του κβαντικού φαινομένου της πίεσης εκφυλισμού των ηλεκτρονίων. Η πίεση αυτή προέρχεται από την άπωση ηλεκτρονίων, εξισορροπώντας έτσι τη βαρυτική συστολή, με αποτέλεσμα το άστρο να γίνει λευκός νάνος.



*Εικόνα 4.10 Φωτογραφία του Σουμπραμανιάν Τσαντρασεκάρ (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).*

Αν η οριακή μάζα είναι μια ή δυο φορές μεγαλύτερη του ήλιου μας, τότε το άστρο καταλήγει σε αστέρα νετρονίων, στον οποίο εξισορροπητικό ρόλο έχει εδώ η άπωση νετρονίων και πρωτονίων (Modinos, 2014). Αν η μάζα του άστρου είναι μεγαλύτερη από το Όριο Τσαντρασεκάρ, οι απώσεις δεν μπορούν να σταματήσουν την καταστροφική κατάρρευση και καταλήγει σε μαύρη τρύπα. Μάλιστα, αν η οριακή μάζα είναι μεγαλύτερη από 3,2 Ηλιακές μάζες, αυτή έρχεται πολύ γρήγορα και ο πυρήνας του άστρου καταλήγει σε μια υπέρπυκνη κατάσταση (Hawking, 2000). Ο Αμερικανός φυσικός Ρόμπερτ Οπενχάιμερ, πρόσωπο που έχει συνδεθεί με το αμερικανικό πρόγραμμα κατασκευής της ατομικής βόμβας στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, απέδειξε το 1931 ότι αστέρες νετρονίων με μάζα από ένα όριο και πάνω θα κατέρρεαν βαρυτικά, χωρίς κανέναν νόμο της φύσης να μπορεί να την σταματήσει. Αυτό το γεγονός αποτελεί και μια επιβεβαίωση του υπολογισμού του Τσαντρασεκάρ (Pfister & King, 2015).

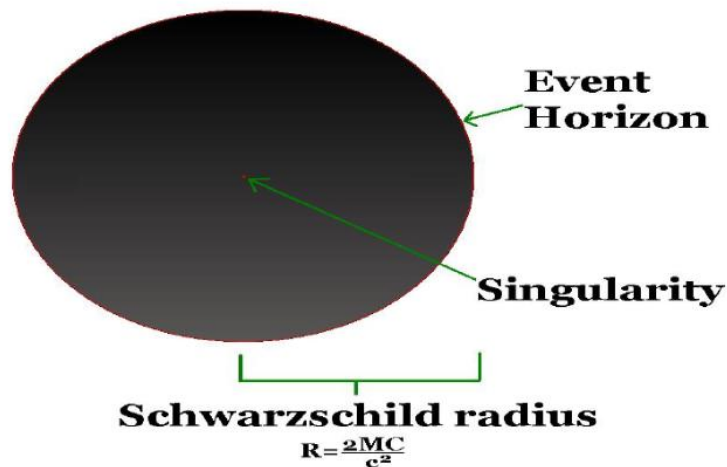
Συνεχίζοντας, καθώς το άστρο καταρρέει, η ακτίνα του μειώνεται και ταυτόχρονα η πυκνότητα του αυξάνεται. Η ΓΘΣ προβλέπει ότι μόλις η ακτίνα φτάσει μια οριακή τιμή, που είναι γνωστή ως ακτίνα Σβάρτσιλντ, το βαρυτικό του πεδίο δεν επιτρέπει ούτε στο φως να

ξεφύγει, οπότε γίνεται αυτομάτως αόρατο στην παρατήρηση. Η κρίσιμη αυτή ακτίνα  $R_s$  δίνεται από τον τύπο  $R_s = 2 \cdot G \cdot M / c^2$  και αποτελεί την ακτίνα που πρέπει να φτάσει το άστρο, για να γίνει κατά την διάρκεια της βαρυτικής του κατάρρευσης, μαύρη τρύπα. Η ακτίνα αυτή πήρε το όνομα της από τον Γερμανό αστροφυσικό Κάρλ Σβάρτσιλντ, ο οποίος έφτασε σε αυτή τη διατύπωση, μετά από λύση των εξισώσεων πεδίου της ΓΘΣ (Ferraro, 2007).



*Εικόνα 4.11 Φωτογραφία του Καρλ Σβάρτσιλντ (Grøn, Celebrating the centenary of the Schwarzschild solutions, 2016).*

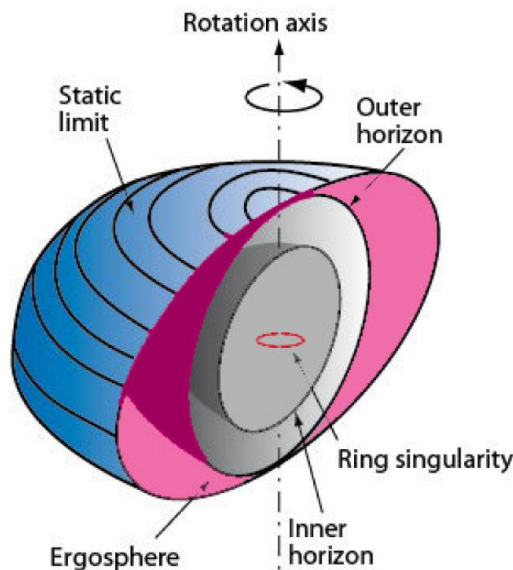
Η σφαιρική επιφάνεια, που ορίζεται από την ακτίνα Σβάρτσιλντ, ονομάζεται ορίζοντας γεγονότων της μελανής οπής. Η συστολή λόγω βαρύτητας συνεχίζεται και πέρα από αυτό το όριο για το άστρο, μέχρι να συνθλιβεί, πέφτοντας σε ένα περίεργο σημείο της οπής, που ονομάζεται σημειακή ιδιομορφία ή ανωμαλία. Αυτή είναι μια περιοχή του χωροχρόνου, όπου οι νόμοι της φυσικής δεν έχουν νόημα, αφού οι τεράστιες βαρυτικές επιδράσεις διαλύουν κάθε μορφή ύλης στα στοιχειώδη σωματίδια, τα οποία εν συνεχεία συμπιέζονται σε μια κατάσταση άπειρης πυκνότητας και παύουν να υπάρχουν (Gautreau, 2000).



*Εικόνα 4.12 Τα βασικά μέρη μιας μελανής οπής. Η περιφέρεια του σφαιρικού αντικειμένου αποτελεί τον ορίζοντα γεγονότων της οπής, ο οποίος ορίζεται από την ακτίνα Σβάρτσιλντ. Αυτή φέρεται από το κέντρο του αντικειμένου, που αποτελεί την μοναδικότητα η σημειακή ιδιομορφία της οπής. Σε αυτό το σημείο του χωροχρόνου έχει συγκεντρωθεί όλη η εναπομείνουσα μάζα του άστρου, λόγω βαρυτικής κατάρρευσης (Albanay, 2015).*

Οι μελανές οπές έχουν τρεις ιδιότητες, με βάση τις οποίες ταξινομούνται σε διάφορα είδη. Οι ιδιότητες αυτές είναι η ιδιοστροφορμή, η μάζα και το ηλεκτρικό φορτίο (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018). Ένα πρώτο είδος είναι η μαύρη τρύπα Σβάρτσιλντ. Ο Γερμανός φυσικός κατέληξε σε λύσεις των εξισώσεων της ΓΘΣ που περιγράφουν μια σφαιρική συμμετρία, η οποία έχει μάζα, αλλά όχι ηλεκτρικό φορτίο και στροφορμή. Η ύπαρξη της παραμορφώνει τον χωροχρόνο γύρω της και αν ένα αντικείμενο με μάζα μπει στο βαρυτικό της πεδίο, οι φασματικές γραμμές της μετατοπίζονται ολοένα και περισσότερο προς το ερυθρό, με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύεται από ένα σημείο εγγύτητας και έπειτα. Επίσης, ένας υποτιθέμενος παρατηρητής εντός της, θα αισθανόταν την βαρύτητα να αυξάνεται συνεχώς και κοντά στην σημειακή ιδιομορφία, οι παλιρροϊκές δυνάμεις θα ήταν τόσο ισχυρές, που θα τον διαμέλιζαν. Ταυτόχρονα, ο ίδιος ο χρόνος θα είχε σταματήσει γι' αυτόν, χωρίς να έχει κανένα νόημα πια (Anderson, 2017; Grøn, Celebrating the centenary of the Schwarzschild solutions, 2016).

Ένα άλλο είδος μελανής οπής είναι η μελανή οπή Κερ, η οποία προτάθηκε από τον Νεοζηλανδό φυσικό Ρόι Κερ, το 1963 και προκύπτει από την κατάρρευση ενός περιστρεφόμενου αστεριού. Αυτό μαρτυρά ότι η συγκεκριμένη οπή έχει μάζα αλλά και στροφορμή, ενώ ηλεκτρικά είναι ουδέτερη. Στην περίπτωση της ακόμη, παρατηρείται εκτός από τον σφαιρικό ορίζοντα γεγονότων και μια ελλειψοειδής επιφάνεια, που τον περιβάλλει εξωτερικά και εφάπτεται σε αυτόν. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται στατικό όριο και ο χώρος που ορίζεται ανάμεσα στους δυο ορίζοντες ονομάζεται εργόσφαιρα. Κάθε υλικό στοιχείο που εισέρχεται εντός της, περιστρέφεται και αυτό μαζί με την οπή και ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ένα μέρος του μπορεί να εισέλθει στην οπή ενώ άλλο μέρος του μπορεί να ξαναβγεί, μεταφέροντας πολύ μεγαλύτερη ενέργεια από την αρχική του μάζα (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009; Pfister & King, 2015). Αυτό το γεγονός δικαιολογείται από τον τύπο της ισοδυναμίας μάζας-ενέργειας και περιγράφεται λεπτομερώς από τον μηχανισμό Πενρόουζ. Ο μηχανισμός αυτός κέντρισε το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων που εργάζονται στον τομέα της ενέργειας, αφού μέσω της εργόσφαιρας της τρύπας Κερ, θα μπορούσε να παραχθεί αξιοποιήσιμη ενέργεια, δεδομένου ότι τεχνολογικά θα υπάρχουν οι δυνατότητες τοποθέτησης μιας ευρηματικής κατασκευής στο επίπεδο του στατικού ορίου της (Narlikar, 1999).



**Εικόνα 4.13** Η δομή μιας περιστρεφόμενης οπής Κερ. Στο σχέδιο φαίνεται με μπλε χρώμα το στατικό όριο, η εργόσφαιρα με κόκκινο χρώμα, ο εξωτερικός και ο εσωτερικός ορίζοντας καθώς και η ιδιομορφία στο κέντρο της, από όπου περνάει ο νοητός άξονας περιστροφής της (Tito & Pavlov, 2018).

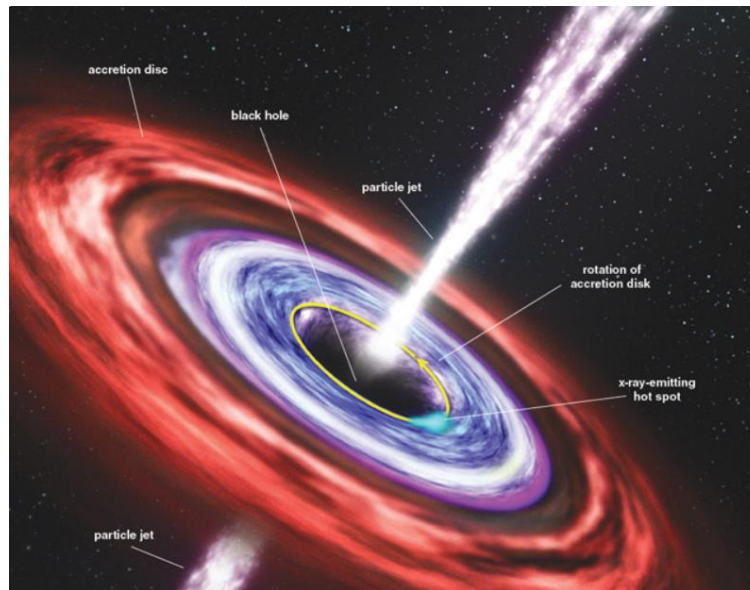
Άλλα δυο είδη μελανών οπών είναι η οπή Ράισνερ – Νόρντστρομ και η οπή Κερ – Νιούμαν. Η πρώτη αναφέρεται σε μαύρες τρύπες, που δεν παρουσιάζουν ιδοστροφορμή, αλλά έχουν μάζα και είναι ηλεκτρικά φορτισμένες, ενώ το άλλο είδος παραπέμπει σε γενίκευση της οπής Κερ και έχει και στροφορμή και ηλεκτρικό φορτίο. Στην περίπτωση που αυτές οι δυο ιδιότητες μηδενιστούν, το αποτέλεσμα δίνει μια μελανή οπή Σβάρτσιλντ, με τον ορίζοντα γεγονότων και το στατικό όριο να ταυτίζονται (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009).

Γενικότερα η ΓΘΣ προβλέπει ότι αντικείμενα με μάζα εντός των οπών καθώς οδηγούνται προς τη σημειακή ιδιομορφία, κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες συνεχώς αυξανόμενες. Αυτό συνεπάγεται ότι το μήκος του αντικειμένου συνεχώς θα μικραίνει και θα μηδενιστεί όταν φτάσει την ταχύτητα του φωτός. Παράλληλα η μάζα θα αυξάνεται, μέχρι να γίνει άπειρη και ο Χρόνος θα διαστέλλεται μέχρι να γίνει κι αυτός άπειρος, σημείο πέρα του οποίου θα ταυτίζεται με την αιωνιότητα. Επιπροσθέτως η αιτία της αύξησης της μάζας λόγω ταχύτητας, εκτός από τον Αϊνστάιν, εξηγήθηκε και από τον Ιταλό Γουίλιαμ Μπερτοζί. Όταν δοθεί ενέργεια σε ένα σώμα για να αυξήσει την ταχύτητα του σε μικρές κλίμακες, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας καταναλώνεται για την άνοδο αυτής και ελάχιστο μέρος της συσσωρεύεται στα δομικά συστατικά του ως δυναμική ενέργεια. Όμως, αν υποθεθεί ότι δίνεται άπειρη ενέργεια στο σώμα αυτό συνεχώς, όταν φτάσει σε σχετικιστικές ταχύτητες, το φαινόμενο αντιστρέφεται. Τότε, ένα ελάχιστο μέρος της ενέργειας καταναλώνεται στην περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας και το μεγαλύτερο μέρος της αποθηκεύεται στα δομικά του στοιχεία, μεταβάλλοντας την αισθητή του μορφή και την αδρανειακή του κατάσταση.

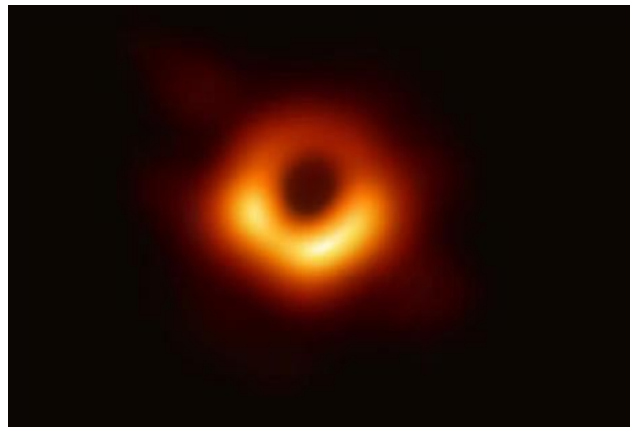
Με άλλα λόγια αυξάνεται η μάζα του, αλλά χωρίς να αυξάνεται και ο όγκος του (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018).

Ένα άλλο θέμα που πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο είναι ο τρόπος ανίχνευσης μια μελανής οπής. Φυσικά αυτός ο τρόπος γίνεται έμμεσα, αφού όπως εξηγήθηκε και παραπάνω η μαύρη τρύπα δεν αφήνει ούτε το φως να διαφύγει από αυτή, οπότε δεν μπορεί να μελετηθεί από τα αστρονομικά όργανα απευθείας. Ένας τρόπος, έγκειται στην ροή ύλης ενός αστεριού που περιφέρεται γύρω από μια μαύρη οπή. Η ροή ύλης συμβαίνει λόγω των ισχυρών παλιρροϊκών δυνάμεων, που προκαλεί το βαρυτικό της πεδίο με αποτέλεσμα η αποσπώμενη ύλη να ακολουθεί την σπειροειδή τροχιά της, δημιουργώντας ένα δίσκο που ονομάζεται δίσκος προσαύξεσης. Έχει υπολογιστεί ότι η θερμοκρασία σε αυτόν υπερβαίνει τους 1.000.000 βαθμούς, κάνοντας τον να εκπέμπει ακτίνες X, που μπορούν να ανιχνευθούν. Αν η μελανή οπή είναι μέρος ενός διπλού αστρικού συστήματος, εντοπίζεται, τόσο από τις βαρυτικές επιδράσεις σε γειτονική ύλη, όσο και από την παρουσία ακτινών X (Breton, 2011; Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).

Άλλος τρόπος ανίχνευσης του αποτελεί η παρατήρηση μεγάλων ταχυτήτων των υλικών αντικειμένων που πλησιάζουν την οπή, καθώς είναι της τάξης των  $1,5 \cdot 10^6$  Km/h αλλά και από τα έντονα φαινόμενα βαρυτικών φακών, που προκαλούν αυτές λόγω της τεράστια βαρύτητας τους και όπως προβλέπει η ΓΘΣ. Επιπλέον, μαύρες τρύπες θεωρείται ότι σχηματίζονται και στα κέντρα των γαλαξιών και μάλιστα συνοδεύονται από παρατηρήσιμα φαινόμενα. Ένα από αυτά είναι η εικόνα γειτονικών αστερών να περιφέρονται σε μεγάλη ταχύτητα γύρω από ένα μη ορατό ελκτικό κέντρο, σχηματίζοντας δίσκους προσαύξεσης, που αργότερα εισέρχονται στο πεδίο της οπής. Στην συνέχεια εκτοξεύονται ταχύτατα πίδακες ιονισμένου αερίου κατά μήκος του άξονα περιστροφής της μαύρης τρύπας. Αυτοί είναι οι λεγόμενοι πίδακες ροής, το αέριο των οποίων, εγκλωβισμένο σε στενές δέσμες, προκαλεί μαγνητικά πεδία, τα οποία προσανατολίζονται στο μήκος του άξονα του αόρατου κέντρου (Hawking, 2000; Thorne, 2019).



**Εικόνα 4.14** Καλλιτεχνική απεικόνιση περιστρεφόμενης οπής. Οι πίδακες ροής ιονισμένου αερίου φαίνονται κατά μήκος του άξονα που περνάει από το αόρατο κέντρο της (Hlavacek, 2013).



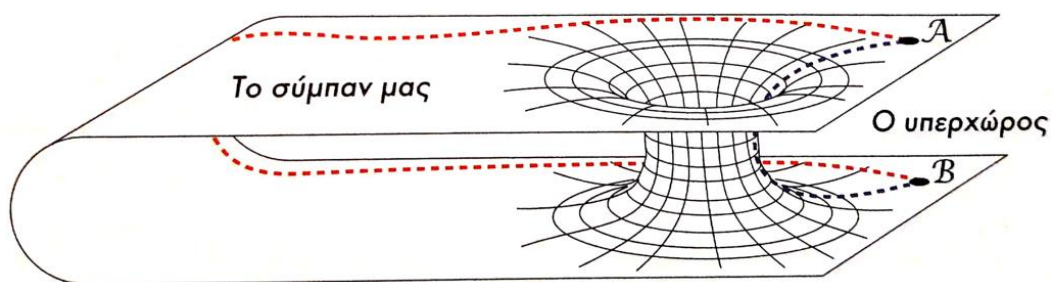
**Εικόνα 4.15** Φωτογραφία υπερμεγέθους μελανής οπής στο κέντρο του γαλαξία M87. Η λήψη της έγινε το 2019 από το Event Horizon Telescope και ήταν αποτέλεσμα συνεργασίας πολλών ραδιοτηλεσκοπίων σε Ευρώπη, Αμερική και Ανταρκτική (Kalhor & Mehrparvar, 2020).

Εκτός από τις μελανές οπές, υπάρχουν και άλλα παράξενα αντικείμενα που προκύπτουν ως μαθηματικές λύσεις των εξισώσεων του Αϊνστάιν και παραμένουν μέχρι στιγμής σε υποθετικό επίπεδο, τα οποία είναι οι σκουληκότρυπες και οι λευκές τρύπες. Οι πρώτες, που στην Αγγλική γλώσσα είναι γνωστές ως wormholes, πήραν το όνομα τους και αυτές από τον Τζόν Γουίλερ, αφού τις παρομοίασε με τις ανάλογες τρύπες που δημιουργούν τα σκουλήκια στα μήλα. Προκειμένου αυτά να φτάσουν στην άλλη άκρη του μήλου, πολλές φορές σχηματίζουν μια τρύπα που είναι και η συντομότερη διαδρομή άφιξης στην άλλη του πλευρά. Το 1960 ο Αυστριακός μαθηματικός και φυσικός Λούντβιχ Φλαμ βρήκε μια λύση των εξισώσεων της ΓΘΣ, που παρέπεμπε σε αυτές. Κύριο χαρακτηριστικό τους ήταν το απόλυτα σφαιρικό σχήμα, ενώ δεν περιείχαν ύλη, που να επηρεάζεται από τη βαρύτητα. Το 1939 ο Αϊνστάιν και ο Αμερικανός φυσικός Νείθαν Ρόζεν, ανεξάρτητα, ανακάλυψαν και

αυτοί μια λύση που ταίριαζε με αυτή του Φλαμ, οπότε προσπάθησαν να κάνουν εικασίες για την σημασία της στο φυσικό κόσμο. Αυτή η ανακάλυψη διατυπώθηκε ως γέφυρα Αϊνστάιν-Ρόζεν. Έτσι λοιπόν η σκουληκότρυπα ή γέφυρα Αϊνστάιν-Ρόζεν, θεωρείται η κοσμική σήραγγα που αποτελείται από στρεβλωμένο χωροχρόνο, συνδέοντας δυο περιοχές του Σύμπαντος μεταξύ τους (Ciufolini & Matzner, 2010).

Η δομή αυτής της σήραγγας ενώ μοιάζει με το εσωτερικό μιας μαύρης τρύπας, δεν έχει δημιουργηθεί από κάποια μάζα. Αν και δεν έχουν παρατηρηθεί μέχρι σήμερα, θεωρητικά θα μπορούσαν να είναι πιθανές φυσικές μηχανές ταξιδιού στο χρόνο. Ο Αμερικανός φυσικός Κιπ Θόρν θεωρεί ότι αποτελούν παρακάμψεις που συνδέουν δυο περιοχές του Σύμπαντος διαφορετικών χρονικών περιόδων (Thorne, 2019). Παρομοίως ο Στίβεν Χόκινγκ αναφέρει ότι πρόκειται για λεπτούς σωλήνες χωροχρόνου μέσω των οποίων επιτρέπονται ταξίδια στο παρελθόν με ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτές του φωτός (Hawking, 2000).

Όπως και να έχει οι Αϊνστάιν και Ρόζεν, μελετώντας τις λύσεις τους, υπέθεσαν ότι αν υπάρχουν οι σκουληκότρυπες, δεν θα μπορούσαν να διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς μετά την δημιουργία τους στενεύουν και αποκόπτονται, οπότε κανένα σύγχρονο διαστημόπλοιο δεν θα προλάβαινε να τις διασχίσει. Ο μόνος τρόπος να διατηρηθούν ανοιχτές είναι να χρησιμοποιηθεί ύλη αρνητικής ενεργειακής πυκνότητας ή εναλλακτικά να βρεθεί η σήραγγα σε χωροχρονική περιοχή αρνητικής καμπυλότητας. Υπενθυμίζεται ότι η συνήθης ύλη έχει θετική ενεργειακή πυκνότητα και οι κλασικοί νόμοι προβλέπουν ότι τέτοιοι σχηματισμοί θα ήταν εξαιρετικά ασταθείς, όπως επίσης απαγορεύουν τα ταξίδια στον χρόνο, τουλάχιστον μέχρι στιγμής (Ciufolini & Matzner, 2010).



**Εικόνα 4.16** Σχηματική αναπαράσταση μιας σήραγγας Ρόζεν-Αϊνστάιν, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις της ΓΘΣ (Thorne, 2019).

Άλλη υποθετική περιοχή του χωροχρόνου με ιδιότητες ακριβώς αντίθετες από τις μελανές οπές αποτελεί η λευκή τρύπα. Σε ένα τέτοιο σχηματισμό ένα υλικό σώμα δεν θα μπορούσε να εισχωρήσει σε αυτή και να φτάσει τον ορίζοντα γεγονότων της. Ακόμη η περιοχή αυτή δεν σχηματίζεται από βαρυτική κατάρρευση άστρων, όπως οι μαύρες τρύπες, οπότε είναι άγνωστο τι προκαλεί την έναρξη τους. Παρόλα αυτά έχουν και αυτές ιδιότητες

όπως φορτίο, μάζα, στροφορμή, ενώ ύλη και φως μπορούν να εκτοξευτούν από αυτές. Γενικώς θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι λευκές τρύπες είναι η χρονοανεστραμμένη εκδοχή του καταρρέοντος άστρου, λόγω του γεγονότος ότι η ΓΘΣ είναι συμμετρική στην αντιστροφή του Χρόνου, επιτρέποντας το θεωρητικά (Anderson, 2017). Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδέα γι' αυτές είναι ότι μπορεί να εξηγούν την Μ. Έκρηξη, αφού τα διαθέσιμα στοιχεία γι' αυτή δείχνουν ότι αντιπροσωπεύει μια κατάσταση, που τεράστια ποσότητα ύλης και ενέργειας εμφανίστηκαν αυθόρμητα. Τέλος άλλες υποθέσεις συνδέουν τις μαύρες με την λευκές τρύπες θεωρώντας ότι η ύλη που εισάγεται στις πρώτες εξέρχεται σε άλλο σημείο του Σύμπαντος μέσω των δευτέρων (Thorne, 2019).

Κλείνοντας αυτό το υποκεφάλαιο αξίζει να γίνει αναφορά και σε δυο άλλες υποθετικές έννοιες, που όμως προέκυψαν από επιβεβαιωμένες παρατηρήσεις και σχετίζονται με την μελέτη της βαρύτητας. Αυτές είναι η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια, όπως είναι γνωστές. Γύρω στο 1930 ο Ελβετός αστρονόμος Φρίτζ Ζουίκι μελετώντας ένα γαλαξιακό σμήνος ονόματι Κόμα, διαπίστωσε κάτι ασυνήθιστο σχετικά με την κίνηση των γαλαξιών. Ο Ζουίκι εύλογα θεωρούσε ότι η φωτεινότητα των γαλαξιών είναι ένα δείγμα της μάζας που περιέχουν και προσπάθησε να την μετρήσει. Από την άλλη υπάρχει και ένα άλλος τρόπος μέτρησης της μάζας τους, μέσω των ταχυτήτων περιφοράς των γαλαξιών στο σμήνος και με βάση τις υπάρχουσες θεωρίες της βαρύτητας, αφού αυτή προκαλεί την κίνησή τους. Όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο του, έπρεπε να αυξάνεται η ταχύτητα περιφοράς των γαλαξιών εντός του σμήνους και να μειώνεται για εκείνους που βρίσκονται στις εξωτερικές περιοχές, λόγω της βαρυτικής έλξης, που ασκούνται από αυτούς των εσωτερικών περιοχών. Εύλογο, επίσης, ήταν ότι οι δυο τρόποι υπολογισμού έπρεπε να δίνουν την ίδια τιμή για την ποσότητα ύλης που περιέχεται στο σμήνος (Δεληβοριάς, 2018).

Προς μεγάλη έκπληξη ο Ζουίκι διαπίστωσε ότι η μάζα που υπολόγισε μέσω της φωτεινότητας, ήταν πολύ μικρότερη από αυτή μέσω της βαρύτητας και ως εκ τούτου αν όλη η ύλη που περιέχεται στο σμήνος ήταν μόνο η ορατή και παρατηρήσιμη, δεν μπορούσε να δικαιολογήσει με τίποτα τις μετρήσεις της ταχύτητας των γαλαξιών. Άρα ο νόμος της βαρύτητας, τόσο ο Νευτώνειος όσο και ο σχετικιστικός, φαινόταν να παραβιάζεται. Μια ριζοσπαστική ερμηνεία της συγκεκριμένης κατάστασης δόθηκε από τον ίδιο τον Ζουίκι, ο οποίος διατύπωσε ότι οι γαλαξίες φέρουν αόρατη ύλη στις εξωτερικές περιοχές τους. Στην γενίκευση του αυτό σήμαινε ότι το Σύμπαν περιέχει πολύ περισσότερη ύλη από αυτή που παρατηρείται με τα αστρονομικά όργανα και μάλιστα ο λόγος της αόρατης προς την ορατή έπρεπε να είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Η αόρατη αυτή ύλη ονομάστηκε σκοτεινή ύλη (Ferreira & Starkman, 2009).





**Εικόνα 4.17** Διάγραμμα της ταχύτητας περιφοράς των άστρων σε σχέση με την απόστασή τους από το κέντρο του γαλαξία. Η κίτρινη καμπύλη δείχνει τις αναμενόμενες τιμές βάσει τη παρατηρούμενης ύλης, ενώ η πράσινη καμπύλη δείχνει τα πραγματικά αποτελέσματα των μετρήσεων (Δεληβοριάς, 2018).

Ο ορισμός της περιλαμβάνει κάθε μορφή ύλης στο Σύμπαν, που δεν μπορεί να παρατηρηθεί με αστρονομικές μεθόδους ή αλλιώς κάθε μορφή ύλης, που δεν αλληλεπιδρά με το φως (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018). Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να εντοπιστεί με έμμεσες μεθόδους, όπως από τα βαρυτικά αποτελέσματα της στις γύρω περιοχές, εφόσον η βαρύτητα είναι ιδιότητα κάθε μορφής ύλης. Βάσει αυτών, μπορεί μια μορφή σκοτεινής ύλης να είναι η μελανή οπή, καθώς έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά όπως αναπτύχθηκε προηγουμένως. Μπορεί ακόμη να είναι μικροί μη φωτοβόλοι σβόλοι ύλης, που αποτελούν τους καφέ νάνους ή εξωτική ύλη που εδρεύει στην άλω των γαλαξιών. Από το 1993 και έπειτα ομάδες αστρονόμων έχουν προσπαθήσει να εντοπίσουν τη σκοτεινή ύλη με τεχνικές, που στηρίζονται στην ιδιότητα της να δρα ως βαρυτικός φακός μέσω της επιρροής τους στο φως, που διέρχεται κοντά σε αυτή. Ένα άλλο θέμα που προκύπτει είναι ότι αν γίνει αποδεκτή, θέτει προβλήματα στην θεωρία της Μ. Έκρηξης, καθώς η αφθονία δευτερίου θα μειωνόταν απότομα και η διακύμανση της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου θα έπρεπε να είναι της τάξης των δεκάκις χιλιοστών, κάτι που δεν έχει παρατηρηθεί, επιβεβαιώνοντας συνάμα ότι δεν αλληλοεπιδρά με το φως. Επίσης η αφθονία δευτερίου μαρτυρά ότι η σκοτεινή ύλη δεν είναι βαρυονική προέλευσης, δηλαδή δεν αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια (Carozziello & De Laurentis, 2011).

Οι σύγχρονες Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες επιτρέπουν την ύπαρξη σωματιδίων με το όνομα ασθενώς αλληλοεπιδρώντα βαριά σωματίδια όπως το φωτίνιο και το αξίνιο, που κινούνται σε ταχύτητες κοντά σε αυτή του φωτός. Αυτά τα μη βαρυονικά σωματίδια θα μπορούσαν να αποτελούν θερμή και ψυχρή σκοτεινή ύλη. Το νετρίνο για παράδειγμα θα μπορούσε να αποτελεί, λόγω μηδενικής μάζας, την θερμή σκοτεινή ύλη, ενώ ένα αντίστοιχο σωματίδιο ψυχρής σκοτεινής ύλης θα κινούνταν πολύ αργά. Όλα αυτά αποτελούν , φυσικά,

απλά ιδέες, που επιχειρούν να καλύψουν το έλλειμμα που παρουσιάζει η φωτεινή και ορατή ύλη, μέχρι να βρεθεί ένας επιβεβαιωμένος τρόπος εντοπισμού τους. Ορισμένοι επιστήμονες μάλιστα ισχυρίζονται ότι ίσως η σκοτεινή ύλη να μην υπάρχει, αλλά η αδυναμία εξήγησης αυτού του ελλείματος, να οφείλεται σε αδυναμίες ή λάθη των θεωριών της βαρύτητας (Hawking, 2000; Narlikar, 1999).

Παρόμοιες υποθέσεις διατυπώθηκαν και για μια άλλη υποθετική μορφή ενέργειας, αυτή η φορά, τη σκοτεινή ενέργεια, μετά από την επιβεβαίωση το 1998 ότι το Σύμπαν διαστέλλεται με επιταχυνόμενο ρυθμό. Η κλασική επιστημονική άποψη θεωρούσε ότι η διαστολή του Σύμπαντος έπρεπε να επιβραδύνεται, όσο απομακρύνεται κανείς από τη Γη, λόγω των ελκτικών βαρυτικών δυνάμεων της ύλης των εσωτερικών περιοχών σε αυτή στις εξωτερικές. Οι μετρήσεις και παρατηρήσεις έδειξαν όμως ότι η ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξιών αυξάνεται επιταχυνόμενα, όσο απομακρυνόμαστε από τη Γη (Δεληβοριάς, 2018). Οι (Δανέζης & Θεοδοσίου, 2018) αναφέρουν ότι σε ένα σύγχρονο «σώζουν τα φαινόμενα» επινοήθηκε ο όρος σκοτεινή ενέργεια. Αυτή η μορφή ενέργειας πρέπει να είναι απωστικής φύσεως, αντιτιθέμενη στην ελκτική φύση της βαρύτητας και υπολογίζεται ότι αποτελεί το 68% της συνολικής υλοενέργειας, επιτρέποντας στο Σύμπαν να διαστέλλεται επιταχυνόμενα (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015). Αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να είναι αραιή από άποψη πυκνότητας, διάχυτη παντού και να έχει ισχυρή αρνητική πίεση. Φυσικά όλα αυτά είναι υποθέσεις, ενώ έχει συνδεθεί και με την Κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$ , που εισήγαγε ο Αϊνστάιν για λόγους, που έχουν ήδη αιτιολογηθεί, καθώς είχε τον ίδιο ρόλο. Εδώ τίθεται το ερώτημα αν τελικά ο Αϊνστάιν δεν έκανε λάθος, όπως και ο ίδιος είχε παραδεχθεί, μετά τα δεδομένα για την διαστολή του Σύμπαντος (Triay, 2010).

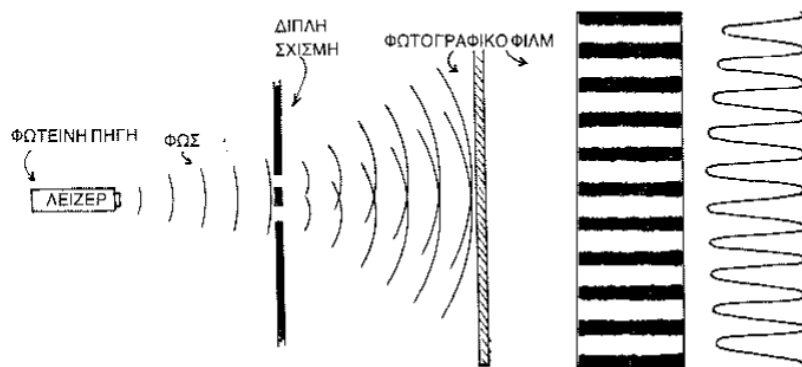
### **4.3 Η Κβαντική Φυσική και η ανάγκη διατύπωσης μιας θεωρίας για την κβαντική βαρύτητα**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι προσπάθειες των επιστημόνων αλλά και οι λόγοι που τους οδήγησαν στην διατύπωση μιας θεωρίας για την Κβαντική βαρύτητα, μια θεωρία που σχετίζεται με τον Μικρόσκοπο των υποατομικών σωματιδίων. Ωστόσο κρίνεται σκόπιμο να γίνει πρώτα μια σύντομη ιστορική εισαγωγή με σημαντικές ανακαλύψεις, που συνέβαλαν στη γέννηση της Κβαντικής Φυσικής αλλά και να αναφερθούν στην συνέχεια οι βασικοί νόμοι που την απαρτίζουν, στοιχεία απαραίτητα για την νοηματική συνοχή του θέματος της εργασίας.

Ξεκινώντας, οι δυο θεωρίες βαρύτητας που έχουν μελετηθεί μέχρι στιγμής είναι η Νευτώνεια και η ΓΘΣ, που δεν την αναιρεί, αλλά αποτελεί μια επέκταση της, ώστε να δίνει λύσεις σε περιοχές όπου τα βαρυτικά φαινόμενα είναι ισχυρά, κάτι που αδυνατούσε η πρώτη. Η ΓΘΣ μαζί με άλλες ανακαλύψεις, που συνέβαλαν στην μελέτη των απομακρυσμένων περιοχών του σύμπαντος αλλά και τη διατύπωση μιας θεωρίας για την προέλευση και εξέλιξη του, αφορούν τον Μεγάκοσμο, δηλαδή δομές οι οποίες ανήκουν σε μεγαλύτερη κλίμακα από αυτές που συναντούν οι άνθρωποι στην καθημερινή τους ζωή και παρατήρηση. Για την τελευταία περίπτωση και μέχρι την μελέτη του Ηλιακού μας συστήματος, αρκεί η Νευτώνεια θεωρία.

Στις αρχές του 1800 ο Άγγλος φυσικός Τόμας Γιάνγκ πραγματοποίησε ένα πείραμα, προκειμένου να αποδείξει ότι η θεωρία του Νεύτωνα για τη σωματιδιακή φύση του φωτός δεν ευσταθεί. Αυτό το πείραμα είναι γνωστό ως το πείραμα των δυο σχισμών. Μια πηγή φωτός αποστέλλει δέσμες σε ένα αδιαφανές πέτασμα, στην επιφάνεια του οποίου έχουν χαραχτεί δυο λεπτές και πολύ κοντινές ορθογώνιες σχισμές, καταλήγοντας σε ένα τοίχο. Το αποτέλεσμα ήταν να προκληθούν σε όλο τον τοίχο και όχι μόνο στα σημεία πίσω από τις σχισμές, εναλλασσόμενα σχέδια φωτεινών και σκοτεινών λωρίδων. Αυτό δικαιολογήθηκε με βάση τα φαινόμενα συμβολής και περίθλασης του φωτός, τα οποία αποδείκνυαν την κυματική του φύση και στήριζαν την επικρατούσα, μέχρι τότε, θεωρία του Χόιχενς (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Ωστόσο, όταν το πείραμα επαναλήφθηκε πολλές φορές, μεταγενέστερα και ειδικά μετά την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Αϊνστάιν και τις ανακαλύψεις των ηλεκτρονίων, η χρήση δεσμών σωματιδίων έδωσε το ίδιο αποτέλεσμα, γεγονός που μαρτυρούσε ότι και τα σωματίδια επιδεικνύουν κυματική συμπεριφορά. Αυτό έδωσε αδιάψευστα επιχειρήματα για την διττή φύση τους φωτός, ως ρεύματα σωματιδίων αφενός, τα επονομαζόμενα φωτόνια και αφετέρου ως κύμα (Ζδέτσης, 2003).



**Εικόνα 4.18** Η διάταξη του πειράματος της διπλής σχισμής. Στα δεξιά φαίνονται οι σχηματισμοί πάνω στο φωτογραφικό φιλμ. Τα αποτελέσματα του πειράματος δίνουν την ίδια εικόνα είτε ερμηνευτεί με την σωματιδιακή φύση του φωτός είτε με την κυματική, γεγονός που αποδεικνύει την διττή φύση του (Hewitt P. , 1997).

Συνεχίζοντας την ιστορική αναδρομή, η ανακάλυψη αόρατων στην παρατήρηση δια γυμνού οφθαλμού ακτινοβολιών, οδήγησε τους επιστήμονες στο συμπέρασμα, ότι τα άτομα έχουν εσωτερική δομή. Συγκεκριμένα το 1895 ο Γερμανός Βίλχελμ Ρέντγκεν ανακάλυψε τις ακτίνες X, των οποίων η διεισδυτικότητα σε διάφορα υλικά, επιβεβαίωσε ότι είναι ένα είδος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας και μικρού μήκους κύματος συγκριτικά με τις αποστάσεις των ατόμων μέσα στα μόρια τους (Pickover, 2016). Επιπροσθέτως, το 1896, ο Γάλλος Αντουάν Μπεκερέλ και οι Γάλλοι Νομπελίστες Μαρί και Πιέρ Κιουρί ανακάλυψαν την ραδιενέργεια, η οποία εμφανίζεται σε τρεις μορφές. Μία από αυτές είναι τα σωματίδια α, δηλαδή γυμνοί πυρήνες ηλίου, ενώ μια άλλη τα σωματίδια β, αποτελούνται από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας (NCERT, 2021). Η τρίτη μορφή είναι οι ακτίνες γ, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής ενέργειας, που ανακαλύφθηκε το 1900 από τον Γάλλο χημικό Πωλ Βιγιάρ (Al-Khalili, 2005).

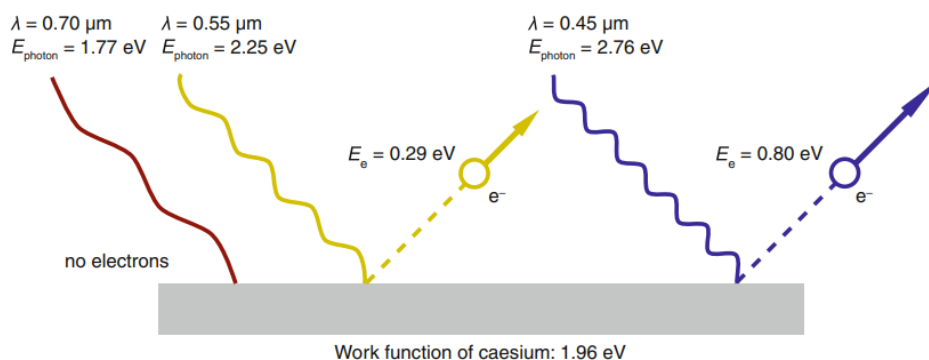
Το 1897 ο Άγγλος Τόμσον ανακάλυψε σωματίδια, τα οποία αποτελούσαν τις καθοδικές ακτίνες σε ένα σωλήνα υψηλού κενού. Αυτά, εκτός από το ότι ήταν παντού πανομοιότυπα, είχαν και τον ίδιο λόγο ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα. Ο Τόμσον διαπίστωσε ότι ήταν φορείς μορφών ηλεκτρισμού και ονομάστηκαν ηλεκτρόνια (Pickover, 2016). Μια σημαντική υπόθεση διατυπώθηκε και από τον Γερμανό Μαξ Πλάνκ το 1900, η οποία συνίστατο στο ότι η ακτινοβολία που απορροφούν ή εκπέμπουν μέλανα σώματα δεν γίνεται με συνεχή τρόπο, αλλά με διακριτά πακέτα ενέργειας (Hewitt P. , 1997).

Στην συνέχεια ο Άλμπερτ Αϊνστάιν, λαμβάνοντας υπόψιν την υπόθεση Πλάνκ, εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, παίρνοντας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, βραβείο Νόμπελ γι' αυτή την εργασία. Το φαινόμενο αυτό αναδύθηκε ύστερα από παρατηρήσεις προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε μέταλλα. Τα ηλεκτρόνια αποσπώνται από την επιφάνεια του μετάλλου, μόνο όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας ήταν μεγαλύτερη ή ίση

με μια κρίσιμη τιμή, που ονομάστηκε συχνότητα κατωφλίου. Επίσης ο αριθμός των αποσπασμένων ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε να είναι ανάλογος της έντασης της ακτινοβολίας, ενώ η εκπομπή ηλεκτρονίων, που αποτελούσε πέρα από το φως και την κινητική τους ενέργεια, εμφανιζόταν να είναι ανάλογη της συχνότητας και ανεξάρτητη της έντασης (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015).

Η Κλασική Φυσική δεν μπορούσε να ερμηνεύσει αυτές τις παρατηρήσεις, αφού σύμφωνα με τους νόμους της, ένα σώμα απορροφά ή εκπέμπει ακτινοβολία κατά συνεχή τρόπο. Αυτό συνεπάγεται ότι η εκπομπή είναι ανεξάρτητη της συχνότητας, ότι η μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας και ότι η απελευθέρωση τους θα απαιτούσε φωτισμό μεγάλης διάρκειας. Οι παρατηρήσεις, όμως, δεν επιβεβαίωναν κανένα από τα τρία δεδομένα. Ο Αϊνστάιν για να το ερμηνεύσει, υπέθεσε ότι η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν μεταφέρεται συνεχώς, αλλά σε διακριτές ποσότητες, που ονομάστηκαν φωτόνια ή κβάντα φωτός ή πακέτα ενέργειας. Η ενέργεια του καθενός δίνεται από τον τύπο  $E_{\phi} = h \cdot f$ , όπου  $h$  η σταθερά του Πλανκ και  $f$  η συχνότητα της ακτινοβολίας (T.Cushing, 2003).

Βάση της εικόνας αυτής κάθε φωτόνιο δίνει όλη την ενέργεια σε ένα ηλεκτρόνιο του μετάλλου κάθε φορά και αν αυτή είναι αρκετή, τότε αυτό απελευθερώνεται από τον πυρήνα του ατόμου, διαφορετικά, την απορροφά και την εκπέμπει αυτούσια στο περιβάλλον. Αυτό εξηγεί την αιτία που η μικρή συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε σχέση με αυτή του κατωφλίου δεν φορτίζει το μέταλλο, όσο και αν φωτιστεί. Άρα ο αυξανόμενος αριθμός των φωτονίων, δηλαδή η αύξηση της έντασης δεν διαδραματίζει κανένα ρόλο στο φαινόμενο, σε αντίθεση με την αύξηση της ενέργειας των φωτονίων, δηλαδή την μείωση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας ή την αύξηση της συχνότητας της (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).



**Εικόνα 4.19** Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στην περίπτωση του καϊσίου η συχνότητα κατωφλίου είναι 1,96 eV. Εάν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει συχνότητα μικρότερη από αυτή, όπως η κόκκινη, δεν αποσπώνται ηλεκτρόνια από το μέταλλο, όσο χρόνο και αν φωτιστεί με αυτή. Εάν όμως η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει μεγαλύτερη συχνότητα από την συχνότητα κατωφλίου, όπως η κίτρινη και η μπλε, τότε αποσπώνται ηλεκτρόνια από το μέταλλο. Οι νόμοι της Κλασικής Φυσικής αδυνατούσαν να ερμηνεύσουν το φαινόμενο αυτό, πράγμα που έκανε ο Αϊνστάιν στηριζόμενος στη θεωρία των κβάντων φωτός, που είχε ήδη υποθέσει ο Πλάγκ (Varvoglis, 2014).

Συμπερασματικά για το φως, ορισμένες συχνότητες, αλλά μεταβλητής έντασης, οδηγούν σε σταθερή ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων, παρά το γεγονός ότι αυξάνεται ο αριθμός τους λόγω έντασης. Τα φωτοηλεκτρόνια εκπέμπονται, μόνο αν η προσπίπτουσα συχνότητα περάσει το όριο αυτής του κατωφλίου, που συμβολίζεται με  $f_0$  και είναι διαφορετική για κάθε μέταλλο. Επίσης η κινητική ενέργεια των φωτονίων αυξάνει γραμμικά μόνο λόγω αύξησης συχνότητας και όχι λόγω έντασης. Η ονομασία Κβάντο δηλώνει ένα ακέραιο πολλαπλάσιο μια μονάδας φωτός ή φωτονίου της ποσότητας, που δίνεται από το γινόμενο  $h \cdot f$ . Η ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Αϊνστάιν σηματοδοτεί την ανάπτυξη ενός κλάδου της Φυσικής, με νόμους για τα υποατομικά σωματίδια διαφορετικούς της Κλασικής Φυσικής, που ονομάζεται εύλογα, από την υπόθεση Πλανκ, Κβαντική Φυσική (Modinos, 2014).

Οι εξελίξεις συνεχίζονται σε αυτό τον τομέα παράλληλα με την ανάπτυξη των ριζοσπαστικών θεωριών της ΕΘΣ και της ΓΘΣ από τον Άλμπερτ. Στις αρχές του 1900 ο Νεοζηλανδός φυσικός Έρνεστ Ράδερφορντ ανέτρεψε το μοντέλο του «σταφιδόψωμου», όπως είχε ονομαστεί από τον Τόμσον, που υπέθετε ότι τα ηλεκτρόνια ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένα σε μια σφαίρα θετικού φορτισμένου υλικού. Μάλιστα το 1911 δυο βοηθοί του Ράδερφορντ καθώς μελετούσαν συγκρούσεις σωματιδίων  $\alpha$ , εκπεμπόμενα από ραδιενεργό πηγή σε λεπτό έλασμα χρυσού, συνειδητοποίησαν ότι τα άτομα έχουν πολύ κενό χώρο μεταξύ τους και ότι τα θετικά φορτισμένα σωματίδια έπρεπε να είναι συγκεντρωμένα στο κέντρο του ατόμου, περιέχοντας σχεδόν όλη τη μάζα του. Ακόμη, δόθηκε η εικόνα ότι γύρω από αυτό το κέντρο περιβάλλονται τα μικρότερης μάζας ηλεκτρόνια, που κινούνται σε τροχιά γύρω από αυτό, όπως στο πλανητικό μοντέλο του Μεγάκοσμου (Hewitt P. , 1997).

Μεταγενέστερα, ο Δανός φυσικός Νίλς Μπορ εφάρμοσε την κβαντική θεωρία του Πλανκ στο μοντέλο Ράδεφορντ, προκειμένου να εξηγήσει την ευστάθεια του, αφού η κλασική θεώρηση έδειχνε ότι τα περιστρεφόμενα ηλεκτρόνια θα έπρεπε, λόγω κίνησης, να χάνουν ενέργεια και άρα να πέφτουν στον πυρήνα, κάτι που δεν παρατηρείται. Η κβαντική θεώρηση προβλέπει ότι όταν ένα ηλεκτρόνιο απορροφά ενέργεια από ένα φωτόνιο, διεγείρεται παροδικά σε μια ανώτερη ενεργειακή τροχιά και μετά από λίγο επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, εκπέμποντας παράλληλα φωτόνια ίδιας συχνότητας με αυτά που απορρόφησε και επιστρέφοντας κατά κάποιο τρόπο την ενέργεια που πήρε. Στο μοντέλο του Μπορ τα ηλεκτρόνια συνεχίζουν να θεωρούνται ως σωματίδια που κινούνται σε καθορισμένες τροχιές, ορίζοντας συνάμα και την ενέργεια τους. Τελικά όμως διαπιστώθηκε ότι και με αυτή την περιγραφή η ευστάθεια του ατόμου ίσχυε μόνο για το απλό άτομο του υδρογόνου και όχι για σύνθετα πολυηλεκτρονιακά άτομα (Al-Khalili, 2005).

Οι βασικοί νόμοι της ατομικής φυσικής ανακαλύφθηκαν την δεκαετία του 1920 μετά από συνδυασμένες προσπάθειες πολλών και μεγάλων επιστημόνων. Αυτοί είναι ο προαναφερθέντας Μπορ, ο Γάλλος Λουί Ντε Μπρολί, οι Αυστριακοί Έρβιν Σρέντιγκερ και Βόλφγκανγκ Πάουλι, ο Γερμανός Βέρνερ Χάισενμπεργκ και ο Άγγλος Πωλ Ντιράκ. Όλοι αυτοί, προσκολλημένοι σε ιδέες κλασικής φυσικής, βρέθηκαν σε σύγχυση και αμηχανία, μη μπορώντας να συμβιβαστούν με την πραγματικότητα των ατόμων. Το πρόβλημα ξεκίνησε από τον Πλανκ και την μη συνεχή εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας, αλλά μόνο κατά δέσμες, τις οποίες ο Αϊνστάιν ονόμασε κβάντα φωτός, δηλαδή φωτόνια ή αλλιώς άμαζα σωματίδια που ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, υποστηρίζοντας παράλληλα και την διπλή φύση του, άλλοτε ως κύμα και άλλοτε ως σωματίδια (T.Cushing, 2003).

Κλείνοντας αυτή την εισαγωγή με ιστορικά στοιχεία που συνέβαλαν στη διαμόρφωση της Κβαντικής Φυσικής, θα ήταν παράλειψη, να μην γίνει αναφορά στο έργο του Λουί Ντε Μπρολί. Το 1924 ο Γάλλος φυσικός υποστήριξε ότι τα σωματίδια ύλης θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως κύματα, αφού έχουν όλα τα χαρακτηριστικά που ταιριάζουν. Ισχυρά επιχειρήματα έδωσε και η ανακάλυψη των Ντέιβιντσον και Γκέρμερ το 1927, οι οποίοι απέδειξαν ότι τα ηλεκτρόνια έχουν και κυματική φύση. Αυτό έγινε εφικτό μέσω μιας σχέσης που αναπτύχθηκε από τον Ντε Μπρολί και εκφράζει ότι όσο πιο μεγάλη ορμή έχει ένα σωματίδιο, τόσο πιο μικρό μήκος κύματος θα έχει, αν λογιστεί ως κύμα. Μαθηματικά εκφράζεται ως  $\lambda = h/p$ , όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $h$  η σταθερά του Πλανκ και  $p$  η ορμή του σωματιδίου (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Έτσι φάνηκε ότι η ύλη μπορεί να εμφανίζει και αυτή τον δυισμό του φωτός και μάλιστα ο Ντε Μπρολί πρότεινε ότι κάθε αντικείμενο μπορεί να έχει ένα μήκος κύματος, που

εξαρτάται από τη μάζα του. Ο ίδιος εμπνεύστηκε από το έργο του Αμερικανού φυσικού Άρθουρ Κόμπτον, ο οποίος είχε δώσει σαφείς ενδείξεις για τη σωματιδιακή φύση του φωτός. Σε ένα πείραμα, γνωστό ως σκέδαση Κόμπτον, ο Αμερικανός φυσικός ρίχνοντας ακτίνες X, που αποτελούνται από φωτόνια υψηλής ενέργειας, όπως έχει ήδη αποδειχθεί, βρήκε, ότι οι ανακλώμενες ακτίνες X είχαν μικρότερη συχνότητα από την αρχική. Η σχέση Ντε Μπρόλι δείχνει ότι το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογος της ορμής ενός σωματιδίου και ο ίδιος υπέθεσε ότι αυτός είναι και ο λόγος, που δεν ανιχνεύεται η κυματική συμπεριφορά της ύλης σε αντικείμενα της καθημερινής ζωής των ανθρώπων (Ζδέτσης, 2003).

#### 4.3.1 Οι βασικοί νόμοι και τα φαινόμενα που ισχύουν στην Κβαντική Φυσική- Το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναφερθούν συνοπτικά οι βασικές αρχές που διέπουν τον υποατομικό κόσμο, τον οποίο μελετά η κβαντική φυσική, καθώς περίεργα, στην κοινή λογική, φαινόμενα, προκύπτουν από αυτές. Μια θεμελιώδης αρχή της Κβαντικής φυσικής είναι η Αρχή της Συμπληρωματικότητας. Αυτή διατυπώθηκε το 1927 από τον Δανό Νίλς Μπορ και εκφράζει την δυαδικότητα των καταστάσεων, η οποία χαρακτηρίζει τις δομικές μονάδες της ύλης. Η δυαδικότητα συνίσταται στην σωματιδιακή και κυματική κατάσταση, ενώ το παράξενο είναι, ότι η κατάσταση που θα εντοπιστεί σε ένα στοιχείο εξαρτάται από τον τρόπο διερεύνησης του εκάστοτε επιστήμονα. Με άλλα λόγια ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός της ακτινοβολίας δεν ειδικεύεται στο φως, αλλά αποτελεί γενικό νόμο κάθε στοιχείου. Μάλιστα η παρατήρηση μιας εκ των δυο καταστάσεων, αποκλείει την ταυτόχρονη εκδοχή της άλλης, ώστε όλη η Αρχή να είναι μια γενική αντίφαση (Hewitt P. , 1997).

Το παράξενο της υπόθεσης είναι ότι πειραματικά επιβεβαιώνεται από νεότερες εκδοχές του πειράματος των δυο σχισμών. Συνοπτικά, το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτό είναι ότι η σωματιδιακή ερμηνεία της εκπνευμένης ακτινοβολίας, αναιρεί τις κυματικές του ιδιότητες, ενώ αντίθετα η αντίστοιχη κυματική οδηγεί στην ύπαρξη του σωματιδίου σε πολλές θέσεις ταυτόχρονα και αλληλεπίδραση με τον εαυτό του. Αυτό το γεγονός δίνει στην διαδικασία της επιστημονικής παρατήρησης δυναμικά στοιχεία και καταργεί κάθε μηχανιστική σκέψη της κλασικής φυσικής. Εν ολίγοις η παρατήρηση χάνει την αντικειμενικότητα της και η συμμετοχή του παρατηρητή τον οδηγεί στην επιλογή μιας από τις δυνητικές καταστάσεις, που γίνεται πραγματική (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).





*Εικόνα 4.20* Φωτογραφία του Δανού Νιλς Μπορ (Encyclopedia Britannica, 2022).

Η Αρχή αυτή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη και με άλλο πυλώνα της Κβαντικής Φυσικής, την Αρχή της Απροσδιοριστίας. Διατυπώθηκε το ίδιο έτος με την προηγούμενη, από τον Γερμανό Βέρνερ Χάιζενμπεργκ και είναι επίσης γνωστή και ως Αρχή της Αβεβαιότητας. Ταυτόχρονες μετρήσεις για φυσικές ποσότητες, που στην κλασική φυσική θεωρούνται δεδομένες, στον υποατομικό κόσμο έχουν όρια στην ακρίβεια τους. Σύμφωνα με αυτή την Αρχή είναι αδύνατο να είναι γνωστή συγχρόνως και με βεβαιότητα η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου, άρα και η ταχύτητα του. Όσο ακριβέστερα υπολογίζεται μια από τις δυο ποσότητες, τόσο μεγαλύτερο σφάλμα προκύπτει στον υπολογισμό της άλλης. Αυτό δεν οφείλεται στην ανακρίβεια ή την ελλιπή τεχνολογία των οργάνων μέτρησης, αλλά καθαρά στους νόμους της ατομικής φυσικής και στη δομή της ύλης.



*Εικόνα 4.21* Φωτογραφία του Γερμανού Βέρνερ Χάιζενμπεργκ, που διατύπωσε τον βασικότερο νόμο της κβαντικής μηχανικής, την Αρχή της Απροσδιοριστίας (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Ο μαθηματικός φορμαλισμός της Αρχής αυτής εκφράζεται ως  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ , όπου  $\Delta x$  η αβεβαιότητα της θέσης  $x$  ενός σωματιδίου,  $\Delta p$  η αβεβαιότητα της ορμής του και  $\hbar$  η ανηγμένη σταθερά του Πλανκ, η οποία ισούται με το πηλίκο της Σταθεράς του Πλανκ προς το

διπλάσιο της Σταθεράς του Αρχιμήδη άρα  $\hbar = h/2 \cdot \pi$  (Καλκάνης, 2005). Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η σταθερά του Πλανκ ή σταθερά δράσης αλλιώς, που υπάρχει και στον κυματικό τύπο της ενέργειας αλλά και στην εξίσωση Ντε Μπρολί, εισήχθη από τον ίδιο τον Πλανκ. Αποτελεί μια σταθερά της φύσης και ισούται με την τιμή  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ j}\cdot\text{s}$ . Η σταθερά αυτή και η ανηγμένη ως παραλλαγή, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην Κβαντική φυσική, ενώ παράλληλα είναι πολύ σημαντικό ότι η τιμή της δεν είναι μηδενική. Διαφορετικά δεν θα υπήρχε κβαντική συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά η μικρή τιμή της σε συνδυασμό με τις μικρές μάζες των υποατομικών σωματιδίων αιτιολογούν την ισχύ της Αρχής της απροσδιοριστίας (Al-Khalili, 2005).

Στον μακρόκοσμο αυτή δεν ισχύει, καθώς τα σφάλματα στην θέση και την ορμή είναι πολύ μικρά, σε αντίθεση με τον μικρόκοσμο. Οι αβεβαιότητες θέσης και ορμής ισούνται με την διασπορά τους γύρω από την μέση τιμή τους και προκύπτουν άμεσα λόγω του της Αρχής της Συμπληρωματικότητας. Μια άλλη μορφή της σχέσης απροσδιοριστίας εκφράζεται και μέσω της σχέσης ενέργειας-χρόνου. Η εξίσωση που την διατυπώνει είναι  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ , όπου  $\Delta E$  η αβεβαιότητα ενέργειας,  $\Delta t$  η αβεβαιότητα χρόνου και τα υπόλοιπα γνωστά. Αυτή η εναλλακτική δεν συνίσταται στη αβεβαιότητα της μέτρησης ενός χρονικού διαστήματος, αλλά στο χρονικό διάστημα αναμονής, προκειμένου να παρατηρηθεί μια αισθητή μεταβολή στην ενέργεια ενός συστήματος. Για παράδειγμα όσο πιο αργά μεταβάλλεται ένα σύστημα, τόσο πιο καθορισμένη είναι η ενέργεια του και αντίστροφα όσο πιο σύντομος είναι ο χρόνος ζωής ενός σωματιδίου, τόσο μεγαλύτερα σφάλματα προκύπτουν στην μέτρηση της ενεργειακής του κατάστασης (T.Cushing, 2003).

Από αυτή την έκφραση προκύπτουν σημαντικές συνέπειες. Αρχικά περιορίζεται η ακρίβεια επαλήθευσης της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας και για να μετρηθεί με βεβαιότητα, πρέπει να τεθεί άπειρος χρόνος. Επίσης δίνει μια εξήγηση για την μη κατάρρευση των ηλεκτρονίων στο μοντέλο του Ράδερφορντ. Αν κατέρρεε, θα ήταν γνωστή με μεγάλη ακρίβεια η θέση του, άρα θα αποκτούσε ακαθόριστη ορμή και ταχύτητα, με συνέπεια να απομακρυνθεί. Ακόμη στον μικρόκοσμο τα στοιχειώδη σωματίδια δεν έχουν αυστηρά καθορισμένες μάζες, επειδή έχουν πεπερασμένο χρόνο ζωής. Όσο περισσότερη προσπάθεια γίνεται για τον εντοπισμό τους, τόσο πιο πολύ απομακρύνεται η πιθανότητα να επιτευχθεί, ενώ το κενό δεν πρέπει να είναι άδειο, τουλάχιστον από ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα είναι δυνατόν να παραβιάσει την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας για συγκεκριμένο χρόνο, δανειζόμενο ενέργεια από το κενό και μάλιστα όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος, τόσο πιο πολύ ενέργεια μπορεί να αντληθεί από αυτό (Hawking, 2000).

Εφόσον λοιπόν στη Κβαντική φυσική τα σωματίδια δεν υπάρχουν με βεβαιότητα και τα γεγονότα δεν εκτυλίσσονται σε καθορισμένους χρόνους, όλα ανάγονται σε πιθανότητες. Αυτό εκ πρώτης όψεως δημιουργεί το πρόβλημα της αδυναμίας διατύπωσης ακριβών προβλέψεων σχετικά με την συμπεριφορά της ύλης σε μικροσκοπικό επίπεδο. Την λύση σε αυτό έδωσε, μετά από πολύ κόπο, ο Έρβιν Σρέντινγκερ, παρουσιάζοντας μια καταστατική εξίσωση, που αντιπροσωπεύει την κυματοσυνάρτηση ενός σωματιδίου. Αυτή εκφράζεται από τη σχέση  $-\frac{\hbar}{2\cdot m}\nabla^2\Psi + v\Psi = i\hbar \cdot \partial\Psi / \partial t$ , όπου  $\hbar$  η ανηγμένη σταθερά Πλανκ,  $m$  η μάζα ενός σωματιδίου,  $\Psi$  η κυματοσυνάρτηση,  $i$  μαθηματικός φανταστικός αριθμός και  $t$  ο χρόνος. Η κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  δεν περιγράφει πραγματικές οντότητες αλλά μια μαθηματική ποσότητα της ως κύμα πιθανοτήτων. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης  $-\frac{\hbar}{2\cdot m}\nabla^2\Psi$  περιγράφει τη μεταβολή της κυματοσυνάρτησης από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο, ο δεύτερος όρος  $v\Psi$  περιγράφει τις δυνάμεις, που δρουν στο σωματίδιο ή την πιθανή ενέργεια του σε κάθε θέση του χώρου και ο τρίτος όρος  $i\hbar \cdot \partial\Psi / \partial t$  περιγράφει την αλλαγή της κυματοσυνάρτησης  $\Psi$  με την πάροδο του χρόνου (Modinos, 2014; T.Cushing, 2003).



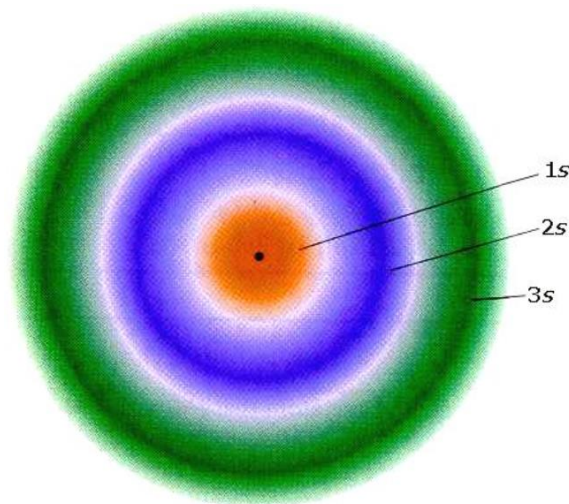
*Εικόνα 4.22 Φωτογραφία του Αυστριακού Έρβιν Σρέντινγκερ, που ανακάλυψε την περίφημη κυματική εξίσωση (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).*

Από αυτά τα ήδη παράξενα στοιχεία του μικροκόσμου προκύπτει μια άλλη Αρχή της κβαντικής Φυσικής, γνωστή ως η Αρχή της Υπέρθεσης. Όταν δυο σωματίδια είναι δυνατόν να βρεθούν σε δυο καταστάσεις, τότε πριν γίνει οποιαδήποτε μέτρηση, πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η πιθανότητα να βρεθούν σε μια οποιαδήποτε γραμμική ενδιάμεση κατάσταση των δυο προηγούμενων. Ως κατάσταση ορίζεται η σημειοθεσία του κάθε σωματιδίου μια χρονική στιγμή. Η Αρχή της Υπέρθεσης σχετίζεται άμεσα και με την Αρχή της κβαντικής διεμπλοκής ή του κβαντικού εναγκαλισμού. Αυτή περιγράφει ότι δυο σωματίδια που έχουν γεννηθεί μαζί, βρίσκονται σε συνεχή συσχέτιση μεταξύ τους, όσο μακριά και να βρίσκονται.

Με άλλα λόγια η αλλαγή μέσω της μέτρησης στην τιμή ενός μεγέθους τους ενός, αλλάζει ακαριαία την τιμή και στο άλλο σωματίδιο. Αυτό φαίνεται αφενός να καταργεί την συνέχεια του χώρου και ταυτόχρονα να καταρρίπτει τον περιορισμό της ταχύτητας, που θέτει η ΕΘΣ. Γι' αυτό τον λόγο ο Αϊνστάιν προσπάθησε να καταρρίψει αυτή την Αρχή της κβαντικής θεωρίας, το 1930, μαζί με τους Ποντόλσκι και Ρόζεν στο γνωστό πείραμα EPR, αλλά απέτυχε (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; T.Cushing, 2003).

Συνεχίζοντας λοιπόν με την εξίσωση Σρέντιγκερ, αν αυτή εφαρμοστεί σε ένα ηλεκτρόνιο, τότε δίνει την πιθανότητα να βρεθεί αυτό σε κάποια θέση μια χρονική στιγμή και συνάμα για κάθε χρονική στιγμή δίνει μια τιμή για κάθε σημείο του χώρου. Έτσι το ηλεκτρόνιο και κάθε σωματίδιο λογίζεται ως κύμα πιθανότητας, έχοντας όμως όλες τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των κυμάτων. Μέσω της λύσης της εξίσωσης αυτής οι φυσικοί εξήγησαν με μεγάλη λεπτομέρεια τον τρόπο, που τα ηλεκτρόνια διατάσσονται στο άτομο. Η διαφορά της εικόνας αυτής με το μοντέλο του Μπορ έγκειται στην ιδέα ότι τα ηλεκτρόνια δεν είναι εντοπισμένα σωματίδια σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα, αλλά νέφη ηλεκτρονίων ή πυκνότητες πιθανότητας ηλεκτρονίων, που οι κυματοσυναρτήσεις τους καταλαμβάνουν όλο τον όγκο του ατόμου και φέρουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία ονομάζονται κβαντικοί αριθμοί.

Οι αριθμοί αυτοί προσφέρουν πληροφορίες διάταξης των ηλεκτρονίων στα κβαντικά τροχιακά, δηλαδή ασαφείς τροχιές παράξενου σχήματος, ή ενεργειακές στάθμες εξηγώντας έτσι τις ιδιότητες των χημικών στοιχείων και την σταθερότητα του ατόμου. Επίσης ερμηνεύουν τα γραμμικά φάσματά τους που συνίστανται στο εκπεμπόμενο φως τους, το οποίο μαρτυρά το είδος των στοιχείων ενός υλικού. Ένα άτομο όταν αλληλοεπιδρά με το φως, τα ηλεκτρόνια απορροφούν ως καθαρή ενέργεια φωτόνια, που έχουν κατάλληλη ενέργεια για την διέγερση τους σε υψηλότερη ενεργειακή τροχιά. Εν συνεχεία αυτά εκπέμπουν ένα φωτόνιο με την ίδια κατάλληλη ενέργεια, μεταπίπτοντας έτσι στην αρχική τροχιά. Η Κβαντική φυσική προβλέπει τη συχνότητα και την ένταση του φωτός, οι οποίες προέρχονται από διεγερμένα ηλεκτρόνια. Κάθε είδος ατόμου έχει συγκεκριμένα σχήματα ενεργειακών σταθμών.



**Εικόνα 4.23** Τροχιακά ηλεκτρονίων στο άτομο. Η πυκνότητα των ηλεκτρονιακών νεφών σχετίζεται με την πυκνότητα των χρωμάτων (Λιοδάκης, Γάκης, Θεοδωρόπουλος, Θεοδωρόπουλος, & Κάλλης).

Οι κβαντικοί αριθμοί είναι τέσσερις και αντιστοιχούν στις φυσικές ποσότητες της στροφορμής, της ενέργειας και του σπιν των σωματιδίων. Ένας από αυτούς είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός με σύμβολο  $n$ , που παίρνει ακέραιες τιμές και καθορίζει το μέγεθος του ηλεκτρονιακού νέφους. Όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος, τόσο πιο απομακρυσμένο είναι από τον πυρήνα και λόγω της έλξης του από αυτόν συνδέεται και με την ενέργεια του, καθώς κάθε τιμή του αντιστοιχεί σε μια στοιβάδα. Άλλος αριθμός είναι ο δευτερεύων κβαντικός αριθμός ή αζιμουθιανός με σύμβολο  $l$ , λαμβάνοντας ακέραιες τιμές με τον περιορισμό  $n-1$ . Αυτός καθορίζει το σχήμα του ηλεκτρονιακού νέφους και σχετίζεται με την ενέργεια του λόγω απωστικής δύναμης με άλλα ηλεκτρόνια. Ως εκ τούτου κάθε τιμή του αντιστοιχεί σε μια υποστοιβάδα. Τρίτος αριθμός είναι ο μαγνητικός κβαντικός αριθμός με σύμβολο  $m$ , που προσδιορίζει τον προσανατολισμό του τροχιακού στον χώρο παίρνοντας τιμές  $2 \cdot l + 1$ . Τέλος, τέταρτος και πολύ σημαντικός είναι ο κβαντικός αριθμός του σπιν ή αλλιώς της ιδιοστροφορμής του ηλεκτρονίου. Αυτός παίρνει τιμές  $+1/2$  ή  $-1/2$  και είναι ανεξάρτητος της τιμής των άλλων κβαντικών αριθμών. Η ιδιότητα που εκφράζει δεν σχετίζεται με την περιστροφή του γύρω από κάποιο άξονα, αφού στην κβαντική φυσικοί οι άξονες δεν είναι καθορισμένοι, αλλά στον τρόπο όψης του ιδωμένο από διάφορες διευθύνσεις. Για να γίνει κατανοητό, ένα ηλεκτρόνιο φαίνεται ίδιο από όλες τις διευθύνσεις, αν περιστραφεί κατά δυο ολόκληρους κύκλους και αυτό δηλώνει η τιμή  $1/2$ . Το  $+$  σημαίνει ότι περιστρέφεται αριστερόστροφα με σύμβολο ( $\uparrow$ ) ενώ το  $-$  δεξιόστροφα με σύμβολο ( $\downarrow$ ) (Ζδέτσης, 2003; Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; Modinos, 2014).

Η ολοκληρωμένη όμως εικόνα του ατόμου σχηματίστηκε μετά από ανακαλύψεις στον τομέα της πυρηνικής φυσικής. Όπως προαναφέρθηκε το 1911 ο Ράδερφοντ συνειδητοποίησε ότι όλη η μάζα του ατόμου είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο του, τον πυρήνα όπως

ονομάστηκε, αποτελούμενος από θετικά φορτισμένα πρωτόνια ίσου αριθμού με τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω του, για να δικαιολογηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα των ατόμων. Αργότερα όμως παρατηρήσεις έδειχναν ότι οι πυρήνες είναι πολύ βαρύτεροι από το άθροισμα των πρωτονίων που περιέχουν. Το 1920 προτάθηκε ότι ίσως να υπάρχουν και εκεί ηλεκτρόνια πέρα από τα περιφερόμενα. Η ιδέα αυτή θεωρήθηκε εσφαλμένη από τους νόμους της κβαντικής φυσικής, αφού η ύπαρξη τους στον περιορισμένο χώρο του πυρήνα θα έδινε βεβαιότητα στη θέση τους λόγω της Αρχής της απροσδιοριστίας. Αυτό αμέσως σημαίνει ότι δεν θα μπορούσε να προσδιοριστεί η ορμή του και άρα η ελκτική δύναμη Κουλόμπ να τα συγκρατεί για μεγάλο διάστημα (Ζδέτσης, 2003; Hewitt P. , 1997).

Το 1932 ο Τζέιμς Τσάντγουικ επαναλαμβάνοντας το πείραμα της Ιρέν Κιουρί και του Φρεντερίκ Τολιό, βομβάρδισε άτομα βηρυλλίου με σωματίδια α. Το αποτέλεσμα εμφάνιζε μια νέα ακτινοβολία, αποτελούμενη από μη φορτισμένα σωματίδια, που ονομάστηκαν νετρόνια. Αυτά λόγω της ηλεκτρικής ουδετερότητας τους διείσδυναν στην ύλη, χωρίς να διαταράσσονται από ηλεκτρικά πεδία. Για την ιστορία, αυτό, αποτέλεσε το έναυσμα για την ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης, που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της ατομικής βόμβας αλλά και των πυρηνικών εργοστασίων. Ο Χάιζενμπεργκ συνέδεσε τα κομμάτια του παζλ, προτείνοντας ότι ο ατομικός πυρήνας αποτελείται μόνο από πρωτόνια και νετρόνια. Αυτό όμως, έθεσε το πρόβλημα του είδους της δύναμης που τα συγκρατεί στον πυρήνα, επειδή μόνο η άπωση πρωτονίου-πρωτονίου και η έλξη ηλεκτρονίου-πρωτονίου είναι μορφές της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης. Αυτή, μαζί με την βαρύτητα, ήταν γνωστό ότι ευθύνονται για την συγκρότηση της ύλης σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο αντίστοιχα (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005; Pickover, 2016).

Το 1935 ο Ιάπωνας φυσικός Χιντέκι Γιουκάβα τιμήθηκε με βραβείο Νόμπελ για την ερμηνεία της πυρηνικής δύναμης. Η ανακάλυψη αυτή βασίστηκε σε μια καινούργια ιδέα, σημαντική όπως θα φανεί, για την ερμηνεία γενικά των δυνάμεων, που στην ουσία είναι η ανταλλαγή σωματιδίων. Αυτή η σκέψη συνδυάζεται μάλιστα και με την Αρχή της απροσδιοριστίας και με την ισοδυναμία μάζας-ενέργειας. Στο σημείο τούτο αναδύεται μια επιβεβαιωμένη πρόβλεψη της κβαντικής φυσικής, η ύπαρξη δυνητικών σωματιδίων. Τα σωματίδια μπορούν να δανειστούν ενέργεια από το κενό, η οποία δύναται να οδηγήσει στην δημιουργία ενός σωματιδίου συγκεκριμένης μάζας. Οι υπολογισμοί του Γιουκάβα απέδειξαν ότι ένα τέτοιο σωματίδιο ευθύνεται για την ελκτική δύναμη μεταξύ νουκλεονίων, η οποία ονομάστηκε ισχυρή πυρηνική δύναμη. Παρομοίως η ηλεκτρομαγνητική δύναμη μπορεί να

θεωρηθεί ως ανταλλαγή ενός δυνητικού φωτονίου, το οποίο είναι διαφορετικό από τα πραγματικά φωτόνια που διατηρούν την ενέργεια τους μέχρι να απορροφηθούν, φαινόμενο χάρη στο οποίο γίνονται αντιληπτά από τις παρατηρήσεις (Al-Khalili, 2005).

Τα δυνητικά σωματίδια που σχηματίζονται από καθαρή ενέργεια, ονομάζονται μποζόνια. Αυτά είναι φορείς δυνάμεων και ανταλλάσσονται μεταξύ δυο κανονικών σωματιδίων, διαδικασία που παράγει μια δύναμη μεταξύ τους. Τα σωματίδια κανονικής ύλης, δηλαδή τα πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια, ονομάζονται φερμιόνια. Σε κβαντικό επίπεδο ο κενός χώρος είναι γεμάτος δραστηριότητα, αφού δυνητικά σωματίδια εμφανίζονται και εξαφανίζονται διαρκώς και παντού. Έτσι σε μια διαδικασία, που λέγεται δίδυμη γένεση ένα σωματίδιο και ένα εταίρο του γεννιούνται από καθαρή ενέργεια, ενώ στην αντίστροφη διαδικασία αυτά τα δυο συγκρούονται και μετατρέπονται σε καθαρή ενέργεια. Το έταίρο σωματίδιο ονομάζεται αντισωματίδιο και αντιπροσωπεύει τη λεγόμενη αντιύλη (Modinos, 2014).

Ο Άγγλος φυσικός Πωλ Ντιράκ το 1928 δημοσίευσε την εργασία με τίτλο «κβαντική θεωρία του ηλεκτρονίου», στην οποία συνδυάζοντας την κβαντική μηχανική με την ΕΘΣ, πρότεινε μια σχετικιστική εκδοχή της εξίσωσης Σρέντιγκερ, που προέβλεπε την ύπαρξη αντιύλης. Αργότερα επιβεβαιώθηκε και πειραματικά. Η εξαϋλωση στην περίπτωση επαφής ενός σωματιδίου με το αντισωματιδίό του συνοδεύεται από έκρηξη ενέργειας, η οποία δικαιολογείται από την ισοδυναμία μάζας-ενέργειας. Η αντίθετη διαδικασία αφορά την μετατροπή ενέργειας σε ύλη, καθώς ένα φωτόνιο μετασχηματίζεται σε ένα ηλεκτρόνιο( $e^-$ ) και ένα ποζιτρόνιο( $e^+$ ), το αντισωματίδιο του με ίδια μάζα και αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο με αυτό. Ο λόγος για τον οποίο δεν μπορούν να ιδωθούν τα αντισωματίδια είναι γιατί το μήκος κύματος του ορατού φωτός, μέσω του οποίου θα ήταν δυνατή η παρατήρηση, είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος του ατόμου. Επίσης είναι γνωστό ότι μικρό μήκος κύματος αντιστοιχεί σε μεγάλη ενέργεια, οπότε για να μελετηθεί η μικρή κλίμακα πρέπει να είναι διαχειρίσιμες μεγάλες ενέργειες σωματιδίων. Οι επιστήμονες στην προσπάθειά τους για βαθύτερη μελέτη της ύλης δημιούργησαν τους μεγάλους επιταχυντές σωματιδίων, όπως το CERN στην Ελβετία. Σε αυτούς επιταχύνουν σωματίδια σε σχετικιστικές ταχύτητες και έπειτα τα συγκρούουν με άλλα, με σκοπό να τα διασπάσουν. Έτσι βρέθηκαν και άλλα είδη σωματιδίων (Fraser, 2003).



*Εικόνα 4.24* φωτογραφία του Άγγλου φυσικού Πολ Ντιράκ, ο οποίος μεταξύ άλλων προέβλεψε και την ύπαρξη της αντιύλης (Fraser, 2003).

Τελικώς από τα παραπάνω προκύπτει ότι η Κβαντική φυσική αντικατέστησε την έννοια της δύναμης με αυτή της αλληλεπίδρασης και περιγράφεται με ακρίβεια μέσω της ανταλλαγής σωματιδίων. Ένα σωματίδιο αλληλεπιδρώντας με ένα άλλο, εκπέμπει ένα μποζόνιο μεταβάλλοντας το μέτρο και τη διεύθυνση της ταχύτητάς του. Εν συνεχεία το μποζόνιο συγκρούεται με το δεύτερο σωματίδιο και απορροφάται από αυτό. Όπως και να έχει η σύγκρουση προκαλεί αλλαγή στο μέτρο και τη διεύθυνση της ταχύτητας και στο δεύτερο σωματίδιο με αποτέλεσμα η κινητική κατάσταση των δυο σωματιδίων να φαίνεται να προήλθε από τη δράση κάποιας δύναμης, που ασκήθηκε μεταξύ τους.

Άλλη συνέπεια των παραπάνω δεδομένων της Κβαντικής φυσικής είναι η εισαγωγή της έννοιας του πεδίου, που μπορεί να πάρει τη μορφή ενός σωματιδίου. Με άλλα λόγια σε κάθε σωματίδιο αντιστοιχεί διαφορετικό κβαντικό πεδίο και η έννοια του αντικαθίσταται πλέον από αυτή του πεδίου. Το κβαντικό πεδίο θεωρείται ένα συνεχές που υπάρχει παντού στον χώρο και μέσα στο οποίο τα σωματίδια νοούνται ως τοπικές συμπυκνώσεις του ή σαν μια περιοχή του χώρου, όπου το πεδίο παρουσιάζει υψηλή ένταση. Ως εκ τούτου ο κενός χώρος δεν διακρίνεται από την ύλη, εφόσον αποδεικνύεται ότι σωματίδια μπορούν να γεννηθούν αυθόρμητα από αυτό και αντίστοιχα να απορροφηθούν σε αυτό. Η θεωρία του Ντιράκ εξισώνει το κενό με μια θάλασσα σωματιδίων αρνητικής ενέργειας, τα οποία αν πάρουν αρκετή θετική ενέργεια, μπορούν να γίνουν ορατά σαν συνηθισμένα σωματίδια (Anderson, 2017; Hawking, 2000).

Σε αυτά τα παράξενα φαινόμενα που πλαισιώνουν την Κβαντική φυσική έρχεται να προστεθεί και μια άλλη σημαντική Αρχή της, γνωστή ως η Απαγορευτική Αρχή του Πάουλι.



Ο Αυστριακός φυσικός Βόλφγκανγκ Πάουλι, το 1925, απέδειξε ότι ένα ζεύγος πανομοιότυπων φερμιονίων δεν μπορεί να καταλάβει την ίδια κβαντική κατάσταση. Έμμεσα η θεωρία υποδηλώνει ότι το ζεύγος αυτό απαγορεύεται να έχει τους ίδιους κβαντικούς αριθμούς. Συνεπώς σε ένα άτομο ή σύμπλεγμα ατόμων δεν μπορούν να υπάρξουν πάνω από δυο ηλεκτρόνια στην ίδια ενεργειακή στάθμη. Επίσης, αν ακριβώς δυο ηλεκτρόνια βρεθούν στην ίδια στάθμη και άρα έχουν τους τρεις κβαντικούς αριθμούς  $n$ ,  $l$ ,  $m$  ίδιους, τότε ο τέταρτος, δηλαδή το σπιν, πρέπει να είναι διαφορετικός.



*Εικόνα 4.25 Φωτογραφία του Αυστριακού φυσικού Βολφγκανγκ Πάουλι, γνωστός για την Απαγορευτική Αρχή στη κβαντική μηχανική (Encyclopedia Britannica, 2022).*

Η Αρχή αυτή εξηγεί ένα μεγάλο αριθμό φαινομένων στο μικρόκοσμο αλλά και στον μακρόκοσμο. Αρχικά αιτιολογεί τον αποκλεισμό της πιθανότητας ύπαρξης ηλεκτρονίων στον πυρήνα και την σταθερότητα του ατόμου. Κατά δεύτερον ερμηνεύει τις διαφορετικές χημικές ιδιότητες των μορίων, αφού αν όλα τα ηλεκτρόνια βρίσκονταν στην χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, όλα τα στοιχεία θα είχαν τις ίδιες. Δεδομένου ότι αυτή η Αρχή αιτιολογεί την σύνδεση ελεύθερων ηλεκτρονίων με άλλα άτομα, κατ' επέκταση φαίνεται και γιατί οι αγωγοί επιδεικνύουν τις ηλεκτρικές, θερμικές και σιδηρομαγνητικές ιδιότητες τους. Επιπλέον, δικαιολογεί την εικόνα της συμπαγούς ύλης και το γεγονός ότι πολλά υλικά στοιχεία δεν μπορούν να καταλάβουν τον ίδιο χώρο ταυτόχρονα. Ακόμη, εξηγεί και ένα φαινόμενο που έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, την πίεση εκφυλισμού των ηλεκτρονίων και των νετρονίων στον πυρήνα ενός καταρρέοντος άστρου στους λευκούς νάνους και αστέρες νετρονίων, αντίστοιχα. Η πίεση αυτή, εμποδίζει την περαιτέρω βαρυτική σύνθλιψη και μάλιστα η ίδια διαφέρει της ανάλογης πίεσης των αερίων, καθώς δεν απαιτεί

πυρηνικές αντιδράσεις, αλλά παρέχεται «δωρεάν» από τους κβαντικούς νόμους. Τέλος, τονίζεται ότι τα φερμιόνια υπόκεινται στην απαγορευτική αρχή του Πάουλι, ενώ τα μποζόνια εξαιρούνται αυτής (Al-Khalili, 2005; Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015).

Μια άλλη Αρχή της κβαντικής φυσικής είναι η Αρχή της Αντιστοιχίας, που είχε διατυπωθεί ήδη από τον Μπορ. Αυτή η Αρχή, όπως παρόμοια ισχύει στην ΓΘΣ, αποδεικνύει ότι η κβαντική μηχανική, στο όριο των μεγάλων κβαντικών αριθμών, συμπίπτει με την κλασική φυσική. Επομένως η Νευτώνεια φυσική και οι νόμοι της αποτελούν και εδώ μια υποπερίπτωση των νόμων του μικρόκοσμου, δίνοντας τα ίδια αποτελέσματα και καταλήγοντας στους ίδιους νόμους σε μεγάλες κλίμακες (Cassidy, Holton, & Rutherford, 2005).

Από τις Αρχές της Κβαντικής μηχανικής προκύπτει ένα φαινόμενο, που είναι γνωστό ως κβαντικό φαινόμενο σήραγγας. Ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο, το οποίο συγκρούεται με ένα πυρήνα, έχει την δυνατότητα να τον διαπεράσει, μόνο αν έχει αρκετή ενέργεια, ικανή να ξεπεράσει συνάμα και το φράγμα κουλόμπ. Ωστόσο, το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας δίνει και μια εναλλακτική δυνατότητα. Ένα κβαντικό σωματίδιο μπορεί να διασχίσει ένα φράγμα σωματιδίων, που με βάση τα δεδομένα, θεωρείται απίθανο. Αυτό εξηγείται από την αρχή της απροσδιοριστίας ενέργειας-χρόνου του Χάιζενμπεργκ. Το μικροσκοπικό σωματίδιο μπορεί να παρουσιάσει έντονες διακυμάνσεις στην ενέργεια του σε μικρή χρονική κλίμακα και να ξεπεράσει το φράγμα δανειζόμενο την επιπλέον ενέργεια από το περιβάλλον του. Επίσης σύμφωνα με την εξίσωση Σρέντιγκερ ένα σωματίδιο έχει μικρή, αλλά υπαρκτή πιθανότητα να βρεθεί σε μια περιοχή, που απαιτεί περισσότερη ενέργεια από αυτή που έχει, εκτός αν το φράγμα έχει άπειρο βάθος, οπότε και η πιθανότητα μηδενίζεται. Αυτό συνεπάγεται ότι αν ένας μεγάλος αριθμός σωματιδίων βρεθεί σε μια τέτοια περιοχή, ένα μικρό ποσοστό θα ξεπεράσει σίγουρα το φράγμα. Σε μακροσκοπικό επίπεδο αυτό δεν συμβαίνει, καθώς η πιθανότητα αυτή θα απαιτούσε χρόνο, περισσότερο από την ηλικία του Σύμπαντος.

Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει στον Ήλιο, διατηρώντας τις αντιδράσεις σύντηξης και έτσι την λαμπρότητα του. Αυτή είναι η λεγόμενη διάσπαση  $\alpha$ , που αποτελεί τη μεταστοιχείωση ενός πυρήνα σε ένα άλλο ελαφρύτερο με έκλυση ενέργειας και εκπομπή σωματιδίων  $\alpha$ , δηλαδή πυρήνων ηλίου. Για να συμβεί αυτό, πρέπει να δοθεί ενέργεια όπως προβλέπει το φαινόμενο σήραγγας, ώστε να ξεπεράσει το φράγμα κουλόμπ του αρχικού πυρήνα. Η κλασική φυσική, από την άλλη πλευρά, αδυνατεί να εξηγήσει την αυθόρμητη αυτή διάσπαση, καθώς οι νόμοι της το καθιστούν ανέφικτο. Οι κβαντικοί νόμοι προβλέπουν ότι με την πάροδο του χρόνου η πιθανότητα, που δίνει η εξίσωση Σρέντιγκερ να περάσει το φράγμα, γίνεται σημαντική. Μάλιστα για ένα μεγάλο αριθμό ραδιενεργών πυρήνων, μετά από ένα

πεπερασμένο χρόνο, που ονομάζεται χρόνος ημιζωής, οι μισοί πυρήνες θα έχουν διασπαστεί. Βέβαια, λόγω της πιθανοκρατικής φύσης της κυματοσυνάρτησης είναι αδύνατο να προβλεφθεί, ακριβώς, η ώρα της διάσπασης (Al-Khalili, 2005).

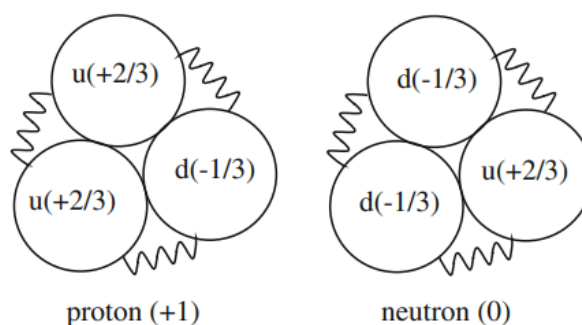
Η διάσπαση  $\alpha$  μελετήθηκε για πρώτη φορά, το 1927, από τον γνωστό Τζόρτζ Γκάμοφ, ο οποίος βάσει αυτών των δεδομένων κβαντική φύσεως, μπόρεσε να διατυπώσει τις προβλέψεις του πρώιμου σταδίου του Σύμπαντος στη θεωρία της Μ. Έκρηξης και έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Συνεχίζοντας, ένα άλλο πυρηνικό φαινόμενο, οι διασπάσεις  $\beta$ , αφορούν σωματίδια εντός πυρήνα και η μελέτη τους οδήγησε στην ανάδυση μιας άλλης πυρηνικής δύναμης, που ευθύνεται γι' αυτά και ονομάζεται ασθενής πυρηνικής δύναμη. Ορισμένοι πυρήνες δεν διαθέτουν τον βέλτιστο λόγο πρωτονίων-νετρονίων και άρα δεν είναι ευσταθείς, οπότε για να αποκατασταθεί η ισορροπία, νετρόνια ή πρωτόνια μετατρέπονται από το ένα είδος στο άλλο, εκλύοντας είτε ένα ηλεκτρόνιο, είτε ένα ποζιτρόνιο για την συνολική διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου. Αυτά ορίζονται ως σωματίδια  $\beta$ . Επομένως, οι διασπάσεις  $\beta$  είναι δυο ειδών. Αν ένας πυρήνας έχει περίσσεια νετρονίων, η ασθενής δύναμη οδηγεί στην μετατροπή τους σε πρωτόνια( $p^+$ ) συνοδευόμενα με ηλεκτρόνια( $e^-$ ) και αντινετρίνα του ηλεκτρονίου( $\bar{\nu}_e$ ), αντίδραση οριζόμενη ως διάσπαση  $\beta^-$ . Αντίθετα, στην περίπτωση περίσσειας πρωτονίων η ασθενής δύναμη οδηγεί στην μετατροπή τους σε νετρόνια( $n^0$ ) συνοδευόμενα με ποζιτρόνια( $e^+$ ) και νετρίνα του ηλεκτρονίου( $\nu_e$ ), οριζόμενη ως διάσπαση  $\beta^+$ . Σημειωτέον, ότι ο Πάουλι το 1933 είχε προβλέψει ότι οι διασπάσεις αυτές παράγουν ένα σωματίδιο, το οποίο λόγω της διατρητότητας που εμφάνιζε στην ύλη, ήταν δύσκολο να ανιχνευτεί. Το 1956 επιβεβαιώθηκε πειραματικά και δεν ήταν άλλο, από το νεutrίνο (Modinos, 2014).

Μέχρι στιγμής οι πυρηνικές αντιδράσεις και οι διασπάσεις  $\alpha$  και  $\beta$  αιτιολογούν το πως σχηματίζονται τα διάφορα στοιχεία της φύσης. Στο εσωτερικό των άστρων σχηματίστηκαν ο άνθρακας, το οξυγόνο και το άζωτο, στοιχεία που εκτοξεύτηκαν στο Διάστημα έπειτα από την βαρυτική τους κατάρρευση, σε μορφή Σούπερνόβα. Τα δυο ελαφρύτερα στοιχεία, δηλαδή το ήλιο και το υδρογόνο δεν σχηματίστηκαν στο εσωτερικό άστρων, αλλά στο πρώιμο Σύμπαν λίγο μετά την Μ. Έκρηξη. Συνεπώς, το 90% της ορατής ύλης αποτελείται από τα δυο ελαφρύτερα, ενώ μόνο το 2% αυτής αντιπροσωπεύουν τα υπόλοιπα. Η ποικιλία πυρήνων, δε, στο Σύμπαν, βασίζεται στους ατελείωτους συνδυασμούς πρωτονίων και νετρονίων και οφείλεται στις πυρηνικές δυνάμεις, αλλά και στο γεγονός ότι αυτά τα δυο υπακούουν σε παρόμοιους κβαντικούς κανόνες με τα ηλεκτρόνια. Άρα και τα νουκλεόνια περιγράφονται από κυματοσυναρτήσεις και διέπονται από την Αρχή της συμπληρωματικότητας, όντας εξαπλωμένες οντότητες μέσα στον πυρήνα του ατόμου (Hewitt P. , 1997).

Οι ανακαλύψεις δεν σταματούν εδώ, αφού το 1964 οι θεωρητικοί φυσικοί Μάρεϊ Γκλεν Μαν και Τζόρτζ Τσβίιγ απέδειξαν ότι τα νουκλεόνια έχουν εσωτερική δομή παίρνοντας βραβείο Νόμπελ γι' αυτό το 1969 (Pickover, 2016). Τα πρωτόνια και τα νετρόνια, λοιπόν, αποτελούνται από θεμελιώδη σωματίδια, που ονομάζονται κουάρκ. Αυτά διακρίνονται σε έξι είδη και αφηρημένα ονομάστηκαν γεύσεις. Τέτοια είναι το πάνω, το κάτω, το παράδοξο, το γοητευτικό, η κορυφή και ο πυθμένας. Τα κουάρκ έχουν και φορτίο αλλά και μια παρόμοια συμβατική ιδιότητα το χρώμα, που εξηγεί τον τρόπο ομαδοποίησης τους σε νουκλεόνια αλλά και τον τρόπο που τα ζεύγη τους μαζί με τα αντίστοιχα της αντιύλης τους σχηματίζουν τα σωματίδια αλληλεπίδρασης της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, που σε επίπεδο νουκλεονίων θεωρείται ότι είναι τα πιόνια. Αυτό σημαίνει ότι στην κβαντική φυσική προστίθεται ένα νέος, πέμπτος κβαντικός αριθμός, το φορτίο χρώματος των κουαρκ.

Το πρωτόνιο περιέχει δυο πάνω(up) και ένα κάτω(down) κουάρκ, ενώ το νετρόνιο περιέχει δυο κάτω(down) και ένα πάνω(up) κουάρκ. Για να αποφευχθούν δυσκολίες οι φυσικοί διατύπωσαν ότι η τριάδα των κουάρκ σε κάθε νουκλεόνιο πρέπει να έχει διαφορετικά φορτία χρώματος, που συμβατικά ονομάστηκαν κόκκινο, μπλε και πράσινο, ώστε το άθροισμα τους να διατηρείται σε συμβατικά λευκό. Η επιρροή αυτή έχει κοινά σημεία με τη θεωρία του φωτός (Modinos, 2014). Το σπιν όλων των κουάρκ, εφόσον αυτά θεωρούνται σωματίδια ύλης, είναι ίσο με  $1/2$  και επίσης το ηλεκτρικό φορτίο των πάνω, παράξενο και κορυφή είναι θετικό και ίσο με  $2/3$  του ηλεκτρονίου, ενώ αντίστοιχα των κάτω, γοητευτικό και πυθμένα είναι αρνητικό και ίσο με  $1/3$  του ηλεκτρονίου (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015). Έτσι το πρωτόνιο αποτελούμενο από δυο πάνω και ένα κάτω κουάρκ έχει συνολικά  $+2/3+2/3-1/3=+1$  φορτίο και το νετρόνιο με δυο κάτω και ένα πάνω κουάρκ έχει συνολικά  $-1/3-1/3+2/3=0$  φορτίο, που είναι και λογικό.(βλ. εικόνα 103)



**Εικόνα 4.26** Εσωτερική δομή πρωτονίου(αριστερά) και νετρονίου(δεξιά). Κάθε πρωτόνιο αποτελείται από δυο πάνω κουάρκ και ένα κάτω κουάρκ, ενώ αντίστοιχα κάθε νετρόνιο αποτελείται από δυο κάτω κουάρκ και ένα πάνω κουάρκ (Modinos, 2014).

Το 1973 επιβεβαιώθηκε από τους Γκρος, Πούλιτζες και Γουίλτσек ένα σημαντικό φαινόμενο που αφορά τα κουάρκ και ονομάζεται φαινόμενο της ασυμπτωτικής ελευθερίας. Σύμφωνα με αυτό, δεν υπάρχει δυνατότητα να απομακρυνθούν τα κουάρκ από το εσωτερικό των νουκλεονίων, όση ενέργεια και αν προσφερθεί. Ακόμη και να ξεπεραστεί η ενέργεια σύνδεσης της ισχυρής πυρηνικής δύναμης τους, το αποτέλεσμα θα είναι η δημιουργία ενός ζεύγους κουάρκ-αντικουάρκ μέσω της δίδυμης γένεσης. Το νέο κουάρκ αντικαθιστά απλά αυτό που απομάκρυνε στο εσωτερικό του νουκλεονίου και παράλληλα το αντικουάρκ ενώνεται με το απομακρυσμένο, σχηματίζοντας ένα μεσόνιο, δηλαδή ένα σύνθετο σωματίδιο αλληλεπίδρασης.

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι οι ενεργειακές στάθμες ενός μορίου, λόγω ταλαντώσεων των ατόμων, ενός ατόμου λόγω των ταλαντώσεων ηλεκτρονίου και πυρήνα, ενός πυρήνα λόγω ταλαντώσεων νουκλεονίων και ενός νουκλεονίου λόγω ταλαντώσεων των κουάρκ, ποιοτικά είναι ίδιες, αλλά ποσοτικά έχουν διαφορές (Al-Khalili, 2005). Μονάδα μέτρησης της ενέργειας σε κβαντική κλίμακα είναι το ηλεκτρονιοβόλτ(eV), που ισούται με  $1,6 \cdot 10^{-19}$  j. Αναλογικά οι μοριακές διεγέρσεις σχετίζονται με ενέργειες χιλιοστών του eV, οι ατομικές με εκατομμύρια του eV(MeV), ενώ οι διεγέρσεις των στοιχειωδών σωματιδίων με δισεκατομμύρια του eV(GeV) (Βρούλος & Καρνάβας, 2021).

Η κβαντική μηχανική κατάφερε στο σύνολο της να περιγράψει με μια θεωρία την αλληλεπίδραση της ύλης με το φως και την συμπεριφορά των ηλεκτρονίων και με μια άλλη θεωρία την αλληλεπίδραση των στοιχείων του πυρήνα και την συμπεριφορά των κουάρκ. Στην πρώτη περίπτωση ο Πάολ Ντιράκ είχε τεράστια συμβολή, αφού πέρα της εργασίας που, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένωσε τους κβαντικούς νόμους με την ΕΘΣ προτείνοντας της ύπαρξη αντιύλης, το 1927 είχε ήδη δημοσιεύσει μια άλλη εργασία που συνδύαζε την κβαντική μηχανική με την θεωρία του Μάξγουελ για το φως, καταφέροντας να κβαντώσει το

ηλεκτρικό πεδίο. Η πρωτογενής θεωρία αυτή ονομάστηκε Κβαντική Ηλεκτροδυναμική με αγγλική συντομογραφία (QED). Αυτή η θεωρία, ενώ ξεκίνησε με πολλές προσδοκίες, άρχισε να συναντά μαθηματικές δυσκολίες, που είχαν την φυσική σημασία της συνεχούς δημιουργίας και καταστροφής δυνητικών σωματιδίων. Το ίδιο συνέβαινε και όταν συνδυάζονταν η Αρχή της Απροσδιοριστίας με την ισοδυναμία μάζας-ενέργειας. Οι μαθηματικές δυσκολίες συνίστατο στο ότι οι υπολογισμοί οδηγούσαν σε απειρισμούς, δηλαδή διαιρέσεις ποσοτήτων με το μηδέν (Hawking, 2000).

Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε το 1941 από τους Φέινμαν, Σβίνγκερ και Τοματάνγκα, οι οποίοι εφάρμοσαν μια συγκεκριμένη μαθηματική μέθοδο, την επακανονικόποίηση. Αυτή, πρόσθετε άπειρες ποσότητες, προκειμένου να εξαλειφθούν οι απειρισμοί. Έτσι, η αρχική Κβαντική Μηχανική εξελίχθηκε σε Κβαντική θεωρία Πεδίου και τελικά σε κανονική Κβαντική Ηλεκτροδυναμική(QED), μια εκδοχή διαφορετική της πρωτογενούς του Ντιράκ. Τα αποτελέσματα της QED ήταν εντυπωσιακά, ενώ συμφωνούσε με τις πειραματικές μετρήσεις με ακρίβεια  $10^{-8}$ . Θεωρούνταν και θεωρείται η πιο θεμελιώδης θεωρία περιγραφής φαινομένων στην υποατομική κλίμακα, με εφαρμογές στη Χημεία και τη Βιολογία, αφού εξηγούσε όλους τους χημικούς, θερμικούς και ηλεκτρικούς μηχανισμούς μαζί με τις δυνάμεις τους, εκτός από την πυρηνική και τη βαρύτητα (White, 2018).

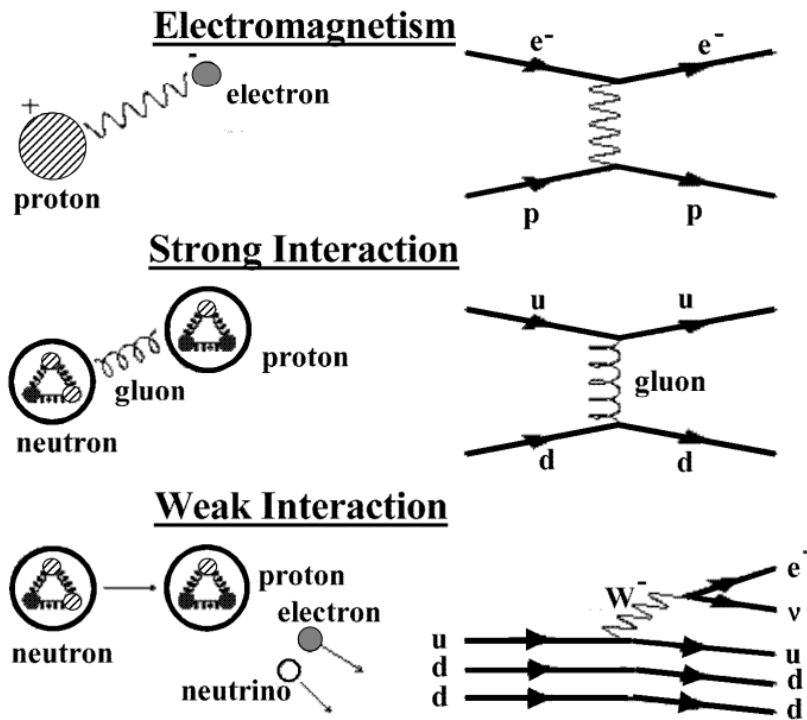
Γύρω στο 1960 οι φυσικοί χρησιμοποιώντας την έννοια της συμμετρίας, προσπάθησαν να επεκτείνουν την QED, ώστε να ενσωματώσει και την ασθενή δύναμη, που υπενθυμίζεται ότι ευθύνεται για τις διασπάσεις  $\beta^\pm$ . Οι Φυσικοί Γκλάσοου, Σαλάμ και Γουάινμπεργκ θεώρησαν κάτω από ειδικές συνθήκες ότι η ασθενής δύναμη μπορεί να στηρίζεται και αυτή στην ανταλλαγή φωτονίων, όπως συμβαίνει στην ηλεκτρομαγνητική. Οι παραπάνω φυσικοί εξήγησαν ότι οι δυο δυνάμεις γίνονται μια, στα πρώτα στάδια της ζωής του Σύμπαντος και καθώς αυτό μεταγενέστερα ψύχεται και διαστέλλεται η συμμετρία σπάει και διαχωρίζονται οι δυο δυνάμεις. Η θεωρία ενοποίησης της ηλεκτρομαγνητικής και της ασθενούς δύναμης ονομάστηκε ηλεκτρασθενής θεωρία πεδίου και η ενιαία δύναμη ηλεκτρασθενής (Weinberg, 2016).

Εν συνεχεία η συμμετρία επεκτάθηκε για να μελετηθεί και η ισχυρή πυρηνική δύναμη σε μια θεωρία πεδίου γνωστή ως Κβαντική Χρωμοδυναμική με αγγλική συντομογραφία (QCD). Αυτή ήταν που έδωσε τα φορτία χρώματος στα κουάρκ και ερμήνευσε όλα τα πυρηνικά φαινόμενα αλλά προέβλεπε 8 διαφορετικά σωματίδια αλληλεπίδρασης της ισχυρής δύναμης, για να αιτιολογηθούν οι τρόποι που συμπεριφέρονται τα χρωματιστά κουάρκ.

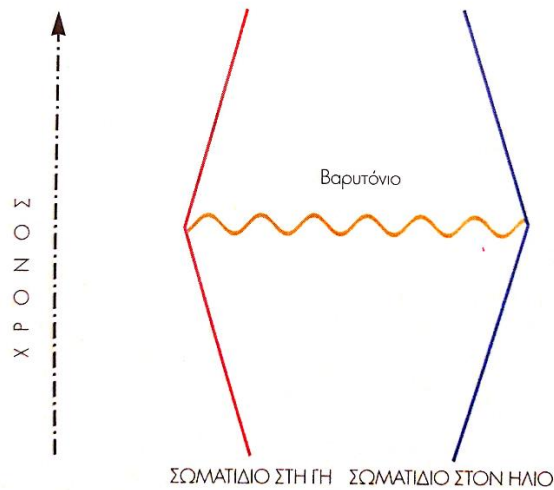
Μετά από αυτή την επιτυχία της Κβαντικής φυσικής υπήρξε περαιτέρω προσπάθεια ενοποίησης της ηλεκτρασθενούς θεωρίας με την QCD, ώστε να ενοποιηθούν οι τρεις από τις τέσσερις δυνάμεις της φύσης.

Όσον αφορά την βαρύτητα η κβαντική θεωρία δίνει μια θεωρητική ερμηνεία, στηριζόμενη στις αρχές που εξηγούνται και οι υπόλοιπες δυνάμεις. Οι αρχές αυτές περιλαμβάνουν την διαταρακτική μέθοδο και αναπαριστάται από τα γνωστά διαγράμματα Φέινμαν. Ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός προβλέπει ότι σε κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα αντιστοιχεί και ένα φωτόνιο και ομοίως σε κάθε ηλεκτρόνιο αντιστοιχεί ένα κύμα σε μορφή ηλεκτρονιακής κυματοσυνάρτησης (Levi, 2020; Wilczek, 2016).

Έτσι λοιπόν στην περίπτωση της βαρύτητας η διαταραχή μιας μάζας παράγει στον κενό χώρο βαρυτικά κύματα, τα οποία αντιστοιχούν στα υποθετικά σωματίδια βαρυτονίων, ως κβάντα αυτών. Η λέξη υποθετικά υποδηλώνει ότι δεν έχουν βρεθεί πειραματικά, λόγω της πολύ ασθενούς επίδρασης τους με την ύλη. Για παράδειγμα δυο βαρυτόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη και την ενέργεια, αλλά και τα ίδια είναι φορείς ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι αλληλεπιδρούν και μεταξύ τους, κάτι που δεν συμβαίνει με τα φωτόνια στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης. Επίσης, η ενέργεια των βαρυτονίων είναι ανάλογη με την συχνότητα των βαρυτικών κυμάτων τους, με την έννοια ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο ισχυρότερα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η μέθοδος της επακανονικοποίησης λογικά θα εξαφάνιζε τους απειρισμούς, όπως και στις άλλες δυνάμεις. Όμως το γεγονός ότι τα βαρυτόνια σκεδάζονται και μεταξύ τους, συνεπάγεται ότι κάθε ένα παράγει πάρα πολλά και τα επόμενα αλληλεπιδρούν πιο ισχυρά σε σχέση με τα προηγούμενα. Αυτό καθιστά τις εξισώσεις μη ελέγξιμες, με αποτέλεσμα να μην αποφεύγονται οι απειρισμοί, γεγονός που καθιστά την βαρύτητα μη επακανονικοποιήσιμη (Smolin, Θεωρία χορδών:όλα ή τίποτα;, 2008).

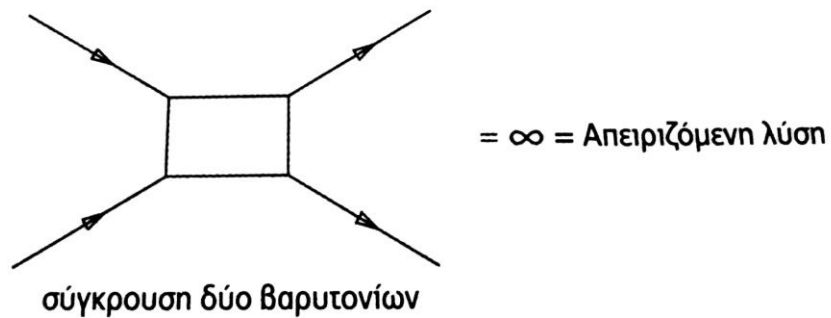


**Εικόνα 4.27** Η ερμηνεία των τριών αλληλεπιδράσεων (ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή) από την κβαντική μηχανική στηριζόμενη στην διαταρακτική μέθοδο, που αναπαρίσταται με τα διαγράμματα Φέινμαν. Στα δισηδιάστατα αυτά χωροχρονικά διαγράμματα κάθε σωματίδιο ύλης (φερμιόνιο) αντιπροσωπεύεται με μια ευθεία γραμμή ενώ οι φορείς αλληλεπιδράσεων (μποζόνια) με διακεκομμένες, καμπύλες ή ελικοειδείς γραμμές. Η μέθοδος της επακανονικοποίησης μέσω της QED και της QCD δίνουν πεπερασμένα αποτελέσματα για τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις (Thomson, 2002).



**Εικόνα 4.28** Η ερμηνεία της βαρύτητας από την κβαντική μηχανική ως ανταλλαγή ενός υποθετικού βαρυτονίου ανάμεσα σε ένα σωματίδιο στη Γη και ένα άλλο στον Ήλιο (Hawking, 2000).





*Εικόνα 4.29 Η εφαρμογή της επακανονικοποίησης στην περίπτωση της βαρυτικής αλληλεπίδρασης δεν δίνει πεπερασμένα αποτελέσματα λόγω του γεγονότος ότι τα υποθετικά γραβιτόνια ή βαρυτόνια αλληλεπιδρούν και μεταξύ τους (Kaku, 2022).*

Το Καθιερωμένο Πρότυπο(Κ.Π.) αποτελεί ένα πλαίσιο επιτομής όλων των σημαντικών ανακαλύψεων και καινοτομιών που συντελέστηκαν στην Κβαντική Φυσική, δίνοντας ακριβή περιγραφή για τη δομή, τον σχηματισμό των σωματιδίων και τις δυνάμεις που συμμετέχουν στα προηγούμενα στην κλίμακα του μικρόκοσμου. Επίσης διατυπώνει προβλέψεις και για φαινόμενα που αναμένονται να αποδειχθούν πειραματικά. Συνοπτικά το Καθιερωμένο Πρότυπο ορίζει ως στοιχειώδη σωματίδια τα κουάρκ και τα λεπτόνια, που μαζί ονομάζονται φερμιόνια, δεδομένου ότι είναι τα μικρότερα κομμάτια, από τα οποία συγκροτούνται οι μεγαλύτερες δομές ύλης. Από τα κουάρκ σχηματίζονται τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Τα λεπτόνια ορίζονται τα σωματίδια που δεν επηρεάζονται από την ισχυρή πυρηνική δύναμη ή αλλιώς όσα δεν έχουν φορτίο χρώματος. Σε αυτά περιλαμβάνεται το ηλεκτρόνιο και το νεutrino του μαζί με τις παραλλαγές των δυο αυτών. Από την άλλη, τα σωματίδια που επηρεάζονται από την ισχυρή δύναμη ονομάζονται αδρόνια, όπως τα πρωτόνια και τα νετρόνια που συνδυαστικά σχηματίζουν τον πυρήνα ενός ατόμου. Ο πυρήνας μαζί με τα ηλεκτρόνια ολοκληρώνουν την εικόνα του ατόμου. Στην συνέχεια πολλά άτομα μαζί, συνθέτουν τα μόρια και πολλά μόρια σχηματίζουν τα υλικά σώματα. Κύριο χαρακτηριστικό των φερμιονίων είναι ότι έχουν ημιακέραιο σπιν και υπόκεινται στην Απαγορευτική Αρχή του Πάουλι.

Όσον αφορά τις δυνάμεις, που πιο σωστά η κβαντική φυσική τις αντικατέστησε με τον όρο ‘αλληλεπιδράσεις’, οφείλονται στην ανταλλαγή σωματιδίων μεταξύ φερμιονίων, τα οποία ονομάζονται μποζόνια. Τα μποζόνια έχουν ακέραια σπιν και δεν υπόκεινται στην Αρχή του Πάουλι. Επίσης δεν υπάρχει όριο στον αριθμό των σωματιδίων που μπορούν να ανταλλαχθούν μεταξύ δυο φερμιονίων, κάνοντας έτσι τις αλληλεπιδράσεις πολύ ισχυρές. Η εμβέλεια τους, ακόμη, είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας των σωματιδίων-φορέων των αλληλεπιδράσεων, σύμφωνα με τον τύπο που δίνει η κβαντική φυσική  $\Delta x = c \cdot h / 2 \cdot \pi \cdot m \cdot c^2$ , με

m τη μάζα του σωματιδίου-φορέα και τα υπόλοιπα γνωστά. Το Καθιερωμένο Πρότυπο ορίζει τέσσερα είδη αλληλεπιδράσεων στη Φύση, αλλά το πλαίσιο της εξηγεί μόνο τις τρεις (Al-Khalili, 2005; Modinos, 2014).

Μια από αυτές είναι η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση, που θεωρείται ως ανταλλαγή φωτονίων, με σπιν 1 και μηδενική μάζα και ως εκ τούτου άπειρη εμβέλεια, μεταξύ ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων. Άλλη αλληλεπίδραση είναι η ασθενής πυρηνική, που προκαλεί φαινόμενα ραδιενέργειας και την υφίστανται όλα τα φερμιόνια με σπιν 1/2 και όχι τα σωματίδια αλληλεπίδρασης. Τα σωματίδια φορείς της ονομάζονται μποζόνια W και Z, με σπιν 1 και εμβέλεια της τάξης των  $2 \cdot 10^{-3}$  φεμπτόμετρα. Τρίτη αλληλεπίδραση είναι η ισχυρή πυρηνική, θεωρούμενη ως ανταλλαγή μεσονίων σε επίπεδο νουκελονίων, ενώ σε επίπεδο κουάρκ ως ανταλλαγή γλουονίων. Το γλουόνιο έχει σπιν 1 και αλληλεπιδρά πέρα από τα κουάρκ και με τον εαυτό του με εμβέλεια μικρότερη  $10^{-15}$ , παρά το γεγονός ότι έχει μηδενική μάζα. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της ασυμπτωτικής ελευθερίας. Τέλος η τέταρτη αλληλεπίδραση, η βαρυτική με τη σχεδόν αμελητέα ισχύ στο μικρόκοσμο νοείται ως ανταλλαγή υποθετικών, καθώς δεν έχουν αποδειχθεί πειραματικά, σωματιδίων ανάμεσα σε υλικές μάζες. Αυτά τα υποθετικά σωματίδια ονομάζονται γκραβιτόνια, με σπιν 2, μηδενική μάζα και άπειρη εμβέλεια. Επίσης τα ίδια, για την κβαντική φυσική, θεωρούνται το κβάντο της βαρυτικής ακτινοβολίας, διαδιδόμενα υπό μορφή βαρυτικών κυμάτων, όπως προβλέπει η ΓΘΣ. Βέβαια, η εικόνα της καμπύλωσης του χωροχρονικού συνεχούς, δεν ισχύει εδώ. Υπό αυτή την έννοια η βαρυτική αλληλεπίδραση δεν αποδεικνύεται πειραματικά από την Κβαντική φυσική, αλλά μόνο προβλέπεται θεωρητικά, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τρεις θεμελιώδεις δυνάμεις (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; Hawking, 2000).

Μιας και έγινε αναφορά στο Καθιερωμένο Πρότυπο, μεγάλη παράλειψη θα ήταν να μην δοθούν πληροφορίες για ένα μποζόνιο, το οποίο ανακαλύφθηκε το 2012 στον επιταχυντή αδρονίων του CERN. Πρόκειται για το μποζόνιο Χίγκς, ένα θεμελιώδες σωματίδιο που πήρε υπόσταση, έπειτα από τις εργασίες του Άγγλου φυσικου Πίτερ Χίγκς το 1964 (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015). Το Χίγκς είναι ένα άμαζο σωματίδιο, χωρίς ηλεκτρικό φορτίο αλλά ούτε και φορτίο χρώματος, με σπιν 0 και ενέργεια 125 eV. Η καθυστέρηση ανίχνεσής του αιτιολογείται από τα μεγάλα ποσά ενέργειας, που έπρεπε να παραχθούν στους επιταχυντές. Το μποζόνιο  $H^0$ , όπως συμβολίζεται, αποτελεί ένα πεδίο πανταχού παρόν στο κενό, χάρη στο οποίο δυνητικά σωματίδια αποκτούν την ιδιότητα της μάζας και εμφανίζονται ως κανονικά σωματίδια. Το πεδίο αυτό επιβραδύνει τα άμαζα σωματίδια, έτσι ώστε να ταξιδεύουν με ταχύτητες μικρότερες από αυτές του φωτός, χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει

ότι επηρεάζονται όλα (Lincoln, 2017; Randall, 2014). Η ιδιότητα αυτή έκανε τον Λέον Λέντερμαν να χαρακτηρίσει το μποζόνιο αυτό καταχρηστικά, ως «σωματίδιο του Θεού» (Pickover, 2016).

Η ανακάλυψη του θεωρήθηκε υψίστης σημασίας για διάφορους λόγους. Αρχικά, βοήθησε στην καλύτερη κατανόηση της δημιουργίας του Σύμπαντος και της θεωρίας της Μ. έκρηξης στα πρώτα κλάσματα του δευτερολέπτου, όταν τίποτα δεν είχε μάζα και όλες οι δυνάμεις ήταν ενωμένες σε μια υπερδύναμη. Επίσης εξηγεί τους λόγους που προκύπτουν διαφορές στις μάζες των υποατομικών σωματιδίων, ενώ παράλληλα είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την ερμηνεία της σκοτεινής ύλης, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του Σύμπαντος, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Επιπλέον θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της βαρύτητας σε κβαντικό επίπεδο, αφού η τελευταία, επιδρά στη μάζα και την ενέργεια.

Το σημαντικότερο επίτευγμα όμως της ανακάλυψης του μποζονίου Χιγκς έγκειται στην ανάλυση του μηχανισμού, κατά τον οποίο τα στοιχειώδη σωματίδια αποκτούν την εγγενή τους μάζα. Αυτή από τον Αϊνστάιν είναι γνωστή ως μάζα ηρεμίας. Για ένα σύνθετο σωματίδιο η μάζα ηρεμίας δεν αποτελείται μόνο από το άθροισμα των ανάλογων μαζών των συστατικών τους. Σε αυτό, πρέπει να προστεθεί και η κινητική τους ενέργεια, όπως και η ενέργεια των αλληλεπιδράσεων τους. Για παράδειγμα το ΚΠ προβλέπει ότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των πρωτονίων και των νετρονίων προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κουάρκ τους και των γλουονίων που τα συνδέουν και δευτερευόντως από τη μάζα ηρεμίας των ίδιων των κουάρκ. Το πεδίο Χιγκς καινοτομεί εδώ, αφού εξηγεί την προέλευση της μάζας των κουάρκ, που δεν έχουν εσωτερική δομή, αφού είναι στοιχειώδη σωματίδια και μάλιστα δεν μπορούν και να απομονωθούν από τα αδρόνια (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009; Gubser, 2020).

Τελικά η μάζα τους προέρχεται από την αλληλεπίδραση δυναμικών σωματιδίων με το πεδίο Χιγκς, ώστε αυτά να προκύψουν ως κβάντα του. Συνολικά η ιδιότητα της μάζας στη Φυσική προκύπτει με τρεις τρόπους. Πρώτον η συνηθισμένη ύλη, χάρη στα πρωτόνια και τα νετρόνια λόγω κίνησης των δεσμευμένων κουάρκ, χωρίς να λαμβάνει χώρα το πεδίο Χιγκς. Δεύτερον τα κουάρκ και τα λεπτόνια, λόγω αποκλειστικά του πεδίου Χιγκς, δηλαδή χωρίς αυτό, θα εξαφανίζονταν. Τρίτον τα άγνωστα σωματίδια σκοτεινής ύλης και άλλα υπερσυμμετρικά οφείλονται επίσης στο ίδιο πεδίο (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

**Πίνακας 4** Πίνακας σωματιδίων ύλης και φορέων αλληλεπιδράσεων σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής. Στον πίνακα περιλαμβάνονται τα ονόματα των γνωστών σωματιδίων και φορέων με τα σύμβολα τους, την γενιά που ανήκουν, τις προσεγγιστικές τιμές της μάζας τους καθώς και τις τιμές των φορτίων και του σπιν τους. Το βαρυτόνιο/γκραβιτόνιο(μωβ σειρά), ο φορέας των βαρυτικών αλληλεπιδράσεων δεν έχει βρεθεί πειραματικά στους επιταχυντές σωματιδίων και έτσι οι προβλεπόμενες τιμές του προκύπτουν θεωρητικά (Arbuzov, 2018; Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; Μαρούδας, 2015).

ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ					
Είδη σωματιδίων	Σύμβολο	Γενιά	Μάζα	Φορτίο	Σπιν
Φερμιόνια(σωματίδια που αποτελούν την ύλη)					
Κουάρκ					
Πάνω	u	1η	$\approx 2,2\text{MeV}/c^2$	+2/3	1/2
Κάτω	d	1η	$\approx 4,7\text{MeV}/c^2$	-1/3	1/2
Γοητευτικό	c	2η	$\approx 1,28\text{GeV}/c^2$	+2/3	1/2
Παράξενο	s	2η	$\approx 96\text{MeV}/c^2$	-1/3	1/2
Κορυφή	t	3η	$\approx 173,1\text{GeV}/c^2$	+2/3	1/2
Πυθμένας	b	3η	$\approx 4,18\text{GeV}/c^2$	-1/3	1/2
Λεπτόνια					
Ηλεκτρόνιο	e	1η	$\approx 0,51\text{MeV}/c^2$	-1	1/2
Μιόνιο	$\mu$	2η	$\approx 105,6\text{MeV}/c^2$	-1	1/2
Ταύ	$\tau$	3η	$\approx 1,77\text{GeV}/c^2$	-1	1/2
Νεutrίνο ηλεκτρονίου	$\nu_e$	1η	$< 2,2\text{eV}/c^2$	0	1/2
Νεutrίνο μιονίου	$\nu_\mu$	2η	$< 0,17\text{MeV}/c^2$	0	1/2
Νεutrίνο ταύ	$\nu_\tau$	3η	$< 15,5\text{ MeV}/c^2$	0	1/2
Μποζόνια(σωματίδια-φορείς αλληλεπιδράσεων)					
Γλουόνιο	g	-	0	0	1
Φωτόνιο	$\gamma$	-	0	0	1
Z Μποζόνιο	$Z^0$	-	$\approx 91,2\text{GeV}/c^2$	0	1
$W^\pm$ Μποζόνιο	$W^\pm$	-	$\approx 80,4\text{GeV}/c^2$	$\pm 1$	1
Μποζόνιο Χίγκς	H	-	$\approx 126\text{GeV}/c^2$	0	0
Βαρυτόνιο/γκραβιτόνιο(υποθετικό)	G	-	0	0	2

Κλείνοντας το κεφάλαιο των κβαντικών νόμων και φαινομένων που οδήγησαν στη συγκρότηση του Καθιερωμένου Προτύπου θα αναλυθεί και ένα άλλο σημαντικό φαινόμενο με την έννοια ότι συνέβαλε στην επέκταση των γνώσεων από τη σκοπιά της Κβαντικής Φυσικής, πέραν της ΓΘΣ, για τη φύση του κενού, τις μαύρες τρύπες και τις σκουληκότρυπες.

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο Κασιμίρ και αναφέρεται σε μια παράξενη ελκτική δύναμη, που εμφανίζεται στον κενό χώρο ανάμεσα σε δυο μη φορτισμένες παράλληλες πλάκες. Το 1948 διατυπώθηκε από τον Ολλανδό φυσικό Χέντρικ Κασιμίρ ως αποτέλεσμα ενός πειράματος, το οποίο είχε κάνει με ανάλογες πλάκες κατόπτρων, που απείχαν μεταξύ τους απόσταση μερικών νανομέτρων σε κενό. Παρατήρησε λοιπόν ότι η συνολική ενέργεια του κενού ανάμεσα σε αυτές ήταν μικρότερη από την ενέργεια του στις εξωτερικές πλευρές των πλακών, με αποτέλεσμα να φαίνεται ότι η μια έλκει την άλλη. Αυτό ήταν πραγματικά ανεξήγητο, δεδομένου ότι οι πλάκες ήταν ηλεκτρικά ουδέτερες και δεν επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες, αφού ήταν τοποθετημένες σε κενό (Pickover, 2016).

Η θεωρία του Κβαντικού πεδίου όμως ερμηνεύει το φαινόμενο Κάσιμιρ και με μεγάλη ακρίβεια. Κβαντικά, το κενό είναι γεμάτο παντού από μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή δυνητικά σωματίδια έχοντας όλα τα πιθανά μήκη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος περιέχει μια ορισμένη ενέργεια, που ονομάζεται ενέργεια μηδενικού σημείου. Επίσης η Αρχή της Απροσδιοριστίας δεν επιτρέπει την ύπαρξη απολύτως μηδενικής ενέργειας, ακόμη και αν αφαιρεθεί όλη η υλοενέργεια του Σύμπαντος. Η παρουσία ύλης δημιουργεί μια διαφορά στην πίεση ακτινοβολίας ή φωτονίων, με αποτέλεσμα να υπάρχουν περισσότερες διακυμάνσεις κυμάτων στο εξωτερικό των πλακών από ότι στο εσωτερικό, προκαλώντας αυτό το ελκτικό αποτέλεσμα. Αυτό γίνεται, καθώς κάποια μήκη κύματος στο εσωτερικό απαγορεύονται ή δεν ταιριάζουν στον συγκεκριμένο χώρο από τους κβαντικούς νόμους με συνέπεια η τιμή της ενέργειας του κενού να ελαττώνεται και να γίνεται αρνητική (Kaku, 2022).

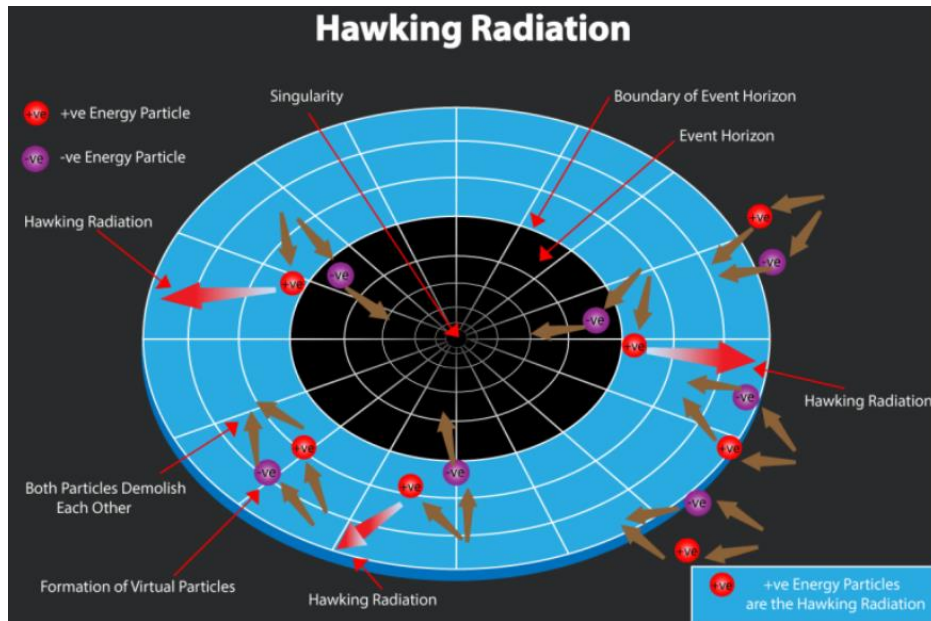
Θεωρητικές εφαρμογές του φαινομένου Κασιμίρ αποτελούν η δημιουργία ανυψωτικών μηχανημάτων μέσω δυνάμεων άπωσης μέχρι τη στήριξη ανοιχτών σκουληκότρυπων με χρήση πυκνότητας αρνητικής ενέργειας. Την δεκαετία του 1970 ο Στίβεν Φούλινγκ και ο Αλ Χαλίλι μπόρεσαν να χρησιμοποιήσουν πειραματικά την ροή αρνητικής ενέργειας μέσω κινούμενων κατόπτρων με συγκεκριμένο τρόπο. Η ροή αρνητικής ενέργειας αυτή κινούνταν με την ταχύτητα του φωτός και είχε διαφορά από την στατική του πειράματος του Κασιμίρ. Το ίδιο ακριβώς έγινε εφικτό και αργότερα μέσα από την χρήση δεσμών λέιζερ (Al-Khalili, 2005).

Επίσης, ο Κιπ Θόρν και οι συνεργάτες του έδειξαν θεωρητικά ότι στο άνοιγμα μια σκουληκότρυπας, αν δημιουργηθεί μια κατάσταση ροής αρνητικής ενέργειας, θα αντιστοιχεί σε αρνητική μάζα, που θα ασκεί αρνητική βαρυτική δύναμη, η οποία με την σειρά της θα αντιστέκεται στο φαινόμενο της σύσφιξης της λόγω κανονικής βαρύτητας και άρα θα μείνει ανοιχτή (Thorne, 2019). Άλλοι επιστήμονες θεωρώντας ότι οι ηλεκτρομαγνητικές

διακυμάνσεις του κενού προκαλούν την αδράνεια και την βαρύτητα, πρότειναν ότι αυτή δεν είναι θεμελιώδης αλληλεπίδραση, αλλά απόρροια της αλλαγής της ενέργειας μηδενικού σημείου εξαιτίας της παρουσίας ύλης. Ο Ρώσος φυσικός Αντρέι Ζαχάροφ έτσι θεώρησε ότι ίσως η βαρύτητα είναι μια μεγάλης εμβέλειας δύναμη Κασιμίρ (Ευαγγελόπουλος, 2001).

Η μεγάλη αξία του φαινομένου Κασιμίρ αποδείχθηκε σε μελέτες που έκανε ο Άγγλος Φυσικός Στίβεν Χόκινγκ, το 1979, πάνω στις μαύρες τρύπες. Αυτός, βασισμένος σε αδιάψευστα δεδομένα, υποστήριξε ότι οι μαύρες τρύπες δεν δικαιολογούν απόλυτα την ονομασία τους, αφού με την πάροδο του χρόνου εξαερώνονται αργά, ακτινοβολώντας θερμότητα. Εδώ τίθεται μια απορία ενεργειακής φύσης, επειδή οι μόνες γνώσεις που παρέχονται για αυτές από την ΓΘΣ επιβεβαιώνουν ότι τίποτα δεν μπορεί να διαφύγει από μια μελανή οπή. Άρα πρέπει να αιτιολογηθεί η παροχή ενέργειας της εκπεμπόμενης θερμότητας (Pfister & King, 2015). Η απάντηση δόθηκε από τον Χόκινγκ μετά από πολύ κόπο, συνδυάζοντας την ΓΘΣ, την κβαντική θεωρία πεδίου, το φαινόμενο Κασιμίρ, το φαινόμενο σήραγγας και την θερμοδυναμική.

Η θερμική ακτινοβολία που απομακρύνεται από την μελανή οπή αναπαριστά ροή θετικής ενέργειας. Ωστόσο, αυτή δεν γίνεται να ιχνηλατηθεί σε όλη της τη διαδρομή από το εσωτερικό της οπής, γιατί θα παραβιαζόταν ο κανόνας ότι τίποτα δεν μπορεί να εξέλθει από αυτή. Αποδείχθηκε λοιπόν ότι ροή αρνητικής ενέργειας εισέρχεται στη μαύρη τρύπα. Αυτή η ροή προέρχεται από τον κενό χώρο, στον οποίο η Κβαντική φυσική επιτρέπει να υπάρχουν δυνητικά σωματίδια. Αυτά τα σωματίδια όμως δεν έχουν μετρήσιμη ενέργεια, άρα δεν ασκούν βαρυτική έλξη. Η ανάδυση τους συμβαίνει, όταν κάποια αιτία διαταράξει την ενέργεια του κενού. Οι ίδιες οι μαύρες οπές δημιουργούν στην γειτονιά τους αυτή την διατάραξη, εξαιτίας της καμπυλότητας του χωροχρόνου που προκαλεί το ισχυρό βαρυτικό τους πεδίο. Τα εικονικά αυτά σωματίδια είναι δυνατόν να δανειστούν ενέργεια από την ίδια την οπή και να γίνουν πραγματικά στην άκρη του ορίζοντα γεγονότων της. Ως εκ τούτου το ένα σωματίδιο θα πέσει στην οπή, ενώ το άλλο θα διαφύγει. Χωρίς τον εικονικό του συνεργάτη, το δραπετεύον σωματίδιο γίνεται πραγματικό, μεταφέροντας στο εξωτερικό της οπής ένα μέρος της υλοενέργειας της. Το δραπετεύον σωματίδιο, επειδή καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από όση έχει, συνεισφέρει στην μαύρη τρύπα αρνητική ενέργεια. Αυτή όμως η συνεισφορά μειώνει την μάζα της οπής σταδιακά. Τελικά η μαύρη τρύπα εξατμίζεται σε βάθος χρόνου, χάνοντας όλη της την ενέργεια χάρη στα διαφεύγοντα σωματίδια. Αυτά τα σωματίδια αντιπροσωπεύουν την θερμότητα, που εκλύει και συνιστούν την ακτινοβολία Χόκινγκ, όπως αυτή ονομάστηκε (Anderson, 2017; Breton, 2011; Hawking, 2000).



**Εικόνα 4.30** Η διαδικασία παραγωγής της ακτινοβολίας Χόκινγκ. Τα δνητικά σωματίδια(κόκκινα και μωβ) αναδύονται λόγω των κβαντικών διακυμάνσεων γύρω από την μελανή οπή και εν συνεχεία γίνονται πραγματικά δανειζόμενα ενέργεια αυτή στον ορίζοντα γεγονότων της. Το σωματίδιο αντύλης(μωβ) πέφτει μέσα στον ορίζοντα οδηγούμενο προς την σημειακή της ιδιομορφία, προσδίδοντάς της αρνητική ενέργεια, που μειώνει τη μάζα της και τελικά εξατμίζεται σταδιακά. Το σωματίδιο με θετική ενέργεια(κόκκινο) διαφεύγει από την οπή και στο σύνολό τους αντιπροσωπεύουν την λεγόμενη ακτινοβολία Χόκινγκ (Siegel, 2022).

Μάλιστα η μελέτη αυτή του Χόκινγκ έδωσε και τον τύπο της θερμοκρασίας μιας μαύρης τρύπας, ο οποίος είναι  $T = \frac{h \cdot c^3}{16 \cdot \pi \cdot G \cdot M \cdot k}$ , όπου  $T$  η θερμοκρασία της οπής,  $h$ ,  $c$ ,  $G$  και  $k$  οι γνωστές σταθερές,  $M$  η μάζα της οπής και  $k$  η σταθερά του Μπόλτσμαν από την Θερμοδυναμική (Grøn, Lecture notes on the General Theory of Relativity, 2009). Αυτή η εξίσωση αποδεικνύει ότι όσο μεγαλύτερη μάζα έχει μια μαύρη τρύπα, τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία της. Καθώς αυτή εκπέμπει ενέργεια-θερμότητα, η μάζα της ελαττώνεται και άρα η θερμοκρασία της αυξάνεται. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε ταχύτερες εκπομπές ενέργειας και τότε γίνεται θερμότερη και μικρότερη μέχρι να φτάσει στα τελευταία δευτερόλεπτα της ζωής της, εξατμιζόμενη συνεχώς, οπότε θα εκραγεί εκλύοντας τεράστια ενέργεια. Η ακτινοβολία Χόκινγκ που εκπέμπεται είναι πρακτικά αδύνατο να καταγραφεί με τις σημερινές τεχνολογίες (Hawking, 2000).

Το έργο του Χόκινγκ ανέδειξε και ένα άλλο πρόβλημα το 1970 που είναι γνωστό ως το παράδοξο της Πληροφορίας. Το δεδομένο της εκπομπής ακτινοβολίας των μαύρων οπών έδωσε μια ιδιότητα, που αντιφάσκει σε σχέση με μια άλλη από την κλασική θεώρηση. Σύμφωνα με την τελευταία, οτιδήποτε εισέρχεται σε μια οπή, χάνεται για πάντα από το Σύμπαν. Ούτε το φως αλλά και καμία πληροφορία δεν μπορεί να εξαιρεθεί από την ισχυρή βαρύτητα της (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Το 1979 ο Χόκινγκ βρήκε μια ρωγμή σε αυτή τη διατύπωση, χρησιμοποιώντας τους κβαντομηχανικούς νόμους. Αυτοί ορίζουν ότι καμία πληροφορία στον Σύμπαν δεν μπορεί

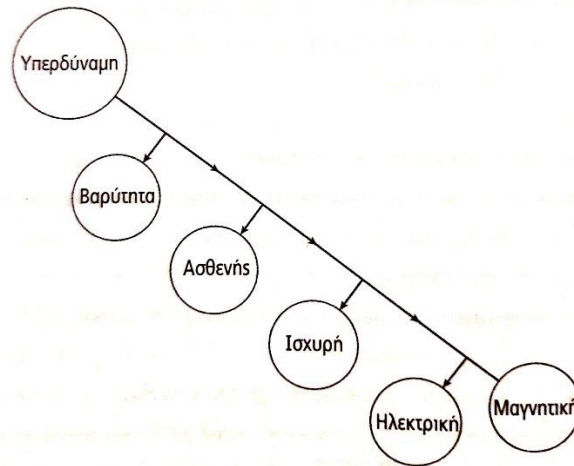
να καταστραφεί και πάντα με κάποιο τρόπο πρέπει να διατηρείται. Στα τελικά στάδια μιας μαύρης τρύπας, αυτή θα εξαφανιστεί λόγω της αργής εξαέρωσης της και οι πληροφορίες για τον σχηματισμό της και την ύλη που έχει απορροφήσει χάνονται (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008). Το 2004 ο Χόκινγκ παρουσίασε νέους μαθηματικούς υπολογισμούς, κατά τους οποίους η πληροφορία δεν χάνεται με την εξαέρωση, αλλά εμφανίζεται σε άλλη μορφή μέσω της ακτινοβολίας Χόκινγκ. Το 2015 κατέληξε πάλι στο ίδιο συμπέρασμα, διευκρινίζοντας ότι η πληροφορία επιστρέφει σε χαοτική μορφή (Hawking, 2000).

Με βάση τα παραπάνω, στο σημείο αυτό προκύπτει ένα σημαντικό θέμα. Αν γίνει αποδοχή της θεωρίας ότι η πληροφορία στο Σύμπαν μπορεί να χαθεί, τότε η Κβαντική Φυσική τίθεται υπό αμφισβήτηση. Αν από την άλλη η κβαντική πληροφορία διατηρείται, θα πρέπει να βρεθεί ένας φυσικός μηχανισμός που να το αποδεικνύει. Διάφορες λύσεις κατά καιρούς έχουν προταθεί, αλλά καμία δεν έχει καθολική αποδοχή από τους επιστήμονες. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που επιβάλλεται η ανάγκη διατύπωσης μιας ακέραιης θεωρίας κβαντικής βαρύτητας και δεν είναι ο μοναδικός, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

#### 4.3.2 Το θέμα της κβαντικής βαρύτητας

Στην προσπάθεια των επιστημόνων για την ενοποίηση όλων των θεμελιωδών δυνάμεων απαραίτητη ήταν η διερεύνηση όλο και μικρότερων κλίμακων μήκους, το οποίο φυσικά για τις πειραματικές διαδικασίες απαιτούσε μεγάλα ποσά ενέργειας από τους επιταχυντές. Η ενοποίηση αυτή, είναι αναγκαία, για να περιγραφεί η κατάσταση του Σύμπαντος στην αρχή της Μ. Έκρηξης, που θεωρείται ότι και οι τέσσερις δυνάμεις ήταν ενωμένες σε μια ονομαζόμενη υπερδύναμη (Kaku, 2022). Οι κλίμακες σύγκλισης των δυνάμεων ώστε να έχουν την ίδια ισχύ, αφορούν αποστάσεις πολύ μικρές, σε σχέση με το μέγεθος του πρωτονίου και είναι περίπου  $10^{-28}$  του χιλιοστού.





**Εικόνα 4.31** Στην αρχή της Μ. Έκρηξης όλες οι γνωστές θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις ήταν ενοποιημένες σε μια Υπερδύναμη (Kaku, 2022).

Μια θεωρία που θα πετύχαινε την σύζευξη αρχικά των δυο πυρηνικών δυνάμεων και της ηλεκτρομαγνητικής, ονομάζεται Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία με αγγλική συντομογραφία GUT. Μέχρι στιγμής υπάρχουν πολλές θεωρίες ενιαίου πεδίου με διάφορα προβλήματα η καθεμία (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008). Αυτές περιγράφουν τις συνθήκες που επικρατούσαν στο Σύμπαν από τα  $10^{-32}$  sec έως τη στιγμή που έχει σημασία η έννοια του χρόνου. Η ηλεκτρομαγνητική η ασθενής και η ισχυρή φαίνεται να ενοποιούνται σε ενέργειες της τάξης των  $10^{15}$  GeV, ενώ η επιτυχημένη ήδη ενοποίηση της ηλεκτρασθενούς, δηλαδή ηλεκτρομαγνητικής και ασθενούς πυρηνική αλληλεπίδρασης, επιτυγχάνεται σε ενέργειες  $10^{13}$  φορές μικρότερη από την προηγούμενη (Ευαγγελόπουλος, 2001).

Φυσικά εδώ δεν γίνεται λόγος για την βαρυτική αλληλεπίδραση, καθώς δεν την έχει ερμηνεύσει καμία κβαντική θεωρία ενιαίου πεδίου. Από την άλλη πλευρά, δεν μπορεί να αγνοηθεί, γιατί παρά το γεγονός ότι σε μικρές κλίμακες είναι αμελητέα, η μεγάλη της εμβέλεια και η αποκλειστικά ελκτική φύση της, κάνουν την επίδραση της να αθροίζεται. Έτσι για μεγάλες ποσότητες ύλης καταλήγει να κυριαρχεί πάνω στις άλλες δυνάμεις και να δραματίζει τελικά τον πιο καίριο ρόλο στην εξέλιξη του Σύμπαντος. Μια Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία που θα περιλαμβάνει και την βαρύτητα, πέρα από τις άλλες τρεις, θα ονομαστεί η Θεωρία των Πάντων και θα σημάνει το τέλος της θεωρητικής φυσικής και της κοσμολογίας, λύνοντας πιθανότατα όλες τις απορίες της επιστήμης σχετικά με το Σύμπαν (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).

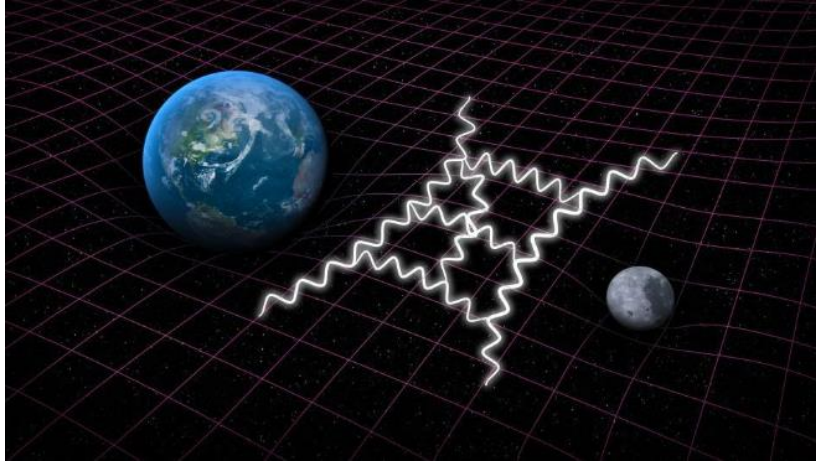
Εκτός από την επιθυμητή ενοποίηση όλων των δυνάμεων, υπάρχει και ένα άλλο πρόβλημα. Η επικρατούσα θεωρία για την προέλευση και εξέλιξη του Σύμπαντος, η θεωρία της Μ. Έκρηξης, προβλέπει ότι υπήρχε μια αρχή στο χώρο και στο χρόνο, η λεγόμενη ανωμαλία ή σημειακή ιδιομορφία, όπως αυτή στο εσωτερικό μιας μαύρης τρύπας. Σε αυτό το σημείο

καμία θεωρία, ούτε η Κβαντική φυσική, ούτε η ΓΘΣ αυτόνομα, δεν έχει ισχύ και δεν παρέχει εξηγήσεις αυτόνομα. Επίσης όλες οι θεωρίες των σημειακών ιδιομορφιών περιγράφουν μια κατάσταση που το βαρυτικό πεδίο είναι πολύ ισχυρό και ταυτόχρονα τα κβαντικά φαινόμενα δεν μπορούν να αγνοηθούν. Όσον αφορά την ΓΘΣ, λόγω του ότι η ανωμαλία έχει άπειρη πυκνότητα και ο χωροχρόνος της άπειρη καμπυλότητα, η ίδια θεωρία καταρρέει και η κβαντική θεωρία από μόνη της δεν περιλαμβάνει την βαρύτητα. Έτσι η λύση θα δοθεί, μόνο αν συνδυαστούν αυτές οι δυο. Επίσης τίθεται η ανάγκη για μια ενιαία θεωρία που θα ισχύει σε όλες τις κλίμακες και θα περιλαμβάνει ως υποπεριπτώσεις της, τις υπόλοιπες θεωρίες. Η θεωρία λοιπόν που θα ενοποιήσει την ΓΘΣ με την Κβαντική θεωρία πεδίου και θα συμφωνεί φυσικά με τα δεδομένα των παρατηρήσεων, ονομάζεται θεωρία κβαντικής βαρύτητας (Hawking, 2000; Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).

Αυτή η προσπάθεια μόνο εύκολη δεν είναι, και αυτό φαίνεται από την πολυετή αλλά ανεπιτυχή προσπάθεια του Αϊνστάιν να ενοποιήσει την βαρύτητα με τον ηλεκτρομαγνητισμό σε ένα ενιαίο πεδίο. Αρχικά η ΓΘΣ και η κβαντική θεωρία δεν έχουν τίποτα κοινό, εκτός από το γεγονός ότι περιλαμβάνουν την Αρχή της Αντιστοιχίας, που σημαίνει ότι σε κλίμακες καθημερινής ζωής προσεγγίζουν την Νευτώνεια Μηχανική. Όμως στις πολύ μεγάλες και μικρές δομές αντίστοιχα, αποκλίνουν τόσο πολύ μεταξύ τους, ώστε οι μαθηματικές σχέσεις τους να είναι ασυμβίβαστες (Carozziello & De Laurentis, 2011).

Η ΓΘΣ είναι μια κλασική θεωρία πεδίου, που σε αντίθεση με την νευτώνεια θεωρία, ερμηνεύει την βαρύτική έλξη μαζών γεωμετρικά, ως καμπύλωση του χωροχρόνου, ο οποίος επιπροσθέτως φέρει δυναμικά και όχι στατικά στοιχεία. Το βαρυτικό πεδίο είναι ένα δίκτυο απεικονιζόμενο από τρισύνολα δυναμικών γραμμών και ερμηνεύεται από τις μεταξύ τους σχέσεις. Έτσι η έννοια του σημείου εδώ δεν έχει υπόσταση, σε αντίθεση με το ηλεκτρικό πεδίο, που περιλαμβάνει σημεία με φυσική σημασία και τιμές σε κάθε χρονική στιγμή. Ο χώρος στην ΓΘΣ αποτελείται από διακριτά γεγονότα και δεν είναι συνεχής, δηλαδή άπειρα διαιρετός, όπως στην θεωρία του Νεύτωνα (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002). Επίσης, ο χρόνος στην ΓΘΣ είναι ένα μέτρο των κοσμικών μεταβολών με την έννοια ότι μετρά τη διάρκεια μια διαδικασίας μόνο μέσω της διάρκειας άλλων διαδικασιών. Αυτό ακριβώς σημαίνει ότι αντιπροσωπεύει ένα δίκτυο σχέσεων εξέλιξης του χώρου, ενώνοντας τες σε χωροχρόνο (Anderson, 2017). Η ΓΘΣ υποστηρίζει και την αιτιότητα με την έννοια ότι ένα γεγονός οδηγεί σε ένα άλλο γεγονός. Η ίδια η κίνηση της ύλης παράγει βαρυτικά κύματα, διαδιδόμενα μέσω της αιτιακής δομής του χωροχρόνου. Η κβαντική θεωρία από την άλλη υποστηρίζει μια νευτώνεια θεώρηση του χώρου και του χρόνου, που λογίζεται

ως το στατικό υπόβαθρο στο οποίο εξελίσσονται τα γεγονότα, δεν περιλαμβάνει καμπυλώσεις χωροχρόνου, αντικαθιστά τα σωματίδια με κβαντικά πεδία, ερμηνεύει τις δυνάμεις ως ανταλλαγή σωματιδίων και βασίζεται στην Αρχή της Απροσδιοριστίας, η οποία μάλιστα έχει αποδειχθεί ότι είναι θεμελιώδες χαρακτηριστικό του Σύμπαντος (Hawking, 2000).



**Εικόνα 4.32** Η προσπάθεια συνδυασμού της ΓΘΣ με την κβαντική μηχανική δεν είναι εύκολη λόγω της διαφορετικής θεώρησης των δυο θεωριών σχετικά με την φύση του χωροχρόνου. Η ΓΘΣ ερμηνεύει την βαρύτητα γεωμετρικά ως καμπύλωση ενός εξελισσόμενου χωροχρόνου ενώ η κβαντική μηχανική χρησιμοποιεί την διαταρακτική μέθοδο, στηριζόμενη στα διαγράμματα Φέινμαν σε στατικό χωροχρόνο(άσπρες γραμμές). Η διαδικασία της επακανονικοποίησης στην περίπτωση της βαρύτητας αλληλεπίδρασης δεν εξαλείφει τους απειρισμούς. Έτσι τέθηκε η ανάγκη διατύπωσης μιας θεωρίας κβαντικής βαρύτητας, που θα συνδυάζει επιτυχώς τις δυο θεωρίες (SLAC National Accelerator Laboratory, n.d.).

Οι δυο θεωρίες, πέρα από τις χωροχρονικές διαφορές, ερμηνεύουν και διαφορετικά τη σχέση του παρατηρητή με το αντικείμενο παρατήρησης. Η ΓΘΣ συμφωνεί εδώ με τη νευτώνεια προσέγγιση της παραπάνω σχέσης με κάποιες τροποποιήσεις στις μεγάλες ταχύτητες και τα ισχυρά βαρυτικά πεδία, αντικαθιστώντας τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου με αυτούς του Λόρεντζ. Η κβαντική θεωρία έρχεται σε ρήξη με την παραπάνω θεώρηση, αφού διχοτομεί τον Κόσμο σε δυο καταστάσεις, αυτής του παρατηρητή μαζί με τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης και από την άλλη, αυτής του υπό μελέτη συστήματος. Το Σύμπαν όμως ως παρατηρούμενο σύστημα είναι μια ολότητα, η οποία εμπεριέχει τους παρατηρητές, οπότε πρέπει να εξαρτάται και από αυτούς.

Συνοπτικά, η ΓΘΣ είναι μια θεωρία για τον χωροχρόνο και την Κοσμολογία, που διαφέρει στις πολύ μεγάλες κλίμακες από την Νευτώνεια αλλά αποτυγχάνει να εξηγήσει την συμπεριφορά των ατόμων και των μορίων. Η κβαντική θεωρία είναι μια θεωρία που αναπτύχθηκε για να εξηγήσει, με όρους πεδίου, τις αποτυχημένες προβλέψεις της νευτώνειας μηχανικής σχετικά με την σταθερότητα των ατόμων καθώς και τις αλληλεπιδράσεις της ύλης με την ακτινοβολία. Από την άλλη, αδυνατεί να περιγράψει τον χωροχρόνο και ως εκ τούτου, τον Κόσμο σε μεγάλες κλίμακες (Anderson, 2017; Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι μια θεωρία κβαντικής βαρύτητας θα πρέπει να περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του χωροχρόνου της ΓΘΣ και ταυτόχρονα τη σχέση παρατηρήτη-μετρούμενου συστήματος, όπως αντικατοπτρίζεται στην κβαντική θεωρία. Η επιχείρηση ενσωμάτωσης της απαραίτητης για την κβαντική βαρύτητα, Αρχής της Απροσδιοριστίας στη ΓΘΣ, οδηγεί σε άτοπες καταστάσεις. Η Αρχή αυτή προβλέπει ότι κενός χώρος είναι γεμάτος με ζεύγη δυνάμει σωματιδίων και αντισωματιδίων. Αυτά τα ζευγάρια έχουν άπειρο ποσό ενέργειας και σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας- ενέργειας θα πρέπει να έχουν και άπειρη μάζα. Αυτό όμως σημαίνει ότι η βαρυτική έλξη τους θα πρέπει να καμπυλώνει το Σύμπαν σε μέγεθος απείρως μικρό. Επομένως, το συνολικό αποτέλεσμα καταλήγει σε απειρισμούς ποσοτήτων χωρίς φυσικό νόημα (Al-Khalili, 2005).

Η λύση σε αυτό θα ήταν η μαθηματική διαδικασία της επακανονικοποίησης, όπως στην περίπτωση της QED. Αυτή η διαδικασία έχει ένα σοβαρό ελάττωμα όμως. Οι πραγματικές τιμές της μάζας των σωματιδίων και της έντασης των μεταξύ τους δυνάμεων δεν προβλέπονται από την θεωρία, αλλά επιλέγονται αυθαίρετα, έτσι ώστε να συμφωνούν με τις παρατηρήσεις. Στην περίπτωση συνδυασμού την Αρχής της απροσδιοριστίας και της ΓΘΣ μόνο δυο μεγέθη μπορούν να ρυθμιστούν, η κοσμολογική σταθερά  $\Lambda$  και η ένταση της βαρύτητας. Η ρύθμιση τους όμως, δεν επαρκεί για να εξαλειφθούν όλοι οι απειρισμοί, πράγμα που σημαίνει ότι η ΓΘΣ δεν επανακανονικοποιείται. Έτσι κάποιες ποσότητες, όπως η καμπύλωση του χωροχρόνου πρέπει να θεωρούνται άπειρες, αλλά οι μετρήσεις και οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι είναι πεπερασμένες.

Αυτή η αδυναμία είχε προβλεφθεί από τον Χόκινγκ αλλά επιβεβαιώθηκε λεπτομερώς και από υπολογισμούς το 1972. Έτσι, ο ίδιος ανέφερε ότι παρά το γεγονός ότι δεν είναι γνωστό ποια θεωρία θα συνδύαζε σωστά την ΓΘΣ με την κβαντική, οι επιστήμονες γνωρίζουν τι χαρακτηριστικά θα έπρεπε να έχει η υποψήφια θεωρία κβαντικής βαρύτητας (Hawking, 2000). Ένα χαρακτηριστικό από αυτά είναι ότι πρέπει να περιλαμβάνει μια πρόταση του Αμερικανού Νομπελίστα φυσικού Ρίτσαρντ Φέινμαν, που είναι γνωστή στην κβαντική φυσική ως 'άθροιση ιστοριών'. Αυτή οδήγησε στην εξέλιξη την κβαντοηλεκτροδυναμικής (QED) και ερμήνευσε τον δυϊσμό του φωτός σε πειράματα δυο σχισμών. Σύμφωνα με αυτή, ένα σωματίδιο κάνει μόνο μια διαδρομή, προκειμένου να καλύψει την απόσταση μεταξύ δυο σημείων και κατ' επέκταση δεν έχει μόνο μια 'ιστορία' στον χωροχρόνο. Αντίθετα, ακολουθεί όλες τις πιθανές διαδρομές και σε καθεμία από αυτές αντιστοιχούν δυο αριθμοί, το μέγεθος και η φάση του κύματος. Η πιθανότητα να περάσει το σωματίδιο από ένα σημείο σε ένα άλλο υπολογίζεται από τη άθροιση των όλων των κυμάτων ή αλλιώς κάθε δυνατής 'ιστορίας' του σωματιδίου. Οι φάσεις διαφέρουν πολύ μεταξύ τους, ώστε κάποια κύματα να

αλληλοαναιρούνται και κάποια να αλληλοενισχύονται (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002). Ο υπολογισμός όμως του αθροίσματος συνοδεύεται με μεγάλα τεχνικά προβλήματα, με αποτέλεσμα η μαθηματική λύση τους να επιβάλει τη χρήση της έννοιας του φανταστικού χρόνου. Ο φανταστικός χρόνος στα μαθηματικά είναι μια πολύ καλά ορισμένη έννοια και στο συγκεκριμένο θέμα εξαφανίζει την διάκριση χώρου και χρόνου. Ένας χωροχρόνος που οι χρονικές συντεταγμένες των γεγονότων εμφανίζονται με φανταστικούς αριθμούς είναι ευκλείδειος χωροχρόνος με τέσσερις διαστάσεις. Στον πραγματικό χωροχρόνο, όπου γίνεται χρήση πραγματικών αριθμών για χρονικές συντεταγμένες, η διεύθυνση του χρόνου υφίσταται εντός κώνου φωτός ενώ του χώρου στο εξωτερικό του.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει η θεωρία της κβαντικής βαρύτητας είναι η ιδέα της αντιπροσώπευσης του βαρυτικού πεδίου από τον καμπύλο χωροχρόνο, που έμμεσα σημαίνει ότι τα σωματίδια προσπαθούν να ακολουθήσουν την πιο ευθεία και σύντομη διαδρομή από ένα σημείο σε ένα άλλο εντός αυτού. Η συνένωση της ιδέας του Αϊνστάιν με αυτής του Φάινμαν έχει ως αποτέλεσμα η ιστορία ενός σωματιδίου να είναι ένας καμπύλος χωροχρόνος, που αναδεικνύει μια ιστορία ολόκληρου του Σύμπαντος. Εάν οι καμπύλοι χωροχρόνοι θεωρηθούν ευκλείδειοι με την έννοια που περιγράφηκαν πιο πάνω, λύνονται πολλά τεχνικά προβλήματα της άθροισης αυτών των ιστοριών. Σε αυτή την κατάσταση αν ήταν γνωστές οι αρχικές συνθήκες και η συμπεριφορά των όλων των ευκλείδειων χωροχρόνων στην αρχή του Σύμπαντος θα μπορούσε να υπολογιστεί η σημερινή κβαντική του κατάσταση (Hawking, 2000).

Μάλιστα μια συγκροτημένη θεωρία κβαντικής βαρύτητας θα έδινε και μια άλλη δυνατότητα οπτικής του Σύμπαντος πέραν των δυο που δίνει η κλασική θεωρία βαρύτητας, δηλαδή είτε του άπειρου χρόνου είτε της αρχικής ανωμαλίας και του πεπερασμένου χρόνου. Η Τρίτη αυτή εικόνα είναι το Σύμπαν να μην έχει κάποια αρχή-σημειακή ιδιομορφία αλλά να είναι ταυτόχρονα και πεπερασμένο χωροχρονικά. Ένα τέτοιο Σύμπαν, όμως, χωρίς όρια και περιέχοντας πλήρως τον εαυτό του, θα είχε επιπλέον διαστάσεις και απλά θα υπήρχε, χωρίς την ανάγκη δημιουργίας και καταστροφής του. Αυτή η οπτική είναι απλά μια θεωρητική ιδέα που για να επιβιώσει, θα έπρεπε να κάνει προβλέψεις, που θα επιβεβαιώνονται από την παρατήρηση. Αυτή η απαίτηση είναι περιορισμένη μέχρι στιγμής καθώς δεν υπάρχει βεβαιότητα στην θεωρία που θα συνταίριαζε την ΓΘΣ με τη κβαντική θεωρία και επίσης τα μοντέλα του Σύμπαντος θα ήταν πολύ περίπλοκα από μαθηματικής άποψης, για να διατυπωθούν ακριβείς προβλέψεις (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Όπως και να έχει οι επιστήμονες θεωρούν ότι η επιθυμητή συνένωση μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους. Ο ένας βασίζεται θεωρώντας δεδομένες τις αρχές της κβαντικής

φυσικής, μιας και περιλαμβάνει τις πιο θεμελιώδεις έννοιες των πεδίων και μετά να ενσωματωθεί η ΓΘΣ, ενώ ο άλλος συνιστάται από την έναρξη των δεδομένων θεμελιωδών εννοιών του χώρου και του χρόνου της ΓΘΣ και έπειτα αυτοί να κβαντωθούν. Βέβαια υπάρχει και ένας τρίτος τρόπος, να απορριφθούν και οι δυο, και να δομηθεί μια καινούργια θεωρία από την αρχή. Ωστόσο αυτή η ιδέα είναι δύσκολο να γίνει αποδεκτή, εφόσον οι δυο θεωρίες στις κλίμακες τους δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα (Carozziello & De Laurentis, 2011).

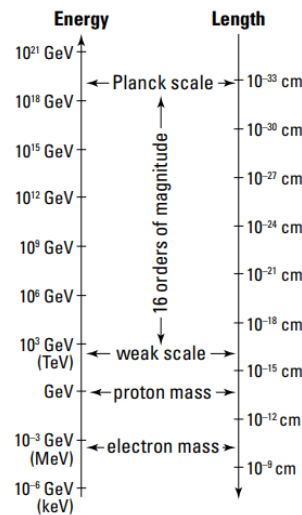
Πολλοί φυσικοί συμφωνούν ότι για να υπάρξει πρόοδος στο θέμα της κβαντικής βαρύτητας, πρέπει ο χωροχρόνος να μην είναι άπειρα διαιρετός, αλλά να αποτελείται από κβάντα. Η ενεργειακή κλίμακα μήκους και χρόνου, που πρέπει να λάβει χώρα η κβάντωση του χωροχρόνου ονομάζεται κλίμακα Πλανκ. Μάλιστα η κλίμακα αυτή ορίζεται ως το όριο κάτω από το οποίο παρουσιάζονται οι επιδράσεις της κβαντικής βαρύτητας. Οι μονάδες της κλίμακας αυτής έχουν ήδη οριστεί και προταθεί από το 1899 μέσω του ίδιου του Μαξ Πλανκ. Αυτές οι μονάδες Πλανκ ορίζονται από τις πέντε παγκόσμιες φυσικές σταθερές και όχι από ανθρώπινα τεχνάσματα. Αυτές οι σταθερές είναι η ταχύτητα του φωτός  $c$  που εμφανίζεται στην ΕΘΣ, η βαρυτική σταθερά  $G$  που εμφανίζεται στην ΓΘΣ και την Νευτώνεια θεωρία, η ανηγμένη σταθερά δράσης  $\hbar$ , που εμφανίζεται στην κβαντομηχανική, η ηλεκτροστατική σταθερά  $e_0$ , που εμφανίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία και η σταθερά Μπόλτςμαν  $k_B$ , που εμφανίζεται στην θερμοδυναμική και στην στατιστική μηχανική (Al-Khalili, 2005).



*Εικόνα 4.33 Φωτογραφία του Γερμανού Φυσικού Μαξ Πλανκ, που πρότεινε τις ομώνυμες μονάδες μέτρησης μέσα από τον συνδυασμό Φυσικών Σταθερών (Encyclopedia Britannica, 2022).*

Έτσι θεμελιώδης μονάδα μέτρησης της απόστασης είναι το μήκος Πλανκ ( $l_p$ ) που εκφράζεται από τον τύπο  $l_p = \sqrt{\hbar \cdot G / c^3}$  και είναι ίσο περίπου με  $l_p \approx 1,61 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ . Θεμελιώδης μονάδα μέτρησης της μάζας είναι η μάζα Πλανκ ( $m_p$ ) με τύπο  $m_p = \sqrt{\hbar \cdot c / G}$  και ισούται με  $m_p \approx 2,17 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$ , ενώ η ανάλογη μονάδα του χρόνου είναι ο χρόνος Πλανκ ( $t_p$ ) με τύπο  $t_p =$

$l_p/c = \hbar / m_p = \sqrt{\hbar \cdot G / c^5}$  και ισούται με  $t_p \approx 5,39 \cdot 10^{-44}$  sec. Τέλος υπάρχει και το φορτίο Πλανκ( $g_p$ ) με τύπο  $g_p = \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \hbar \cdot c}$  που είναι ίσο με  $g_p \approx 1,87 \cdot 10^{-18} C$  καθώς και η θερμοκρασία Πλανκ( $T_p$ ) με τύπο  $T_p = m_p \cdot c^2 / k_B = \sqrt{\hbar \cdot c^5 / G} \cdot k_B^{-1}$  και είναι ίση με  $T_p \approx 1,41 \cdot 10^{32} K$ . Οι μονάδες αυτές θεωρείται ότι θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην ενοποίηση των αλληλεπιδράσεων και στην αναζήτηση μια θεωρίας κβαντικής βαρύτητας (Anderson, 2017; Ciufolini & Matzner, 2010; Pfister & King, 2015; Rothleitner & Schlamminger, 2017).



**Εικόνα 4.34** Η κλίμακα Πλανκ όπου επιχειρείται η ανακάλυψη μιας θεωρίας κβαντικής βαρύτητας έχει 16 τάξεις μεγέθους διαφορά σε σχέση με την ασθενή κλίμακα δράσης του μποζονίου Χίγκς. Κάτω από την μάζα του ηλεκτρονίου βρίσκεται η ενέργεια των κβαντικών διακυμάνσεων του κενού (Jones & Robbins, 2010).

## 4.4 Ενοποιημένες θεωρίες πεδίου και οι υποψήφιες θεωρίες κβαντικής βαρύτητας

Σε αυτό το κεφάλαιο, που είναι και το τελευταίο του βιβλιογραφικού μέρους της εργασίας θα διατυπωθούν οι υποψήφιες θεωρίες που διαμορφώθηκαν τον 20ο αιώνα προκειμένου να ερμηνεύσουν την κβαντική βαρύτητα και να βοηθήσουν παράλληλα στην ενοποίηση όλων των δυνάμεων προς μια Θεωρία των Πάντων. Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά και σε κάποιες εναλλακτικές ιδέες, που έχουν προταθεί από διάφορους φυσικούς της εποχής μας, ώστε να δοθεί η συνολική εικόνα της εξέλιξης πάνω στο θέμα της βαρύτητας.

Οι προσπάθειες που έγιναν προς την κατεύθυνση ενοποίησης του ηλεκτρομαγνητισμού με την βαρύτητα γέννησαν τις λεγόμενες ενοποιημένες θεωρίες πεδίου. Μέχρι την εποχή του Αϊνστάιν, υπήρχε η άποψη στη Φυσική ότι τα πάντα αποτελούνται από ύλη. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι ο ηλεκτρομαγνητισμός ερμηνεύονταν ως τάσεις του υποθετικού υλικού μέσου του αιθέρα. Με την ΕΘΣ ανατράπηκε αυτό και επικράτησε η άποψη ότι η ύλη αποτελείται από πεδία, που αντιπροσωπεύονται από κάποιες τιμές. Ο Αϊνστάιν ενσωμάτωσε τον ηλεκτρομαγνητισμό στην ΕΘΣ και στην συνέχεια τροποποίησε την νευτώνεια

βαρύτητα, για την συμπεριλάβει σε αυτή ως ΓΘΣ. Πλέον εφόσον και οι δυο δυνάμεις περιγράφονται από πεδία, έπρεπε να μπορούν να συνδυαστούν σε ένα ενιαίο πεδίο.

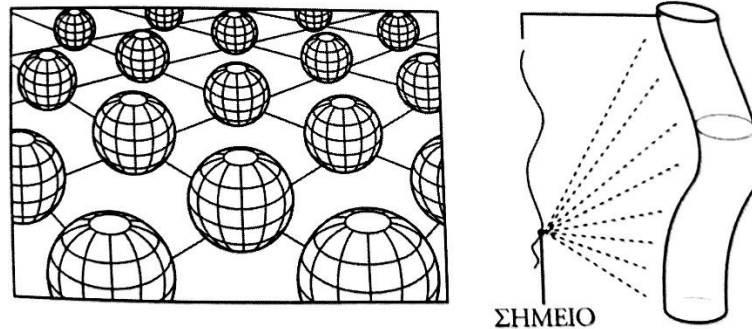
Το 1914 ο Φινλανδός φυσικός Γκούναρ Νόρντστρεμ ακολούθησε ένα διαφορετικό δρόμο από αυτό του Αϊνστάιν. Προσπάθησε να ενοποιήσει τον ηλεκτρομαγνητισμό με την βαρύτητα, προσθέτοντας στις εξισώσεις πεδίου μια επιπλέον χωρική διάσταση. Το αποτέλεσμα αυτή της προσπάθειας περιέγραφε τον ηλεκτρομαγνητισμό στις τέσσερις πλέον χωρικές διαστάσεις και σε μια χρονική, με την βαρύτητα να εμφανίζεται αυθόρμητα στο μοντέλο. Η θεωρία του Νόρντστρεμ ήταν απολύτως συμβατή με την ΕΘΣ και μαθηματικά συνεπής, αλλά εμφάνιζε το πρόβλημα της επιπλέον διάστασης, η οποία ήταν μεν το κλειδί της ενοποίησης, αλλά δεν μπορούσε να παρατηρηθεί πειραματικά. Η εξήγηση που δόθηκε γι' αυτό ήταν ότι χωρική αυτή διάσταση είχε την μορφή κύκλου, η διάμετρος του οποίου ήταν πολύ μικρή για να εντοπιστεί, όπως στην περίπτωση του φωτός δεν είναι ορατά κάποια μήκη κύματος. Η θεωρία του Νόρντστρεμ τελικά απορρίφθηκε από την επιστημονική κοινότητα, επειδή προέβλεπε ότι το φως πάντα κινείται ευθύγραμμα, ενώ κάτι τέτοιο είχε ήδη αποδειχτεί πειραματικά από την ΓΘΣ ότι δεν ισχύει (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Από το 1915 και έπειτα υπήρξαν και άλλες προσπάθειες διατύπωσης θεωριών ενοποιημένου πεδίου, ακόμη και από τον ίδιο τον Αϊνστάιν, καθώς υπήρχε η υπόνοια ότι και ο ηλεκτρομαγνητισμός επιδέχεται γεωμετρική περιγραφή, όπως η βαρύτητα. Όλες όμως οι επιχειρήσεις συμπεριλαμβανομένης του Αϊνστάιν και του Χέρμαν Βάιλ απέτυχαν, καθώς οδηγούσαν σε περίεργες προβλέψεις ή εμφάνιζαν άπειρες ποσότητες στις εξισώσεις (Pfister & King, 2015).

Το 1929 ο Γερμανός μαθηματικός Θίοντορ Καλούζα ακολούθησε την πεπατημένη μέθοδο του Νόρντστρεμ για να αναπτύξει μια νέα θεωρία. Η διαφορά ήταν ότι ξεκίνησε με τις εξισώσεις της ΓΘΣ που περιέγραφαν την βαρύτητα και ότι με την προσθήκη μια επιπλέον χωρικής διάστασης αναδυόταν αυθόρμητα ο ηλεκτρομαγνητισμός. Η κρυμμένη διάσταση του Καλούζα περιλάμβανε ένα μικρό κύκλο σε κάθε σημείο του χωροχρόνου, η ακτίνα του οποίου συνδεόταν με το φορτίο του ηλεκτρονίου, ενώ παράλληλα η γεωμετρία του χώρου μπορούσε να καμπυλώνεται με διάφορους τρόπους. Βασική παράλειψη της προσπάθειας αυτής ήταν ότι δεν γινόταν καμία συσχέτιση με την κβαντική θεωρία, η οποία βρισκόταν υπό ανάπτυξη τότε. Από την άλλη πλευρά ο Σουηδός φυσικός Όσκαρ Κλείν, προσθέτοντας μια πέμπτη μεταβλητή στις τέσσερις υπάρχουσες της εξίσωσης Σρέντιγκερ, βρήκε λύσεις που περιέγραφαν κυματοσωματίδια να κινούνται υπό την επίδραση και της βαρύτητας και της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης (Karaca, 2012).



Ο συνδυασμός αυτών των δυο προτάσεων οδήγησε στην δημιουργία πολλών παραλλαγών μιας θεωρίας, που ονομάστηκε Θεωρία Καλούζα-Κλέιν, με κοινό γνώμονα την γεωμετρική περιγραφή των δυναμικών πεδίων σε πέντε διαστάσεις. Οι θεωρίες αυτές φαινόταν να συνδυάζουν τις δυο δυνάμεις σε μια ενιαία κβαντική θεωρία, έτσι ώστε κάθε σημείο του χωροχρόνου να είναι ένας μικρός βρόγχος με διάμετρο  $10^{-32}$  cm, που επεκτείνεται σε μια δομή που λέγεται επτασφαίρα. Αυτή η πολυδιάστατη δομή προέβλεπε το Σύμπαν να έχει τον ίδιο βαθμό πολυπλοκότητας με αυτόν που παρατηρείται. Επίσης, μέσα από αυτό τον τρόπο οι εξισώσεις του Μάξγουελ για τον ηλεκτρομαγνητισμό προέκυπταν από τις εξισώσεις της ΓΘΣ, απλά με την προσθήκη μιας διάστασης. Οι θεωρίες Καλούζα-Κλέιν ενώ έδειχναν υποσχόμενες και έγιναν αρχικά δεκτές με μεγάλο ενθουσιασμό από τους Αϊνστάιν και Λόρεντζ, εγκαταλείφθηκαν στην συνέχεια αφού τα μοντέλα τους εμφάνιζαν προβλήματα (Lecian, 2008; Μπογδάνος, 2008).



**Εικόνα 4.35** Σχηματική αναπαράσταση της επιπλέον χωρικής διάστασης που εισήγαγε η Θεωρία Καλούζα-Κλέιν. Στο αριστερό τμήμα φαίνεται κάθε σημείο του τρισδιάστατου χώρου να αποτελείται από μια σφαίρα που περιέχει την πέμπτη διάσταση, με τον ίδιο τρόπο που ένας κύκλος (δεξί τμήμα) σε μονοδιάστατο χώρο αν παρατηρηθεί σε μεγέθυνση μοιάζει με κύλινδρο (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα., 2008).

Μια σωστή θεωρία στη Φυσική πρέπει να κάνει προβλέψεις που να επαληθεύονται από το πείραμα. Ένα μειονέκτημα των θεωριών Καλούζα-Κλέιν ήταν ότι η επιπλέον χωρική διάσταση, δεν μπορούσε να παρατηρηθεί. Η θεωρία το αιτιολογούσε βάσει της μικρής ακτίνας της κυκλικής διάστασης. Πέρα από αυτό εντοπίστηκε και ένα επιπλέον πρόβλημα. Για να εξαχθεί ο ηλεκτρομαγνητισμός από την θεωρία της ΓΘΣ έπρεπε η ακτίνα της επιπλέον διάστασης να μην κινείται ελεύθερα, δηλαδή να παγώνει κατά κάποιο τρόπο στον χρόνο. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το κύριο δόγμα της ΓΘΣ, που θεωρεί ότι η γεωμετρία του χώρου εξελίσσεται με τον χρόνο και η ίδια η θεωρία Καλούζα-Κλέιν χρησιμοποιούσε αυτή σαν βάση.

Από την άλλη πλευρά, αν κινούνταν ελεύθερα η ακτίνα της πέμπτης διάστασης, ο κύκλος της ή θα κατέληγε σε σημειακή ιδιομορφία, που θα σήμαινε το τέλος του χρόνου, ή θα γινόταν πολύ μεγάλος ώστε τελικά να γίνεται ορατή στον Κόσμο. Και οι δυο περιπτώσεις

καταλήγουν σε ασταθείς λύσεις ή σε άτοπες ερμηνείες. Σε αυτά τα προβλήματα προστέθηκε και ένα τρίτο το 1930, με την ανακάλυψη των πυρηνικών δυνάμεων. Μια ενοποιημένη θεωρία έπρεπε να περιλαμβάνει και αυτές, αλλά για να συμβεί αυτό απαιτούνταν περισσότερες διαστάσεις των οποίων οι γεωμετρίες έπρεπε πάλι να είναι στατικές στον χώρο και στον χρόνο (Carozziello & De Laurentis, 2011; Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008). Όπως και να έχει η ιδέα της χρησιμοποίησης ανώτερων διαστάσεων οδήγησε τις θεωρίες ενοποιημένου πεδίου σε παρακμή, αν και η εφαρμογή τους στην ΓΘΣ ανέδειξαν τις εξισώσεις Γιάνγκ-Μίλς όπως ονομάστηκαν το 1950 και χρησιμοποιήθηκαν ως μαθηματικά εργαλεία από μεταγενέστερες θεωρίες (Kaku, 2022).

Τα παραπάνω μειονεκτήματα προσπάθησε να καλύψει μια άλλη θεωρία που αναπτύχθηκε το 1973, από τον Αυστριακό φυσικό Τζούλιους Βες και τον Ιταλό φυσικό Μπρούνο Ζουμίνο και είναι γνωστή ως Υπερσυμμετρική θεωρία (Pickover, 2016). Η θεωρία αυτή επιχείρησε να ενοποιήσει τα σωματίδια με τις δυνάμεις, αφού η κβαντική θεωρία παρά τον σωματιδιοκυματικό δυϊσμό προέβλεπε δυο χωριστές κατηγορίες στοιχειωδών οντοτήτων, τα φερμιόνια και τα μποζόνια. Η Υπερσυμμετρία αποτελεί ένα μαθηματικό τρόπο επίλυσης του προβλήματος μέσω της ιδέας-πρόβλεψης ότι τα φερμιόνια και τα μποζόνια δύναται να συσχετιστούν μεταξύ τους μέσω ενός υπερσυμμετρικού σωματιδίου-εταίρου και άρα αυτά να εμφανίζονται κατά ζεύγη. Παραδείγματος χάριν το ηλεκτρόνιο, που είναι φερμιόνιο, αποτελεί το ίδιο σωματίδιο με το υπερσυμμετρικό του ζευγάρι, το σηλεκτρόνιο, που είναι μποζόνιο. Αν ιδωθεί από άποψη σπιν, η υπερσυμμετρία αποτελεί μια προσπάθεια ενοποίησης σωματιδίων ύλης με ημιακέραιο σπιν(1/2, 3/2) και σωματιδίων φορέων δυνάμεων με ακέραιο σπιν (0,1,2).

Με αυτόν τον τρόπο τα ζεύγη δυνητικών σωματιδίων και αντισωματιδίων με ημιακέραιο σπιν θα έχουν αρνητική ενέργεια και θα εξουδετερώνουν την θετική ενέργεια των ανάλογων σωματιδίων με ακέραιο σπιν, εξαλείφοντας έτσι το πρόβλημα των απειρισμών που παρατηρούνται στις εξισώσεις (Gubser, 2020; Μαρούδας, 2015).

Η εφαρμογή αυτής της θεωρίας στην περίπτωση της βαρυτικής αλληλεπίδρασης ήταν το έναυσμα για την εμφάνιση μιας ομάδας θεωριών, που ονομάζονται θεωρίες Υπερβαρύτητας. Η πρωταρχική θεωρία υπερβαρύτητας προέκυψε από τις συνδυασμένες εργασίες των Αμερικανών φυσικών Στάνλεϊ Ντέσερ και Ντάνιελ Φρίντμαν, των Ιταλών φυσικών Σέρτζιο Φεράρα και Μπρούνο Ζουμίνο καθώς και του Ολλανδού φυσικού Πίτερ Βαν Νιουβενχόιζεν. Η ίδια η θεωρία αποτελεί μια γενίκευση της ΓΘΣ, ώστε να περιλαμβάνει ένα πεδίο πανταχού παρόν με σπιν 3/2, αυτό του υπερσυμμετρικού του μποζονικής φύσεως γκραβιτονίου ή βαρυτονίου, δηλαδή του φερμιονικής φύσεως γκραβιτίνου ή βαρυτίνου.

Απαραίτητη προϋπόθεση της θεωρίας ήταν οι δυνάμεις να μην αλλάζουν, όταν γίνεται η αντικατάσταση των βαρυτίνων από βαρυτόνια. Γενικά ισχύει ότι οι περιστροφές σωματιδίων αλλά και οι μετακινήσεις τους δεν αλλάζουν τις ιδιότητες του χώρου, γιατί αυτός δεν έχει προτιμώμενη κατεύθυνση και διότι η γεωμετρία του είναι ομοιόμορφη αντίστοιχα. Με άλλα λόγια οι μετατοπίσεις και οι στροφές αποτελούν συμμετρίες του χώρου. Η θεωρία υπερβαρύτητας ουσιαστικά εφάρμοσε τις συμμετρίες του χώρου και του χρόνου στον τρόπο λειτουργίας των δυνάμεων και το αποτέλεσμα ήταν η εξαγωγή της ΓΘΣ. Αρχικά είχε ένα τεχνικό όνομα υπερβαρύτητα  $N=8$ , με το  $N$  να συμβολίζει το πλήθος των διαφορετικών τρόπων συνδυασμού φερμιονίων και μποζονίων. Αυτό βέβαια είχε ως αποτέλεσμα η θεωρία να έχει πολλές διαφορετικές εκδοχές, στις οποίες οι υπολογισμοί ήταν μακροσκελείς και κουραστικοί (Ευαγγελόπουλος, 2001; Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Ακόμη οι εκφραστές της θεωρίας προσπάθησαν να δουν πως θα έμοιαζε η βαρύτητα σε περισσότερες διαστάσεις, κατά τον ίδιο τρόπο που ο Καλούζα επεξεργάστηκε τις εξισώσεις του Αϊνστάιν σε πέντε διαστάσεις. Το αποτέλεσμα περιγράφει ένα Σύμπαν ενέργειας που δημιουργήθηκε σε έντεκα διαστάσεις, χωρίς να υπάρχει διάκριση ύλης και δυνάμεων. Καθώς αυτή η ενέργεια διασκορπιζόταν, ορισμένες διαστάσεις αναδιπλώθηκαν και συγκρότησαν ως δονούμενα κύματα τα σωματίδια, που με την σειρά τους ανέδυσαν τις δυνάμεις της φύσης, που εν συνεχεία εκδηλώθηκαν ως παραμορφώσεις της γεωμετρίας του χωροχρόνου (Carozziello & De Laurentis, 2011).

Οι υποστηρικτές της θεωρίας πιστεύουν ότι το στοιχείο της θεώρησης όλων των γνωστών σωματιδίων ως διαφορετικές καταστάσεις του ανάλογου υπερσωματιδίου τους, την καθιστούν ικανή να ερμηνεύσει τα θέματα της σκοτεινής ύλης και ενέργειας του Σύμπαντος. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, αυτές οι σκοτεινές δομές μπορούν να μελετηθούν μόνο μέσω της βαρύτητας. Έτσι τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης και ενέργειας μπορεί να είναι το βαρυτίνιο, το φωτίνιο, το σηλεκτρόνιο, τα σκουάρκ κ.α. (Al-Khalili, 2005).

Όπως και να έχει, επειδή η θεωρία αυτή είναι καθαρά μαθηματική, πρέπει να επιβεβαιωθεί από πειραματικές παρατηρήσεις. Με άλλα λόγια πρέπει τα υπερσυμμετρικά σωματίδια να εντοπιστούν στους επιταχυντές σωματιδίων, όμως κάτι τέτοιο δεν έχει συμβεί μέχρι σήμερα και ένας πιθανός λόγος είναι ότι χρειάζεται πιο εξελιγμένη τεχνολογία από την ήδη υπάρχουσα. Επιπλέον, κάποιοι φυσικοί υποστηρίζουν ότι παρά την κομψή και απλή μαθηματική της περιγραφή, η θεωρία δεν εξαλείφει όλες τις άπειρες ποσότητες, άρα δεν επακανονικοποιεί τη βαρύτητα. Αυτό επίσης δεν μπορεί να ελεγχθεί πλήρως, διότι οι υπολογισμοί που πρέπει να γίνουν ξεπερνάνε τις δυνατότητες των  $H/Y$ . Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι

στις τέσσερις διαστάσεις η θεωρία δεν περιγράφει σωστά τον χωροχρόνο, παρά μόνο στις έντεκα. Ειδικά η διάκριση των εννοιών δεξιά και αριστερά καταρρίπτονται, ενώ η φύση αποδεικνύει το αντίθετο όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του αριστερόστροφου σπιν του νετρίνου, που ισχύει πάντα. Πέραν αυτών των προβλημάτων, υπάρχουν απόψεις που υποστηρίζουν ότι τα στοιχεία της θεωρίας είναι προς τη σωστή κατεύθυνση ενοποίησης των φυσικών θεωριών με τη βαρύτητα (Gubser, 2020).

Γρήγορα έγινε αντιληπτό ότι η θεωρία Υπερβαρύτητας με όλες τις εκδοχές της δεν ήταν ικανή να λύσει από μόνη της το πρόβλημα της κβαντικής βαρύτητας, καθώς κάποιοι απειρισμοί παρέμεναν και δεν είχαν εντοπιστεί στους επιταχυντές οι υπερσυμμετρικοί 'εταίροι'. Αυτό οδήγησε την επιστημονική κοινότητα σε αλλαγές θεώρησης δυο θεμελιωδών στοιχείων, που πιθανόν ευθύνονται για την αποτυχία της. Τα στοιχεία αυτά ήταν ότι ή έπρεπε να απορριφθεί η ιδέα του χωροχρόνου ως στατικού υποβάθρου ή τα σωματίδια που κινούνται στο στατικό υπόβαθρο έπρεπε να μην είναι σημεία-μονοδιάστατες οντότητες (Μαρούδας, 2015).

Η κύρια υποψήφια θεωρία, η οποία έχει συνδεθεί με αυτή που θα ερμηνεύσει την κβαντική βαρύτητα είναι γνωστή ως η Θεωρία των Χορδών. Η ίδια ξεκινάει από την κατεύθυνση της θεώρησης της κβαντικής θεωρίας ως θεμελιώδη και προσπαθεί να τροποποιήσει την ΓΘΣ ώστε να συμπνέει με αυτή. Αυτό έμμεσα σημαίνει ότι θεωρεί εξ αρχής τον χωροχρόνο ως απόλυτο ή αλλιώς ως ένα σταθερό υπόβαθρο πάνω στον οποίο ισχύουν οι νόμοι της κβαντικής φυσικής των στοιχειωδών σωματιδίων. Η κύρια ριζοσπαστική ιδέα στην οποία στηρίζεται και συνάμα την διαφοροποιεί από τις άλλες θεωρίες πεδίου, είναι η αντικατάσταση της έννοιας του σημειακού σωματιδίου από ένα κύμα ενέργειας μιας διάστασης, που ονομάζεται χορδή. Έτσι το πεδίο ή οι δυναμικές γραμμές με άλλα λόγια δεν είναι θεμελιώδης οντότητα, αλλά προσεγγιστική περιγραφή της συμπεριφοράς των χορδών. Αυτή η ιδέα θεωρήθηκε ότι θα εξαλείψει το πρόβλημα των απειρισμών χάρη στην έκταση των χορδών και συνάμα στο ότι οι αλληλεπιδράσεις τους δεν συμβαίνουν σε μηδενική απόσταση (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Στην γενική της μορφή και εξέλιξή της, η θεωρία των χορδών είναι μια μαθηματική θεωρία, επηρεασμένη τόσο από τις θεωρίες Καλούζα-Κλέιν, όσο και από αυτές της Υπερσυμμετρίας. Επινοήθηκε πρώτη φορά το 1960 μέσα από τις ιδέες του Ιταλού φυσικού Γκάμπριελ Βενετσιάνο, με σκοπό να ερμηνεύσει την ισχυρή πυρηνική δύναμη. Αυτή εικαζόταν ως τμήματα χορδών που συνέδεαν τα αδρόνια μεταξύ τους. Η ανακάλυψη όμως αργότερα, των κουάρκ και των γλοιονίων καθώς και η επιτυχή εφαρμογή την κβαντικής χρωμοδυναμικής, που την ενέταξε στο πλαίσιο του Καθιερωμένου Προτύπου, είχε ως συνέπεια την

περιθωριοποίηση της ιδέας των χορδών. Το ενδιαφέρον όμως γι' αυτήν αναθερμάνθηκε αργότερα, καθώς κάποια ενδιαφέροντα στοιχεία της θεωρίας, που θα περιγραφούν παρακάτω, την καθιστούσαν κατάλληλη ως μια θεωρία κβαντικής βαρύτητας (Al-Khalili, 2005).

Σύμφωνα με την θεωρία των χορδών οι μονοδιάστατες αυτές οντότητες έχουν δυο ιδιότητες. Η μια είναι ότι μπορούν να τεντωθούν, όταν παίρνουν ενέργεια και η άλλη ότι μπορούν να χαλαρώνουν, όταν χάνουν ενέργεια. Έτσι η κάθε χορδή είναι ένα διακριτό τεμάχιο που είχε ένα συγκεκριμένο ποσό ορμής και ενέργειας, το οποίο ονομάζεται τάση χορδής και εκφράζει την ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα μήκους της χορδής. Αυτή η ιδέα συμφωνούσε μια την Αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής θεωρίας, δεδομένου ότι υπάρχει ένα ελάχιστο δυνατό μήκος (Gubser, 2020).

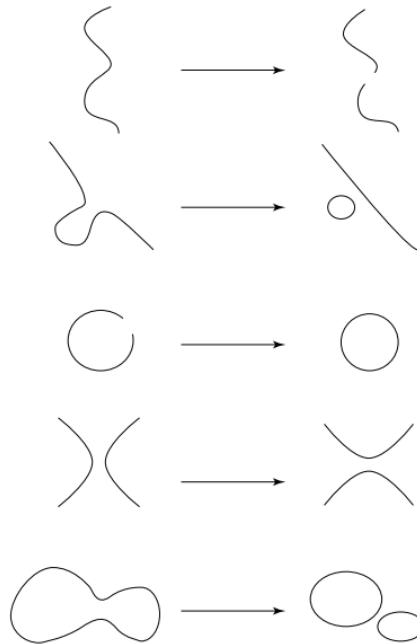
Ακόμη, οι χορδές χωρίζονται σε δυο είδη, τις ανοιχτές και τις κλειστές. Οι ανοιχτές έχουν δυο άκρα, όπως ένα ευθύγραμμο λαστιχάκι, τα οποία αντιπροσωπεύουν εκατέρωθεν τα φορτισμένα σωματίδια ύλης και αντιύλης, ενώ η μεταξύ τους άμαξη ταλάντωση αναπαριστά τον φορέα της δύναμης που υφίστανται, δηλαδή τα μποζόνια. Οι κλειστές χορδές αποτελούν ένα βρόχο ή πιο απλά μοιάζουν με ένα κύκλο. Οι διαφορετικές ταλαντώσεις ή συχνότητες δόνησης των χορδών αντιστοιχούν στα διαφορετικά είδη σωματιδίων που παρατηρούνται στο Κ.Π., με την έννοια ότι διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης εκφράζονται με διαφορετικές τιμές μάζας ή σπιν των σωματιδίων (Chamani & Ahmadi, 2010).



**Εικόνα 4.36** Τα δυο βασικά είδη των χορδών. Αριστερά φαίνεται μια ανοιχτή χορδή ενώ δεξιά μια κλειστή χορδή (White, 2018).

Οι τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων εκφράζονται μέσω της δυνατότητας δυο χορδών να ενώνονται σε μια και μέσω της δυνατότητας μιας χορδής να διαχωρίζεται σε δυο. Η εκπομπή ενός μποζονίου αντιστοιχεί σε διαχωρισμό χορδών, ενώ η απορρόφηση σε σύνθεση χορδών. Στην περίπτωση των ανοιχτών χορδών η ένωση ή ο διαχωρισμός μοιάζει με διακλάδωση ευθύγραμμων τμημάτων, ενώ στην περίπτωση των κλειστών χορδών, με δυο διακλάδωση σωλήνων (Hawking, 2000). Το στοιχείο που περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις στην θεωρία των χορδών ονομάζεται σταθερά σύζευξης ( $g$ ) και είναι ένα καθαρός αριθμός, ο οποίος εκφράζει την πιθανότητα να σπάσει ή να ενωθεί μια

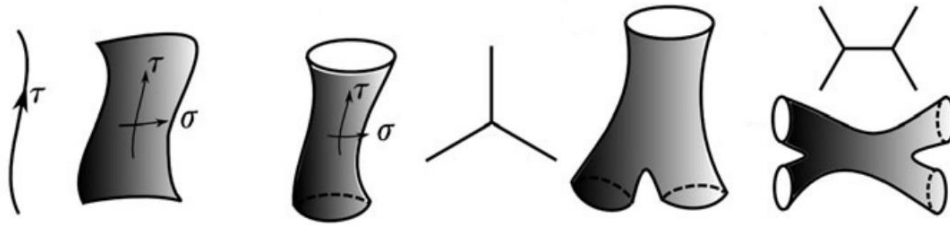
χορδή, αναδύοντας έτσι την μεταξύ τους δύναμη. Η σταθερά σύζευξης έχει σταθερή τιμή και δεν καθορίζεται από την θεωρία, αλλά προκύπτει από το περιβάλλον στο οποίο δραστηριοποιείται η χορδή (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).



**Εικόνα 4.37** Οι αλληλεπιδράσεις στη Θεωρία των Χορδών ερμηνεύονται μέσα από συνενώσεις ή διαχωρισμούς μεταξύ ανοιχτών και κλειστών χορδών (Jones & Robbins, 2010).

Μια ακόμη καινοτομία της Θεωρίας των Χορδών συνιστά η ενοποίηση δυνάμεων και κίνησης εκπεφρασμένη μέσα από ένα πολύ απλό νόμο, που είναι συμβατός τόσο με την ΓΘΣ, όσο και με την κβαντική θεωρία. Η κίνηση της μονοδιάστατης χορδής στον χρόνο σχηματίζει μια δυσδιάστατη επιφάνεια στον χωροχρόνο, την κοσμική επιφάνεια της χορδής που μπορεί να είναι μια ταινία ή ένας κύλινδρος, αν είναι ανοιχτή ή κλειστή αντίστοιχα. Οι χορδές κινούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν λιγότερο εμβαδό, γι' αυτό και ο απλός νόμος κίνησης τους ονομάζεται νόμος του ελάχιστου εμβαδού. Μέσω αυτού καθορίζονται, ταυτόχρονα, αφενός οι ιδιότητες του χωροχρόνου και αφετέρου οι δυνάμεις, αφού ερμηνεύονται μέσω της ένωσης ή της σχάσης χορδών (Markatos, 2009; Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).

Η βαρύτητα στην θεωρία αυτή περιγράφεται μέσω της δράσης των κλειστών χορδών αποκλειστικά, ως συνδετικοί κρίκοι δυο χορδών. Αυτή η διαδικασία στον χωροχρόνο είναι παρεμφερής με την διαδικασία ένωσης δυο σωλήνων σε ένα τρίτο. Οι υπόλοιπες δυνάμεις και τα σωματίδια μπορούν να προκύψουν είτε από ταλαντώσεις ανοιχτών είτε κλειστών χορδών. Έτσι μπορεί να ειπωθεί ότι η βαρύτητα στην συγκεκριμένη θεωρία και αναδύεται και διαχωρίζεται από τις άλλες δυνάμεις εξ αρχής (Hawking, 2000).



**Εικόνα 4.38** Οι χορδές (ανοιχτές και κλειστές) καθώς κινούνται στον χρόνο σχηματίζουν κοσμικές επιφάνειες που μοιάζουν με φύλλα για τις ανοιχτές και με σωλήνες για τις κλειστές, όπως φαίνεται αριστερά στην εικόνα. Η βαρύτητα στην Θεωρία Χορδών περιγράφεται αποκλειστικά από την δράση κλειστών χορδών που συνενώνονται, όπως φαίνεται στα δεξιά της εικόνας. Επίσης φαίνεται η διαφορά με τα διαγράμματα Φέινμαν, μέσω των οποίων ερμηνεύονται οι αλληλεπιδράσεις στην Κβαντική μηχανική (Anderson, 2017).

Παρά το γεγονός ότι η θεωρία αυτή ήταν απλή, κομψή, περιεκτική και πλήρως συμβατή με τις κβαντικές αρχές και την ΓΘΣ, εξαιρουμένης της δράσης των χορδών σε στατικό χωροχρόνο, ταλανιζόταν από δυο σοβαρά και αλληλένδετα προβλήματα. Το κύριο πρόβλημα ήταν ότι προέβλεπε την ύπαρξη σωματιδίων με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τις βασικές αρχές της θεωρίας της σχετικότητας που ήδη εμπεριέχει. Έχει ήδη αναφερθεί ότι οι διαφορετικές καταστάσεις ταλάντωσης της χορδής αντιστοιχούν σε διαφορετικές μάζες και είναι πλήρως συμβατές από τον τύπο της ισοδυναμίας μάζας-ενέργειας  $E=m \cdot c^2$ . Όμως οι συχνότητες ταλάντωσης της χορδής δεν συνάδει με τον τύπο της ενέργειας των κβάντων  $E=h \cdot f$ .

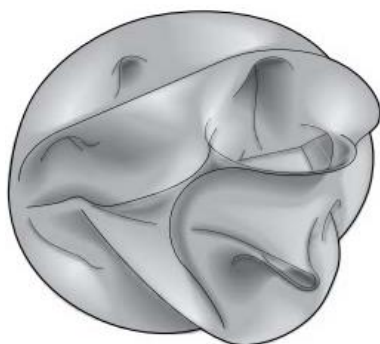
Η συνολική μάζα της χορδής προκύπτει από το άθροισμα της εγγενούς μάζας ηρεμίας της χορδής απλά επειδή υπάρχει, της ενέργειας ταλάντωσης λόγω ισοδυναμίας μάζας-ενέργειας και τις ελάχιστες ενεργειακές ταλαντώσεις που προβλέπει η κβαντική αβεβαιότητα, γνωστή ως ενέργεια μηδενικού σημείου. Αυτή, δεν μπορεί να αποφευχθεί, καθώς είναι βασική αρχή της κβαντικής θεωρίας, αλλά οι αριθμητικές τιμές που δίνει στην μάζα της χορδής είναι αρνητικές. Αποδεικνύεται επίσης ότι το συνολικό άθροισμα των παραπάνω συνεισφορών στη μάζα της χορδής είναι πάλι αρνητικός αριθμός και ονομάζεται φανταστική μάζα. Οι φανταστικές μάζες κινούνται με ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτές του φωτός, δεδομένου ότι οι μηδενικές μάζες κινούνται ακριβώς με αυτή. Τα υποθετικά σωματίδια αυτά ονομάζονται ταχύονια και περιγράφουν ένα Σύμπαν εξαιρετικά ασταθές με μαθηματικούς απειρισμούς συνάμα (Gubser, 2020).

Η ρύθμιση αυτού του προβλήματος γίνεται μόνο με την προσθήκη επιπλέον διαστάσεων, διότι η τιμή της ενέργειας μηδενικού σημείου εξαρτάται από τον αριθμό τους. Για να γίνει λοιπόν μηδενική, έπρεπε να υπάρχουν στην θεωρία εικοσιπέντε διαστάσεις χώρου και μια χρονική. Αυτή όμως η ρύθμιση δεν αρκεί, γιατί προβλέπει μόνο άμαζα σωματίδια, οπότε από την θεωρία λείπουν τα φερμιόνια παντελώς, δηλαδή η συνηθισμένη ύλη. Η αρχική αυτή

εκδοχή της θεωρίας των χορδών του Βενετσιάνο ονομάστηκε μποζονική θεωρία των χορδών και παρά την μαθηματική ομορφιά της, ήταν ελλιπής (Tong, 2009).

Το 1984 η θεωρία των χορδών ξαναήρθε στο προσκήνιο σε άλλη μορφή, μετά την αποτυχία των θεωριών Υπερβαρύτητας να ξεπεράσουν τους μαθηματικούς απειρισμούς και να εξηγήσουν την ενδογενή αριστερή στροφικότητα των σωματιδίων. Αυτή η χρονική περίοδος αποτέλεσε και την πρώτη επανάσταση, όπως ονομάστηκε, στην θεωρία των χορδών. Τα έργα του Γαλλοαμερικανού φυσικού Πιέρ Ραμόντ καθώς και του Αμερικανού Τζόν Σβαρτς και του Βρετανού Μίκαελ Γκριν συνδύαζαν την θεωρία της υπερσυμμετρίας με τις χορδές του Βενετσιάνο, δίνοντας μια νέα, εξελιγμένη θεωρία, την Θεωρία των Υπερχορδών (Schwarz, 1982).

Η θεωρία αυτή διορθώνει το πρόβλημα των ταχυονίων της μποζονικής θεωρίας με την εισαγωγή των υπερσυμμετρικών σωματιδίων, που προβλέπονται από την θεωρία της Υπερσυμμετρίας. Αυτή όμως λειτουργεί μόνο όταν στο Σύμπαν οι χωρικές διαστάσεις είναι εννέα. Έτσι η θεωρία Υπερχορδών μειώνει τις είκοσι έξι διαστάσεις του χωροχρόνου της αρχικής θεωρίας σε δέκα. Επίσης παρουσιάζονται νέοι τρόποι ταλάντωσης και κίνησης της χορδής, όχι μόνο στον συμβατικό χωροχρόνο αλλά και σε υψηλότερες διαστάσεις. Μέσα από αυτούς τους νέους τρόπους προβλέπονται όλα τα φερμιόνια, που έλλειπαν από την αρχική θεωρία ενώ ταυτόχρονα εξηγείται και το αριστερόστροφο σπιν των παρατηρούμενων σωματιδίων. Τέλος, η νέα θεωρία προβλέπει, δανειζόμενη στοιχεία από τις θεωρίες Καλούζα-Κλέιν, ότι οι έξι επιπλέον χωρικές διαστάσεις συμπύσσονται σε ένα συμπαγή υποχώρο πάρα πολύ μικρού μεγέθους για να παρατηρηθεί. Οι υποχώροι αυτοί σχηματίζουν δομές, που ονομάζονται χώροι Κάλαμπι-Γιάο ή πολλαπλότητες (Anderson, 2017; Jones & Robbins, 2010).



**Εικόνα 4.39** Σχηματική υποθετική αναπαράσταση ενός χώρου Κάλαμπι-Γιάο, όπου οι έξι κρυμμένες χωρικές διαστάσεις είναι συμπαγοποιημένες (Jones & Robbins, 2010).



Παρά τις βελτιώσεις και τα καινοτόμα στοιχεία, σύντομα έγινε αντιληπτό από τους φυσικούς ότι υπήρχαν πέρα από την μοζονική θεωρία, πέντε συνεπείς θεωρίες Υπερχορδών σε δεκαδιάστατο χωροχρόνο. Επομένως δεν υπάρχει ενοποιημένη θεωρία και καμία από τις πέντε δεν είναι πιο θεμελιώδης από την άλλη. Επιπροσθέτως υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι να κουλουριαστούν οι επιπλέον διαστάσεις στις δομές Κάλαμπι-Γιάο, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι μοναδικές.

Αυτό έχει και περαιτέρω συνέπειες, αφού κάθε τέτοια δομή αντιπροσωπεύει διαφορετική γεωμετρία πάνω στην οποία κινούνται οι χορδές, αλλά η ίδια η θεωρία είναι εξαρτημένη από το υπόβαθρο, το οποίο, όπως φαίνεται, δεν είναι μοναδικό. Οι σταθερές που περιγράφουν τις τιμές της μάζας των σωματιδίων και την ισχύ των δυνάμεων εξαρτώνται από τις τιμές της γεωμετρίας των επιπλέον διαστάσεων, οπότε πρέπει να ρυθμιστούν. Οι ελεύθερες σταθερές είναι όσοι και οι χώροι Κάλαμπι-Γιάο, δηλαδή εξαιρετικά πολλές, ενώ το Καθιερωμένο Πρότυπο έχει μόνο είκοσι. Συνολικά η θεωρία Υπερχορδών είναι απλά ένας κατάλογος με εκατοντάδες χιλιάδες λύσεις και παράλληλα στηρίζεται στα υπερσυμμετρικά σωματίδια που δεν έχουν παρατηρηθεί στους επιταχυντές καθώς και δεν μπορεί να κάνει προβλέψεις που να αποδεικνύονται πειραματικά, αφού οι κλίμακες που αναφέρεται είναι εκτός δυνατοτήτων των επιταχυντών. Όλα αυτά τα στοιχεία οδήγησαν του φυσικούς σε μια εκ νέου περιθωριοποίηση της θεωρίας και στροφή σε άλλες κατευθύνσεις (Gubser, 2020; Jones & Robbins, 2010).

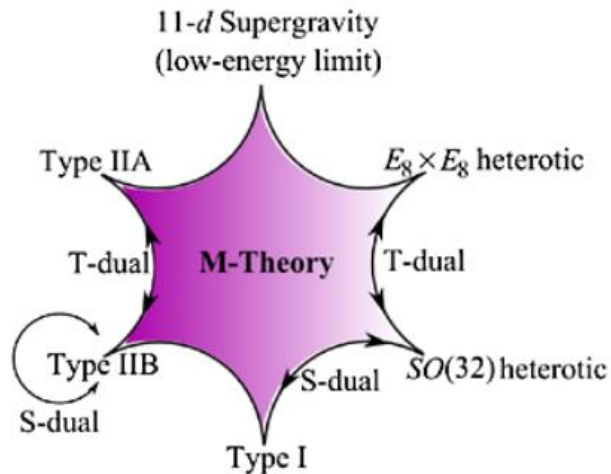
Περιέργως η ιστορία έχει και συνέχεια αφού το 1995 έγινε μια δεύτερη επανάσταση στην Θεωρία των Χορδών χάρη στις ιδέες και το έργο του Αμερικανού φυσικού Έντουαρντ Βίτεν. Η κύρια ιδέα του Βίτεν ήταν ότι ο πέντε διαφορετικές θεωρίες Υπερχορδών θα μπορούσαν να ενοποιηθούν σε μια θεωρία μέσω της καινοτομίας των δυϊσμών και της ενσωμάτωσης των βρανών, από μια θεωρία που είχε αναπτυχθεί, ανεξάρτητα από αυτή των χορδών (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008). Η νέα θεωρία που προκύπτει από τον συγκεκριισμό αυτών των στοιχείων και απαιτεί ο χωροχρόνος να έχει έντεκα διαστάσεις ονομάστηκε Θεωρία Μ, με το Μ να μην επιδέχεται μοναδική ερμηνεία (Kaku, 2022).



*Εικόνα 4.40* Φωτογραφία του Αμερικανού Φυσικού Έντουαρντ Βίτεν, ο οποίος συνέβαλε στην συνένωση των πέντε συνεπών θεωριών χορδών στην επονομαζόμενη Θεωρία Μ (Encyclopedia Britannica, 2022).

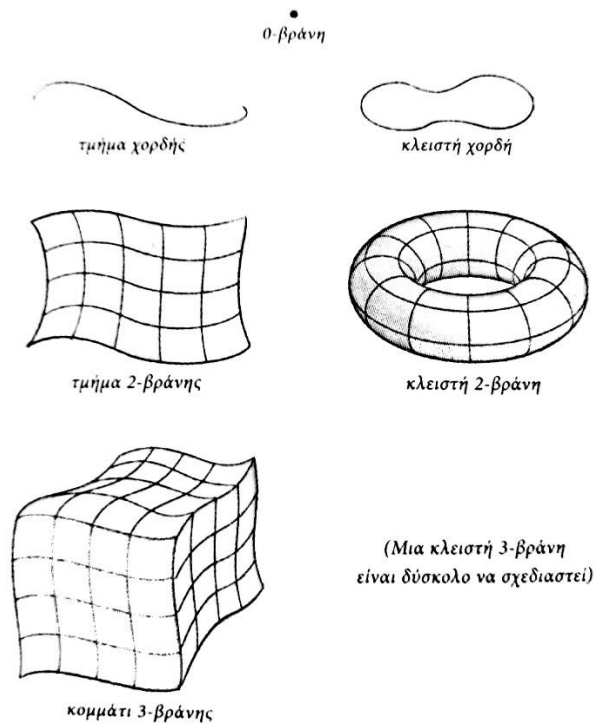
Οι δυϊσμοί αποτελούν μια τεχνική που αναδεικνύει ότι φαινομενικά διαφορετικές περιγραφές μεταξύ δυο θεωριών αντιστοιχούν στην ίδια πραγματικότητα. Η περιγραφή μιας θεωρίας στις χαμηλές ενέργειες, δηλαδή στις μεγάλες κλίμακες έχει λιγότερη πληροφορία και δεδομένα προς επεξεργασία σε σχέση με την ίδια περιγραφή στις υψηλές ενέργειες και άρα στις μικρές κλίμακες. Ωστόσο οι δυϊσμοί εγγυόνται ότι μέσα από ειδικές συμμετρίες, το σύνολο των δεδομένων υπάρχει και στις δυο περιγραφές, οπότε οι δυο θεωρίες θεωρούνται ισοδύναμες ή δυϊκές (Tong, 2009).

Οι δυϊσμοί συσχετίζουν θεωρίες υπερχορδών με χωροχρόνους που έχουν ίδιο πλήθος διαστάσεων. Υπάρχουν τρεις κύριοι δυϊσμοί και από εκεί και πέρα έχουν πολλές επεκτάσεις. Η T-δυϊκότητα, όπως ονομάζεται, συνδέει θεωρίες υπερχορδών με κριτήριο την τοπολογία του χώρου. Το διαφορετικό σύμπτυγμα των διαστάσεων σε δυο θεωρίες ισοδυναμεί με τον τρόπο που οι χορδές περιελίσσονται γύρω από ένα κύκλο. Οι ακτίνες των κύκλων μπορεί να έχουν διαφορετικές τιμές αλλά η τιμή της μιας να ισούται με την αντίστροφη τιμή της άλλης. Ένα άλλο είδος, η S-δυϊκότητα, σχετίζεται με την σταθερά σύζευξης και άρα με την ισχύ των αλληλεπιδράσεων, οπότε και πάλι η τιμή της μιας θεωρίας ισούται με την αντίστροφη τιμή της άλλης. Τέλος, υπάρχει και η U-δυϊκότητα, που αναφέρεται σε θεωρίες που ισχύουν μαζί και οι S και οι T δυϊσμοί (Anderson, 2017; Gubser, 2020). Οι δυϊσμοί όμως είναι αποτελεσματικοί στη Θεωρία Μ, μόνο αν οι χορδές συνδυαστούν με άλλα αντικείμενα, τις βράνες (Kaku, 2022).



**Εικόνα 4.41** Η Θεωρία M συνδυάζει τις πέντε θεωρίες χορδών με τεχνικές ονομασίες I,IIA,IIIB και τις δυο ετεροτικές χάρις στον δνίσμους S και T,δίνοντας παράλληλα τα ίδια αποτελέσματα με την ενδεκαδιάστατη Θεωρία Υπερβαρύτητας στις χαμηλές ενέργειες ή αλλιώς στις μεγάλες κλίμακες (Anderson, 2017).

Η θεωρία των βρανών είχε αναπτυχθεί για να δώσει μια εναλλακτική ερμηνεία για το Κοσμολογικό γίνεσθαι. Επίσης κύριος στόχος της ήταν να εξηγήσει το λόγο που η βαρύτητα είναι ασθενής στον τετραδιάστατο κόσμο σε σχέση με τις υπόλοιπες αλληλεδράσεις. Η βράνη είναι ένα αντικείμενο που μπορεί να έχει πολλές χωρικές διαστάσεις ανάλογα με το αριθμητικό πρόθεμα που έχει στην αρχή. Έτσι μια 0-βράνη είναι ένα αδιάστατο σωματίδιο, η 1-βράνη είναι ένα μονοδιάστατο αντικείμενο όπως μια χορδή, η 2-βράνη είναι μια δυσδιάστατη επιφάνεια κ.ο.κ. Η θεωρία αυτή υποθέτει ότι το Σύμπαν μας είναι εγκλωβισμένο σε μια τετραδιάστατη βράνη, που πλέει σε ένα πολυσύμπαν πολλών διαστάσεων, δίπλα από άλλες βράνες. Η Αμερικανίδα φυσικός Λίζα Ράνταλ και ο Ινδοαμερικανός Ραμάν Σούντρουμ υποστήριζαν ότι οι βράνες μπορούν να αλληλεπιδρούν μόνο βαρυτικά και ο λόγος που η βαρύτητα είναι ασθενής στον Κόσμο μας είναι ακριβώς γιατί τα βαρυτόνια διαχέονται στις άλλες διαστάσεις, με αποτέλεσμα να εξασθενούν και ο αριθμός τους στις τρεις διαστάσεις να είναι μειωμένος. Αυτός ίσως είναι και ένας λόγος που δεν έχει παρατηρηθεί ακόμα (Banks, Fischler, Shenker, & Susskind, 1997; Μπογδάνος, 2008).



**Εικόνα 4.42** Τα διάφορα είδη βρανών. Ένα σημείο είναι μια 0-βράνη, η χορδή θεωρείται ως 1-βράνη, οι κοσμικές επιφάνειες τους θεωρούνται ως 2-βράνες ενώ το τρισδιάστατο ανάλογο τους είναι οι 3-βράνες. Ο γραφικός σχεδιασμός της κλειστής 3-βράνης ενέχει δυσκολίες (Gubser, 2020).

Επιστρέφοντας στην θεωρία M, αν συνδυαστούν οι βράνες με τις χορδές, δίνουν μια καλύτερη εικόνα στην σχέση ανάμεσα στις θεωρίες πεδίου και σε αυτές των χορδών. Επίσης δίνουν τις κατάλληλες αναλογίες για να κατανοηθεί η σχέση των τριών διαστάσεων με τις επιπλέον διαστάσεις της θεωρίας χορδών. Οι 0-βράνες μπορούν αντικαταστήσουν τον χώρο των άκρων μια ανοιχτής χορδής, που αντιπροσωπεύουν ηλεκτρομαγνητικά φορτία παρέχοντας παράλληλα επιπλέον χαρακτηριστικά στην γεωμετρία υποβάθρου. Επίσης, οι βράνες έχουν καθορισμένη μάζα, η οποία εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από την ισχύ της αλληλεπίδρασης των χορδών. Επιπλέον για κάθε βράνη, υπάρχει και μια αντιβράνη με αντίθετο φορτίο, που αν συγκρουστούν, μετατρέπονται σε καθαρή ενέργεια ισοδύναμης μάζας με αυτή των βρανών.

Η θεωρία M τελικά είναι μια συνεπής κβαντική θεωρία που έχει ως όριο για τις χαμηλές ενέργειες τα ίδια αποτελέσματα με την θεωρία Υπερβαρύτητας των έντεκα διαστάσεων. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι με τους δυϊσμούς και τις βράνες κατάφερε να συσχετίσει τις πέντε θεωρίες Υπερχορδών, δεν αποτελεί μια πλήρης περιγραφή μιας ενιαίας και συνεπούς θεωρίας. Αυτό συμβαίνει γιατί ως θεωρία είναι εξαρτημένη από το υπόβαθρο και δεν παρέχει ένα συγκεκριμένο, αφού οι πέντε θεωρίες που είναι κομμάτια της έχουν διαφορετικές γεωμετρίες η καθεμία και δεν είναι γνωστό ποια είναι η σωστή. Έτσι οι εξισώσεις της μπορεί να είναι μοναδικές αλλά έχουν δισεκατομμύρια διαφορετικές λύσεις. Άλλοι λόγοι

που δεν την καθιστούν πλήρη είναι ότι δεν εξηγεί την σκοτεινή ενέργεια, συνεπώς και την επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος, όπως επίσης είναι απαραίτητη και η απόδειξη των υπερσυμμετρικών σωματιδίων που χρησιμοποιεί. Τέλος η θεωρία Μ για να περιγράψει συνολικά τον μικρόκοσμο και τον μακρόκοσμο έπρεπε να υποθέσει παραπάνω διαστάσεις και σωματίδια από αυτά που παρατηρούνται, τα οποία εν συνεχεία πρέπει να αποδειχθούν άμεσα ή έμμεσα (Anderson, 2017; Banks, Fischler, Shenker, & Susskind, 1997; Gubser, 2020).

Η θεωρία των χορδών με τις εξελίξεις της αποτελούν την μια κατεύθυνση σύνθεσης μιας θεωρία κβαντικής βαρύτητας, που θεωρεί έχει ως κύριο πυλώνα την κβαντική θεωρία. Σε μια άλλη κατεύθυνση, που βασίζεται στην ΓΘΣ και τις αρχές της, κινήθηκε επίσης πλήθος θεωριών. Βασικά χαρακτηριστικά της κατεύθυνσης αυτής είναι η δυναμική γεωμετρία του χωροχρόνου εξελισσόμενη στον χρόνο ή αλλιώς η ανεξαρτησία υποβάθρου, η συμπίληψη της αιτιότητας σε αυτή την δομή και η αντικατάσταση της εικόνας του χωροχρονικού συνεχούς με τον διακριτό χωροχρόνο (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).

Πολλοί φυσικοί και μαθηματικοί είχαν συνεργαστεί στο παρελθόν προκειμένου να παρουσιάσουν μια κβαντική γεωμετρία του χωροχρόνου. Μια πρώτη προσπάθεια επιτεύχθηκε με την θεωρία των αιτιακών δυναμικών τριγωνισμών από τους Ρενάτε Λολ και Γιαν Άμπγκερν. Στην θεωρία αυτή ο χωροχρόνος αναπαρίσταται από απλούς δομικούς λίθους κύβων, στους οποίους αν εφαρμοστούν απλοί κανόνες περιέχοντας ταυτόχρονα τις κβαντομηχανικές πιθανότητες και την αιτιότητα, αναδύουν τον κλασικό χωροχρόνο, όπως τον περιγράφει η ΓΘΣ. Παρεμφερής είναι και η θεωρία αιτιακών συνόλων, που στηρίζεται στις σχέσεις των θεμελιωδών δομικών λίθων του χωροχρόνου, οι οποίες και πάλι τον αναδύουν (Μαρούδας, 2015). Μάλιστα ο Ράφαελ Σόρκιν και οι συνεργάτες του κατάφεραν μέσω αυτής να αποδείξουν ότι η κοσμολογική σταθερά, που σχετίζεται με την επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος, εμφανίζει την παρατηρούμενη τιμή (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Επίσης ο Άγγλος φυσικός Ρότζερ Πενρόουζ, το 1960, είχε δώσει μια προσέγγιση ενός κβαντισμένου χωροχρόνου, βασισμένο σε αιτιακές σχέσεις μέσα από μια θεωρία που είναι γνωστή ως θεωρία συστροφών. Σε αυτή οι ακτίνες φωτός μπορούν να θεωρηθούν θεμελιώδεις και να δομήσουν τον χωροχρόνο ως αιτιακή πτυχή τους (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002). Τέλος μια ακόμη ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι αυτή του Αλαίν Κον μέσω της λεγόμενης μη μεταθετικής γεωμετρίας. Στην περίπτωση αυτή προσπάθησε να περιγράψει μια κβαντική γεωμετρία μέσα από την ενοποίηση Άλγεβρας και

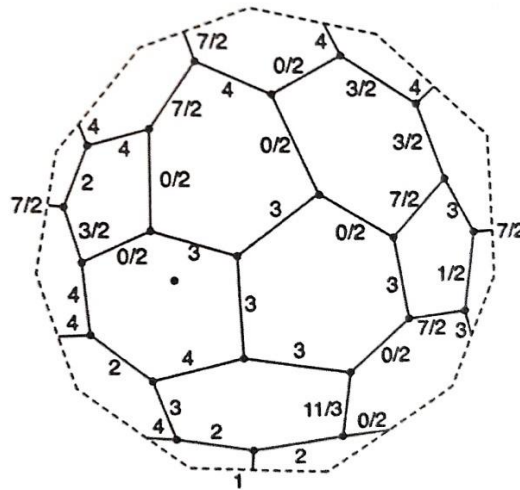
Γεωμετρίας. Στηριζόμενος στην Αρχή της Απροσδιοριστίας μια σχέση  $AB$  στον χώρο αυτό δεν ισοδυναμεί με την σχέση  $BA$ , δηλαδή δεν ισχύει η αντιμεταθετικότητα, επειδή δεν υπάρχει ταυτόχρονη γνώση για την ορμή και την θέση ενός σώματος. Αυτή η θεωρία ήταν πλήρως συνεπής με το Καθιερωμένο Πρότυπο και η συμμόρφωση της με τη θεωρία του Μάξγουελ στην γεωμετρία αυτή, έδινε το μοντέλο Σαλάμ-Γουάινμπεργκ της ηλεκτρασθενοσύς θεωρίας μαζί με τα πεδία Χίγκς (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα, 2008).

Η κύρια θεωρία αυτή της κατεύθυνσης, που θέτει σοβαρή υποψηφιότητα για να είναι μια ολοκληρωμένη θεωρία κβαντικής βαρύτητας είναι η κβαντική βαρύτητα βρόχων με αγγλική συντομογραφία LQG. Οι ιδέες της στηρίζονται αφενός σε μελέτες υπεραγωγών που έγιναν το 1950 και αφετέρου στα έργα του Ινδού Αμπάι Αστεκάρ, του Αμερικανού Λι Σμόλιν και του Ιταλού Κάρλο Ροβέλι. Κύρια επιδίωξη των προαναφερθέντων επιστημόνων ήταν η περιγραφή της βαρύτητας στην κλίμακα Πλάνκ ως καμπύλωση του χωροχρόνου, ευθυγραμμιζόμενοι με τις αρχές του Αϊνστάιν. Ωστόσο για να αποφευχθούν οι απειρισμοί, έπρεπε ο χωροχρόνος να είναι ασυνεχής, δηλαδή κβαντισμένος, και ταυτόχρονα να εξελίσσεται χρονικά σε ένα αιτιακό περιβάλλον. Η επιδίωξη αυτή μόνο εύκολη δεν ήταν, αφού έπρεπε να δομηθεί από την αρχή, χωρίς μια προϋπάρχουσα μετρική υποβάθρου (Jones & Robbins, 2010).

Βασική αρχή της LQG είναι ότι σε αυτό τον χωροχρόνο υπάρχει μια ελάχιστη ποσότητα μήκους, η οποία είναι το μήκος Πλανκ της τάξεως των  $10^{-33}\text{cm}$ . Από αυτό προκύπτει επίσης ότι υπάρχει και μια ελάχιστη ποσότητα εμβαδού, που εκφράζεται σε τετραγωνικά μήκη Πλανκ και είναι της τάξης των  $10^{-66}\text{cm}^2$ . Παρομοίως και ο ελάχιστος όγκος εκφράζεται σε κυβικά μήκη Πλανκ, ισοδύναμος με  $10^{-99}\text{cm}^3$ . Κατ' επέκταση όλες οι μεγαλύτερες δομές του χώρου προκύπτουν ως ακέραια πολλαπλάσια των παραπάνω μονάδων. Το αποτέλεσμα αυτής δόμησης είναι ένας βρόχος, που αντιπροσωπεύει τις κβαντικές καταστάσεις της γεωμετρίας του χώρου αυτού. Η κάθε κβαντική κατάσταση απεικονίζεται σε μορφή γραφήματος που ονομάζεται δίκτυο σπιν, μια ονομασία που έχει επιρροή από ιδέες του Πενρόουζ (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).

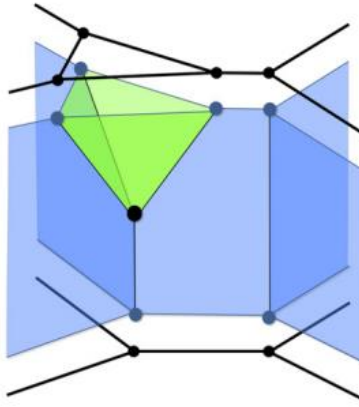
Το δίκτυο σπιν που επί της ουσίας περιγράφει τον χώρο μόνο, αποτελείται από κόμβους και ακμές, που λαμβάνουν πεπερασμένες τιμές. Οι κόμβοι αντιστοιχούν σε κβάντα όγκων Πλανκ και ενώνονται με τις ακμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε κβάντα εμβαδών Πλάνκ, όπως ορίστηκαν προηγουμένως. Οι τιμές των ακμών είναι ακέραια πολλαπλάσια του  $\hbar/2$  και προέρχονται από τα επιτρεπόμενα σπιν των σωματιδίων της κβαντικής θεωρίας, δικαιολογώντας τον όρο δίκτυο σπιν. Με αυτό τον τρόπο ο χώρος δεν εμπεριέχεται σε κάποιο υπόβαθρο αλλά τον φτιάχνει μέσα από τους διαφορετικούς τρόπους συνένωσης των

ακμών στους κόμβους του δικτύου. Στην ΓΘΣ τα εμβαδά και οι όγκοι εξαρτώνται από τις τιμές των βαρυτικών πεδίων και κωδικοποιούνται στις μαθηματικές συναρτήσεις του μετρικού τανυστή. Στην LQG η γεωμετρία κωδικοποιείται από την επιλογή ενός δικτύου σπιν (Ashtekar & Bianchi, 2021; Weinstein & Rickles, 2008).



*Εικόνα 4.43* Γραφική αναπαράσταση ενός δικτύου σπιν, μέσω του οποίου επιχειρείται η κβάντωση της γεωμετρίας του χωροχρόνου. Οι ακμές του δικτύου εκφράζουν κβάντα εμβαδού ενώ οι κόμβοι κβάντα όγκου (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).

Ο χρόνος στην θεωρία είναι επίσης μια κβαντισμένη ποσότητα, οριζόμενη από τον χρόνο Πλανκ ως η ελάχιστη χρονική διάρκεια ενός γεγονότος και ισοδυναμεί με τον χρόνο που χρειάζεται το φως για να διασχίσει ένα κόμβο, όντας της τάξης των  $10^{-44}$  sec. Με την προσθήκη του χρόνου στα δίκτυα σπιν, αυτά κινούνται διαμορφώνοντας νέες δομές που ονομάζονται αφροί σπιν, περιγράφοντας πλέον τον δυναμικό χωροχρόνο. Ο Κάρλος Ροβέλι έδειξε μέσα από τις εργασίες του πως αναδύεται ο κλασικός χωροχρόνος μέσα από τα εξελισσόμενα δίκτυα σπιν, ενώ παράλληλα απέδειξε πως μέσα από αυτά προκύπτει ότι δυο μάζες ασκούν έλξη, ακριβώς όπως ορίζει ο Νόμος του Νεύτωνα. Επιπλέον στις χαμηλές ενέργειες προβλέπονται βαρυτόνια, που περιγράφονται από τις αλληλεπιδράσεις των ακμών με τους κόμβους (Ashtekar & Bianchi, 2021). Τέλος, η Ελληνίδα Φωτεινή Μαρκοπούλου σε μια εκδοχή της LQG έδειξε ότι η θεωρία προβλέπει όλη την πρώτη γενιά σωματιδίων του Κ.Π., που εμφανίζονται ως αναδυόμενες διεγέρσεις της κβαντικής γεωμετρίας της (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).



**Εικόνα 4.44** Η εξέλιξη των δικτύων σπιν μέσα από την κίνησή τους στον χρόνο σχηματίζει τον αφρό σπιν, αντιπροσωπεύοντας έτσι έναν δυναμικό χωροχρόνο (Ashtekar & Bianchi, 2021).

Συνολικά η LQG έχει πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά, είναι μια θεωρία που δίνει πεπερασμένα αποτελέσματα λόγω της κβάντωσης του χωροχρόνου, ενώ ταυτόχρονα είναι και ανεξάρτητη υποβάθρου. Αυτό δείχνει ότι συνταιριάζει αρμονικά τα βασικά στοιχεία τόσο της κβαντικής θεωρίας, όσο και της ΓΘΣ. Επιπροσθέτως δίνει μια απάντηση στο πρόβλημα των σημειακών ιδιομορφιών τόσο του εσωτερικού των Μελανών οπών όσο και της Μ.Έκρηξης. Στις περιπτώσεις αυτές η γεωμετρία του χωροχρόνου αλλάζει πάρα πολύ γρήγορα με τον χρόνο, με αποτέλεσμα η ΓΘΣ να προβλέπει την πάυση του.

Η LQG εδώ δίνει μια νέα οπτική, καθώς προβλέπει ότι η ιδιομορφία αντικαθίσταται με μια νέα έννοια την χωροχρονική αναπήδηση. Καθώς η ύλη συστέλλεται στο εσωτερικό του ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής, δεν καταλήγει σε μια μόνιμη σημειακή ιδιομορφία, αλλά με το που σχηματίζεται στο επόμενο κβάντο χρόνου, αρχίζει να διαστέλλεται πάλι σε μια νέα περιοχή που δεν υπήρχε προηγουμένως. Έτσι ταυτόχρονα λύνεται και το Παράδοξο της πληροφορίας, το οποίο είχε εντοπίσει ο Χόκινγκ, αφού αυτή δεν χάνεται. Από την άλλη αν η χωροχρονική αναπήδηση εφαρμοστεί στο μοντέλο της Μ.Έκρηξης δίνει την ερμηνεία ενός Σύμπαντος, που υπήρχε και πριν την έκρηξη αλλά και θα συνεχίζει να υπάρχει, καθώς γεννιέται και καταρρέει σε νέες περιοχές του. Τέλος, είναι μια θεωρία που κάνει προβλέψεις με δυνατότητα απόδειξης είτε μέσω της μελέτης της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου, είτε της κλίμακας Πλάνκ.

Παρά τα πλεονεκτήματα της δεν μπορεί να θεωρηθεί ακόμη τουλάχιστον, ως μια ολοκληρωμένη θεωρία για διάφορους λόγους. Πρώτον δεν έχει αποδειχθεί, αφού τα πειράματα που πρέπει να γίνουν, απαιτούν ανώτερη τεχνολογία από την υπάρχουσα. Δεύτερον παρόλο που περιγράφει την βαρύτητα, αδυνατεί να κάνει το ίδιο και με τις άλλες δυνάμεις. Επίσης ο αφρός σπιν αναδεικνύει μόνο τα βασικά σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου



και μακροσκοπικά, αδυνατεί να περιγράψει με ακρίβεια την ύλη (Ashtekar & Bianchi, 2021; Jones & Robbins, 2010; Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

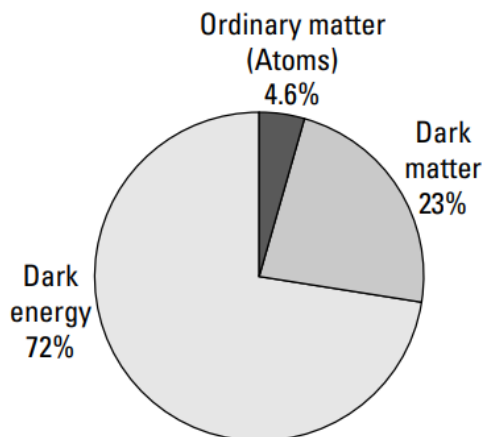
Τελικώς παρά της προσπάθειας των φυσικών του 20ου αιώνα, η Θεωρία των Χορδών και η Κβαντική βαρύτητα βρόχων είναι ημιτελείς και δεν έχουν οδηγήσει σε μια Θεωρία των Πάντων, καθώς η καθεμιά έχει τα δικά της προβλήματα και δεν μπορούν να ελεγχθούν και πειραματικά με τους τωρινούς επιταχυντές σωματιδίων (Μαρούδας, 2015). Ο Λι Σμόλιν προσθέτει ότι κατά την κρίση του υπάρχει και ένα άλλο πρόβλημα. Αυτό έχει να κάνει με την αντίληψη των δυο επιτυχημένων θεωριών φυσικής για τη φύση του χρόνου. Η μελέτη του ως ισοδύναμη χωρική διάσταση με τις υπόλοιπες έχει λύσει πολλά υπολογιστικά προβλήματα αλλά αποτυπώνει ένα στατικό κόσμο που διαμορφώνεται μέσα από παγωμένες χρονικές στιγμές. Ευελπιστεί ότι μια νέα αναπαράσταση, ίσως μέσω των Μαθηματικών συνδυαστικά με την εξέλιξη της Πληροφορικής, δώσει μελλοντικά εργαλεία ώστε ο χρόνος να μελετάται όπως πραγματικά είναι, δηλαδή δυναμικός και εξελισσόμενος (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

## 4.5 Εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας

Πριν ολοκληρωθεί το βιβλιογραφικό μέρος της εργασίας και δεδομένου ότι δεν έχει επιλυθεί το θέμα της κβαντικής βαρύτητας, καθώς και της ενοποίησης όλων των δυνάμεων, κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν ορισμένες αναφορές σε εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας, οι οποίες ακολουθούν κατευθύνσεις διαφορετικές από αυτές που αναφέρθηκαν έως τώρα.

Μια από αυτές τις θεωρίες προκύπτει μέσα από το πρόβλημα της παρατηρούμενης ταχύτητας των άστρων στο εξωτερικό τμήμα των γαλαξιών, που δεν δικαιολογείται βαρυτικά από την ποσότητα παρατηρήσιμης υλοενέργειας που περιέχουν. Έχει ήδη γίνει αναφορά σε αυτό το θέμα σε προηγούμενο κεφάλαιο και το μοντέλο, το οποίο είχε προταθεί ήταν αυτό της σκοτεινής ύλης. Ωστόσο μέχρι στιγμής παραμένει ένα μυστήριο, αφού καμία θεωρία δεν έχει αποδεδειγμένα περιγράψει την φύση των σωματιδίων της άγνωστης αυτής ύλης. Μόνο αν υπάρχει αυτή η υποθετική ύλη και μάλιστα σε αναλογία περίπου 5:1 σε σχέση με την συνηθισμένη, ισχύει ο νευτώνειος και ο σχετικιστικός νόμος της βαρύτητας δίνοντας τα παρατηρούμενη εικόνα του Σύμπαντος. Ακόμη η επιβεβαίωση της επιταχυνόμενης διαστολής του Σύμπαντος κάθε άλλο παρά δικαιολογούσε το σύνολο της σκοτεινής και κανονικής ύλης. Έτσι θεωρήθηκε ότι υπάρχει διάχυτη στον χωροχρόνο μια απωστική δύναμη, που ονομάστηκε σκοτεινή ενέργεια, χωρίς να γνωρίζει κανείς τι την προκαλεί (Carozziello & De Laurentis, 2011). Σημειωτέων, ότι ο δορυφόρος Πλανκ που τέθηκε σε λειτουργία από το

2009 έως το 2013 προκειμένου να αντλήσει στοιχεία από την ακτινοβολία υποβάθρου, επιβεβαίωσε ότι από τη συνολική υλοενέργεια του Σύμπαντος μόνο το 4,6% αφορά την συνηθισμένη ύλη και ενέργεια καθώς από το υπόλοιπο το 23% είναι σκοτεινή ύλη και το 72% σκοτεινή ενέργεια (Jones & Robbins, 2010; Νίντος & Αλυσσανδράκης, 2015).



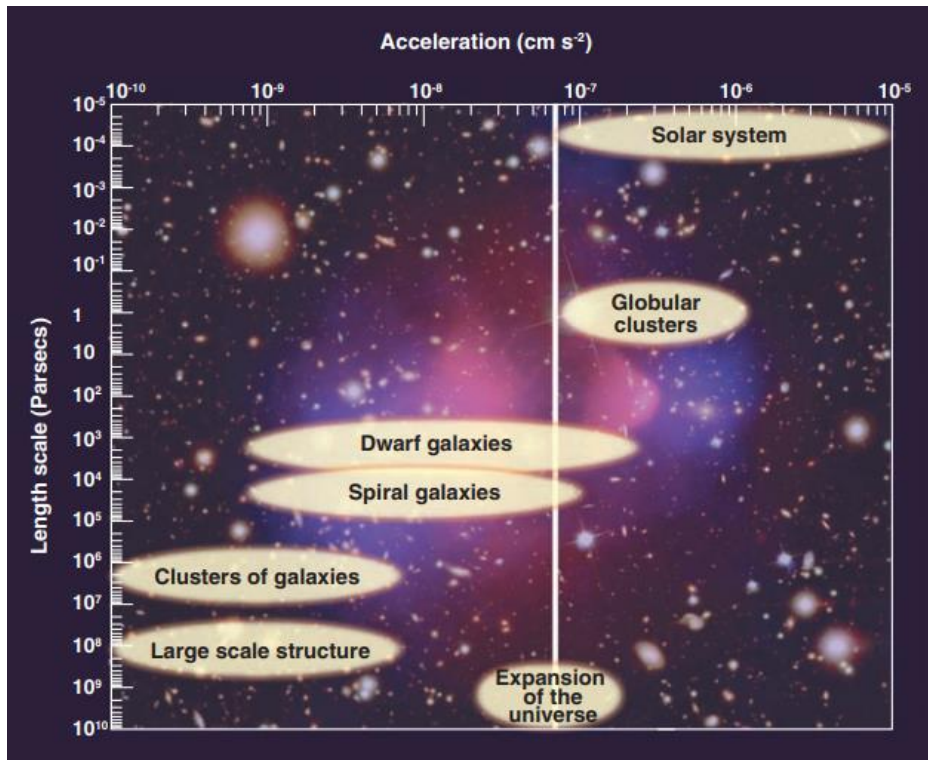
**Εικόνα 4.45** Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον δορυφόρο Πλανκ επιβεβαιώνουν ότι μόνο το 4,6% του Σύμπαντος αποτελεί την συνηθισμένη υλοενέργεια, ενώ το υπόλοιπο έχει σκοτεινή φύση (Jones & Robbins, 2010).

Το μόνο δεδομένο με το οποίο συνδέεται η σκοτεινή ενέργεια είναι η Κοσμολογική σταθερά( $\Lambda$ ) των εξισώσεων πεδίου της ΓΘΣ (Triay, 2010). Αφού το Σύμπαν διαστέλλεται αργά, αλλά με επιταχυνόμενο ρυθμό αυτή η σταθερά έχει μια θετική τιμή αλλά μικρή, την οποία καμία θεωρία δεν προβλέπει με ακρίβεια. Εν συνεχεία η Κοσμολογική σταθερά όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εργασία αυτή, έχει την φυσική ερμηνεία μιας κλίμακας απόστασης, επί της οποίας καμπυλώνεται το Σύμπαν και ονομάζεται παράγοντας κλίμακας( $R$ ). Αυτή αντιστοιχεί στην τιμή των 10 δισεκατομμυρίων ετών φωτός. Η ίδια η κλίμακα είναι πάρα πολύ μεγάλη συγκριτικά με οποιαδήποτε άλλη στη Φύση. Χάρη σε αυτή όμως έχει υπολογιστεί η σημερινή ηλικία του Σύμπαντος, αφού δίνεται από τον λόγο  $R/c$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Ο αντίστροφος λόγος  $c/R$  δίνει την συχνότητα με την οποία ταλαντώνεται το Σύμπαν και αυτή είναι πολύ μικρή, καθώς αντιστοιχεί σε μια ταλάντωση ανά χρόνος ζωής του Σύμπαντος. Από την άλλη ο λόγος  $c^2/R$  δίνει την επιτάχυνση με την οποία αυξάνεται ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος. Πιο απλά είναι η επιτάχυνση που παράγεται βάσει της τιμής της κοσμολογικής σταθεράς και είναι της τάξεως των  $10^{-8}$  cm/sec<sup>2</sup>, μια τιμή εξίσου μικρή. Έτσι η κλίμακα  $c^2/R$  φαίνεται να συνδέει την σκοτεινή ύλη και τη σκοτεινή ενέργεια, αν και είναι δυο ξεχωριστά φαινόμενα (Smolin, Θεωρία χορδών:όλα ή τίποτα;, 2008).

Έχοντας όλα αυτά τα δεδομένα υπόψιν το 1980 ο Ισραηλινός φυσικός Μόρντεχαι Μίλγκρομ, έκανε μια ριζοσπαστική υπόθεση. Εφόσον δεν έχουν βρεθεί τα σωματίδια σκοτεινής ύλης μέχρι στιγμής, ίσως αυτή δεν υπάρχει και απλά ο Νόμος του Νεύτωνα αλλάζει

όταν οι επιταχύνσεις πλησιάζουν την τιμή της  $c^2/R$ . Μάλιστα η κρίσιμη τιμή που όρισε ήταν ακριβώς  $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ cm/sec}^2$ . Υπενθυμίζεται ότι ο Νόμος της βαρύτητας του Νεύτωνα ορίζει ότι η επιτάχυνση ενός σώματος, λόγω της ελκτικής επίδρασης από μια άλλη μάζα, μειώνεται σύμφωνα με το τετράγωνο της απόστασης του από την πηγή έλξης. Η πρόταση του Μίλγκρομ συμφωνεί με αυτό, αλλά οριοθετεί ότι ισχύει για επιταχύνσεις μέχρι την παραπάνω κρίσιμη τιμή. Για μικρότερες από αυτή, το μόνο που αλλάζει είναι ότι πλέον η μεταβολή δεν γίνεται σύμφωνα με το τετράγωνο της απόστασης, αλλά γραμμικά με την απόσταση. Έτσι ο λόγος που τα άστρα πέρα από κάποια τροχιά στο εξωτερικό του γαλαξία κινούνται γρηγορότερα από όσο θα έπρεπε είναι λόγω του ότι αισθάνονται ισχυρότερη βαρυτική έλξη, από αυτή που προβλέπει ο νευτώνειος Νόμος. Η θεωρία αυτή σχετικά με την βαρύτητα, όπως προκύπτει από την ιδέα του Μίλγκρομ ονομάζεται Τροποποιημένη Νευτώνεια Δυναμική με αγγλική συντομογραφία MOND (Δεληβοριάς, 2018; Ferreira & Starkman, 2009).

Η εναλλακτική αυτή θεωρία δεν έχει γίνει αποδεκτή από την πλειοψηφία των επιστημόνων, καθώς υπάρχουν σοβαροί λόγοι που οι ηλεκτρικές και βαρυτικές δυνάμεις μειώνονται με το τετράγωνο της απόστασης και σχετίζονται με την τρισδιάστατη φύση του χώρου (Kaku, 2022). Επίσης είναι ασυνεπής τόσο με την ΕΘΣ, όσο και με την ΓΘΣ. Υπήρξαν κάποιες βελτιωμένες παραλλαγές της από τον Ισραηλοαμερικανό Τζέικομπ Μπεκενστάιν και από τον Βρετανό Τζόν Μοφάτ, αλλά λειτουργούσαν εν μέρει. Το Σύμπαν θα παρουσιάζοταν εξαιρετικά ασταθές αν περιγράφονταν από αυτές τις θεωρίες, αφού έπρεπε να προσαρμοστούν σημαντικές μεταβλητές σε απίθανες τιμές. Εν ολίγοις η MOND δεν έδινε καλά αποτελέσματα σε μελέτες εκτός γαλαξιών αλλά μόνο εντός του και πάλι με αρκετές προσαρμογές. Από την άλλη πλευρά τα μοντέλα σκοτεινής ύλης, πέρα από το γεγονός ότι δεν έχουν αποδειχτεί, λειτουργούν καλά εκτός των γαλαξιών αλλά όχι εντός, οπότε πάλι δεν υπάρχει μια ενοποιημένη θεωρία στην εξήγηση του σκοτεινού μέρους του Σύμπαντος, το οποίο καλύπτει συνολικά το 96% του συνόλου (Ferreira & Starkman, 2009; Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).



**Εικόνα 4.46** Διάγραμμα μήκους της κοσμικής κλίμακας σε συνάρτηση με την επιτάχυνση. Οι αποκλίσεις της ΓΘΣ εμφανίζονται σε συστήματα, που η επιτάχυνση είναι πολύ μικρή δίνοντας ισχυρές ενδείξεις για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης. Τέτοια συστήματα είναι οι σπειροειδείς γαλαξίες, τα σμήνη γαλαξιών και γενικά οι μεγάλες συμπαντικές δομές (Ferreira & Starkman, 2009).

Μια άλλη θεωρία που σχετίζεται με την περίπτωση της κβαντικής βαρύτητας εμφανίστηκε το 1999 από τον Ιταλό φυσικό Τζιοβάνι Καμέλια και ονομάζεται παραμορφωμένη ή διπλή ειδική θεωρία της σχετικότητας, με συντομογραφία DSR (Camelia, 2010). Όλα ξεκίνησαν από την πρόβλεψη δυο Σοβιετικών φυσικών και ενός Αμερικανού, ανεξάρτητα, το 1966. Οι Γκεόργκι Ζατσέπιν, Βαντίμ Κούζαν και Κένεθ Γκρέσειν μελετώντας τις κοσμικές ακτίνες που προέρχονται πιθανότατα από εκρήξεις αστερών του απώτερου διαστήματος, διαπίστωσαν ότι φωτόνια διαφορετικών ενεργειών, τα οποία προέρχονται όμως από την ίδια πηγή, φτάνουν στη Γη με ελαφρά διαφορετικές ταχύτητες.

Η πρόβλεψη αυτή, που είναι γνωστή ως GZK, από τα αρχικά των επιθέτων των παραπάνω επιστημόνων, αν αληθεύει, καταρρίπτει μια από τις βασικές αρχές της ΕΘΣ. Ωστόσο κάτι τέτοιο, αν επιβεβαιωθεί, αφορά την κλίμακα Πλανκ, δηλαδή έμμεσα την κβαντική βαρύτητα. Όλες οι πιθανές θεωρίες κβαντικής βαρύτητας συμφωνούν ότι το μήκος Πλανκ είναι το μικρότερο μήκος, που μπορεί να παρατηρηθεί ή από άλλη όψη η μέγιστη ενέργεια ή και η μέγιστη ορμή στη Φύση. Με αφορμή την πρόβλεψη GZK έπρεπε να ελεγχθεί αν η ΕΘΣ ισχύει στην κλίμακα Πλανκ, αλλιώς θα έπρεπε να τροποποιηθεί (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008). Ωστόσο θεωρητικά και μόνο δημιουργείται ένα παράδοξο. Το μήκος Πλανκ έπρεπε να έχει την ίδια καθολικότητα με την ταχύτητα του φωτός.

Στην ΕΘΣ οι κινούμενοι παρατηρητές σε σχέση με τους ακίνητους μετρούν διαφορετικά τον χώρο και τον χρόνο, αλλά συμφωνούν στο ότι το φως έχει ίδια ταχύτητα. Το τέχνασμα του Αϊνστάιν είναι ότι η διαφορά των μετρήσεων τους είναι τέτοια ή πιο απλοϊκά η φύση του χώρου και ο χρόνος είναι τέτοια, ώστε η ταχύτητα του φωτός να είναι σταθερή, εφόσον είναι η μέγιστη ταχύτητα κίνησης στη Φύση (Erstein, Εικόνες της Σχετικότητας:1.Ειδική θεωρία, 1990). Κάτι ανάλογο έπρεπε να συμβαίνει και με το μήκος Πλανκ. Η ΕΘΣ μακροσκοπικά τουλάχιστον, προβλέπει ότι το μήκος ενός σώματος και άρα και το μήκος Πλανκ θα πρέπει να συστέλλεται για ένα κινούμενο παρατηρητή, ενώ δεν θα συνέβαινε το ίδιο για έναν ακίνητο. Το παράδοξο είναι ότι διαφορετικοί παρατηρητές δεν θα συμφωνούν για το ίδιο μήκος Πλανκ, οπότε δεν θεωρείται Παγκόσμια σταθερά, όπως η  $c$ .

Αυτή την ασυμφωνία έλυσε ο Καμέλια εφαρμόζοντας το παραπάνω τέχνασμα του Αϊνστάιν και για το μήκος Πλανκ. Έτσι η διαφορά των μετρήσεων διαφορετικών συστημάτων αναφοράς είναι τέτοια ώστε η ταχύτητα του φωτός να είναι ίδια αλλά και το μήκος Πλανκ να είναι ίδιο, εφόσον κανένα αντικείμενο στη Φύση δεν μπορεί να έχει μικρότερο μήκος από αυτό, όπως και τίποτα δεν μπορεί να έχει ταχύτητα μεγαλύτερη από την  $c$ . Το όνομα διπλή ειδική σχετικότητα προέρχεται ακριβώς από αυτό το γεγονός, ότι δηλαδή το τέχνασμα του Αϊνστάιν εφαρμόζεται δυο φορές και για την  $c$  και για το μήκος Πλανκ. Από εκεί και πέρα εμφανίστηκαν και άλλες εκδοχές της DSR, που προβλέπουν το ίδιο είτε για την ενέργεια Πλανκ είτε για την ορμή σε αυτή την κλίμακα, αρκεί να ισχύει η προϋπόθεση ότι υπάρχει μια μέγιστη ενέργεια ή ορμή που δεν μπορεί να ξεπεραστεί (Camelia, 2010).

Ο Λι Σμόλιν παραδέχεται ότι είχε συναντήσει παρόμοια παράδοξα με αυτό του Καμέλια σε εφαρμογές της LQG αλλά τα είχε αγνοήσει. Με τις ιδέες όμως του Καμέλια καθώς και έπειτα από συνεργασία με τον Πορτογάλο φυσικό Ζοάο Μαγκέιζο κατέληξαν σε μια θεωρία που είναι γνωστή ως βαρύτητα του ουράνιου τόξου. Σύμφωνα με αυτή η βαρύτητα ίσως επηρεάζει διαφορετικά την ταχύτητα των φωτονίων διαφορετικής ενέργειας, άρα και συχνότητας, άρα και χρωμάτων. Με άλλα λόγια σταθερή είναι η ταχύτητα του φωτός όχι για όλα τα μήκη κύματος αλλά για μόνα για τα μεγάλα. Συνεπώς φωτόνια με υψηλές ενέργειες μπορεί να κινούνται ταχύτερα συγκριτικά με αυτά που έχουν χαμηλές ενέργειες. Μάλιστα οι παραπάνω φυσικοί διατύπωσαν ότι η θεωρία τους παρά το γεγονός ότι προβλέπει μεταβαλλόμενη ταχύτητα του φωτός, δύναται να είναι συνεπής με την ΓΘΣ αφού διατηρείται το ένα από τα δυο αξιώματα της ΕΘΣ, δηλαδή η αρχή της σχετικότητας.

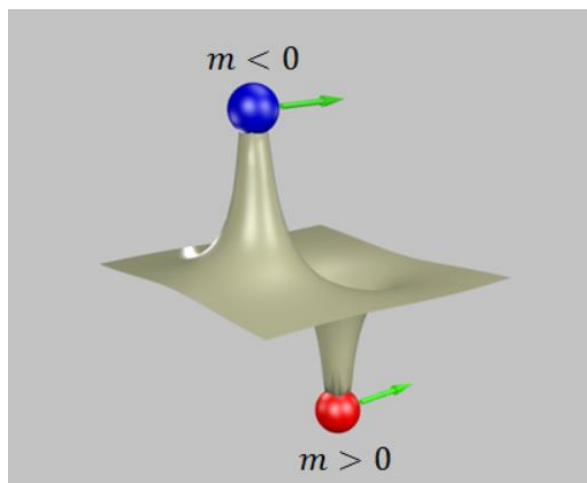
Αν ισχύει κάτι τέτοιο, θα έχει επιτευχθεί μια σημαντική πρόοδος ως προς τον συμβιβασμό των αρχών την ΓΘΣ με την κβαντική θεωρία. Βέβαια η βαρύτητα του ουράνιου τόξου παραμένει ανάμεσα στις εναλλακτικές θεωρίες, γιατί πρέπει να αποδειχτεί κυρίως

μέσω της μελέτης από ευαίσθητους ανιχνευτές ακτινών  $\gamma$ , που προέρχονται από κοσμικές ακτίνες ή από Κβάζαρς. Ο Σμόλιν μάλιστα πιστεύει ότι αν η θεωρία τους ευσταθεί, η ιδέα του πληθωρισμού στο πρώιμο Σύμπαν καθίσταται περιττή. Αυτό προκύπτει εύλογα αφού η ταχύτητα του φωτός στα αρχικά στάδια θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι σήμερα δεδομένου ότι η θερμοκρασία ήταν υψηλότερη, έτσι ώστε όταν αυτή έφτανε την ενέργεια Πλανκ, η  $c$  θα έτεινε στο άπειρο (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Έχοντας δώσει ήδη αρκετά στοιχεία για τις πιθανές θεωρίες τροποποιημένης βαρύτητας, στην συνέχεια θα αναφερθούν και άλλες εναλλακτικές θεωρίες που έχουν διαφορετική βάση. Μια από αυτές αναπτύχθηκε το 2011 από έναν φυσικό του CERN με καταγωγή από το Μαυροβούνιο, τον Ντράγκαν Χατζούκοβιτς. Η προσέγγιση του έχει κβαντομηχανική βάση και διατυπώθηκε προκειμένου να ερμηνεύσει την σκοτεινή ύλη και ενέργεια όχι με κάποια επιπλέον σωματίδια αλλά με βαρυτικό τρόπο. Ο Ντράγκαν υπέθεσε ότι τα σκοτεινά φαινόμενα ίσως να ερμηνεύονται από την βαρυτική άπωση ύλης και αντιύλης (Hajdukovic, 2014). Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι καμία θεωρία δεν έχει εξηγήσει τον λόγο-μηχανισμό που λίγο μετά τη Μ. Έκρηξη η ύλη επικράτησε της αντιύλης ενώ υπήρχαν σε ίσες ποσότητες (Smolin, Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;, 2008).

Υπενθυμίζεται ότι η αντιύλη είναι μαθηματικό προϊόν των σχετικιστικών εξισώσεων κβαντομηχανικής του Ντιράκ και αφορά τον σύντροφο των φερμιονίων με αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο, που προκύπτει κατά την δίδυμη γένεση. Κατά τον Φείνμαν μπορεί να θεωρηθεί και η χρονοανεστραμμένη εκδοχή του κάθε φερμιονίου. Αργότερα ανιχνεύτηκαν και πειραματικά, αλλά ουδέποτε έχει εξεταστεί η βαρυτική τους συμπεριφορά. Στη φύση υπάρχει μια συμμετρία, γνωστή ως συμμετρία ομοτιμίας-φορτίου (CP), η οποία προβλέπει ότι αφού η αντιύλη έχει ίδια αδρανειακή μάζα με την ύλη, θα πρέπει και να έλκονται βαρυτικά ως συνήθως (Fraser, 2003). Επίσης η ΓΘΣ στηρίζεται στην ισοδυναμία αδρανειακής-βαρυτικής μάζας δίνοντας ένα επιπλέον επιχείρημα, αλλά ούτε αυτό έχει ελεγχθεί πειραματικά σε υποατομικό επίπεδο. Εάν τα σωματίδια και τα αντισωματίδια έχουν βαρυτικά φορτία, όπως πιστεύει ο Ντράγκαν, τότε η βαρύτητα δεν θα εμφανίζεται μόνο ως ελκτική δύναμη, αλλά και ως απώστική. Αυτό αυτομάτως θα σήμαινε ότι η αντιύλη θα έπρεπε να έχει αρνητική ενέργεια, άρα και αρνητική μάζα και άρα να ασκεί αρνητική πίεση. Έτσι το κβαντικό κενό, η θάλασσα όλων των σωματιδίων αρνητικής ενέργειας, θα μπορούσε να αλληλεπιδρά βαρυτικά με την συνήθη ύλη, που αναδύεται από αυτό, ερμηνεύοντας έτσι την προέλευση της υποθετικής σκοτεινής ενέργειας. Μάλιστα, ο Ντράγκαν ισχυρίζεται πως αν κάτι τέτοιο ισχύει, τότε ερμηνεύονται και οι ανωμαλίες στις επιταχύνσεις των γαλαξιών που ούτε η MOND, ούτε τα μοντέλα σκοτεινής ύλης εξηγούν πλήρως (Hajdukovic, 2014).

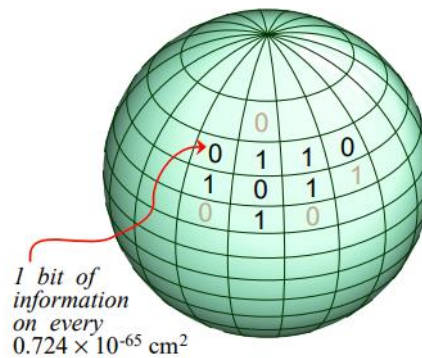
Ωστόσο η πλειοψηφία των επιστημόνων θεωρούσε μέχρι πρόσφατα ότι οι αρνητικές μάζες προβλέπονται μόνο θεωρητικά και απέρριπταν τέτοιες εκδοχές. Βέβαια ο Βρετανός αστροφυσικός Χέρμαν Μπόντι είχε μελετήσει το 1957 την πιθανότητα ύπαρξης αρνητικών μαζών και είχε διατυπώσει ότι δεν υπάρχει καμία αντίφαση στο θέμα, αρκεί και τόσο οι αδρανειακές, όσο και οι βαρυτικές μάζες να είναι αρνητικές. Οι ομόσημες μάζες θα έλκονται και οι ετερόσημες μάζες θα απωθούνται, το αντίθετο δηλαδή από ότι ισχύει με τα ηλεκτρομαγνητικά φορτία. Από μια άλλη σκοπιά οι θετικές μάζες καμπυλώνουν τον χωροχρόνο και έλκουν ενώ οι αρνητικές μάζες δημιουργούν ένα λόφο σε αυτόν και απωθούν(βλ. εικόνα 4.47) (Bondi, 1957). Επιπλέον η αρνητική ενέργεια έχει ήδη πειραματική θεμελίωση μέσω του φαινομένου Κασιμίρ, μηχανισμό, που ο Χόκινγκ χρησιμοποίησε για την κβαντομηχανική ερμηνεία της κατάστασης των μελανών οπών (Kaku, 2022).



**Εικόνα 4.47** Οι διαφορετικές καμπυλώσεις του χωροχρόνου που προκαλούνται από μια συνήθη μάζα(κόκκινη σφαίρα) και από μια αρνητική μάζα(μπλε σφαίρα) (Kluckenyer, 2013).

Το 2017 δημιουργήθηκε σε εργαστήριο υλικό, το οποίο συμπεριφέρεται ως αρνητική μάζα σε πείραμα που έκαναν οι Πίτερ Ένγκελς και Μίκαελ Φόρμπος και επιβεβαίωσαν τα παραπάνω δεδομένα. Συγκεκριμένα υπερέψυξαν άτομα ρουβιδίου μέχρι το απόλυτο μηδέν και με χρήση μαγνητικών πεδίων και λέιζερ αντέστρεψαν το σπιν τους (Khamehchi, et al., 2017). Έτσι η ύλη έφτασε σε μια φάση, που είναι γνωστή ως Συμπύκνωμα Μπόζε-Αϊνστάιν. Αυτή, αποτελεί αραιό αέριο μποζονίων, που το κάθε επιμέρους συστατικό του συμπεριφέρεται ως κύμα Ντε Μπρόλι, και καθώς κινείται ενιαίο εμφανίζει ιδιότητες υπερρευστού, δηλαδή ρέει χωρίς απώλεια ενέργειας και χωρίς να παραβιάζει τον Νόμο Διατήρησης της (Al-Khalili, 2005). Τα παραπάνω δεδομένα δείχνουν ότι η θεωρία του Ντράγκαν φαίνεται βάσιμη, αλλά χρειάζεται να γίνουν περισσότερα πειράματα και μελέτες για να φανεί, αν θα επιβεβαιωθεί.

Μια άλλη κατεύθυνση με την οποία μπορεί να σχετίζεται μια θεωρία κβαντικής βαρύτητας είναι αυτή που συνδέεται με την Ολογραφική Αρχή. Αυτή η Αρχή είναι απόρροια των ιδεών του Ολλανδού φυσικού Γκέραρντ Χούφτ και του Αμερικανού Λέοναρντ Σάσκιντ. Σύμφωνα με αυτή, θεμελιώδεις έννοιες στο Σύμπαν δεν είναι η ύλη και η ενέργεια, αλλά οι μονάδες Πληροφορίας που τις δημιουργούν και ορίζονται από κβαντικά μπίτς (bits). Αυτά διαφέρουν από τις κλασικές μονάδες πληροφορίας, επειδή μπορούν να πάρουν κάθε χρονική στιγμή μόνο τιμές 0 και 1, όπως στα κλασικά μπιτς, αλλά μπορούν να βρεθούν και σε ενδιάμεση κατάσταση. Αυτό όμως ήταν ένας παραλληλισμός, που αφορά την περίπτωση των υπολογιστών. Στο Σύμπαν αυτά αντιπροσωπεύουν τιμές του σπιν των σωματιδίων, τα οποία μάλιστα είναι κβαντικώς συμπλεγμένα. Αυτό σημαίνει ότι η μέτρηση της τιμής του ενός, επηρεάζει άμεσα την τιμή ενός άλλου, όσο μακριά και αν βρίσκονται (t Hooft, 2001).



**Εικόνα 4.48** Μοντέλο αναπαράστασης της κατανομής της πληροφορίας στην επιφάνεια μιας μελανής οπής σύμφωνα με την Ολογραφική Αρχή (t Hooft, 2001).

Η γενική εικόνα που δίνει για την Κοσμολογία η Ολογραφική αρχή είναι ότι ο χωροχρόνος αποτελεί ένα ολόγραμμα, μια δυσδιάστατη αναπαράσταση ενός σύνθετου συστήματος. Σύμφωνα με τον Λουίς Κρέιν η κβαντική μηχανική δεν είναι στατική περιγραφή του συστήματος, αλλά αρχείο πληροφορίας που κάποιο υποσύστημα του διαθέτει για άλλο υποσύστημα, προκειμένου να περιγράψει την αλληλεπίδραση τους. Σημαντική συμβολή στην ανάπτυξη της Ολογραφικής Αρχής είχαν δυο φυσικοί, διατυπώνοντας δυο νόμους αντίστοιχα. Αυτοί είναι ο Καναδός Γουίλιαμ Ούνρουχ και ο γνωστός πλέον Τζέικομπ Μπέκενσταϊν.

Ο Ούνρουχ το 1976 διαπίστωσε ότι επιταχυνόμενοι παρατηρητές στο κενό θα αντιλαμβάνονταν γύρω τους ένα θερμό αέριο φωτονίων με θερμοκρασία ανάλογη της επιτάχυνσης τους, ενώ αδρανειακοί παρατηρητές δεν θα συμφωνούσαν σε αυτό. Αυτή η πρόταση είναι γνωστή ως ο Νόμος Ούνρουχ και ο μαθηματικός φορμαλισμός της θερμοκρασίας που θα μετρούσαν οι παρατηρητές, δίνεται από τον τύπο  $T = \hbar \cdot a / 2 \cdot \pi \cdot c \cdot k_B$ , όπου  $T$  η θερμοκρασία



των περιβαλλόντων σωματιδίων, a η επιτάχυνση του παρατηρητή και τα υπόλοιπα οι γνωστές σταθερές (Anderson, 2017).

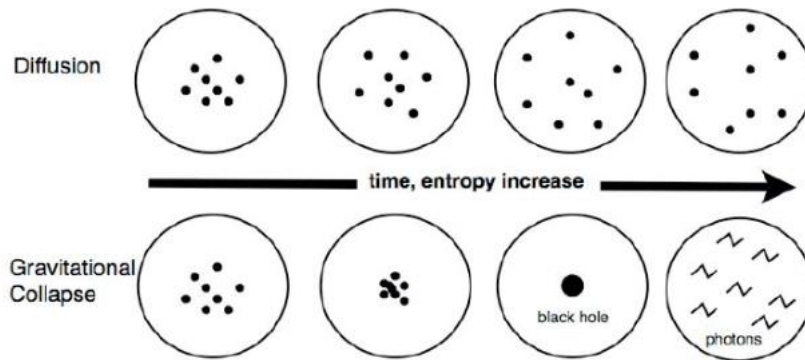
Επιπροσθέτως το 1973 ο Μπέκενσταϊν συσχέτισε αναλογικά το εμβαδόν του ορίζοντα γεγονότων μια μαύρης τρύπας με ένα μέγεθος της θερμοδυναμικής, την εντροπία. Αυτή είναι μια πρόταση που μπορεί να γενικευτεί υπό την έννοια ότι υπάρχει ένα όριο στο ποσό της πληροφορίας, που μπορεί να αποθηκευτεί σε μια πεπερασμένη περιοχή του χώρου, με τον όρο ότι αυτή περιέχει πεπερασμένο ποσό ενέργειας. Το όριο αυτό στην πληροφορία ονομάζεται φράγμα Μπέκενσταϊν (Smolin, Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα, 2002).

Η εντροπία από την άλλη είναι ένα μέγεθος που μετρά σε ένα σύστημα το ποσό της πληροφορίας που χάνεται υπό μορφή τυχαίας κίνησης, δηλαδή θερμικής ενέργειας. Με άλλα λόγια είναι ένα μέτρο της αταξίας ενός συστήματος και σύμφωνα με τον 2ο Θερμοδυναμικό Νόμο η εντροπία μπορεί μόνο να αυξάνεται, κάτι που εξηγεί και γιατί το βέλος του χρόνου κινείται μόνο προς μια κατεύθυνση, μακροσκοπικά τουλάχιστον. Ακόμη η ίδια λαμβάνει την μέγιστη τιμή σε ένα σύστημα, όταν αυτό σε όλη του την έκταση έχει σταθερή θερμοκρασία (Modinos, 2014). Ο Μπέκενσταϊν διατύπωσε ότι οι μαύρες τρύπες έχουν εντροπία, για μην παραβιάζεται ο παραπάνω νόμος και μάλιστα αυτή είναι ανάλογη προς το εμβαδόν του ορίζοντα γεγονότων της, μετρημένο σε μονάδες Πλανκ (Pfister & King, 2015).

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι αυτό το δεδομένο χρησιμοποίησε ο Χόκινγκ για να διατυπώσει το Παράδοξο της Πληροφορίας και να συμπεράνει ότι οι μελανές οπές ακτινοβολούν, γιατί αφού έχουν εντροπία, πρέπει να έχουν και θερμοκρασία (Hawking, 2000). Η Ολογραφική Αρχή επίσης αναφέρει ότι το ποσό της πληροφορίας, που είναι εγγεγραμμένο σε μια περιοχή του χώρου είναι ανάλογο του εμβαδού και όχι του όγκου του, διότι ο ίδιος ο όγκος είναι μια ψευδαίσθηση μέσα στο ολόγραμμα του Σύμπαντος (Kaku, 2022).

Το 2009 ο Ολλανδός φυσικός Έρικ Βερλίντε λαμβάνοντας υπόψιν την Ολογραφική Αρχή διατύπωσε μια θεωρία που περιγράφει την βαρύτητα όχι ως θεμελιώδη αλληλεπίδραση, αλλά ως αναδυόμενη εντροπική δύναμη. Η πρόταση του είναι συνεπής τόσο με την Ολογραφική Αρχή όσο και με την Θερμοδυναμική. Συγκεκριμένα ο Βερλίντε πιστεύει ότι η βαρύτητα πηγάζει από τις σχέσεις τμημάτων χωροχρονικής πληροφορίας ή πιο απλά είναι συνέπεια των πληροφοριών, που σχετίζονται με τις θέσεις των υλικών σωμάτων στο Ολογραφικό Σύμπαν. Επίσης η βαρύτητα είναι άμεσα συνυφασμένη με την αύξηση της εντροπίας, γεγονός το οποίο δείχνει την συγγένεια της με τα θερμοδυναμικά φαινόμενα. Για παράδειγμα ένα αντικείμενο, που πέφτει στο έδαφος λόγω βαρυτικής έλξης, αυξάνει παράλληλα την εντροπία του, καθώς η ίδια ήταν μικρότερη, πριν πέσει. Ένα δεύτερο παράδειγμα

είναι ότι σε ένα περιβάλλον ισχυρής βαρύτητας όπως ένας αστέρας νετρονίων, οποιοδήποτε αντικείμενο βρισκόταν στην επιφάνεια του, η ίδια η βαρύτητα θα αύξανε την εντροπία του εσωτερικού των ατόμων του. Η πρόταση λοιπόν του Βερλίντε είναι ότι η βαρύτητα δεν είναι έμφυτη ιδιότητα των μαζών, αλλά αναδύομενο φαινόμενο, που προκύπτει από την αλληλεπίδραση μάζας, χρόνου και χώρου (Μούστος, 2014; Verlinde, 2017).



*Εικόνα 4.49 Η βαρύτητα αυξάνει την εντροπία των συστημάτων (Lineweaver & Egan, 2010).*

Τέλος μια άλλη θεωρία βαρύτητας που συνδυάζει την Θεωρία των Χορδών με την Ολογραφική Αρχή διατυπώθηκε το 2010 από τους φυσικούς Τζον Καραάσκο, Σβι Μπέρν και Λανς Ντίξον. Η θεωρία αυτή βασίζεται στον δυϊσμό θεωριών πεδίου/ θεωριών χορδών και διατυπώθηκε πρώτη φορά από τον Αργεντίνο Χουάν Μαλντασένα κατά την δεύτερη επανάσταση των χορδών, η οποία είναι γνωστή και με τη συντομογραφία ADS/CFT. Σύμφωνα με αυτή την αντιστοιχία, η αλληλεπίδραση δυο D-βρανών μπορεί να συσχετιστεί τόσο με ανοιχτές χορδές, που περιγράφονται από τις θεωρίες πεδίου. όσο και από κλειστές χορδές μέσω της βαρύτητας. Η βαρύτητα μπορεί να αναδυθεί από την συμμετρία των άλλων τριών δυνάμεων. Σε αυτούς του δυϊσμούς, που ονομάζονται και ολογραφικοί δυϊσμοί, μια θεωρία που περιλαμβάνει την βαρύτητα περιγράφεται εξίσου καλά από μια θεωρία, η οποία δεν περιλαμβάνει την βαρύτητα αλλά σε μια διάσταση του χώρου λιγότερη (Houghton & Houghton, 2021; Maldacena, 2016; White, 2018; Wolchover, 2014). Σε μια τέτοια θεωρία ένα γκραβιτόνιο σχηματίζεται ως ζευγάρι δυο γλοιονίων, κάτι που δείχνει συσχέτιση μεταξύ βαρύτητας και ισχυρής πυρηνικής δύναμης (Kaku, 2022).

The diagram shows an equation between two Feynman diagrams. On the left, a red wavy line (gluon) with three external legs labeled 1, 2, and 3 is shown. This is equal to the sum of two diagrams on the right. Each diagram on the right consists of two blue wavy lines (ghosts) meeting at a vertex, with a red wavy line (gluon) attached to the vertex. The external legs are labeled 1, 2, and 3. The two diagrams on the right are separated by a multiplication sign (x).

**Εικόνα 4.50** Οι Μπερν , Καράσκο και Ντίξον έδειξαν ότι ο υπολογισμός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ γκραβιτονίων είναι ισοδύναμος με τον πιο βατό υπολογισμό δυο αλληλεπιδράσεων μεταξύ γλοιονίων, τον φορέα της πυρηνικής δύναμης σύμφωνα με την κβαντική μηχανική (Wolchover, 2014).

## **5 Κεφάλαιο 5.Ερευνητικά ερωτήματα σχετικά με τις αντιλήψεις των εκπαιδευτικών Πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης για την χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στη διδασκαλία της Φυσικής**

### **5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική ανασκόπηση έρευνας**

Η Διδακτική Φυσικών Επιστημών(ΔΦΕ) είναι μια αυτόνομη επιστημονική περιοχή της Παιδαγωγικής Επιστήμης, που έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και βελτίωση της διδασκαλίας τους στο σχολείο, χρησιμοποιώντας τετριμμένες και καινοτόμες διδακτικές τεχνικές, άμεσα συνδεδεμένες με συγκεκριμένες παιδαγωγικές θεωρίες (Σκουμιάς , 2012).

Ο Σκοπός της Διδακτικής Φυσικής στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση, όπως ορίζεται στο Νέο Αναλυτικό Πρόγραμμα Σπουδών, περιλαμβάνει τόσο την κατάκτηση γνώσεων από τους μαθητές, όσο και την ανάπτυξη στάσεων και δεξιοτήτων, σχετικών με το αντικείμενο. Όσον αφορά τον πρώτο σκοπό, οι στόχοι συνδέονται με την κατανόηση των πληροφοριών, τη γνώση της χρονικής ακολουθίας τους, την ανάλυση και σύνθεση σχέσεων των φυσικών εννοιών, την ερμηνεία πειραμάτων, τη διατύπωση συμπερασμάτων με χρήση επιστημονικής ορολογίας καθώς και τη διάκριση μεταξύ θεωριών, αρχών και μοντέλων. Σχετικά με τον δεύτερο, στόχος είναι η ανάπτυξη την προσωπικότητας των μαθητών, η προώθηση της ανεξάρτητης σκέψης και η ικανότητα διατύπωσης υποθέσεων και ορθολογικής αντιμετώπισης καταστάσεων καθώς και η συνεργατική εργασία πάνω σε πειράματα, τηρώντας παράλληλα τους κανόνες ασφαλείας. Οι στόχοι που αφορούν δεξιότητες περιλαμβάνουν δημιουργία πειραματικών διατάξεων, χρήση οργάνων, ακριβή μέτρηση, περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και αναπαράσταση συμπερασμάτων. Σε κάθε περίπτωση, κύριο μέλημα είναι οι μαθητές να κατακτήσουν την επιστημονική σκέψη και μέθοδο εργασίας καθώς και να εξοικειωθούν με αυτή και τα στάδια της. Αυτά περιλαμβάνουν συνοπτικά κατά σειρά την παρατήρηση, τη συγκέντρωση πληροφοριών, τη διατύπωση υποθέσεων, τον πειραματικό έλεγχο, την ανάλυση συμπερασμάτων και τη γενίκευση (Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, 2011).

Επιπροσθέτως σε όλα τα σύγχρονα αναλυτικά προγράμματα αναφέρεται ως γενικός σκοπός, ο επιστημονικός γραμματισμός. Η έννοια αυτή περιλαμβάνει την αφομοίωση των διαδικασιών, των εφαρμογών και των πρακτικών της επιστημονικής κοινότητας με σκοπό

την ανάπτυξη γενικότερων δεξιοτήτων από τους μαθητές, ως μελλοντικοί πολίτες στα πλαίσια της παγκοσμιοποίησης. Αυτές οι δεξιότητες αφορούν στρατηγικές επίλυσης προβλημάτων, την ανάπτυξη της κριτικής σκέψης, την ικανότητα διάκρισης της επιστήμης από ψευδοεπιστήμες, την αξιολόγηση των κινδύνων καθώς και την συσχέτιση της Φυσικής με την Τεχνολογία και την Κοινωνία (Στεφανίδου , 2013).

Οι διδακτικές προσεγγίσεις της ΔΦΕ είναι τέσσερις κατά κύριο λόγο και έχουν διαμορφωθεί από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα και έπειτα, επηρεαζόμενες από διάφορα ρεύματα. Μια από αυτές είναι η παραδοσιακή προσέγγιση, η οποία βασίζεται σε θεωρίες μάθησης στηριζόμενες στον Συμπεριφορισμό. Τα χαρακτηριστικά της προσέγγισης αυτής συνδέονται με το δασκαλοκεντρικό πρότυπο, σύμφωνα με το οποίο οι γνώσεις μεταδίδονται λεκτικά από τον εκπαιδευτικό με την βοήθεια του βιβλίου, ενώ οι μαθητές είναι παθητικοί δέκτες της όλης διαδικασίας και αξιολογούνται με βάση την ικανότητα απομνημόνευσης των πληροφοριών.

Μια άλλη διδακτική προσέγγιση είναι η ανακαλυπτική, η οποία στηρίζεται στην θεωρία της ενεργητικής μάθησης, βάσει της οποίας οι μαθητές ανακαλύπτουν μόνοι τους την γνώση μέσα από καθοδηγητικές εργαστηριακές ασκήσεις και δραστηριότητες που σχεδιάζονται από τον εκπαιδευτικό. Οι μαθητές εργάζονται ομαδικά και αλληλεπιδρούν με τα υλικά των πειραμάτων, όπως ακριβώς οι επιστήμονες, ακολουθώντας τα στάδια της επιστημονικής μεθόδου.

Μια τρίτη προσέγγιση είναι η εποικοδομητική στην οποία οι μαθητές είναι και πάλι το επίκεντρο την μαθησιακής διαδικασίας, ενώ ο δάσκαλος έχει συντονιστικό ρόλο. Η μάθηση στην περίπτωση αυτή κατασκευάζεται από τους ίδιους τους μαθητές μέσα από την πρόκληση ενδιαφέροντος και την επεξεργασία σε συλλογικό επίπεδο. Σε αυτή την προσέγγιση, επίσης, λαμβάνονται υπόψιν οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών, όπως έχουν διαμορφωθεί εκτός σχολείου και μέσω των καθημερινών εμπειριών τους. Η διδασκαλία επικεντρώνεται στην ανάδειξη των ιδεών αυτών με χρήση στοχευμένου διδακτικού υλικού, το οποίο εν συνεχεία οδηγεί στην αναδόμηση αυτών από τους ίδιους τους μαθητές λόγω της γνωστικής σύγκρουσης, που προκαλείται. Τελικό στάδιο είναι η εφαρμογή των νέων ιδεών και η σύγκριση με τις προηγούμενες, ώστε να αποδειχθεί ότι αυτές λειτουργούν καλύτερα στην πράξη.

Τέταρτη και τελευταία προσέγγιση αποτελεί το ρεύμα του επιστημονικού αλφαριθμητισμού. Σε αυτή την προσέγγιση δίνεται βάση στην διαθεματικότητα της γνώσης, στην ανάπτυξη μεταγνωστικών δεξιοτήτων, στην ικανότητα συνεργασίας των μαθητών και στην χρήση της Τεχνολογίας στη μαθησιακή διαδικασία. Οι μαθητές αξιολογούνται βάσει της ικανότητας τους για περιγραφή, πρόβλεψη και εξήγηση επιστημονικών φαινομένων, της

κατανόησης και χρήσης της επιστημονικής μεθοδολογίας καθώς και της δυνατότητας ερμηνείας δεδομένων και εξαγωγής συμπερασμάτων. Σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι ο επιστημονικός εγγραμματισμός των μαθητών ως μελλοντικών πολιτών μιας παγκοσμιοποιημένης κοινότητας, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω (Καλκάνης, 2005; Κόκκοτας, 2022; Σκουμιάς, 2012).

Η Διδακτική της Φυσικής παρά τους συγκεκριμένους γνωστικούς στόχους της, που είναι η πρόβλεψη, η μελέτη, η περιγραφή και η εξήγηση των φυσικών φαινομένων, συνδέεται και αλληλεπιδρά διαθεματικά και συστημικά και με άλλους τομείς όπως η Ψυχολογία, η Κοινωνιολογία, οι Τέχνες, η Ιστορία, η Τεχνολογία και το Περιβάλλον (Καλκάνης, 2005). Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στη δυνατότητα της χρήσης της Ιστορίας και Φιλοσοφίας των Φυσικών Επιστημών στη διδασκαλία εννοιών της Φυσικής, έχοντας εκθέσει λεπτομερή ιστορικά στοιχεία για την εξέλιξη της θεωρίας της βαρύτητας από την Αρχαιότητα έως τη σύγχρονη εποχή.

Η Ιστορία και Φιλοσοφία των Φυσικών Επιστημών (ΙΦΦΕ) αποτελεί ένα σύγχρονο διεπιστημονικό αντικείμενο, το οποίο εξετάζει την Επιστήμη ως σύνθετο και δυναμικά εξελισσόμενο φαινόμενο, αναδεικνύοντας τις ιστορικές, φιλοσοφικές, κοινωνικές και πολιτισμικές διατάσεις των θεωριών και των πρακτικών της. Επίσης αντικατοπτρίζει την Ιστορία της προσπάθειας των Ανθρώπων να κατανοήσουν τα Φυσικά φαινόμενα μέσω της παρατήρησης, της διατύπωσης συλλογισμών, της μέτρησης, της πειραματικής επαλήθευσης και της ανάπτυξης θεωριών ανά τους αιώνες. Η διδασκαλία από την άλλη με χρήση της ΙΦΦΕ αποτελεί ένα εναλλακτικό επικοινωνιακό εργαλείο και μέσο για τον εκπαιδευτικό, προκειμένου να επιτευχθούν οι σκοποί του μαθήματος της Φυσικής και να εμπλουτιστεί το αυστηρό, εννοιολογικά, περιεχόμενο της (Matthews, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2014).

Υπάρχει πλήθος ερευνών και εργασιών που προτείνουν τη χρήση της ΙΦΦΕ στην ΔΦΕ καθώς αυτή η δράση παρέχει πολλά γνωστικά, μεταγνωστικά και συναισθηματικά οφέλη για τους μαθητές, αλλά και συνολικά για την μαθησιακή διαδικασία (Elkana, 1970; Kampourakis, 2015; Lederman, Abd-El Khalick, Bell, & Schwartz, 2002; Matthews, Thomas Kuhn's Impact on Science Education: What Lessons Can Be Learned?, 2004; Roca-Rosell & Schneider, 2010; Seroglou & Koumaras, 2001; Smith M., 2013; Teixeira, Greca, & Freire, 2012; Wang & Cox-Petersen, A Comparison of Elementary, Secondary and Student Teachers' Perceptions and Practices Related to History of Science Instruction, 2002; Wang & Marsh, Science Instruction with a Humanistic Twist: Teachers' Perception and Practice in Using the History of Science in Their Classrooms, 2002). Αρχικά η χρήση της

ΙΦΦΕ εμπλουτίζει και δίνει βάθος στο περιεχόμενο των Φυσικών Επιστημών και προσφέρει ποιοτικότερη κατανόηση των εννοιών, ιδεών και θεωριών, που εκτίθενται. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της παροχής επιπλέον πληροφοριών και λεπτομερειών, οι οποίες αναδεικνύουν την φιλοσοφική, κοινωνική, πολιτική και πολιτισμική διάσταση της Επιστήμης με αποτέλεσμα οι μαθητές να έχουν ολοκληρωμένη εικόνα για μια ανακάλυψη και όχι να περιορίζονται στην αποσπασματική αναφορά των συμπερασμάτων ή των τελικών θεωριών (Matthews, Thomas Kuhn's Impact on Science Education: What Lessons Can Be Learned?, 2004; Wang & Marsh, Science Instruction with a Humanistic Twist: Teachers' Perception and Practice in Using the History of Science in Their Classrooms, 2002). Με αυτόν τον τρόπο τονίζεται και η αξία της διαθεματικότητας στην εκπαίδευση αλλά ταυτόχρονα ενισχύεται και η ικανότητα λογικής και κριτικής σκέψης, όπως και οι δεξιότητες επίλυσης προβλημάτων εκ μέρους των μαθητών (Matthews, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2014; Seroglou & Koumaras, 2001).

Επιπλέον η ΙΦΦΕ αποτελεί ιδανικό μέσο για εποικοδομητική διδασκαλία, εφόσον φυσικά αυτή γίνεται ρητά και είναι καλά σχεδιασμένη, στοχευμένη και διαμορφωμένη. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι μαθητές μέσα από κατάλληλες πηγές έρχονται σε επαφή με τον τρόπο σκέψης των ιστορικών προσώπων, τόσο από την οπτική του φιλοσόφου, όσο και από αυτή του ερευνητή και του φυσικού. Η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης αυτής έγκειται στην ομοιότητα των εναλλακτικών αντιλήψεων των μαθητών για διάφορα φαινόμενα με τις αντιλήψεις των επιστημόνων του παρελθόντος. Έτσι μελετώντας υλικό σχετικό με την εξέλιξη της ΙΦΦΕ, μπορούν να διορθώσουν και να αντικαταστήσουν ευκολότερα τις παρανοήσεις από τις πρότερες αντιλήψεις τους με τις επιστημονικά ορθές (Kampourakis, 2015; Seroglou & Koumaras, 2001; Teixeira, Greca, & Freire, 2012).

Επιπροσθέτως η χρήση της ΙΦΦΕ συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της Φύσης της Επιστήμης και συγκεκριμένα στην αφομοίωση των σταδίων της μεθοδολογίας που ακολουθεί. Οι μαθητές μελετώντας την ιστορική εξέλιξη των θεωριών και των ανακαλύψεων συνειδητοποιούν το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της Επιστήμης στον χρόνο, που είναι η αλλαγή. Πέρα όμως από αυτό αντιλαμβάνονται και τους λόγους, τον τρόπο, τα κριτήρια, με τα οποία μια θεωρία στην Επιστήμη αντικαθιστά μια άλλη. Έτσι στοιχεία όπως η ανάγκη μελέτης της πρότερης γνώσης, η σκληρή δουλειά, η επιμονή, η αμφισβήτηση, οι συγκρούσεις, οι ιδέες που προκύπτουν από λογικές υποθέσεις αλλά και ο συνεχής και εξαντλητικός έλεγχος τους μέσα από το πείραμα, ως απαραίτητο αποδεικτικό στοιχείο, αποκτούν νόημα και κερδίζουν την εκτίμηση των μαθητών. Ακόμα μέσα από την χρήση της στη διδασκαλία

δίνονται παραδείγματα, ώστε οι μαθητές να εκτιμήσουν την αξία της χρήσης των Μαθηματικών στη διενέργεια ακριβών προβλέψεων και στην πιστή αναπαράσταση του φυσικού κόσμου. Σε αυτά προστίθεται και η αντίληψη της σύνδεσης και της επιρροής των κοινωνικών, πολιτικών, οικονομικών, θρησκευτικών παραγόντων στις εκάστοτε ανακαλύψεις της εποχής αλλά και τους λόγους που πεποιθήσεις και παγιωμένες αντιλήψεις προερχόμενες από αυτούς τους τομείς αποτέλεσαν τροχοπέδη για την εξέλιξη της Επιστήμης. Τέλος, μέσα από την ιστορική προσέγγιση αποκαλύπτεται η σχέση της Επιστήμης και με την Τεχνολογία, ώστε οι μαθητές να έχουν ολοκληρωμένη εικόνα για τον τρόπο που έφτασε στις σημερινές δυνατότητες. Συνολικά μπορεί να ειπωθεί ότι όλα τα πιθανά οφέλη που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο αυτή, αποτελούν στοιχεία του επιστημονικού γραμματισμού (Elkana, 1970; Lederman, Abd-El Khalick, Bell, & Schwartz, 2002; Matthews, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2014; Wang & Cox-Petersen, A Comparison of Elementary, Secondary and Student Teachers' Perceptions and Practices Related to History of Science Instruction, 2002).

Άλλο πλεονέκτημα της χρήσης της ΙΦΦΕ στην διδασκαλία είναι η επίτευξη της γεφύρωσης ανθρωπιστικών και θετικών σπουδών. Οι μαθητές συνειδητοποιούν ότι η Επιστήμη δεν είναι κάτι αφηρημένο, που επιβάλλεται προς μάθηση, αλλά είναι προϊόν ανθρωπινων εγχειρημάτων και έχει αυτούσια αξία, καθώς είναι μέρος του πολιτισμού. Μέσα από αυτή τη διερεύνηση καταρρίπτεται η εξιδανικευμένη εικόνα στο μυαλό των μαθητών σχετικά με τους μεγάλους επιστήμονες, αφού διαφαίνεται η ανθρώπινη φύση του λάθους όπως και αρνητικές επιπτώσεις στοιχείων του χαρακτήρα ή της προσωπικότητας τους. Αυτό συνεπάγεται ότι η Επιστήμη δεν είναι ατομική υπόθεση αλλά ανήκει σε όλη την κοινότητα, όπως μια Επανάσταση ή ανακάλυψη δεν θα μπορούσε να εδραιωθεί, χωρίς συλλογική προσπάθεια. Ακόμη η Ιστορία δίνει στους μαθητές παραδείγματα, ώστε να μπορούν και οι ίδιοι να διακρίνουν μελλοντικά επιστημονικές από ψευδοεπιστημονικές αντιλήψεις και απόψεις. Σε αυτό το σημείο μπορεί επίσης να αναφερθεί ότι η Φιλοσοφία της Επιστήμης δύναται να βοηθήσει σε αυτό, αφού εκθέτει τα κίνητρα και τον τρόπο σκέψης των ανθρώπων, που οδήγησαν στην διαμόρφωση της επιστημονικής μεθόδου. Επίσης προσφέρει το κατάλληλο υλικό για να επιτευχθεί από τους μαθητές η δύσκολη διάκριση και κατανόηση των εννοιών: θεωρία-νόμος-μοντέλο (Mccomas, 2011; Roca-Rosell & Schneider, 2010; Solbes & Traver, 2003; Στεφανίδου, 2013; Wang & Marsh, Science Instruction with a Humanistic Twist: Teachers' Perception and Practice in Using the History of Science in Their Classrooms, 2002).



Τέλος, οι (Seroglou & Koumaras, 2001) στην ερευνητική τους επισκόπηση υποστηρίζουν ότι η ΙΦΦΕ στη Διδακτική Φυσικής καλλιεργεί την φαντασία και ενισχύει το ενδιαφέρον, την περιέργεια, την τάση για διερεύνηση των μαθητών, με αποτέλεσμα αυτοί να δημιουργούν θετική στάση για το μάθημα. Επιπλέον παρέχει μια εποικοδομητική διέξοδο από την αποσπασματικότητα των συμπερασμάτων, την αυστηρή ορολογία και την μαθηματικοποίηση του περιεχομένου, ενώ παράλληλα αποτελεί και πηγή έμπνευσης για τους μαθητές, ώστε να ερευνούν αλλά και να ακολουθήσουν μελλοντικά την πορεία των επιστημόνων του παρελθόντος. Πιο συγκεκριμένα οι (Roca-Rosell & Schneider, 2010) αναφέρουν ότι στο Δημοτικό προτείνεται αυτή η προσέγγιση, αφού δίνονται οι βάσεις, ώστε οι μαθητές να μπορούν να ανταποκριθούν στην απαιτητική ύλη των επόμενων βαθμίδων χωρίς να έχουν σχηματίσει από νωρίς αρνητική εικόνα για το μάθημα. Άλλο πλεονέκτημα της χρήσης της ΙΦΦΕ είναι ότι καταρρίπτεται ο δογματισμός σχετικά με την φύση του μαθήματος και δίνεται η ευκαιρία για δημοκρατικές και ελεύθερες συζητήσεις μέσα στην τάξη, αυξάνοντας παράλληλα την συμμετοχή των μαθητών (Matthews, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2014).

Παρά τα οφέλη που αναδύονται από την ΙΦΦΕ στη Διδακτική Φυσικής, η προσέγγιση δεν εφαρμόζεται οργανωμένα στην τάξη και τις περισσότερες φορές επαφίεται στη διάθεση και την ελεύθερη βούληση των εκπαιδευτικών, καθώς υπάρχουν εμπόδια και περιορισμοί, που έχουν εντοπιστεί από τη βιβλιογραφία. Ο (Matthews, Thomas Kuhn's Impact on Science Education: What Lessons Can Be Learned?, 2004) αναφέρει ότι ο κύριος λόγος που δεν χρησιμοποιείται είναι η υπερβολική προσκόλληση των εκπαιδευτικών στην παραδοσιακή διδασκαλία, η οποία προσανατολίζεται στην απλή μετάδοση γνώσεων από τη φωνή του εκπαιδευτικού χωρίς να δίνεται έμφαση στη συμμετοχή των μαθητών. Οι (Stinner, Mcmillan, Metz, Jilek, & Klassen, 2003) επίσης αναφέρονται σε περιορισμένους πόρους από τα αναλυτικά προγράμματα, όπως επίσης και στον περιορισμένο χρόνο που αυτά προβλέπουν, αποβλέποντας στην ολοκλήρωση της διδακτέας ύλης των σχολικών εγχειριδίων. Επιπλέον, ένα άλλο εμπόδιο είναι ότι οι εκπαιδευτικοί στοχεύουν μέσω της διδασκαλίας τους στην αποστήθιση νόμων και θεωριών δίνοντας σημασία στην χρησιμοποιούμενη ορολογία και την ποσότητα πληροφοριών που πρέπει να θυμούνται οι μαθητές. Ακόμη η αξιολόγηση των μαθητών περιορίζεται στις γραπτές εξετάσεις, ενώ παράλληλα δεν λαμβάνεται υπόψιν ο ρόλος της ανακάλυψης, της έρευνας, της αμφισβήτησης και της κριτικής σκέψης από τους μαθητές πάνω στο μάθημα της Φυσικής.

Οι (Höttecke & Silva, 2011) συνοψίζουν τα εμπόδια της χρήσης της ΙΦΦΕ σε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη σχετίζεται με την κουλτούρα της διδασκαλίας της Φυσικής, η

δεύτερη με τις διδακτικές ικανότητες και τις πεποιθήσεις των εκπαιδευτικών, η τρίτη με το πλαίσιο, που επιβάλλεται από τους Θεσμούς και η τέταρτη κατηγορία με την υποστηρικτικό υλικό των σχολικών εγχειριδίων. Ένα μεγάλο εμπόδιο είναι οι παγιωμένες αντιλήψεις των εκπαιδευτικών σχετικά με τη σημασία της απομνημόνευσης των πληροφοριών στο μάθημα και η επιλογή της μετωπικής διδασκαλίας ως κατάλληλης προσέγγισης. Επίσης οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα ή προσέγγιση θα έχει αυξημένο χρόνο εφαρμογής σε βάρος της χρόνου ανάλυσης του περιεχομένου, οπότε δεν θεωρείται απαραίτητη. Σε αυτά τα επιχειρήματα προστίθενται και η ανεπάρκεια υλικών, μέσων και εργαλείων, όπως και ο εξωδιδακτικός χρόνος οργάνωσης περιεχομένου και προετοιμασίας για μια τέτοια προσέγγιση. Άλλες δυσκολίες χρήσης της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία σχετίζονται με την έλλειψη ιστορικών γνώσεων και βαθύτερης κατανόησης των εννοιών Φυσικής από τους εκπαιδευτικούς, έλλειψη διδακτικής εμπειρίας και δεξιοτήτων για τις πρακτικές της καθώς και ελλιπές περιεχόμενο σχετικά με Ιστορία και Φιλοσοφία από τα ίδια τα σχολικά εγχειρίδια. Επιπλέον οι αρμόδιοι, σχετικά με την εκπαιδευτική πολιτική, Θεσμοί δεν παρέχουν δοκιμασμένο και αξιολογημένο υλικό, ώστε να υποστηρίξει τέτοιου τύπου δράσεις.

Οι (Wang & Cox-Petersen, A Comparison of Elementary, Secondary and Student Teachers' Perceptions and Practices Related to History of Science Instruction, 2002) προσθέτουν ότι τα υπάρχοντα εγχειρίδια περιέχουν απλή αναφορά ημερομηνιών ή ιστοριογραμμών και οποιαδήποτε δραστηριότητα περιέχει φιλοσοφικό ή ιστορικό περιεχόμενο βρίσκεται σε συγκεκριμένα πλαίσια εκτός του κυρίως μαθήματος και επισημαίνεται ως προαιρετική από το Αναλυτικό πρόγραμμα. Επιπροσθέτως οι ερευνητές αναφέρουν ότι δεν σχεδιάζονται κατάλληλες επιμορφώσεις εκπαιδευτικών σχετικά με την εφαρμογή της ΙΦΦΕ, ενώ ένα άλλο αρνητικό είναι ότι οι εκπαιδευτικοί αλλά και οι ιστορικοί ή φιλόσοφοι δεν συμμετέχουν στην διαμόρφωση των αναλυτικών προγραμμάτων εκπαίδευσης. Βέβαια εμπόδιο αποτελεί και η ένσταση ορισμένων ιστορικών ότι η εφαρμογή της ΙΦΦΕ θα οδηγήσει σε παραποίηση της Ιστορίας, όπως επίσης και οι αναφορές ορισμένων φυσικών για έκπτωση του περιεχομένου του μαθήματος.

Πέρα από τις δυσκολίες και τα εμπόδια χρήσης της ΙΦΦΕ στην διδασκαλία, η βιβλιογραφία παρέχει και αρκετές διδακτικές προτάσεις και πρακτικές, σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής της στην τάξη. Οι (Teixeira, Greca, & Freire, 2012) επισημαίνουν πως η χρήση της, πρέπει να γίνεται προσεκτικά και οργανωμένα, με κατάλληλη στοχοθεσία και προετοιμασία από τους εκπαιδευτικούς, προκειμένου αυτή να είναι αποτελεσματική, εξυπηρετώντας τον σκοπό της. Κατά αυτόν τον τρόπο μεγάλη σημασία έχει η επιλογή δραστηριοτήτων οι οποίες εμπλέκουν ενεργά τους μαθητές στην όλη διαδικασία, τονώνουν το ενδιαφέρον

των μαθητών, στοχεύουν την εννοιολογική αλλαγή των ιδεών τους και φυσικά είναι κατάλληλες για το επίπεδο τους, ανάλογα με την τάξη που βρίσκονται. Αυτό σημαίνει ότι η απλή παράθεση ιστορικού υλικού χωρίς να συνδέεται με κάποια δραστηριότητα από τους μαθητές, δεν θα έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα και δεν θα εκτιμηθεί από τους μαθητές στον βαθμό που πρέπει.

Ορισμένες προτάσεις που καταγράφονται στην βιβλιογραφία αφορούν την εισαγωγή της Ιστορίας σε μορφή επεισοδίων από σημαντικά επιστημονικά γεγονότα και επαναστάσεις, την μελέτη βιογραφιών και αυτοβιογραφιών των επιστημόνων, την αυτούσια χρήση πρωτογενούς ιστορικού υλικού χωρίς ερμηνευτικά σχόλια, την αναπαραγωγή και παρουσίαση ιστορικών πειραμάτων καθώς και τη δραματοποίηση διαλόγων σχετικά με ιστορικές διαμάχες ή αξιοποίηση τους σε παιχνίδια ρόλων (Mccomas, 2011; Seroglou & Koumaras, 2001; Teixeira, Greca, & Freire, 2012). Άλλες πρακτικές περιλαμβάνουν ανακατασκευή και παρουσίαση ιστορικών επιστημονικών οργάνων, μελέτες περίπτωσης στα πλαίσια εκπαιδευτικού σεναρίου σχετικά με την σημασία των κρίσιμων πειραμάτων ή νοητικών πειραμάτων από την ΙΦΦΕ, όπως και χρήση ιστορικών αφηγήσεων για εποικοδομητικές συζητήσεις μέσα στην τάξη σχετικά με την κοινωνική, τεχνολογική και πολιτισμική διάσταση της Επιστήμης (Elkana, 1970; Kubli, 2001; Roca-Rosell & Schneider, 2010; Solbes & Traver, 2003).

Η έρευνα των (Kafai & Gilliland-Swetland, 2001) αναφέρεται μια πρακτική που εφαρμόστηκε σε 29 μαθητές πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης στην νότια Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Πρόκειται για μελέτη περίπτωσης στα πλαίσια ενός εκπαιδευτικού σεναρίου σχετικά με το έργο και τη ζωή του φυσιοδίφη Ντόναλντ Ντίκι και περιλαμβάνει χρήση πρωτογενούς ιστορικού υλικού. Οι μαθητές αφού ενημερώθηκαν από τους δασκάλους τους για το θέμα, πραγματοποίησαν επίσκεψη στον χώρο που εργαζόταν ο επιστήμονας και έτσι οι ίδιοι ήρθαν σε επαφή με αυθεντικά κείμενα, φωτογραφίες και ταριχευμένα δείγματα από πτηνά και θηλαστικά που είχε συλλέξει στο παρελθόν. Στην συνέχεια οι μαθητές δημιούργησαν δικό τους υλικό με σύγχρονα μέσα ακολουθώντας την μεθοδολογία του επιστήμονα και πραγματοποίησαν συγκρίσεις και σχολιασμούς, αποτυπώνοντας τις σκέψεις τους σχετικά με τις διαφορές των συνθηκών εργασίας. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη πρακτική ενέχει δυσκολίες για την ηλικία των μαθητών, τα αποτελέσματα ήταν θετικά, καθώς πάνω από το 90% συνέκρινε σωστά τα δικά τους δείγματα με τα πρωτογενή. Επίσης οι μαθητές εκδήλωσαν μεγάλο ενδιαφέρον για τη διαδικασία, ενώ παράλληλα προσέγγισαν και βιωματικά την επιστημονική μεθοδολογία.

Οι (Piliouras, Siakas, & Seroglou, 2011) επιχείρησαν ένα διδακτικό σενάριο Αστρονομίας σε παιδιά Δημοτικού ηλικίας 12 ετών σε αστικό σχολείο με θέμα την ιστορική διαμάχη θεωριών σχετικά με το Γεωκεντρικό – Ηλιοκεντρικό κοσμολογικό μοντέλο. Οι μαθητές αρχικά ενημερώνονται για τα διάφορα κοσμολογικά μοντέλα μέσω παρακολούθησης κατάλληλων ταινιών και έπειτα εργάζονται πάνω σε διαμορφωμένο εκπαιδευτικό υλικό και φύλλα εργασίας σχετικά με τα ονόματα των επιστημόνων και τις θεωρίες που ανέπτυξαν. Στην συνέχεια οι μαθητές διαλέγουν μια αφηγηματική τεχνική μέσω της οποίας θα οργανώσουν και θα συνθέσουν τις πληροφορίες που αποκόμισαν και με ποικίλους τρόπους δημιουργούν ταινίες κινουμένων σχεδίων μικρού μήκους τις οποίες παρουσιάζουν. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη δράση κάνει προσιτές στους μαθητές έννοιες, που είναι δύσκολο να γίνουν κατανοητές με τον παραδοσιακό τρόπο, ενώ παράλληλα αντικατοπτρίζει τον επαναστατικό χαρακτήρα της Επιστήμης όπως και στοιχεία της μεθοδολογίας που ακολουθεί για την επαλήθευση μια θεωρίας. Τέλος στα θετικά στοιχεία της δράσης συμπεριλαμβάνονται η εμπλοκή των μαθητών στην γνωστική διαδικασία και η αναδόμηση των εναλλακτικών ιδεών των μαθητών.

## **5.2 Αφετηρία, σκοπός και επιμέρους στόχοι της έρευνας**

Από το θεωρητικό υπόβαθρο και την παραπάνω μελέτη της βιβλιογραφίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι ολοένα και περισσότερο αυξάνεται το ερευνητικό ενδιαφέρον για τη δυνατότητα χρήσης της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία του μαθήματος της Φυσικής στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση και όχι μόνο, καθώς καλύπτει αρκετούς γνωστικούς αλλά πολύ περισσότερο μεταγνωστικούς και συναισθηματικούς στόχους του μαθήματος, οι οποίοι ορίζονται από το Αναλυτικό Πρόγραμμα Σπουδών. Επίσης υπάρχουν ενδιαφέροντα παραδείγματα οργανωμένης εφαρμογής της σε διαθεματικές και εποικοδομητικές δράσεις, εξυπηρετώντας πολλούς από τους στόχους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ωστόσο παρά τα θετικά στοιχεία που έχει μια τέτοια προσέγγιση, αναφέρονται στη βιβλιογραφία και αρκετοί παράγοντες διαφορετικής φύσεως, οι οποίοι εμποδίζουν ή αποθαρρύνουν τους εκπαιδευτικούς από το να την εφαρμόσουν στη διδασκαλία τους.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση των αντιλήψεων των εκπαιδευτικών Πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης σχετικά με τη χρήση της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία του μαθήματος της Φυσικής.

Πιο συγκεκριμένα οι επιμέρους στόχοι της έρευνας είναι η διερεύνηση των στάσεων και των απόψεων των εκπαιδευτικών Πρωτοβάθμιας σχετικά:

- 1.) με τη δυνατότητα χρήσης της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία και την αναγνώριση των οφελών, που έχει η προσέγγιση αυτή για τους μαθητές.
- 2.) με τους τρόπους και τις πρακτικές, που αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να εφαρμοστεί.
- 3.) τις δυσκολίες και τα εμπόδια που έχει η εφαρμογή της προσέγγισης αυτής καθώς και τους τρόπους που θα μπορούσαν να ξεπεραστούν.

### **5.3 Μεθοδολογικό πλαίσιο έρευνας**

#### **5.3.1 Επιλογή ερευνητικής προσέγγισης και προσδιορισμός του ρόλου των συμμετεχόντων**

Αναφορικά με τη γενική θεματική της έρευνας που είναι η διερεύνηση των αντιλήψεων των εκπαιδευτικών Πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης σχετικά με τη χρήση της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία, κρίθηκε σκόπιμο, να χρησιμοποιηθεί η ποιοτική έρευνα. Η επιλογή αυτή στηρίζεται στη φύση του θέματος, αφού εξετάζονται οι αντιλήψεις, οι απόψεις, οι στάσεις, οι πρακτικές, οι οπτικές και οι εμπειρίες των εκπαιδευτικών σχετικά με αυτό. Η συγκεκριμένη ερευνητική προσέγγιση παρέχει τη δυνατότητα στον ερευνητή να μελετήσει σε βάθος τα παραπάνω στοιχεία, καθώς προτείνει ευέλικτες μεθόδους εξαγωγής και παραγωγής δεδομένων, ενώ παράλληλα συνεισφέρει στην ερμηνεία, κατανόηση και επέκταση των πεποιθήσεων των συμμετεχόντων με ένα πολυδιάστατο τρόπο. Επίσης στηρίζεται στον αυθορμητισμό και την ειλικρίνεια μεταξύ ερευνητή και συμμετεχόντων λόγω της αμεσότητας και του γεγονότος ότι τα δεδομένα συλλέγονται στο φυσικό τους πλαίσιο. Αυτό επίσης δίνει και στον ερευνητή τη δυνατότητα να εκμαιεύσει επιπλέον πληροφορίες από τις μη λεκτικές αντιδράσεις των συμμετεχόντων. Έτσι, επιτυγχάνεται μια ολιστική προσέγγιση των μεμονωμένων περιπτώσεων από την πλευρά του ερευνητή, ώστε στη συνέχεια αυτός να οδηγηθεί σε ασφαλή συμπεράσματα (Ισαρη & Πουρκός, 2015).

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά ο ρόλος του ερευνητή στο πλαίσιο της ποιοτικής έρευνας δεν είναι αποστασιοποιημένος και αντικειμενικός όπως στις ποσοτικές προσεγγίσεις, αλλά κεντρικός και μεροληπτικός, με το στοιχείο της υποκειμενικότητας να θεωρείται δεδομένο. Η προσωπική εμπλοκή του στη διαδικασία αλλά και η διαδικασία ερμηνείας και νοηματοδότησης της γλώσσας των υποκειμένων έχει ως αποτέλεσμα την ενσωμάτωση και των δικών του απόψεων, εμπειριών και σκέψεων στην ανάλυση του θέματος. Αυτό σημαίνει ότι μια συγκεκριμένη θεματική μπορεί να αναλυθεί διαφορετικά από κάθε ερευνητή, προσφέροντας σε αυτό πολλές οπτικές, οι οποίες εμπεριέχουν μοναδικές και χρήσιμες πληροφορίες. Από την άλλη πλευρά ο ρόλος των συμμετεχόντων δεν είναι παθητικός, όπως στις ποσοτικές έρευνες, αφού μέσα από την ελεύθερη συζήτηση και ανάπτυξη των θεμάτων

προκύπτουν κατευθύνσεις και προοπτικές, που αλλάζουν τον σχεδιασμό της έρευνας ή την συνδιαμορφώνουν. Κατά αυτόν τον τρόπο οι συμμετέχοντες λογίζονται ως ερευνητικοί συνεργάτες (Glesne, 2018; Ίσαρη & Πουρκός, 2015).

### 5.3.2 Επιλογή εργαλείου συλλογής δεδομένων

Στην παρούσα έρευνα επιλέχθηκε ως εργαλείο συλλογής δεδομένων η τεχνική της συνέντευξης, επειδή θεωρήθηκε η κατάλληλη για την εξυπηρέτηση του σκοπού και των επιμέρους στόχων της έρευνας. Η συγκεκριμένη επιλογή, πέρα από το γεγονός ότι είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική στις εκπαιδευτικές έρευνες, παρέχει πολλές δυνατότητες στην κατανόηση και πολυδιάστατη ερμηνεία πεποιθήσεων και πρακτικών εκ μέρους του ερευνητή, δίνει περιθώρια για αφηγηματική διατύπωση των απόψεων των συνεντευξιζόμενων, είναι διαδραστική και εύκολη στη διεξαγωγή της και έχει μηδενικό κόστος.

Αναφορικά με τον βαθμό τυποποίησης των ερωτημάτων της συνέντευξης, επιλέχθηκε η ημιδομημένη συνέντευξη. Το συγκεκριμένο είδος συνέντευξης περιέχει ένα σύνολο προκαθορισμένων ερωτήσεων, βασισμένων στους άξονες των επιμέρους στόχων αλλά προσφέρει εκτός από την δυνατότητα εμβάθυνσης στο περιεχόμενο, και την ευελιξία επέκτασης, τροποποίησης και αλλαγής σειράς της διατύπωσης των ερωτημάτων κατά τη διάρκεια της συνέντευξης και σύμφωνα με την κρίση του ερευνητή (Ίσαρη & Πουρκός, 2015).

Στην παρούσα ποιοτική έρευνα σχεδιάστηκε ο οδηγός ημιδομημένης συνέντευξης με βάση τους επιμέρους στόχους της έρευνας και εκτίθεται στο παράρτημα της εργασίας, περιλαμβάνοντας δέκα ερωτήσεις. Αρχικά εμπεριέχει τέσσερις ερωτήσεις κλειστού τύπου, ώστε να σκιαγραφηθεί το προφίλ των συνεντευξιζόμενων, ενώ οι υπόλοιπες έξι είναι, κατά κύριο λόγο, ανοιχτού τύπου. Οι αρχικές ερωτήσεις σχετίζονται με το φύλο, το καθεστώς εργασίας, τα έτη υπηρεσίας, τις επιπλέον σπουδές αλλά και αυτές σχετικά με τη Φυσική καθώς και τον αριθμό των ετών διδασκαλίας σε Ε΄ και ΣΤ΄ Δημοτικού. Στη συνέχεια ακολουθεί μια εισαγωγική ερώτηση σχετικά με τον αριθμό και το είδος των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν οι εκπαιδευτικοί στη διδασκαλία της Φυσικής και την γνώμη τους για το ποια θεωρούν πιο αποτελεσματική. Η επόμενη ερώτηση αφορά την χρήση ή μη στοιχείων από την ΙΦΦΕ στη διδασκαλία τους έως τότε και τη σύντομη περιγραφή του τρόπου που την πραγματοποίησαν. Στην ίδια ερώτηση περιλαμβάνεται και μια σύντομη περιγραφή της κύριας αιτίας σε περίπτωση μη χρήσης της.

Εν συνεχεία ακολουθούν κατά σειρά οι ερωτήσεις που αφορούν τους ερευνητικούς άξονες της εργασίας και περιλαμβάνουν τις απόψεις και τις πεποιθήσεις των εκπαιδευτικών

σχετικά με: 1.)τα πιθανά οφέλη από τη χρήση στοιχείων της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της Φυσικής 2.)τις ιδέες, πρακτικές και του τρόπου εφαρμογής της στο μάθημα 3.)τα πιθανά εμπόδια που τους αποθαρρύνουν από την χρήση της αλλά και τους τρόπους που θα μπορούσαν να ξεπεραστούν. Η τελευταία ερώτηση δεν αφορά άμεσα τους ερευνητικούς άξονες, αλλά σχετίζεται με την δυνατότητα αξιοποίησης στοιχείων από την ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της έννοιας της βαρύτητας στο κεφάλαιο της Μηχανικής του σχολικού βιβλίου. Επίσης σε περίπτωση αρνητικής απάντησης εμπεριέχεται υποερώτημα, που αφορά την άποψη των εκπαιδευτικών για την καταλληλότερη προσέγγιση σχετικά με το μάθημα αυτό.

### 5.3.3 Περιγραφή του δείγματος της έρευνας και της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων

Από τις στρατηγικές δειγματοληψίας της ποιοτικής έρευνας όπως προσδιορίζονται από τη βιβλιογραφία επιλέχθηκε ο τύπος του δείγματος ευκολίας. Ο συγκεκριμένος τύπος δείγματος δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να επιλέξει περιπτώσεις ανθρώπων, που είναι άμεσα διαθέσιμες και στους οποίους έχει εύκολη πρόσβαση (Ισαρη & Πουρκός, 2015). Επίσης οι μισοί από τους συμμετέχοντες που επιλέχθηκαν είχαν επιπλέον σπουδές σχετικές με τη διδακτική Φυσικών Επιστημών με την έννοια ότι είναι αυτοί, οι οποίοι θα μπορούσαν να δώσουν περισσότερες πληροφορίες για το θέμα ενώ παράλληλα θα γινόταν και μια ενδιαφέρουσα σύγκριση απόψεων σχετικά με τους υπόλοιπους.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του 2023 και στο δείγμα περιλαμβάνονται τέσσερις εν ενεργεία εκπαιδευτικοί πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης, εργαζόμενοι σε σχολεία της Ανατολικής Αττικής. Ο ένας από τους συμμετέχοντες είναι άντρας με εύρος ηλικίας 30-35 έτη, ο οποίος είχε σπουδές μεταπτυχιακού επιπέδου ενώ οι άλλοι τρεις συμμετέχοντες είναι γυναίκες με ηλικιακό εύρος 28-40 έτη, από τις οποίες οι δυο είχαν μεταπτυχιακό τίτλο στη Διδακτική Φυσικών ή Θετικών Επιστημών. Όλοι οι συμμετέχοντες είχαν συνολικά έτη υπηρεσίας άνω των οκτώ (8) ετών και είχαν αναλάβει Ε΄ ή ΣΤ΄ Δημοτικού πάνω από τρεις (3) σχολικές χρονιές.

Οι συνεντεύξεις με τους παραπάνω εκπαιδευτικούς έγιναν τηλεφωνικά, αφού ενημερώθηκαν για τους άξονες και το θέμα της έρευνας μια μέρα πριν πραγματοποίηση της και δέχτηκαν να ηχογραφηθούν οι συνομιλίες κατά την διάρκεια τους. Επίσης διαβεβαιώθηκε από τον ερευνητή ότι θα τηρηθούν όλοι οι κανόνες δεοντολογίας, ασφαλείας και ηθικής σχετικά με την ανωνυμία, την χρήση των προσωπικών δεδομένων και την ακριβή χρήση τους στην έρευνα, χωρίς παραποίηση των λεγόμενων τους. Για τον λόγο αυτό τα ονόματα

των συνεντευξιαζόμενων κωδικοποιήθηκαν και μόνο ο ερευνητής γνωρίζει σε ποιον ανήκει το κάθε απόσπασμα.

#### 5.3.4 Περιγραφή της μεθόδου ανάλυσης των ερευνητικών δεδομένων

Η μέθοδος ανάλυσης που ακολούθησε η παρούσα έρευνα είναι η θεματική ανάλυση, η οποία είναι μια εύχρηστη μέθοδος οργάνωσης, αναφοράς και εντοπισμού επαναλαμβανόμενων νοηματικών μοτίβων, που προκύπτουν από τα ερευνητικά δεδομένα. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε καθώς έχει το πλεονέκτημα της θεωρητικής ελευθερίας, χωρίς δέσμευση από το ερευνητή σε συγκεκριμένες επιστημολογικές θέσεις και χωρίς αυτό να σημαίνει ότι περιέχει ασάφειες ή είναι εκτός επιστημονικού πλαισίου (Ισαρη & Πουρκός, 2015).

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου αυτής ήταν η απομαγνητοφώνηση των συνεντεύξεων, η συγκέντρωση των δεδομένων που απαντούν στα ερευνητικά ερωτήματα και η εξοικείωση του ερευνητή με αυτά. Στη συνέχεια τα δεδομένα χωρίστηκαν σε κατηγορίες με επαγωγικό τρόπο και ενοποιήθηκαν σε αυτές που έδιναν την ίδια πληροφορία. Έπειτα τα θέματα ελέγχθηκαν, κωδικοποιήθηκαν και αναπτύχθηκαν με τον τρόπο που προέκυψαν από το ερευνητικό υλικό και τελικά κατανοήθηκαν και ερμηνεύθηκαν από τον ερευνητή, ώστε να μην αμφισβητηθεί η εγκυρότητα τους.

### 5.4 Ανάλυση και παρουσίαση των ερευνητικών δεδομένων

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα ευρήματα της έρευνας, όπως προέκυψαν από τις απαντήσεις των συμμετεχόντων εκπαιδευτικών στις ερωτήσεις του οδηγού ημιδομημένης συνέντευξης.

Όσον αφορά την εισαγωγική ερώτηση που έγινε στους εκπαιδευτικούς σχετικά με τα είδη των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν στη διδασκαλία του μαθήματος της Φυσικής και την αποτελεσματικότητά τους, όλοι οι εκπαιδευτικοί ανέφεραν ότι χρησιμοποιούν σίγουρα τη διερευνητική μάθηση με χρήση πειραμάτων. Συγκεκριμένα αναφέρουν:

*« Όσο μπορώ αξιοποιώ τη διερευνητική προσέγγιση, ώστε οι μαθητές να εμπλέκονται με πειράματα...» E1*

*« Προτού προσεγγίσουμε θεωρητικά μια έννοια, κάνουμε πειράματα στην τάξη... Άλλες φορές τα εκτελώ εγώ αν έχουν κάποια δυσκολία ή επικινδυνότητα ενώ άλλες φορές τα εκτελούν οι μαθητές σε ομάδες...» E2*

*«Γενικότερα στη διδασκαλία των Φ.Ε. χρησιμοποιώ βιωματικές μεθόδους, πειράματα... Δίνονται τα κατάλληλα ερεθίσματα στους μαθητές, διατυπώνουν υποθέσεις, τις ελέγχουν και καταλήγουν σε συμπεράσματα» E3*



*«Χρησιμοποιώ στην τάξη στοιχεία ανακαλυπτικής και διερευνητικής μάθησης μέσω των πειραμάτων που προτείνει το Τετράδιο Εργασιών κατά την διάρκεια των οποίων οι μαθητές ακολουθούν όλα τα στάδια της επιστημονικής μεθόδου...» E4*

Ένα άλλο στοιχείο που προέκυψε από αυτή την ερώτηση είναι ότι όλοι οι εκπαιδευτικοί χρησιμοποιούν μεικτές μεθόδους και θεωρούν ότι όλες είναι αποτελεσματικές κατά περίπτωση ανάλογα με τη φύση του εκάστοτε μαθήματος και τις ιδιαιτερότητες των μαθητών της κάθε τάξης. Οι συμμετέχοντες αναφέρουν:

*« Χρησιμοποιώ όλες τις προσεγγίσεις, ακόμη και την παραδοσιακή που γενικώς την αποφεύγω...Καθεμιά έχει τη δική της λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητα ανάλογα με το επίπεδο των μαθητών και τη δυσκολία του μαθήματος...» E1*

*«Όλες οι προσεγγίσεις είναι αποτελεσματικές ανάλογα με το μάθημα και όπου είναι χρήσιμο χρησιμοποιούμε ψηφιακά μέσα (H/Y, προτζέκτορα κλπ.) ώστε να γίνει πιο κατανοητό το μάθημα...» E2*

*« Όλες οι μορφές διδασκαλίας είναι χρήσιμες ανάλογα με το στάδιο διδασκαλίας, σπανίως χρησιμοποιώ μόνο μια...» E3*

*« Παρόλο που αυτή η προσέγγιση (ανακαλυπτική) είναι αυτή που χρησιμοποιώ κυρίως δεν σημαίνει ότι πάντα είναι και η πιο αποτελεσματική...Ορισμένα μαθήματα δεν είναι κατάλληλα ή έχουν πειράματα με υλικά που δεν είναι απλά, οπότε χρησιμοποιώ την παραδοσιακή διδασκαλία και βοηθητικά τα τεχνολογικά μέσα της τάξης...» E4*

Τέλος ένα άλλο στοιχείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι μόνο οι δυο εκπαιδευτικοί αναφέρθηκαν ξεκάθαρα σε χρήση εποικοδομητικών δράσεων, η μια εκ των οποίων μάλιστα με χρήση της ΙΦΦΕ. Πιο συγκεκριμένα αναφέρουν:

*«Χρησιμοποιώ αρκετά, όσο μπορώ, την Ιστορία, ώστε τα παιδιά να ψάχνουν πληροφορίες για τους επιστήμονες, να διερευνούν τις ιδέες τους, να συζητούν και να συγκρίνουν στοιχεία με τους δικούς τους πειραματισμούς...» E1*

*«Λαμβάνω πάντα υπόψιν τις εναλλακτικές ιδέες των μαθητών για την διδασκαλία εννοιών και σχεδιάζω το μάθημα έτσι ώστε μόνοι τους να τις αναδομήσουν και στο τέλος του μαθήματος τους δίνεται το θεωρητικό πλαίσιο...» E3*

Συνεχίζοντας στην επόμενη ερώτηση που σχετίζεται με το αν οι εκπαιδευτικοί έχουν κάνει χρήση ή όχι στοιχείων της ΙΦΦΕ στην διδασκαλία του μαθήματος μέχρι τη στιγμή που έγινε η συνέντευξη, μόνο μια εκπαιδευτικός απάντησε ότι την έχει χρησιμοποιήσει οργανωμένα και συστηματικά, ενώ μια άλλη εκπαιδευτικός έχει απλά εμπλουτίσει τη διδασκαλία της με ιστορικές αναφορές. Επίσης ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να αναφέρουν

παραδείγματα από τέτοιες δράσεις, που έχουν πραγματοποιήσει. Οι συγκεκριμένοι εκπαιδευτικοί αναφέρουν κατά σειρά:

*«Όπως σας ξαναείπα προηγουμένως χρησιμοποιώ την ΙΦΦΕ στο μάθημα της Φυσικής και έχω πολλά παραδείγματα να σας αναφέρω... Ένα από αυτά που μου έρχεται στο μυαλό είναι η αξιοποίηση του έργου του Μπρέχτ 'Η ζωή του Γαλιλαίου' σε τάξη Ε' Δημοτικού, το οποίο μελετήσαμε σε διάφορα επίπεδα... Είχε έρθει μια αστροφυσικός στην τάξη από το Ίδρυμα Ευγενίδου και είχε μιλήσει στα παιδιά για τον ίδιο τον Γαλιλαίο, το έργο του και τη συμβολή του στην καθιέρωση του ηλιοκεντρικού συστήματος... Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε επίσκεψη στο Ίδρυμα αυτό και τα παιδιά είδαν μια ταινία σχετικά με αυτό ενώ ο κ. Π. ήρθε και τους ενημέρωσε στο τέλος για τις απόψεις που προκύπτουν ιστορικά σχετικά με το γεωκεντρικό και ηλιοκεντρικό σύστημα... Αργότερα μελετήσαμε με τους μαθητές το κείμενο του Μπρέχτ σχετικά με το πως η γλώσσα των Φ.Ε εμπλέκεται με τον θεατρικό λόγο, τα παιδιά εξοικειώθηκαν με τεχνικές θεάτρου και τελικά το έργο εξελίχθηκε σε θεατρική παράσταση που έγινε από τους μαθητές στο τέλος της χρονιάς... Μια άλλη παρόμοια δράση τύπου πρότζεκτ που αφορά το έργο του Ίψεν 'Ο εχθρός του λαού' και έγινε σε μαθητές Στ' Δημοτικού. Σε αυτό αναδύθηκαν πτυχές της Επιστήμης όπως είναι η σχέση με το κοινωνικό και πολιτισμικό πλαίσιο, ο ρόλος του επιστήμονα και η ηθική πλευρά της Επιστήμης... Έχω κάνει και άλλα πολλά σχετικά με την φύση της μέτρησης, την εξέλιξη των επιστημονικών οργάνων κλπ...» E1*

*«Ναι οπωσδήποτε... δίνω στοιχεία από την Ιστορία σχετικά με την θεωρία του μαθήματος και πληροφορίες για το πως ένας επιστήμονας δούλεψε, πως σκέφτηκε, πως κατέληξε σε αυτό το συμπέρασμα, ποιο ήταν το κοινωνικό πλαίσιο της εποχής του... Φυσικά δεν το κάνω σε όλα τα μαθήματα αλλά μόνο σε αυτά που έχω τέτοιου τύπου γνώσεις... Δεν θυμάμαι αυτή τη στιγμή να σας πω αναλυτικά κάποια δράση αλλά όσο μπορώ αξιοποιώ ιστορικές πληροφορίες στο μάθημα...» E3*

Επιπροσθέτως σχετικά με τους εκπαιδευτικούς που δεν την έχουν χρησιμοποιήσει ζητήθηκε από τον ερευνητή αν μπορούν να δώσουν μια σύντομη εξήγηση των λόγων που δεν το έχουν κάνει και θα παρατεθούν σε επόμενο σχετικό ερώτημα που αφορά τους άξονες της έρευνας. Ακόμη η ερώτηση αυτή περιλάμβανε ένα άλλο υποερώτημα σχετικά με το πόσο πιθανό είναι να χρησιμοποιήσουν στοιχεία της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία του μαθήματος στο μέλλον. Όλοι οι εκπαιδευτικοί απάντησαν ότι είναι πολύ πιθανό, με τους εκπαιδευτικούς που δεν την χρησιμοποιούσαν συστηματικά ή καθόλου να προβάλλουν κάποιες προϋποθέσεις για να γίνει αυτό:

*«Θέλω πολύ να την χρησιμοποιήσω (την προσέγγιση της ΙΦΦΕ) στο μέλλον αλλά δυστυχώς δεν έχω και τόσες πολλές γνώσεις σχετικά με την Ιστορία της Επιστήμης από τις σπουδές μου*

έως τώρα και παρά το γεγονός ότι προέρχομαι από την τεχνολογική κατεύθυνση, όταν ήμουν στο σχολείο...» E3

«Δεν είναι ότι δεν το έχω σκεφτεί να εφαρμόσω την συγκεκριμένη προσέγγιση(χρήση ΙΦΦΕ) αλλά είναι τόση πολύ η ύλη και περιορισμένος ο χρόνος που δεν νομίζω ότι είναι εύκολο να επεκταθεί κανείς και σε τέτοιες δράσεις... Φυσικά και θα την χρησιμοποιούσα στο μέλλον και θα το έψαχνα αρκεί να μειωθεί η ύλη, ώστε να έχω τον χρόνο να το ψάξω...» E2

« Δεν έχω κάνει χρήση της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία του μαθήματος και θα ήταν ψέμα να σας πω ότι δεν το έχω σκεφτεί καθώς έχω μια από καιρό μια πολύ καλή ιδέα-δράση να δουλέψω με τα παιδιά που αφορά την ανακατασκευή ιστορικών οργάνων και την χρήση τους από τους μαθητές...Ωστόσο δυσκολεύομαι πολύ να βρω τα υλικά και γενικά δεν υπήρχε υποστήριξη ούτε από το σχολείο, ούτε από τους γονείς, ούτε από τον διευθυντή, ούτε από αρμόδιους φορείς όταν είχα εκφράσει αυτή την σκέψη, οπότε έμεινε εκεί η ιδέα(στην σκέψη)... Φυσικά και θα ήμουν πολύ θετική να την εφαρμόσω στο μέλλον αρκεί να υπάρχει υποστήριξη και να έχω τουλάχιστον τα μέσα που χρειάζομαι...» E4

Η εκπαιδευτικός που έχει κάνει αρκετές φορές χρήση της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της Φυσικής ανέφερε με σιγουριά και ενθουσιασμό ότι θα την χρησιμοποιούσε στο μέλλον:

«Φυσικά και θα την ξαναχρησιμοποιήσω(την ΙΦΦΕ)...έχει γίνει έμφυτο πια γιατί τα παιδιά ανταποκρίνονται σε αυτό και έχουν πολλά οφέλη...Στην αρχή να σας πω την αλήθεια φοβόμουν και προβληματιζόμουν αν αυτή η τεχνική θα δουλέψει και ήμουν αρκετά διστακτική, όμως το προσπάθησα πολύ και τώρα μπορώ να σας πω ότι τα κατάφερα...και μάλιστα με θαυμαστό τρόπο!!! Αν δεν δοκιμάσεις κάτι, δεν μπορείς να ξέρεις πως θα εξελιχθεί...» E1

Η επόμενη ερώτηση έχει να κάνει με τις απόψεις τα εκπαιδευτικών σχετικά με τα οφέλη που θα έχει η χρήση της ΙΦΦΕ στους μαθητές σε διάφορα επίπεδα και αποτελεί τον πρώτο ερευνητικό άξονα της παρούσας εργασίας. Ένα στοιχείο που επισημαίνεται από όλους τους συμμετέχοντες στην έρευνα είναι η ανάδειξη του δυναμικού και εξελικτικού χαρακτήρα της Φυσικής και κατ' επέκταση της Επιστήμης. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τις απαντήσεις τους:

« Μέσα από την χρήση της ΙΦΦΕ αναδεικνύονται διαστάσεις μέσα από τις οποίες τα παιδιά κατανοούν ότι στον χώρο της Επιστήμης τίποτα δεν είναι απόλυτο ή δεδομένο αλλά ότι όλα(οι θεωρίες, τα ευρήματα) είναι υπό εξέλιξη και μπορούν να ανατραπούν...θεωρώ ότι αυτό είναι στάση ζωής και άμα το καλλιεργήσεις στα παιδιά και να το γενικεύσεις είναι πολύ σημαντικό...» E1

«Αν συνδυαστεί η Φυσική με την Ιστορία της Επιστήμης δίνουμε στα παιδιά την ευκαιρία να κατανοήσουν πως η γνώση δεν δόθηκε έτοιμη ή να το πω καλύτερα δεν προέκυψε χωρίς προσπάθεια αλλά εξελίχθηκε και συνεχώς εξελίσσεται μέσα από σκληρή δουλειά αλλά και τα λάθη των επιστημόνων...» E2

« Η ΙΦΦΕ είναι το κατάλληλο πλαίσιο ώστε οι μαθητές να καταλάβουν όχι μόνο μια θεωρία που τους δίνεται αλλά και πως αυτή άλλαξε μέσα από την δουλειά άλλων επιστημόνων...Να αντιληφθούν ότι τίποτα δεν θεωρείται δεδομένο...» E3

« Όταν η Φυσική διδάσκεται μέσα από το ιστορικό της πλαίσιο οι μαθητές συνειδητοποιούν ότι δεν ζυπνήσαμε μια μέρα και εμφανίστηκαν οι θεωρίες από μόνες τους αλλά αυτή (η Επιστήμη) εξελίχθηκε σε βάθος χρόνου από ανθρώπους με διαφορετικές σκέψεις και ιδέες...Για παράδειγμα μια θεωρία που ίσχυε παλιότερα, όχι μόνο έχει εξελιχθεί αλλά μπορεί να μην υφίσταται καθόλου πλέον ή να έχει αντικατασταθεί» E4

Επίσης ένα άλλο σημείο που προέκυψε από τις απαντήσεις όλων των εκπαιδευτικών είναι η εξοικείωση των μαθητών με την μεθοδολογία της Επιστήμης:

«...Βοηθάει τους μαθητές να κατανοήσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των επιστημόνων, δηλαδή το πως ο ένας πατάει στις ιδέες του άλλου για εξελίξει μια θεωρία αλλά και ο τρόπος που γίνεται αυτό δηλαδή πως μέσα από τις δικές του υποθέσεις αποδεικνύει ότι η δική του θεωρία λειτουργεί καλύτερα από την άλλη...» E1

« Μέσα από την Ιστορία της Επιστήμης μπορείς να γίνει ξεκάθαρος, ο τρόπος εργασίας των επιστημόνων και η μεθοδολογία που ακολούθησαν προκειμένου να φτάσουν σε μια ανακάλυψη...» E2

« Επίσης θεωρώ πως μέσω της προσέγγισης αυτής(χρήση ΙΦΦΕ) οι μαθητές αντιλαμβάνονται καλύτερα την μεθοδολογία που χρησιμοποιούν οι φυσικοί για να φτάσουν σε ένα συμπέρασμα...» E3

«Ένα άλλο όφελος είναι ότι οι μαθητές έρχονται σε επαφή με την διαδικασία που εφαρμόζουν οι επιστήμονες για να διατυπώσουν μια θεωρία ή ένα νόμο και να επιβεβαιώσουν πως αυτός ισχύει στην Φύση...» E4

Ένα άλλο θετικό στοιχείο που προσφέρει η χρήση της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία και ανέφεραν όλοι οι εκπαιδευτικοί είναι η κατανόηση και η εμβάθυνση στο περιεχόμενο της Φυσικής μέσα από αυτή την προσέγγιση:

« Αρχικά πιστεύω ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση δίνει χώρο στους μαθητές να αναπτύξουν μια καλύτερη κατανόηση του μαθήματος, μια ενσυναίσθηση, έως και μια ταύτιση με τους επιστήμονες...» E1

*«Αν συνδυάσεις την ΙΦΦΕ το μάθημα μπορεί να γίνει πιο απλό, πιο ζωντανό, πιο κατανοητό και σε ορισμένες περιπτώσεις να το αναλύσεις ένα βήμα παραπέρα...» E2*

*«Υπάρχουν πολλά οφέλη για τους μαθητές στο γνωστικό κομμάτι, που αφορούν την κατανόηση και την νοηματοδότηση του περιεχομένου και των εννοιών...» E3*

*«Οι μαθητές έρχονται σε επαφή με την εξέλιξη της θεωρίας και επιτυγχάνεται μια εμπάθунση ως προς το περιεχόμενο της...»E4*

Ακόμη από τα λεγόμενα όλων των συμμετεχόντων τονίστηκε και η καλλιέργεια ενδιαφέροντος και η ανάπτυξη θετικής στάσης εκ μέρους των παιδιών για το μάθημα:

*«Νομίζω ότι το επιθυμητό αποτέλεσμα και το μεγαλύτερο κέρδος από αυτή την διαδικασία(χρήση της ΙΦΦΕ) είναι τα παιδιά να αγαπήσουν το μάθημα...να μην είναι ένα μάθημα-τιμωρία που στηρίζεται στην παπαγαλία...» E1*

*«Μέσα από μια τέτοιου τύπου προσέγγιση κεντρίζεται το ενδιαφέρον των μαθητών και αυξάνεται η συμμετοχή τους στο μάθημα...»E2*

*«Στο συναισθηματικό κομμάτι θεωρώ πως ενθαρρύνει τα παιδιά να ασχοληθούν γενικά με την Φυσική ακολουθώντας το παράδειγμα των επιστημόνων του παρελθόντος...» E3*

*«Από την πλευρά των μαθητών σίγουρα θεωρώ πως ενισχύεται το ενδιαφέρον τους και η εμπλοκή τους στην μαθησιακή διαδικασία...» E4*

Συμπληρωματικά με την παραπάνω άποψη, όλοι οι εκπαιδευτικοί επισήμαναν την κινητοποίηση και εμπλοκή μαθητών που παραδοσιακά θεωρούνται αδύναμοι στο μάθημα:

*«Εννοείται πως βοηθάει, όπως και όλες οι εναλλακτικές προσεγγίσεις, τους μαθητές που δεν τα πηγαίνουν καλά ή που δεν αποδίδουν στην παραδοσιακή διδασκαλία...Αυτό είναι και το ζητούμενο νομίζω! » E1*

*« Η προσέγγιση αυτή επίσης δίνει στους μαθητές που δυσκολεύονται στην κατανόηση της αυστηρής ορολογίας του μάθημα της Φυσικής το κίνητρο της ενεργούς συμμετοχής...» E2*

*«Θεωρώ πως η χρήση της ΙΦΦΕ θα τονώσει το ενδιαφέρον ειδικά των αδύναμων μαθητών...» E3*

*«Σίγουρα η χρήση υλικού από την ΙΦΦΕ θα βοηθήσει όλους τους μαθητές αλλά κυρίως αυτούς που έχουν μια αρνητική εικόνα για το μάθημα ή το αντιμετωπίζουν με φόβο...» E4*

Εν συνεχεία τρεις εκπαιδευτικοί αναφέρουν ότι η εφαρμογή της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία έχει ως αποτέλεσμα τη σύνδεση της Επιστήμης με την Κοινωνία και την καθημερινή ζωή:

*« Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι αυτής της προσέγγισης θεωρώ πως έχει να κάνει με την σύνδεση αυτών που συμβαίνουν στο σχολείο με τον έξω κόσμο, τη καθημερινή τους ζωή...» E1*

*«Με αυτόν τον τρόπο(την χρήση της ΙΦΦΕ) βάζεις τη Φυσική στο κάδρο όλων των Επιστημών και της Κοινωνίας, αφού η Ιστορία είναι ό,τι έχουμε περάσει ως ανθρωπότητα...Έτσι δίνεις στο παιδί να καταλάβει ότι όλο αυτό είναι κομμάτι της και μάλιστα είναι αυτό που μας οδήγησε στην πρόοδο σε όλους τους τομείς...» E2*

*«Πιστεύω ότι είναι πολύ χρήσιμο η Επιστήμη να διδάσκεται μέσα στο ιστορικό, κοινωνικό και πολιτισμικό της πλαίσιο, γιατί όλα αυτά είναι αλληλένδετα μεταξύ τους και αυτή η οπτική πρέπει να γίνει αντιληπτή από τα παιδιά...» E4*

Το επιχείρημα αυτό επεκτείνεται από τους δυο εκπαιδευτικούς και συμπίπτει με την άποψη μιας άλλης εκπαιδευτικού που αφορά την ανάδειξη του ανθρώπινου χαρακτήρα της Επιστήμης, μέσα από δράσεις σχετικές με την ΙΦΦΕ:

*«Δίνονται ευκαιρίες στα παιδιά να συνειδητοποιήσουν ότι δεν είναι οι μόνοι που κάνουν σκέψεις ή έχουν απορίες για πράγματα που δεν μπορούν να κατανοήσουν, αλλά ότι και άλλοι πριν από αυτούς είχαν εμπλακεί σε διερευνητικές δραστηριότητες...Επίσης μέσα από τέτοιες δραστηριότητες παύουν όλα τα επιστημονικά επιτεύγματα να παρουσιάζονται ως μαγικά και απρόσωπα και έτσι γίνονται πιο προσιτά στους μαθητές...»E1*

*«Έχοντας οι μαθητές ως παραδείγματα περιπτώσεις επιστημόνων καθώς και του τρόπου εργασίας τους, μπορεί να εμπνευστούν και να ακολουθήσουν την ίδια πορεία με αυτούς...» E2*

*« Τα ιστορικά παραδείγματα δείχνουν στους μαθητές ότι δεν ήταν οι επιστήμονες του παρελθόντος οι έξυπνοι ή οι σοφοί, αλλά ότι και οι ίδιοι(οι μαθητές)μπορούν να τα καταφέρουν εάν εργαστούν με τον ίδιο τρόπο και μιμηθούν το παράδειγμα τους...» E3*

Από τις δυο τελευταίες αναφορές των εκπαιδευτικών E2 και E3 αναδύεται έμμεσα και ένα ακόμη στοιχείο που προσφέρει η χρήση της ΙΦΦΕ και δεν είναι άλλο από την κατάρριψη εκ μέρους των μαθητών της εξιδανικευμένης εικόνας των επιστημόνων. Αυτό είναι ένα μοναδικό πλεονέκτημα της προσέγγισης κατά την άποψη και του ερευνητή, αφού πολλές φορές μέσα από την απλή έκθεση των θεωριών τους και των επιτευγμάτων τους οι μαθητές θεωρούν λανθασμένα ότι η Φυσική απευθύνεται σε υψηλής νοημοσύνης μόνο άτομα ή σε εκ γενετής ‘σοφούς’ όπως αναφέρουν και οι συμμετέχοντες.

Επίσης οι δυο από τους τέσσερις εκπαιδευτικούς αναφέρουν ξεκάθαρα ότι μέσω της χρήσης της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία επιτυγχάνεται η ανάπτυξη της κριτικής σκέψης καθώς και των στρατηγικών επίλυσης προβλημάτων:

*«Τα παιδιά μέσα από την ενασχόληση τους με δραστηριότητες που περιλαμβάνουν ιστορικά στοιχεία στη Φυσική αναπτύσσουν κριτική στάση απέναντι σε αυτά που ακούν και μαθαίνουν...» E1*

«Στα θετικά νομίζω περιλαμβάνεται και το γεγονός ότι ενισχύεται η κριτική σκέψη των παιδιών αλλά και η ικανότητα επίλυσης προβλημάτων καθώς παρουσιάζονται θέματα που ζητούνται από τα ίδια να σχολιάσουν, να πουν την γνώμη τους αλλά και να διεισδύσουν στον τρόπο σκέψης των επιστημόνων...»E4

Ως προς το ίδιο επιχείρημα η εκπαιδευτικός E4 προσθέτει ότι οι δραστηριότητες που κάνουν χρήση της ΙΦΦΕ συμβάλουν και στον επιστημονικό γραμματισμό των παιδιών:

«Κάτι ακόμη που θα ήθελα να προσθέσω σε αυτό είναι ότι οι μαθητές ερχόμενοι σε επαφή με τους τρόπους σκέψης των επιστημόνων μαθαίνουν να αμφισβητούν, να ψάχνουν, να ελέγχουν μια πληροφορία και γενικά να μην θεωρούν τίποτα δεδομένο, απλά επειδή τους δίνεται από κάποια πηγή... Έτσι αποκτούν μια ανάλογη στάση ζωής ως μελλοντικοί πολίτες...»E4

Επίσης εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι η ίδια εκπαιδευτικός E4 είναι η μόνη που αποτυπώνει ρητά ότι η ΙΦΦΕ είναι το κατάλληλο πλαίσιο για εποικοδομητικές δραστηριότητες που συμβάλουν στην εννοιολογική αλλαγή των μαθητών:

«Σίγουρα ένα σημαντικό στοιχείο αξιοποίησης αυτής της προσέγγισης(χρήση ΙΦΦΕ) είναι ότι μπορούν, με κατάλληλο σχεδιασμό φυσικά, να αναδειχθούν οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών, οι οποίες μπορεί να συμπίπτουν με παρόμοιες ιδέες που υπήρχαν παλαιότερα και να αλλάξουν, ερχόμενα(τα παιδιά) σε επαφή με τα επιχειρήματα των μετέπειτα επιστημόνων...» E4

Τέλος δυο ακόμη οφέλη που προκύπτουν από τις απόψεις των συμμετεχόντων, μεμονωμένα, είναι η απόκτηση ολοκληρωμένης εικόνας και πολυεπίπεδης γνώσης για τις Επιστήμες:

«Νομίζω ότι μέσα από την Ιστορία παρέχονται πολλές πληροφορίες και δίνεται ευκαιρία για ανάλυση σε πολλά επίπεδα με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μια πιο ολιστική ή ολοκληρωμένη γνώση, αν θέλετε, των Επιστημών...» E2

όπως και η επίτευξη των στόχων της διαθεματικότητας:

«Η αξιοποίηση της ΙΦΦΕ και ο συνδυασμός της με πρακτικές θεάτρου για παράδειγμα και όχι μόνο νομίζω ότι παρέχει οφέλη σε πολλά επίπεδα ανάπτυξης δεξιοτήτων των παιδιών που νομίζω είναι και ο κύριος στόχος όταν εφαρμόζονται σε διαθεματικά πλαίσια...»E1

Η επόμενη ερώτηση του οδηγού συνέντευξης σχετίζεται με τον δεύτερο άξονα της έρευνας και αφορά τους τρόπους εφαρμογής ή τις διδακτικές πρακτικές που θα χρησιμοποιούσαν οι εκπαιδευτικοί αξιοποιώντας την ΙΦΦΕ στο μάθημα της Φυσικής. Οι απαντήσεις των συμμετεχόντων ποικίλλουν, ωστόσο τρεις από αυτούς (E1,E2, E4) αναφέρουν ότι θα την εφαρμόζαν μέσα από τη μελέτη βιογραφικών κειμένων των επιστημόνων:

«Μια καλή πρακτική, νομίζω, είναι η αξιοποίηση βιογραφικών στοιχείων των επιστημόνων δίνοντας τους εγώ κατάλληλες πηγές η ακόμα καλύτερα να ψάξουν και μόνοι τους πληροφορίες για αυτούς...θεωρώ πως θα ενδιέφερε πολύ τους μαθητές να δουν τις συνθήκες ζωής των επιστημόνων, τον τρόπο που μεγάλωσαν, τα βήματα προόδου που ακολούθησαν, την αλληλεπίδραση τους με το κοινωνικό πλαίσιο, το πως βασίστηκε η δουλειά τους σε έργα άλλων ερευνητών...» E1

«Ναι, θα μπορούσε την χρησιμοποιήσουμε είτε διαβάζοντας μέσα από πηγές την ιστορία ενός επιστήμονα σχετικά με το πως ζούσε, που ζούσε, ποιες μεθόδους χρησιμοποίησε, γιατί τις χρησιμοποίησε, δηλαδή αξιοποίηση βιογραφικών ή αυτοβιογραφικών πληροφοριών...Θα έδινα εγώ κάποιο υλικό και θα έβαζα και τα παιδιά να ψάξουν και να κάνουν μετά μια εργασία πάνω σε αυτό κάνοντας τα δικά τους σχόλια...» E2

«Μια πρώτη σκέψη είναι ότι θα μπορούσε να δουλευτεί με βιογραφικό υλικό, με τους μαθητές να αναζητούν στοιχεία για τη ζωή, τον τρόπο εργασίας, τις υποθέσεις που έκαναν για να καταλήξουν σε ένα συμπέρασμα...Αυτό βέβαια θα γινόταν συνδυαστικά με υλικό που θα τους έδινα εγώ...» E4

Μια άλλη πρακτική που ανέφεραν τρεις εκπαιδευτικοί (E1,E3,E4) είναι η χρήση ιστορικών πρωτογενών πηγών και υλικών. Οι εκπαιδευτικοί επίσης συμπληρώνουν ότι θα μπορούσε να συνδυαστεί με κάποια επίσκεψη σε μουσείο ή χώρο όπου υπάρχουν εκθέματα ενώ μια εκπαιδευτικός (E1) τονίζει ότι απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση κατάλληλου υλικού αφού αποτελεί μια δύσκολη πρακτική για μαθητές Δημοτικού:

«Θα σκεφτόμουνα και κάποια εφαρμογή με πρωτογενές υλικό αλλά με προβληματίζει λίγο η ηλικία των παιδιών...Ωστόσο με σωστή επιλογή και επεξεργασία θα μπορούσε να επιτευχθεί...Άκριτα, δεν μπορεί να γίνει αυτό...Θέλει δόμηση και υποστήριξη...» E1

«Μια καλή ιδέα είναι η χρήση πρωτογενών υλικών και η δημιουργία δραστηριοτήτων με ερμηνευτικά σχόλια από τους μαθητές και γιατί όχι και επίσκεψη σε κάποιο χώρο ώστε να έρθουν σε άμεση επαφή με αυτά...» E3

«Θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένα πρότζεκτ που θα περιλάμβανε επισκέψεις σε μουσεία σχετικά με τις επιστήμες, εκλαϊκευμένες ομιλίες από Φυσικούς ή Αρχαιολόγους και δραστηριότητες που σχετίζονται με επεξεργασία ιστορικού υλικού, όπως φωτογραφίες, πρωτότυπα κείμενα, όργανα κλπ.....» E4

Επίσης δυο συμμετέχοντες (E1, E2) αναφέρουν την χρήση διαλόγων μεταξύ επιστημών σε συνδυασμό με τεχνικές θεάτρου:



*«Σίγουρα θα χρησιμοποιούσα τεχνικές θεάτρου, όπως έχω ήδη κάνει και σας περιέγραφα πιο πριν αξιοποιώντας κείμενα του Μπρεχτ και του Ίψεν αλλά θα μπορούσε να γίνει κι με debate μεταξύ επιστημόνων, όπου εκθέτουν διαφορετικές απόψεις για ένα φαινόμενο...» E1*

*«Μπορείς να εφαρμόσεις αυτή την προσέγγιση μέσα από δραματοποίηση ή θεατρικό παιχνίδι...δηλαδή να πάρουν οι μαθητές τον ρόλο ενός επιστήμονα, που να σχετίζεται με την ύλη της τάξης, και να κάνουν χρήση έτοιμων διαλόγων...Έτσι θα έμπαιναν οι μαθητές στην θέση του επιστήμονα...» E2*

Οι εκπαιδευτικοί (E1,E3) επίσης προτείνουν την αναπαραγωγή ιστορικών πειραμάτων με τη μέθοδο και τα μέσα που τα εκτέλεσαν οι επιστήμονες του παρελθόντος:

*«Θα μπορούσε να γίνει αναπαράσταση ενός πειράματος που έκαναν οι επιστήμονες στο παρελθόν...Να μπου οι μαθητές στη θέση του ερευνητή, να μετρήσουν, να συζητήσουμε τη φύση και την αξία της μέτρησης, πιθανές δυσκολίες που υπήρχαν με τα μέσα της εποχής...»E1*

*«Μια καλή εφαρμογή θα ήταν η εκτέλεση ενός σημαντικού πειράματος από το παρελθόν είτε με τα ίδια υλικά, αν είναι εφικτό, είτε με προσομοιώσεις με τη βοήθεια τεχνολογικών μέσων και κατάλληλου λογισμικού...» E3*

Μια εκπαιδευτικός (E4) αναφέρει δυο εφαρμογές ακόμη που αναφέρονται σε χρήση αφήγησης συνδυαστικά με ψηφιακό υλικό καθώς και δημιουργία εννοιολογικών χαρτών σε περιπτώσεις σύγκρισης θεωριών:

*«Κάτι άλλο που μου έρχεται στο μυαλό έχει να κάνει με αφηγηματικές τεχνικές συνοδεία παρουσιάσεων, ψηφιακών κειμένων, βιντεοπροβολών ώστε να σχεδιαστούν δραστηριότητες έπειτα που να αξιοποιούν το ιστορικό υλικό...Επίσης θα μπορούσε να εφαρμοστεί μια εποικοδομητική δράση, στην οποία οι μαθητές σε ομάδες θα κατασκεύαζαν εννοιολογικούς χάρτες συγκρίνοντας τις θεωρίες διαφόρων επιστημόνων για μια έννοια έτσι ώστε να προσδιορίσουν τις ομοιότητες και τις διαφορές που έχουν και να τις κατανοήσουν καλύτερα...»E4*

Επιπροσθέτως η πρόταση μιας εκπαιδευτικού (E3) περιλαμβάνει δραστηριότητες με δημιουργία κινουμένων σχεδίων από τους μαθητές με χρήση ψηφιακών μέσων:

*«Μια πρακτική που κατά τη γνώμη μου θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον για τα παιδιά θα ήταν να φτιάξουν επιστημονικά μοντέλα με μορφή κινουμένων σχεδίων και ακόμη καλύτερα αν μπορούσε να βοηθήσει και ο δάσκαλος της Πληροφορικής να τα κάνουν στον Η/Υ με ελεύθερο λογισμικό, αυτά υπάρχουν...αλλά πρέπει να υπάρχει διάθεση για συνεργασία σε κάτι τέτοιο...» E3*

Τέλος στις προτάσεις εφαρμογής συμπεριλαμβάνεται και η ιδέα της εκπαιδευτικού E4 που σχετίζεται με την ανακατασκευή ιστορικών οργάνων και έχει διατυπωθεί από την ίδια σε προηγούμενη ερώτηση:

«...μια πολύ καλή ιδέα-δράση να δουλέψω με τα παιδιά αφορά την ανακατασκευή ιστορικών οργάνων και την χρήση τους από τους μαθητές...Ωστόσο δυσκολεύομαι πολύ να βρω τα υλικά και γενικά δεν υπήρχε υποστήριξη ούτε από το σχολείο, ούτε από τους γονείς, ούτε από τον διευθυντή, ούτε από αρμόδιους φορείς όταν είχα εκφράσει αυτή την σκέψη, οπότε έμεινε εκεί η ιδέα(στην σκέψη)...Φυσικά και θα ήμουν πολύ θετική να την εφαρμόσω στο μέλλον αρκεί να υπάρχει υποστήριξη και να έχω τουλάχιστον τα μέσα που χρειάζομαι...» E4

Ο τρίτος και τελευταίος άξονας της έρευνας περιλαμβάνει τις αντιλήψεις των συμμετεχόντων για τα εμπόδια ή τις δυσκολίες που αποθαρρύνουν τους ίδιους από την χρήση της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της Φυσικής και αποτυπώνεται στην επόμενη ερώτηση. Επιπλέον τέθηκε από τον ερευνητή και ένα υποερώτημα που έχει ως στόχο να παρουσιαστούν προτάσεις από τους ίδιους τους εκπαιδευτικούς σχετικά με τις ενέργειες που θα οδηγούσαν στην άρση των εμποδίων-δυσκολιών αυτών. Όσον αφορά το πρώτο σκέλος της ερώτησης όλοι οι εκπαιδευτικοί(E1,E2,E3,E4) συμφώνησαν σε δυο σημεία. Αρχικά επισήμαναν την έλλειψη εξοικείωσης των παιδιών με εναλλακτικές δράσεις ιστορικού περιεχομένου στη Φυσική:

«Ένα πρόβλημα που μπορεί και ένας έμπειρος εκπαιδευτικός να αντιμετωπίσει είναι όταν τα παιδιά δεν είναι συνηθισμένα να δουλεύουν με τέτοιου τύπου πρακτικές(χρήση ΙΦΦΕ) ή με εποικοδομητικές και γενικότερα εναλλακτικές προσεγγίσεις...» E1

«Εμπόδια προκύπτουν όταν οι μαθητές αλλά και ο εκπαιδευτικός δεν έχουν ξαναδουλέψει στο παρελθόν και μάλιστα το συγκεκριμένο μάθημα με ιστορικό υλικό το οποίο απαιτεί εναλλακτικές δραστηριότητες, αναζήτηση και διερεύνηση...» E2

«Αρκετές δυσκολίες έχει να διαχειριστεί ο εκπαιδευτικός στην περίπτωση που τα παιδιά δεν έχουν συνηθίσει ή εκπαιδευτεί, να το πω καλύτερα, στον τρόπο εργασίας τέτοιων προσεγγίσεων διδασκαλίας(χρήση ΙΦΦΕ)...» E3

«Το χαμηλό επίπεδο και οι ιδιαιτερότητες- ανομοιογένειες της τάξης συνδυαστικά με την ελλιπή εξοικείωση τους με τέτοιες δράσεις πολλές φορές αποτελούν τροχοπέδη για την εφαρμογή τους...» E4

Κατά δεύτερον όλοι οι συμμετέχοντες ανέφεραν την έλλειψη υποστηρικτικού υλικού από τα σχολικά εγχειρίδια ή τις δομές του σχολείου:

«Ένα θέμα που συχνά αντιμετωπίζουμε εμείς οι εκπαιδευτικοί είναι ότι μπορεί να χρειαστούμε υλικά ή εξοπλισμός και να μην υπάρχει στο σχολείο...οπότε πρέπει να είμαστε προετοιμασμένοι να το καλύψουμε και με δικά μας έξοδα...πιθανότατα βέβαια όχι πάντα...Επίσης μπορεί να ζητήσεις από τα παιδιά να βρουν διάφορα υλικά και να μην τα καταφέρουν...και αυτό

πρέπει να δεις πως θα το διαχειριστείς...Ακόμη τα προγράμματα σπουδών και τα σχολικά εγχειρίδια δεν περιλαμβάνουν τέτοιου τύπου θεματικές(σχετικές με ΙΦΦΕ) και δυστυχώς θα πω εγώ στο ελληνικό εκπαιδευτικό σύστημα βασιζόμαστε πάρα πολύ στα εγχειρίδια...» E1

«Τις περισσότερες φορές δεν έχεις το υλικό για να κάνεις τέτοιες προσεγγίσεις, στο σχολείο δεν υπάρχουν βιβλία που να το παρέχουν στους εκπαιδευτικούς...Μην συζητήσω για τα σχολικά εγχειρίδια τα οποία είναι αναχρονιστικά, στηρίζονται στην αυστηρή ορολογία και έχουν ελλιπές ιστορικό περιεχόμενο...Ευτυχώς το τετράδιο εργασιών της Φυσικής είναι καλό για πειράματα...αλλά δεν είναι αυτό το θέμα εδώ...» E2

«Αρχικά δεν υπάρχει βιβλιοθήκη σε όλα τα σχολεία που να περιέχει βιβλία καλών πρακτικών αλλά ούτε ψηφιακή βιβλιοθήκη με αξιολογημένο υλικό για τέτοιες προσεγγίσεις...Επίσης θεωρώ πως τα δυο σχολικά εγχειρίδια είναι αποκομμένα το ένα από το άλλο...δεν υπάρχει συνοχή...Επίσης το βιβλίο του μαθητή περιέχει κάποια στοιχεία της ΙΦΦΕ αλλά είναι αποσπασματικά, λειτουργούν πολλές φορές ως εισαγωγή σε ένα κείμενο που ακολουθεί αυστηρή ορολογία ενώ άλλες ιστορικές πληροφορίες είναι σε πλαίσια και είναι προαιρετικά...» E3

«Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας είναι η έλλειψη υλικοτεχνικού εξοπλισμού στα σχολεία και γενικά η υποχρηματοδότηση τους ώστε να γίνουν αποτελεσματικά τέτοιες προσεγγίσεις...Να μην πω ότι σε κάποια σχολεία δεν υπάρχουν καν υπολογιστές και προτζέκτορες...Αυτό σημαίνει ότι εκπαιδευτικός πρέπει να προμηθεύεται μόνος του υλικά για να υλοποιήσει εναλλακτικές ιδέες(όπως η χρήση ΙΦΕΕ)...Ακόμη δεν υπάρχει καθοδήγηση από τους αρμόδιους φορείς εκπαιδευτικής πολιτικής αλλά και από το αναλυτικό πρόγραμμα για τέτοιες περιπτώσεις...Αυτό φαίνεται και από τα εγχειρίδια που έχουν ελάχιστες αναφορές σχετικά με την ΙΦΦΕ, οπότε ο εκπαιδευτικός μόνος του επιφορτίζεται με την αναζήτηση, οργάνωση και επιλογή κατάλληλου υλικού για να το χρησιμοποιήσει εποικοδομητικά...» E4

Ένα ακόμη στοιχείο που αναφέρεται από τρεις εκπαιδευτικούς(E1,E3,E4) είναι η έλλειψη γνώσεων από τους ίδιους σχετικά με την Ιστορία της Επιστήμης:

«Επίσης θα πάω σε ένα τομέα που έχει να κάνει με την επαγγελματική ανάπτυξη των εκπαιδευτικών...Εγώ έχω κάνει δράσεις σχετικά με την ΙΦΦΕ στο μάθημα αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι από τον πρώτο καιρό που δούλεψα, το έκανα πράξη...Χρειάζεται εξοικείωση και ενημέρωση με τη λογική των Φυσικών Επιστημών...Οι εκπαιδευτικοί συνήθως δεν έχουν σχετικές γνώσεις(με την ΙΦΦΕ) από το Πανεπιστήμιο και εγώ προσωπικά...Όμως μετά την συνεργασία με τον κ. Π έσαξα, διάβασα ενημερώθηκα και βρήκα πράγματα που μπορούσα να εφαρμόσω...»E1

«Ένας παράγοντας δυσκολίας για μένα τουλάχιστον είναι το επιστημονικό υπόβαθρο πάνω στην Ιστορία των Φυσικών Επιστημών, δηλαδή ναι μεν στο Πανεπιστήμιο έχουμε ως μάθημα

τη Διδακτική Φυσικής αλλά αυτό δεν μας παρέχει και ιστορικές γνώσεις πάνω στον τομέα...Σκεφτείτε εγώ που προέρχομαι και από την Τεχνολογική κατεύθυνση δεν γνωρίζω πολλά πράγματα για την Ιστορία της επιστήμης, οπότε πρέπει να το ψάξω αρκετά για να χρησιμοποιήσω το στοιχείο αυτό στην διδασκαλία...» E3

«Δεν γνωρίζουν όλοι οι εκπαιδευτικοί πληροφορίες σχετικά με τη Ιστορία και Φιλοσοφία της Φυσικής...Εγώ στο βασικό πτυχίο και στο μεταπτυχιακό είχα σχετικό μάθημα αλλά γνωρίζω ότι άλλοι συνάδελφοι δεν το είχαν...και νομίζω είναι άξιο αναφοράς...»E4

Ωστόσο μια από τους παραπάνω εκπαιδευτικούς (E3) προσθέτει και την έλλειψη εμπειρίας από τους εκπαιδευτικούς σχετικά με την οργανωμένη και συστηματική εφαρμογή της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία:

«...Ωστόσο θεωρώ ότι δεν είναι μόνο οι γνώσεις, παίζει ρόλο και η εμπειρία στην σωστή εφαρμογή μια τέτοιας προσέγγισης ώστε να εξυπηρετεί τους στόχους της...Αν για παράδειγμα έχεις τις ιστορικές γνώσεις αλλά δεν έχεις κάνει σχετική πρακτική από το Πανεπιστήμιο ή από κάποιο σεμινάριο ώστε να αποκτήσεις μια άλφα εμπειρία τότε πάλι νομίζω ότι συναντάς εμπόδια στον σχεδιασμό και την εφαρμογή της...» E3

Ένας ακόμη αποθαρρυντικός παράγοντας στην εφαρμογή της ΙΦΦΕ αναφέρεται από τρεις εκπαιδευτικούς(E1,E2,E4) και να κάνει με την απαιτητικότητα της προετοιμασίας καθώς και του αυξημένου χρόνου που αυτή απαιτεί:

«Η αλήθεια είναι ότι, αν δεν έχεις εξοικειωθεί με τέτοιες δράσεις, στην αρχή χρειάζεται περισσότερος χρόνος προετοιμασίας από τους εκπαιδευτικούς και μιλάω από προσωπική πείρα.. Φυσικά θεωρώ ότι ένας δάσκαλος ούτως ή άλλως δεν μπορεί να μπει μέσα στην τάξη έτσι(χωρίς προετοιμασία) πόσο μάλλον όταν πρέπει να σχεδιάσει κάτι πέρα από τα συνηθισμένα ή όταν θέλει να κάνει το μάθημα του με ένα τρόπο ποιοτικότερο...θα έλεγα...»E1

«Για μια τέτοια προσέγγιση και δεδομένου ότι οι εκπαιδευτικοί πρέπει να ψάξουν το υλικό, χρειάζεται πάρα πολύς χρόνος διδακτικός και εξωδιδακτικός, μεγάλη προετοιμασία και τρέχεις να καλύψεις και την ύλη, οπότε δεν είναι εύκολο να το επιχειρήσεις...»E2

«Άλλο εμπόδιο είναι ότι η προσέγγιση αυτή απαιτεί χρόνο και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τις περισσότερες φορές δεν έχεις και υποστήριξη πέφτει όλο το βάρος πάνω σου και αποθαρρύνεσαι...»E4

Δυο εκπαιδευτικοί (E2,E3) αναφέρουν επίσης ως εμπόδιο τον αυξημένο όγκο ύλης και την πίεση για την κάλυψη της:

«Εμπόδια είναι η αυξημένη ύλη σε συνδυασμό με τη δυσνόητη ύλη, όποτε χάνεις πολύ χρόνο σχετικά με την κατανόηση των επιστημονικών όρων από τους μαθητές...Δεν προλαβαίνεις να ασχοληθείς με τέτοιες προσεγγίσεις...και τρέχεις να καλύψεις και την ύλη...» E2

*«Υπάρχει μειωμένος χρόνος γιατί πρέπει να βγάλεις την ύλη, καθώς αυτές είναι οι οδηγίες και τα περιθώρια είναι στενά...» E3*

Στο παραπάνω επιχείρημα προστίθεται και η προσκόλληση των εκπαιδευτικών στην εφαρμογή του αναλυτικού προγράμματος καθώς και οι περιορισμένες πρωτοβουλίες που δίνει το εκπαιδευτικό σύστημα καθώς είναι εξαρτημένο από τα εγχειρίδια στοιχεία που προκύπτουν και από τα λεγόμενα της εκπαιδευτικού E1 προηγουμένως:

*« Ακόμη τα προγράμματα σπουδών και τα σχολικά εγχειρίδια δεν περιλαμβάνουν τέτοιου τύπου θεματικές(σχετικές με ΙΦΦΕ) και δυστυχώς θα πω εγώ στο ελληνικό εκπαιδευτικό σύστημα βασιζόμαστε πάρα πολύ στα εγχειρίδια...» E1*

Τέλος ένα άλλο θέμα που θίγεται από τους εκπαιδευτικούς E1 και E3 σχετικά με τις δυσκολίες εφαρμογής της ΙΦΦΕ είναι η παρεμβατικότητα των γονέων σε θέματα διδασκαλίας:

*« Άλλου τύπου πρόβλημα που μπορεί ένας εκπαιδευτικός να αντιμετωπίσει είναι όταν έρχονται οι γονείς των μαθητών και αντιδρούν σε τέτοιου τύπου προσεγγίσεις οπότε πρέπει να το αιτιολογήσεις σωστά και σε αυτούς προκειμένου να γίνει κατανοητό...»E1*

*«Ένα άλλο θέμα είναι ότι δεν έχεις πάντα την ελευθερία ως εκπαιδευτικός να κάνεις εναλλακτικές προσεγγίσεις διότι μπορεί να μην είναι αρεστό στους γονείς οι οποίοι θα επιμένουν να γίνει παραδοσιακά το μάθημα της Φυσικής...Επίσης θεωρούν πολλές φορές(οι γονείς) ότι αναλώνεσαι σε αντικείμενο που δεν είναι σχετικό με το μάθημα ή ότι χάνει την ουσία του κλπ....Μου έχει τύχει γι' αυτό σας το λέω...Οπότε συνέχεια πρέπει να κάθεται να εξηγείς και πολλές φορές δεν καταλαβαίνουν...» E3*

Στην συνέχεια ακολούθησε το υποερώτημα που αναφέρεται στις προτάσεις των εκπαιδευτικών για την αντιμετώπιση των εμποδίων που δυσχεραίνουν την εφαρμογή της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της φυσικής. Όλοι οι εκπαιδευτικοί (E1,E2,E3,E4) θεώρησαν ότι σημαντικό ρόλο θα διαδραμάτιζε μια ουσιαστική επιμόρφωση πάνω στο συγκεκριμένο θέμα:

*«Νομίζω πως σίγουρα χρειάζεται να γίνει επιμόρφωση ειδικά στους νέους δασκάλους αλλά και σε όσους δεν είναι εξοικειωμένοι με το θέμα(χρήση ΙΦΦΕ) και τις πρακτικές του... Αυτή θα μπορούσε σχεδιαστεί από τους αρμόδιους φορείς του Υπουργείου Παιδείας όπως το ΙΕΠ ή ακόμη καλύτερα από το Πανεπιστήμιο...Με αυτόν τον τρόπο οι εκπαιδευτικοί πιστεύω θα καταλάβουν την αξία της προσέγγισης αλλά και τον τρόπο που θα μπορούν να το αξιοποιήσουν εποικοδομητικά...» E1*

«Ως προς αυτό το κομμάτι σίγουρα θα βοηθούσε μια επιμόρφωση αλλά με την προϋπόθεση να είναι ουσιαστική, δηλαδή να μην είναι αποκλειστικά θεωρητική αλλά να δίνει υλικό και καθοδήγηση για το πως ακριβώς θα πρέπει να εφαρμοστεί στην τάξη καθώς και να δίνει την δυνατότητα στους επιμορφούμενους να κάνουν πρακτική εξάσκηση...»E2

«Θα ήταν χρήσιμο να γίνει ουσιαστική επιμόρφωση στην οποία θα παρέχεται έτοιμο και αξιολογημένο υλικό...»E3

«Ίσως μια ειδική επιμόρφωση με παραδείγματα και κατάλληλο υλικό που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από κάθε εκπαιδευτικό θα ήταν πολύ γόνιμη...»E4

Τρεις εκπαιδευτικοί (E1,E2,E4) προτείνουν την αναδιαμόρφωση του προγράμματος σπουδών και των εγχειριδίων με σκοπό την συμπερίληψη θεματικών σχετικά με την ΙΦΦΕ. Οι συγκεκριμένοι συμμετέχοντες αναφέρουν:

«Η προσέγγιση του μαθήματος μέσω της ΙΦΦΕ δεν περιλαμβάνεται αυτή τη στιγμή στα εγχειρίδια οπότε η πολιτεία θα πρέπει να μεριμνήσει να διαμορφώσει με κατάλληλο τρόπο ως προς αυτή την κατεύθυνση...»E1

«Η Φυσική πρέπει να ξεκινάει από την Ιστορία των Επιστημών και οι πρώτοι μήνες μαθημάτων θα πρέπει να την περιλαμβάνουν και μετά να μπαίνουμε σε αυστηρούς επιστημονικούς όρους...Μην ξεχνάμε ότι είναι παιδιά Δημοτικού και στην πρώτη τους επαφή με το μάθημα πρέπει πρώτα πειστούν για την αξία της και πως αυτή συνδέεται με την Κοινωνία, ώστε να αποκτήσουν θετική άποψη για το μάθημα.. Οπότε σίγουρα θα πρότεινα αναθεώρηση των σχολικών εγχειριδίων...»E2

«Πρέπει να βελτιωθούν τα σχολικά εγχειρίδια της Φυσικής ώστε να περιέχουν οργανωμένο ιστορικό υλικό, το οποίο θα είναι κατάλληλο για να σχεδιαστεί μια τέτοια δράση(χρήση ΙΦΦΕ)...» E4

Ακόμη σε συνέχεια της προηγούμενης πρότασης η εκπαιδευτικός E4 επισημαίνει και την γενικότερη αλλαγή νοοτροπίας αναφορικά με την προσκόλληση στο αναλυτικό πρόγραμμα και την εξάρτηση από τα εγχειρίδια:

«Το ιδανικό θα ήταν μια γενική αλλαγή στη λογική του εκπαιδευτικού συστήματος όσον αφορά την υποχρεωτική κάλυψη της ύλης και την αποκλειστική χρήση των εγχειριδίων, αλλά ξέρω ότι αυτό δεν μπορεί να γίνει εύκολα και γρήγορα...χρειάζεται χρόνος...»E4

Δυο συμμετέχοντες (E1,E4) επίσης, αναφέρουν την ανάγκη χρηματοδότησης των σχολείων για εξοπλισμό και υλικό απαραίτητο για τους εκπαιδευτικούς:

« Θεωρώ πως το Υπουργείο Παιδείας πρέπει να εξοπλίσει το σχολείο με όργανα, βιβλιοθήκες, αναλώσιμο υλικό και να τα εκσυγχρονίζει τακτικά αν θέλουμε να υποστηριχθούν εναλλακτικές δράσεις...»E1

*«Πρέπει κάποια στιγμή να διατεθούν στα σχολεία χρήματα για υλικό και αίθουσες ώστε να ενισχύουν τέτοιες δράσεις, να μην στηρίζονται μόνο στην καλή διάθεση του εκπαιδευτικού...»E4*

Σε αυτή την προσπάθεια οι εκπαιδευτικοί E1 και E3 προσθέτουν ότι απαραίτητη είναι η αρωγή και η προώθηση αιτημάτων σε αρμόδιους φορείς υλικοτεχνικών θεμάτων από τον ίδιο τον διευθυντή του σχολείου:

*«Βέβαια πρέπει να υπάρχει κατανόηση και ενδιαφέρον από τον διευθυντή σε κάποια θέματα που αφορούν υλικά μέσα, ώστε να αναζητηθούν τουλάχιστον πιθανές λύσεις...»E1*

*«Πολλές φορές πρέπει να υπάρχει και η αντίστοιχη κατανόηση και υποστήριξη από τον διευθυντή του σχολείου, ειδικά στην εύρεση υλικών για μια εναλλακτική προσέγγιση...»E3*

Στο τέλος του οδηγού συνέντευξης διατυπώθηκε από τον ερευνητή μια ερώτηση σχετικά με την άποψη των εκπαιδευτικών για το αν η χρήση της ΙΦΦΕ θα ήταν κατάλληλη στην διδασκαλία της έννοιας της βαρύτητας που περιλαμβάνεται στο κεφάλαιο της Μηχανικής στο βιβλίο της Ε΄ Δημοτικού. Επίσης ζητήθηκε από τον ερευνητή να περιγράψουν σύντομα με ποια από τις πρακτικές που είχαν αναφέρει σε προηγούμενη ερώτηση θα την εφαρμόζαν. Από την άλλη σε περίπτωση αρνητικής απάντησης θα ζητούνταν από τους συμμετέχοντες να αναφέρουν ποια άλλη προσέγγιση θα θεωρούσαν καλύτερη αιτιολογώντας την άποψη τους. Η ερώτηση αυτή δεν σχετίζεται με τους ερευνητικούς άξονες της εργασίας αλλά θεωρήθηκε ότι θα παρείχε χρήσιμα συμπεράσματα μιας και συνδέεται με το βιβλιογραφικό τμήμα της εργασίας.

Όλοι οι συμμετέχοντες (E1,E2,E3,E4) απάντησαν θετικά στην χρήση της ιστορικής προσέγγισης στη διδασκαλία της βαρύτητας και δυο εκπαιδευτικοί E3, E4 τόνισαν την καταλληλότητα της λόγω της απαιτητικότητας του κεφαλαίου και δη της συγκεκριμένης έννοιας για μαθητές Δημοτικού. Αυτά προκύπτουν από τις παρακάτω απαντήσεις:

*«Σαφώς και συμφωνώ ότι θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε αυτή την περίπτωση...»E1*

*«Βέβαια...εννοείται ότι προσφέρεται ειδικά για αυτό το κεφάλαιο και το μάθημα...» E2*

*«Ναι, θα την χρησιμοποιούσα η βαρύτητα ίσα ίσα είναι μια αφηρημένη και δύσκολη έννοια για να διδαχθεί παραδοσιακά...Νομίζω ότι μέσω της Ιστορίας αποκτά ενδιαφέρον και μπορείς να τη δουλέψεις με μαθητές Δημοτικού...»E3*

*«Γενικά θεωρώ το κεφάλαιο της Μηχανικής αρκετά προχωρημένο για μαθητές Ε΄ ή ΣΤ΄ Δημοτικού και την εξήγηση των δυνάμεων όπως η βαρύτητα αρκετά δύσκολη...Ωστόσο μέσα από την ΙΦΦΕ θα μπορούσαν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την κλασικές προσεγγίσεις...Άλλο είναι να ζητάμε απομνημόνευση ορισμών με αυστηρή ορολογία και άλλο*

να έρχονται σε επαφή τα παιδιά με τις σκέψεις ή τα πειράματα που οδήγησαν τους επιστήμονες στην ανακάλυψη της...» E4

Στην συνέχεια οι εκπαιδευτικοί έδωσαν σύντομα παραδείγματα πρακτικών εφαρμογής της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της συγκεκριμένη έννοιας, με τους δυο από αυτούς(E1,E2) να αναφέρουν ότι θα αξιοποιούσαν κείμενα με βιογραφικά στοιχεία σχετικά με τον Νεύτωνα:

«Γιατί να μην συζητήσουμε και να αναλύσουμε...μέσα από κατάλληλα επεξεργασμένα ιστορικά κείμενα ή αυτοβιογραφικά την προσπάθεια, τον τρόπο εργασίας και τις παρατηρήσεις του Νεύτωνα ώστε να καταλήξει στην ανακάλυψη της...Μπορείς να το πιάσεις από πολλά σημεία και να βάλεις ενδιαφέρουσες δραστηριότητες...Αυτή η ιδέα μου έρχεται αυτή τη στιγμή...»E1  
«Θα μπορούσε να αξιοποιηθεί η βιογραφία του Νεύτωνα και η ιστορία με το μήλο και μέσα από συνοδευτικά κείμενα να αντιπαρατεθεί το ιστορικό πλαίσιο της εποχής σχετικά με το πώς εξηγούσαν τη βαρύτητα, τι προκαταλήψεις υπήρχαν λόγω αμάθειας, τι πέρασε και πως οδηγήθηκε ο ίδιος στην επιστημονική εκδοχή της...Νομίζω μια διαθεματική και εποικοδομητική προσέγγιση θα αναδείκνυε και τις προϋπάρχουσες γνώσεις των μαθητών...» E2

Η εκπαιδευτικός E3 υποστήριξε ότι ένα σημαντικό σημείο για την έννοια της βαρύτητας είναι η διάκριση των εννοιών μάζας-βάρους και πρότεινε τη χρήση της ΙΦΦΕ μέσα από διαλόγους και δραματοποίηση των θεωριών του Αριστοτέλη, του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα συγκριτικά:

«Αρχικά σκέφτομαι ότι τα παιδιά πρέπει να κατανοήσουν τη διαφορά των εννοιών της μάζας και του βάρους αλλά και το πως η μια επιδρά στην άλλη...Νομίζω θα χρησιμοποιούσα ιστορικό υλικό, θα το μετέτρεπα σε μορφή διαλόγων ώστε να αποτυπώνουν τις διαφορετικές ιδέες του Αριστοτέλη, του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα...και γιατί όχι να εξελιχθεί και σε ένα θεατρικό σκετσάκι...» E3

Η τελευταία απάντηση της συνεντευξιζόμενης E4 αναφέρεται σε αναπαράσταση ιστορικών πειραμάτων με τη βοήθεια και ψηφιακών μέσων σχετικά με τις ιδέες του Αριστοτέλη και του Γαλιλαίου και της επιρροής τους στη θεωρία του Νεύτωνα. Επίσης η ίδια αναφέρει ότι απαραίτητα στοιχεία είναι η κατανόηση της διαφοράς μάζας-βάρους και η επίδραση της αντίστασης του αέρα στην ελεύθερη πτώση:

«Κάτι που μου έρχεται αυτή τη στιγμή ως ιδέα είναι η αξιοποίηση πειραμάτων που παραπέμπουν σε ιδέες για την βαρύτητα πριν το έργο του Νεύτωνα εποικοδομητικά όμως...Θα μπορούσα να χρησιμοποιήσω απλά υλικά όπως ένα βιβλίο και ένα φύλλο χαρτί ρίχνοντας τα από το ίδιο ύψος και να ζητήσω από τους μαθητές να σχολιάσουν και να εξηγήσουν τα αποτελέσματα...Συνήθως οι μαθητές έχουν τις ίδιες ιδέες με τον Αριστοτέλη οπότε ένας στόχος θα



*ήταν η διάφορα της μάζας και του βάρους...Επόμενος στόχος πως ο αέρας επηρεάζει το πείραμα και επίδειξη του πειράματος του Γαλιλαίου με ψηφιακό υλικό βέβαια αυτό δεν μπορεί να γίνει στην τάξη...Τέλος να σχολιάσουμε πως επηρέασαν αυτές οι ιδέες τον Νεύτωνα...Αυτές οι ιδέες θα μπορούσαν να δέσουν σε ένα σενάριο διδασκαλίας» E4*

## **5.5 Συμπεράσματα έρευνας-Συζήτηση-Προτάσεις**

Ο γενικότερος σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση των αντιλήψεων των εκπαιδευτικών πρωτοβάθμιας σχετικά με την χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στη διδασκαλία του μαθήματος της Φυσικής. Οι επιμέρους στόχοι της έρευνας αφορούν τις απόψεις των εκπαιδευτικών για την χρήση της, την αναγνώριση των θετικών στοιχείων που παρέχει στους μαθητές, τις πρακτικές εφαρμογής της, αλλά και των εμποδίων που προκύπτουν, καθώς και τις προτάσεις άρσης αυτών προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον. Η έρευνα είναι ποιοτική και διερευνώνται οι απόψεις τεσσάρων δασκάλων πρωτοβάθμιας με πάνω από οκτώ έτη υπηρεσίας συνολικά και με σπουδές μεταπτυχιακού επιπέδου, οι δυο από τις οποίες σχετίζονται με τη διδακτική Φυσικών ή Θετικών Επιστημών. Από τις απαντήσεις των εκπαιδευτικών στις ερωτήσεις του οδηγού ημιδομημένης συνέντευξης και έπειτα από θεματική ανάλυση προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα, που επιβεβαιώνονται από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία προηγήθηκε. Στην συνέχεια βάση αυτών των δεδομένων γίνονται προτάσεις που αφορούν μεταξύ άλλων και θέματα για μελλοντική έρευνα.

Αρχικά οι εκπαιδευτικοί του δείγματος χρησιμοποιούν ποικίλες προσεγγίσεις στη διδασκαλία του μαθήματος καθώς θεωρούν ότι όλες έχουν την χρησιμότητα τους ανάλογα με το περιεχόμενο του εκάστοτε μαθήματος και τις ιδιαιτερότητες των μαθητών της τάξης. Όλοι οι συμμετέχοντες υποστήριξαν ότι χρησιμοποιούν τη διερευνητική μάθηση με εκτέλεση πειραμάτων, το οποίο ήταν και αναμενόμενο, αφού προτείνεται από το αναλυτικό πρόγραμμα Σπουδών (Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, 2011). Επίσης δυο εκπαιδευτικοί ανέφεραν ρητά ότι χρησιμοποιούν εποικοδομητικές προσεγγίσεις με δραστηριότητες που ενισχύουν την εμπλοκή των μαθητών και λαμβάνουν υπόψιν τις ιδέες τους. Μάλιστα, η μια εκπαιδευτικός ανέφερε εξ' αρχής ότι κάνει χρήση της Ιστορίας Φυσικών Επιστημών.

Η συμμετέχουσα αυτή ήταν και η μοναδική του δείγματος που έχει κάνει χρήση της ΙΦΦΕ στο μάθημα μέχρι τότε, αξιοποιώντας δύσκολα κείμενα για την ηλικία των παιδιών όπως έργα του Μπρεχτ και του Ίψεν . Οι δράσεις που πραγματοποίησε σε συνθετικές εργασίες συνδυάστηκαν με τεχνικές θεάτρου, επισκέψεις σε Ιδρύματα και χώρους σχετικούς με

την Επιστήμη, ομιλίες από ειδικούς του χώρου και πραγματοποίηση παραστάσεων στο τέλος της χρονιάς. Οι δράσεις της συγκεκριμένης εκπαιδευτικού αποδεικνύουν ότι η χρήση της ΙΦΦΕ μπορεί και πρέπει να αξιοποιείται διαθεματικά, όπως αναφέρεται από τους (Matthews, Thomas Kuhn's Impact on Science Education: What Lessons Can Be Learned?, 2004) και (Στεφανίδου, 2013). Ακόμη η συμμετέχουσα αναφέρει ότι παρά τις αρχικές της ανησυχίες για την αποτελεσματικότητα των δράσεων, πείστηκε για την αξία τους και θα συνεχίσει να τις εφαρμόζει κάτι που τονίστηκε από τα λεγόμενα της: «...Στην αρχή να σας πω την αλήθεια φοβόμουνα και προβληματιζόμουνα αν αυτή η τεχνική θα δουλέψει και ήμουν αρκετά διστακτική, όμως το προσπάθησα πολύ και τώρα μπορώ να σας πω ότι τα κατάφερα... και μάλιστα με θαυμαστό τρόπο!!! Αν δεν δοκιμάσεις κάτι, δεν μπορείς να ξέρεις πως θα εξελιχθεί...», «Φυσικά και θα την ξαναχρησιμοποιήσω(την ΙΦΦΕ)...έχει γίνει έμφυτο πια γιατί τα παιδιά ανταποκρίνονται σε αυτό και έχουν πολλά οφέλη...»

Από του υπόλοιπους τρεις συμμετέχοντες, μια ακόμη αναφέρει ότι έχει χρησιμοποιήσει ιστορικά στοιχεία στη διδασκαλία, αλλά αποσπασματικά και όχι οργανωμένα σε μια γενικότερη δράση. Δύο εκπαιδευτικοί απάντησαν ότι δεν την έχουν χρησιμοποιήσει καθόλου, όχι γιατί την αγνοούν ως προσέγγιση, αλλά επικαλούμενοι λόγους σχετικούς με τον όγκο της ύλης, τον περιορισμένο χρόνο, τις εξειδικευμένες γνώσεις που απαιτεί καθώς και την έλλειψη υλικών και υποστήριξης από τον διευθυντή, τη σχολική μονάδα και τους γονείς. Αυτοί οι λόγοι έχουν επισημανθεί στη βιβλιογραφία ως εμπόδια από τους (Höttecke & Silva, 2011) και (Stinner, Mcmillan, Metz, Jilek, & Klassen, 2003). Παρόλα αυτά όλοι οι εκπαιδευτικοί εξέφρασαν την επιθυμία τους και την πρόθεση τους να την εφαρμόσουν στο μέλλον.

Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση των απαντήσεων είναι ότι και οι τέσσερις συμμετέχοντες αναγνωρίζουν την αξία και αρκετά από τα οφέλη της χρήσης της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία, όπως προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Ως προς το γνωστικό κομμάτι αναφέρθηκαν από την πλειοψηφία των απαντήσεων η εξοικείωση των μαθητών με τη μεθοδολογία της επιστήμης (Wang & Marsh, Science Instruction with a Humanistic Twist: Teachers' Perception and Practice in Using the History of Science in Their Classrooms, 2002) και η κατανόηση και εμβάθυνση στο περιεχόμενο των Φυσικών Επιστημών (Mccomas, 2011; Seroglou & Koumaras, 2001; Texeira, Greca, & Freire, 2012). Επίσης δυο εκπαιδευτικοί αναφέρονται στην ανάπτυξη της κριτικής σκέψης και των στρατηγικών επίλυσης προβλημάτων, στοιχείο που τονίζεται από τον (Matthews, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2014) στο βιβλίο του. Ένα ακόμη όφε-

λος στον τομέα αυτό, που αναγνωρίστηκε από μια συμμετέχουσα είναι η συμβολή της δράσης στην εννοιολογική αλλαγή των μαθητών. Στην επισκόπηση ερευνών οι (Seroglou & Koumaras, 2001) αλλά και στην εργασία τους οι (Teixeira, Greca, & Freire, 2012) αναφέρουν ότι η χρήση της ΙΦΦΕ δίνει πρόσφορο έδαφος για να σχεδιαστεί μια εποικοδομητική προσέγγιση, που να αξιοποιεί τις εναλλακτικές ιδέες των μαθητών και να τις αναδομεί βάσει της θεωρίας του κονστρουκτισβισμού. Ακόμη επισημαίνουν ότι αυτό συμβαίνει, διότι πολλές προϋπάρχουσες ιδέες των μαθητών ταιριάζουν με αυτές που είχαν οι επιστήμονες στο παρελθόν και βλέποντας την ιστορική εξέλιξη επέρχεται η επιθυμητή γνωσιακή σύγκρουση.

Οι εκπαιδευτικοί του δείγματος της έρευνας αναγνωρίζουν ότι η χρήση της ΙΦΦΕ εξυπηρετεί και στόχους που αφορούν το μεταγνωστικό κομμάτι. Αρχικά όλοι οι συμμετέχοντες συμφώνησαν ότι μέσω της ΙΦΦΕ αναδεικνύεται ο δυναμικός και εξελικτικός χαρακτήρας της Επιστήμης (Seroglou & Koumaras, 2001). Ένα άλλο πλεονέκτημα που ανέφεραν τρεις συνεντευξιζόμενοι είναι ότι μέσω της ΙΦΦΕ διαφαίνεται η σύνδεση των Φυσικών Επιστημών με την Κοινωνία και την καθημερινή ζωή. Η άποψη αυτή ενισχύεται από τους (Teixeira, Greca, & Freire, 2012) καθώς υποστηρίζουν ότι οι μαθητές δεν πρέπει να θεωρούν τις Φυσικές Επιστήμες αποκομμένες από το περιβάλλον και το κοινωνικοπολιτισμικό πλαίσιο και η Ιστορία της Επιστήμης δίνει πολλά παραδείγματα, για να φανεί αυτή η πτυχή. Επίσης ένα ακόμη στοιχείο που εξήχθη από δυο συνεντεύξεις είναι η ανάδειξη του ανθρώπινου χαρακτήρα της Επιστήμης και συνδυάστηκε με δυο ακόμη απαντήσεις, που έμμεσα ανέφεραν, ότι επιτυγχάνεται η κατάρριψη της εξιδανικευμένης εικόνας των επιστημόνων από τους μαθητές. Οι (Roca-Rosell & Schneider, 2010) επιβεβαιώνουν αυτά τα ευρήματα, αφού οι μαθητές ερχόμενοι σε επαφή με τον τρόπο σκέψης και εργασίας των επιστημόνων διαπιστώνουν ότι είναι άνθρωποι που κάνουν λάθη, και μέσα από επίπονες διαδικασίες έφτασαν στις ανακαλύψεις τους, αφιερώνοντας ολόκληρη τη ζωή τους σε αυτό.

Στο μεταγνωστικό τομέα ένα όφελος που προκύπτει από την χρήση της ΙΦΦΕ και αποτελεί σκοπό του αναλυτικού προγράμματος για τις Φ.Ε αναφέρθηκε ρητά από μια εκπαιδευτικό και είναι η επίτευξη του επιστημονικού εγγραμματισμού. Η (Στεφανίδου, 2013) στο διδακτορικό της αλλά και οι (Wang & Cox-Petersen, A Comparison of Elementary, Secondary and Student Teachers' Perceptions and Practices Related to History of Science Instruction, 2002) στην εργασία τους συμφωνούν ότι η ΙΦΦΕ δίνει ευκαιρίες στους μαθητές να αφομοιώσουν στοιχεία όπως η κριτική σκέψη, ο έλεγχος των πληροφοριών, η γόνιμη αμφισβήτηση, η σχέση την Τεχνολογία και να μετατραπούν σε στάση ζωής ως μελλοντικοί πολίτες.

Σχετικά με τον συναισθηματικό τομέα, όλοι οι εκπαιδευτικοί του δείγματος είναι πεπεισμένοι ότι η χρήση της ΙΦΦΕ στο μάθημα της Φυσικής συμβάλει στην καλλιέργεια του ενδιαφέροντος καθώς και της θετικής στάσης εκ μέρους των μαθητών για το ίδιο συνολικά. Το ίδιο συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από τους (Seroglou & Koumaras, 2001) οι οποίοι προσθέτουν ότι η ΙΦΦΕ ενισχύει την φαντασία των μαθητών αλλά και την τάση τους για διερεύνηση. Επίσης και οι τέσσερις συνεντευξιζόμενοι πιστεύουν ότι ένα μεγάλο κέρδος θα είναι η κινητοποίηση και η ενεργός συμμετοχή μαθητών που δεν έχουν καλή επίδοση ή παρουσιάζονται αδιάφοροι σε άλλου τύπου διδασκαλία, κυρίως στην παραδοσιακή. Οι (Roca-Rosell & Schneider, 2010) αναφέρουν ότι είναι σημαντικό οι μαθητές Δημοτικού πριν προχωρήσουν στις επόμενες βαθμίδες, όπου το περιεχόμενο γίνεται πιο αυστηρό εννοιολογικά και μαθηματικά, να έχουν ήδη αποκτήσει θετική εικόνα για το μάθημα της Φυσικής, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη εφαρμογής εναλλακτικών προσεγγίσεων στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση.

Ένα ακόμη όφελος που εντόπισε ένας εκπαιδευτικός της έρευνας σχετίζεται με την απόκτηση από του μαθητές μιας ολοκληρωμένης εικόνας για την Επιστήμη μέσω της ΙΦΦΕ. Η (Elkana, 1970) αλλά και ο (Matthews, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2014) τονίζουν την αξία της ολιστικής προσέγγισης μέσω της ΙΦΦΕ μέσα από την παροχή ποικιλίας πληροφοριών σχετικά με την ζωή και τις συνθήκες εργασίας των επιστημόνων όπως και τις προκαταλήψεις και τα κοινωνικοπολιτικά δεδομένα της εποχής. Αυτό επίσης βοηθάει τους μαθητές να κατανοήσουν τη σχέση της Επιστήμης με άλλους τομείς όπως η Κοινωνιολογία, η Τεχνολογία, το ευρύτερο πολιτισμικό πλαίσιο και η Θρησκεία. Ειδικά η σχέση Θρησκείας- Επιστήμης μέσα από την ΙΦΦΕ έχει μελετηθεί από τον (Smith M. , 2013).

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα έρευνα είναι ότι οι ιδέες των συμμετεχόντων σχετικά με τον δεύτερο ερευνητικό άξονα, δηλαδή τους τρόπους ή πρακτικές εφαρμογής της ΙΦΦΕ στο μάθημα, βρίσκονται στη σωστή κατεύθυνση μιας και συμβαδίζουν με ανάλογες που έχουν μελετηθεί από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα η αξιοποίηση της προσέγγισης μέσα από βιογραφίες ή αυτοβιογραφίες επιστημόνων του παρελθόντος, δραματοποίηση διαλόγων, αναπαραγωγή ιστορικών πειραμάτων και ανακατασκευή ιστορικών οργάνων έχουν προταθεί από τους (Mccomas, 2011), (Seroglou & Koumaras, 2001) και (Teixeira, Greca, & Freire, 2012). Επίσης η χρήση της αφήγησης σε συνδυασμό με ψηφιακό υλικό για σχόλια και εποικοδομητικές συζητήσεις στην τάξη έχει επισημανθεί από τους (Roca-Rosell & Schneider, 2010) και (Solbes & Traver, 2003) ενώ η χρήση πρωτογενών πηγών-υλικών σε συνδυασμό με επισκέψεις σε σχετικούς χώρους, που αναφέρθηκε

από τρεις εκπαιδευτικούς, έχει εφαρμοστεί με υλικό του φυσιοδίφη Ντόναλτ Ντίκι από τις (Kafai & Gilliland-Swetland, 2001) σε μαθητές Δημοτικού με πολύ καλά αποτελέσματα ειδικά στην ανάπτυξη θετικής στάσης για την Επιστήμη και παρά τις δυσκολίες που έχει λόγω της ηλικίας των παιδιών, υποψία που εκφράστηκε και από μια συνεντευξιαζόμενη. Μια άλλη πρόταση μιας συμμετέχουσας της παρούσας έρευνας αναφέρεται σε χρήση κινουμένων σχεδίων σε συνδυασμό με χρήση ψηφιακών μέσων, δράση που έχει επιχειρηθεί από τους (Piliouras, Siakas, & Seroglou, 2011) με θέμα σχετικό με θεωρίες επιστημόνων του παρελθόντος για τη δομή του ηλιακού συστήματος, το οποίο είχε, όπως αναφέρουν οι ερευνητές, εξαιρετικά αποτελέσματα στην εννοιολογική αλλαγή των μαθητών. Τέλος η πρόταση μιας εκπαιδευτικού για δημιουργία εννοιολογικών χαρτών από του μαθητές για τη σύγκριση επιστημονικών θεωριών δεν έχει αντιστοίχιση με πρακτικές που να αναφέρονται από την παρούσα, τουλάχιστον, βιβλιογραφική ανασκόπηση, οπότε απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τον τρίτο ερευνητικό άξονα, δηλαδή τα εμπόδια ή οι δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι εκπαιδευτικοί στην εφαρμογή της ΙΦΦΕ ταξινομούνται κυρίως σε τρεις κατηγορίες. Η μια αφορά τις νοοτροπίες των εκπαιδευτικών και τη γενικότερη λογική του εκπαιδευτικού συστήματος, η δεύτερη τις δεξιότητες και τις γνώσεις των εκπαιδευτικών, ενώ η τρίτη την υλικοτεχνική υποστήριξη που έχουν. Σχετικά με την πρώτη, όλοι οι συνεντευξιαζόμενοι αναφέρουν την έλλειψη εξοικειώσής των μαθητών με τον τρόπο εργασίας της προσέγγισης και γενικά εναλλακτικών δράσεων. Αυτό αντικατοπτρίζει πέρα από την έλλειψη πρωτοβουλιών από τους εκπαιδευτικούς και την λογική ενός συστήματος εξαρτημένου από τις δραστηριότητες των σχολικών εγχειριδίων και την αποκλειστική κάλυψη της ύλης του αναλυτικού προγράμματος. Οι (Höttecke & Silva, 2011) αναφέρονται σε αυτό το εμπόδιο σχετικά με την χρήση της ΙΦΦΕ καθώς τα παιδιά δεν έχουν συνηθίσει να δουλεύουν με πρακτικές που αξιοποιούν ιστορικές πληροφορίες.

Στην ίδια κατηγορία από τις απαντήσεις των εκπαιδευτικών αναφέρονται και άλλα εμπόδια όπως απαιτητικότητα προετοιμασίας από τους εκπαιδευτικούς συνδυαστικά με αυξημένο όγκο ύλης, αυξημένο χρόνο εφαρμογής και πίεση για κάλυψη της ύλης. Αυτά τα εμπόδια επισημαίνονται από τους (Höttecke & Silva, 2011) και (Stinner, Mcmillan, Metz, Jilek, & Klassen, 2003) ενώ ο (Matthews, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2014) τονίζει ως αποτρεπτικό παράγοντα για την εφαρμογή τέτοιων προσεγγίσεων την εμμονή των εκπαιδευτικών στην παραδοσιακή διδασκαλία και την προσκόλληση των εκπαιδευτικών συστημάτων στην πιστή εφαρμογή των αναλυτικών προγραμμάτων.

Όσον αφορά τη δεύτερη κατηγορία, τρεις συμμετέχοντες ανέφεραν ως εμπόδια τις ελλιπείς γνώσεις από τους ίδιους σχετικά με την Ιστορία της Επιστήμης, ενώ παράλληλα δυο εκπαιδευτικοί κάνουν λόγο για έλλειψη εμπειρίας στον τρόπο εφαρμογής της ιστορικής προσέγγισης. Επίσης οι εν λόγω εκπαιδευτικοί τονίζουν ότι δεν είχαν ως υποχρεωτικό μάθημα στο πανεπιστήμιο κάτι σχετικό αλλά υπάρχει και η άποψη πως ακόμη αυτοί που το είχαν, δεν έχουν κάνει πρακτική εφαρμογή του στην τάξη. Εδώ ο ερευνητής συμφωνεί με τις παραπάνω απόψεις και σημειώνει πως έχει παρακολουθήσει σχετικό μάθημα και μόνο σε θεωρητικό επίπεδο στο βασικό του πτυχίο αλλά την περίοδο εκείνη ήταν μάθημα επιλογής. Οι (Guerra-Ramos, 2012) και (Stinner, Mcmillan, Metz, Jilek, & Klassen, 2003) επιβεβαιώνουν τα παραπάνω στοιχεία και αναφέρονται στην ανάγκη βελτίωσης των μεθοδολογικών προσεγγίσεων από τους εκπαιδευτικούς καθώς οι νοοτροπίες διδασκαλίας μεταφέρονται έμμεσα και στα παιδιά.

Σχετικά με την τρίτη κατηγορία όλοι οι εκπαιδευτικοί του δείγματος αναφέρθηκαν σε ελλιπές ιστορικό περιεχόμενο από τα σχολικά εγχειρίδια, στοιχείο που ενισχύεται από τους (Wang & Cox-Petersen, A Comparison of Elementary, Secondary and Student Teachers' Perceptions and Practices Related to History of Science Instruction, 2002), αλλά και σε ελλείψεις υλικών ή εξοπλισμού ακόμη και από εκπαιδευτικούς που έχουν επιχειρήσει ή έχουν την διάθεση να εφαρμόσουν προσεγγίσεις μέσω της ΙΦΦΕ στο μάθημα της Φυσικής. (Höttecke & Silva, 2011) Μάλιστα δυο συμμετέχοντες αναφέρουν ότι πολλές φορές δεν υπάρχει και η κατανόηση από τον διευθυντή του σχολείου, ώστε να τους υποστηρίξει σε τέτοιες δράσεις. Ένα ακόμη εμπόδιο, που δεν περιλαμβάνεται σε αυτή την κατηγορία, αλλά επισημάνθηκε από δυο εκπαιδευτικούς, είναι η παρεμβατικότητα εκ μέρους των γονέων σε θέματα διδασκαλίας και συνήθως σε εναλλακτικές προσεγγίσεις. Αυτό το δεδομένο δεν υποστηρίζεται από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, ωστόσο και ο ερευνητής έχει συναντήσει στη διδακτική του εμπειρία ανάλογες δυσκολίες και κατά την άποψη του δείχνει εν μέρει και την γενικότερη νοοτροπία προσκόλλησης στον παραδοσιακό τρόπο διδασκαλίας. Η συγκεκριμένη αναφορά χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, για να φανεί αν αποτελεί απλώς παράγοντα που αφορά το ελληνικό εκπαιδευτικό σύστημα.

Επιπροσθέτως ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να προτείνουν βελτιωτικές ενέργειες, που θα μπορούσαν να γίνουν, ώστε να ξεπεραστούν κάποια εμπόδια, αν όχι όλα, ως προς την χρήση της ΙΦΦΕ στο μέλλον. Όλες οι απαντήσεις των εκπαιδευτικών αναφέρουν ως βελτιωτικό παράγοντα την ουσιαστική επιμόρφωση επί του θέματος, με δυνατότητες πρακτικής εφαρμογής, ανατροφοδότησης και καθοδήγησης όπως και παροχή αξιολογημένου υλικού από τους επιμορφωτές. Επίσης μια άλλη πρόταση από δυο εκπαιδευτικούς είναι

η αναδιαμόρφωση του αναλυτικού προγράμματος και κατ' επέκταση και των σχολικών εγχειριδίων του Δημοτικού, ώστε να εμπλουτιστεί με ιστορικό περιεχόμενο, το οποίο να μπορεί να αξιοποιηθεί σε εποικοδομητικές δράσεις και να δίνει λιγότερη σημασία στην απομνημόνευση και την αυστηρή ορολογία. Τέλος μια ακόμη πρόταση που έγινε από δυο εκπαιδευτικούς είναι να αυξηθεί η χρηματοδότηση στα σχολεία, ώστε να έχουν κατάλληλο εξοπλισμό και υλικά για τέτοιες δράσεις και να υποστηρίζεται η προσπάθειά τους. Σε αυτή την κατεύθυνση μια συμμετέχουσα αναφέρει ότι το Υπουργείο Παιδείας πρέπει να παρέχει κατάλληλο και αξιολογημένο υλικό, έστω και ψηφιακά, που να υποστηρίζει και να καθοδηγεί τους δασκάλους στις πρακτικές εφαρμογές της ΙΦΦΕ στο μάθημα της Φυσικής.

Τέλος από τις απαντήσεις των συνεντευξιαζόμενων στο τελευταίο ερώτημα που αφορούσε τις απόψεις των εκπαιδευτικών για την καταλληλότητα της χρήσης της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της βαρύτητας στο κεφάλαιο της Μηχανικής αλλά και την αναφορά πρακτικών χρήσης της προέκυψαν ενδιαφέρουσες προτάσεις. Αρχικά όλοι οι ερωτηθέντες εκπαιδευτικοί πιστεύουν ότι λόγω της δυσκολίας και του αφηρημένου χαρακτήρα του συγκεκριμένου μαθήματος, ενδείκνυται η χρήση της ΙΦΦΕ. Δυο προτάσεις που αναφέρθηκαν ξεχωριστά από τους συμμετέχοντες περιλαμβάνουν αξιοποίηση κειμένων από τη βιογραφία του Νεύτωνα που να αντικατοπτρίζουν τον τρόπο σκέψης του, τον τρόπο εργασίας, τις συνθήκες και τις προκαταλήψεις που είχε να αντιμετωπίσει ώστε να φτάσει στην διατύπωση της θεωρίας του. Επίσης οι άλλοι δυο συμμετέχοντες επικεντρώθηκαν περισσότερο στην κατανόηση της διαφοράς μάζας-βάρους αλλά και στη επίδραση της αντίστασης του αέρα σε περιπτώσεις ελεύθερης πτώσης. Έτσι η μια εκπαιδευτικός πρότεινε τη χρήση επεξεργασμένων διαλόγων, που να φανερώνουν τις απόψεις και θεωρίες του Αριστοτέλη, Γαλιλαίου και Νεύτωνα για τη βαρύτητα και στην συνέχεια να συνδυαστούν με παιχνίδι ρόλων- δραματοποίηση από τους μαθητές. Η άλλη εκπαιδευτικός πρότεινε τη δημιουργία σεναρίου με αξιοποίηση των εναλλακτικών ιδεών των μαθητών, στο οποίο θα περιλαμβάνεται πείραμα με ρίψη ενός βιβλίου και ενός φύλλου από χαρτί καθώς και ψηφιακή επίδειξη του πειράματος του Γαλιλαίου με τα κεκλιμένα επίπεδα. Στην συνέχεια θα ακολουθούσαν σχόλιο σχετικά με την επιρροή των ιδεών αυτών στην θεωρία του Νεύτωνα.

Με βάση τα αποτελέσματα και την ανάλυση της παρούσας ποιοτικής έρευνας και των στοιχείων της βιβλιογραφίας θα διατυπωθούν κάποιες γενικότερες προτάσεις που αφορούν το θέμα όπως και κάποιες ακόμη για μελλοντική έρευνα.

Αρχικά προτείνεται η χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στο μάθημα της Φυσικής στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση καθώς έχει πολλαπλά οφέλη που συνδέονται με γνωστικούς, αλλά κυρίως με μεταγνωστικούς και συναισθηματικούς στόχους.

Βιβλιογραφικά, υπάρχει πλήθος ερευνών, που υποστηρίζουν και τονίζουν τα παραπάνω οφέλη, τα περισσότερα από τα οποία αντικατοπτρίζονται στις απόψεις των εκπαιδευτικών της παρούσας έρευνας. Τα πιο σημαντικά από αυτά τα οφέλη είναι η κατανόηση και εμπάθυνση στο περιεχόμενο του μαθήματος, η εξοικείωση με τη μεθοδολογία της Επιστήμης, η επίτευξη της εννοιολογικής αλλαγής των μαθητών, η ανάπτυξη κριτικής σκέψης, η ενίσχυση του ενδιαφέροντος και της συμμετοχής τους στο μάθημα αλλά και γενικότερα η ανάπτυξη θετικής στάσης απέναντι στις Επιστήμες.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση προκειμένου να αξιοποιηθεί σωστά από τους δασκάλους, απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις, προσεκτικά επεξεργασμένο και αξιολογημένο υλικό καθώς και οργανωμένη και συστηματική εφαρμογή μέσα από διαθεματικές πρακτικές. Αυτά τα στοιχεία επιβεβαιώνονται τόσο από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, όσο και από τις αντιλήψεις των συμμετεχόντων στη έρευνα. Έτσι μια δεύτερη πρόταση, που υποστηρίχθηκε από όλους τους συνεντευξιζόμενους, είναι ο σχεδιασμός από τους αρμόδιους φορείς εκπαιδευτικής πολιτικής ή και από το Πανεπιστήμιο μιας ουσιαστικής επιμόρφωσης σχετικά με την εφαρμογή της ΙΦΦΕ, ειδικά για την πρωτοβάθμια εκπαίδευση. Επίσης αναγκαίο αίτημα των εκπαιδευτικών ήταν η παροχή κατάλληλου υλικού και η δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής του στα πλαίσια της επιμόρφωσης.

Ως προς την ίδια κατεύθυνση προτείνεται επίσης η αναμόρφωση των σχολικών εγχειριδίων, ώστε να εμπλουτιστούν με υλικό σχετικά με την ΙΦΦΕ καθώς και η χρηματοδότηση των σχολικών μονάδων σχετικά με υλικά και εξοπλισμό, ώστε να υποστηριχθούν οι ανάλογες δράσεις. Ακόμη προτείνεται η συμμετοχή των εκπαιδευτικών στην διαμόρφωση των αναλυτικών προγραμμάτων στο μέλλον, αφού οι ίδιοι γνωρίζουν καλύτερα μέσα από την καθημερινή διδασκαλία τους τις ανάγκες, τις ελλείψεις αλλά και τις βελτιώσεις που πρέπει να γίνουν με σκοπό την αλλαγή των χαρακτηριστικών του εκπαιδευτικού συστήματος προς το καλύτερο. Οι προτάσεις αυτές έχουν επισημανθεί επανειλημμένα από τη βιβλιογραφία και συμφωνούν με τα ευρήματα της παρούσας έρευνας.

Ακόμη προτείνεται η διεξαγωγή περαιτέρω ποιοτικής έρευνας πάνω στο θέμα της χρήσης της ΙΦΦΕ στην διδασκαλία της Φυσικής στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση, ακόμη και με τον ίδιο σκοπό και ερευνητικούς άξονες, περιλαμβάνοντας όμως μεγαλύτερο δείγμα εκπαιδευτικών, έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα ευρήματα της παρούσης και να φανεί αν είναι αντιπροσωπευτικά. Επίσης θα μπορούσε να σχεδιαστεί μελλοντική έρευνα που θα περιλαμβάνει και τις αντιλήψεις των μαθητών για την ΙΦΦΕ, αφού προηγουμένως έχει εφαρμοστεί στην τάξη ένα σενάριο ή σενάρια διδασκαλίας βασισμένο σε πρακτικές που προτάθηκαν από τους συνεντευξιζόμενους ή τη βιβλιογραφία.



Τέλος μια άλλη ενδιαφέρουσα πρόταση για μελλοντική έρευνα που προκύπτει από τα στοιχεία της έρευνας αφορά διερεύνηση, εφαρμογή και αξιολόγηση πρακτικών για την διδασκαλία του φαινομένου της βαρύτητας σε μαθητές Δημοτικού με χρήση της ΙΦΦΕ. Ιδέες που εκφράστηκαν από τους εκπαιδευτικούς του δείγματος σχετίζονται με χρήση κειμένων από τη βιογραφία του Νεύτωνα, δημιουργία διαλόγων και δραματοποίηση με περιεχόμενο τις θεωρίες του Αριστοτέλη, Γαλιλαίου και Νεύτωνα για τη βαρύτητα καθώς και εκτέλεση ή ψηφιακή επίδειξη πειραμάτων σε σενάριο που στηρίζεται στην εννοιολογική αλλαγή των μαθητών.

### 5.5.1 Περιορισμοί έρευνας

Ένας από τους περιορισμούς της παρούσας έρευνας αφορά την αντιπροσωπευτικότητα της, λόγω του μικρού δείγματος της, με αποτέλεσμα τα εξαγόμενα συμπεράσματα να μην μπορούν να γενικευτούν. Ούτως ή άλλως ο σκοπός της έρευνας ήταν η ανάδειξη των απόψεων και αντιλήψεων των εκπαιδευτικών για το θέμα και η μελέτη τους μέσα από το πρίσμα της υποκειμενικότητας του ερευνητή, οπότε αυτό αποτελεί και ένα ακόμη περιορισμό, όπως εξ' άλλου και σε πολλές ποιοτικές έρευνες. Παρόλα αυτά δεν αμφισβητείται η εγκυρότητα της, δεδομένου ότι τα εξαγόμενα στοιχεία ελέγχθηκαν και επιβεβαιώθηκαν από τους συμμετέχοντες ενώ ακολουθήθηκε πιστά η ορθή ανάλυση τους, όπως ορίζει η βιβλιογραφία (Glesne, 2018). Τέλος στους περιορισμούς της έρευνας συμπεριλαμβάνεται και ο διαθέσιμος χρόνος, αφού αποτελεί μέρος μεταπτυχιακής εργασίας με συγκεκριμένες ημερομηνίες παράδοσης.

## Συμπεράσματα

Από την ανάλυση του βιβλιογραφικού μέρους, που προηγήθηκε, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η θεωρία της βαρύτητας δομήθηκε, μέσα από την Ιστορία Φυσικών Επιστημών, αφενός χάρη στη μελέτη της Αστρονομίας και αφετέρου μέσα από μικρές διαδικασίες ενοποίησης επιμέρους θεωριών, φαινομένων και παρατηρήσεων. Όλα αυτά φυσικά συντελέστηκαν σε ένα πλαίσιο αντιπαραθέσεων, αμφισβητήσεων ακόμη και έντονων διαμαχών, στοιχεία που παρά την αρνητική τους χροιά δείχνουν ότι η ελευθερία του Λόγου και της Σκέψης αποτελούν βασικοί πυλώνες εξέλιξης και προόδου στις Φυσικές Επιστήμες.

Η πρώτη περιγραφή της βαρυτικής αλληλεπίδρασης έγινε στην Αρχαία Ελλάδα από τον Αριστοτέλη, ο οποίος διατύπωσε το προφανές, ότι δηλαδή τα αντικείμενα με μεγαλύτερη μάζα κάνουν λιγότερο χρόνο πτώσης από τα ελαφρύτερα. Η ιδιότητα αυτή ίσχυε μόνο για την Γη, καθώς η αιτιοκρατική της ερμηνεία στηριζόταν στις θρησκευτικές αντιλήψεις της εποχής. Ομοίως το αστρονομικό μοντέλο του Αριστοτέλη μαζί αυτό του Πτολεμαίου ενοποιούσε μεν τους Νόμους των Ουρανού που χαρακτηρίζονται από την ομαλή κυκλική κίνηση, αλλά άφηνε εκτός τη Γη, που επικρατούσε η ηρεμία. Ο Κοπέρνικος, όμως πιστεύοντας στην ιδέα ότι η Γη δεν διαφέρει από τους άλλους πλανήτες αναβίωσε την ιδέα του Αρίσταρχου για ένα ηλιοκεντρικό μοντέλο, ερχόμενος σε ευθεία αντιπαράθεση με παγιωμένες αντιλήψεις που είχαν μείνει άκαμπτες διακόσια χρόνια.

Στην συνέχεια ο Κέπλερ έχοντας την τύχη να έχει διαθέσιμες τις πολύτιμες και ακριβέστατες για την εποχή, παρατηρήσεις του Τύχο Μπράχε, έκανε το παιδικό του όνειρο περί ενοποίησης των νόμων της κίνησης όλων των πλανητών, πραγματικότητα. Η γεωμετρική ενοποίηση των τροχιών με τα Πλατωνικά Στερεά αρχικά, καθώς και η δεύτερη απόπειρα σύνδεσης των ταχυτήτων τους με τις αριθμητικές αναλογίες της Μουσικής του Πυθαγόρα δεν είχαν αποτέλεσμα. Όμως η επιμονή του και οι σημειώσεις του Μπράχε τον οδήγησαν σε μια ενοποιημένη μαθηματική περιγραφή των κινήσεων των πλανητών του Ηλιακού συστήματος μέσα από τρεις Νόμους.

Την εποχή της Αναγέννησης ο Γαλιλαίος κατάφερε να επιβεβαιώσει πειραματικά και μαθηματικά τα επιτεύγματα των προκατόχων του καταρρίπτοντας εντελώς την κοσμοθεωρία του Αριστοτέλη. Επίσης μελέτησε άμεσα το φαινόμενο της βαρύτητας μέσω της ελεύθερης πτώσης, διατυπώνοντας ότι η ταχύτητα ενός σώματος κατά την κίνηση αυτή δεν εξαρτάται από τη μάζα του, αλλά από τον χρόνο της πτώσης του, αναγνωρίζοντας παράλληλα ότι η αντίσταση του αέρα είναι παραπλανητική. Ακόμη πέτυχε μια άλλη ενοποίηση

αυτή της κίνησης και της ηρεμίας μέσα από την Αρχή της Σχετικότητας, αφού οι παρατηρητές δεν αισθάνονται τις επιπτώσεις τους, οπότε δεν τις διακρίνουν.

Την εποχή του Διαφωτισμού διατυπώθηκε και κωδικοποιήθηκε μαθηματικά ο πρώτος Παγκόσμιος Νόμος για την βαρύτητα στην Ιστορία της Επιστήμης από τον Ισαάκ Νεύτωνα, στηριζόμενος, όπως και ο ίδιος έχει πει, στα έργα των «γιγάντων» προκατόχων του, δηλαδή του Κοπέρνικου, του Κέπλερ και του Γαλιλαίου. Ο Νεύτωνα στους τρεις Νόμους της κίνησης επιβεβαίωσε την σχετικότητα της κίνησης και συνάμα ότι η ηρεμία είναι υποπερίπτωση της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης, αλλά ταυτόχρονα υποστήριξε και την απολυτότητα της επιτάχυνσης. Η μεγάλη ενοποίηση που πέτυχε, όμως ο Νεύτωνα ήταν αυτή των Νόμων του Ουρανού και της Γης, μέσα από μια εξ' αποστάσεως Παγκόσμια δύναμη ανάμεσα σε μάζες, που είναι ανάλογη αυτών και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης τους. Σε αυτή την περιγραφή εξηγούνται οι Νόμοι του Κέπλερ, οι γήινες και οι πλανητικές κινήσεις καθώς και το Ηλιοκεντρικό μοντέλο. Δικαίως λοιπόν χαρακτηρίζεται εκείνη η περίοδος ως Επιστημονική Επανάσταση.

Παρά την ευρεία αποδοχή του τιτάνιου έργου του Νεύτωνα, η ιδέα μια δύναμης, που ασκείται χωρίς υλικό μέσο μέσα από το κενό, άργησε να γίνει αποδεκτή. Το 1860 ο Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ αξιοποιώντας την έννοια του πεδίου του Φαραντέι πέτυχε μια άλλη ενοποίηση αυτή των νόμων του ηλεκτρισμού με αυτών του μαγνητισμού, δείχνοντας ότι είναι εφικτή ή μεταφορά ενέργειας μέσω κυμάτων από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο διαμέσου του κενού. Ο Μάξγουελ γρήγορα συνειδητοποίησε ότι αυτά τα κύματα ήταν φως, μετρώντας παράλληλα και την ταχύτητα του. Επιπλέον κατάλαβε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπουν σε όλες τις συχνότητες, με αποτέλεσμα εκτός από το ορατό να υπάρχει και το αόρατο φως. Ωστόσο η υλιστική αντίληψη της εποχής δεν δεχόταν την ιδέα του πεδίου, οπότε επινοήθηκε μια νέα μορφή ύλης στο κενό, ο αιθέρας. Αυτός έπρεπε να έχει περιέργες ιδιότητες, όπως ακαμψία, υψηλή πυκνότητα και ταυτόχρονα μη αλληλεπίδραση με την ύλη, προκειμένου να μείνει ακέραιη η θεωρία του Νεύτωνα και η σταθερότητα του Σύμπαντος.

Αυτό όμως δεν έλυσε όλα τα προβλήματα καθώς η θεωρία του Μάξγουελ παραβίαζε την Αρχή της Σχετικότητας της νευτώνειας μηχανικής. Σε αυτό το σημείο ο Άλμπερτ Αϊνστάιν ήρθε να λύσει τις ασυμφωνίες. Ο Αϊνστάιν χάρη στην ευφυΐα του κατάλαβε ότι ένας στατικός παρατηρητής ερμηνεύει τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα με όρους ηλεκτρισμού, ενώ ένας κινούμενος σε σχέση με τον πρώτο με όρους μαγνητισμού, οπότε και οι δυο συμφωνούν στα ίδια αποτελέσματα. Μέσω της ενοποίησης της Σχετικότητας του Γαλιλαίου με

την θεωρία του Μάξγουελ, διατύπωσε την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, που προϋπέθετε σταθερή ταχύτητα του φωτός ανεξαρτήτως κινήσεων πηγής-παρατηρητών. Οι συνέπειες αυτής της θεωρίας μαζί με την ερμηνεία του πειράματος των Μίκελσον και Μόρλεϊ οδήγησαν σε μια εκ νέου διπλή ενοποίηση, αυτής του χώρου με τον χρόνο και της μάζας με την ενέργεια ενώ παράλληλα κατέρριψαν την ιδέα του αιθέρα.

Αυτή η επιτυχία του Αϊνστάιν ήταν το υπόστρωμα για την επέκταση της βαρυτικής θεωρίας του Νεύτωνα σε μια νέα θεωρία πιο ακριβής και με περισσότερες δυνατότητες και προβλέψεις, τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας. Αυτό συντελέστηκε χάρη στην ενοποίηση δύναμης και κίνησης, με άλλα λόγια η βαρύτητα είναι ισοδύναμη με την επιτάχυνση. Πλέον όλες οι κινήσεις είναι ενοποιημένες αν είναι παρούσα η βαρύτητα και επειδή ακριβώς δεν υπάρχει μέρος στο Σύμπαν που να μην είναι, η λεγόμενη Αρχή της Ισοδυναμίας είναι Παγκόσμια.

Μια συνέπεια της θεωρίας είναι η κάμψη των ακτινών φωτός από βαρυτικά πεδία και επειδή αυτές χρησιμοποιούνται ήδη από την ΕΘΣ για την μελέτη της γεωμετρίας του χωροχρόνου συνδυαστικά με το γεγονός ότι τα βαρυτικά πεδία επηρεάζονται από την ύλη, συντελείται μια τρίτη επαναστατική ενοποίηση: της βαρύτητας με την γεωμετρία του χωροχρόνου. Συν τοις άλλοις, επειδή πλέον το αίτημα των παραλλήλων του Ευκλείδη δεν ικανοποιείται πάντα, οπότε η κίνηση της ύλης αλλάζει δυναμικά και την γεωμετρία του χωροχρόνου. Συνολικά η ΓΘΣ προσέφερε όλα τα στοιχεία εξέλιξης για να αναπτυχθεί η σύγχρονη Αστρονομία και Κοσμολογία. Όλες οι προβλέψεις της: η θεωρία της Αρχής του Σύμπαντος, της Μ. Έκρηξης, τα βαρυτικά κύματα, οι βαρυτικοί φακοί, οι μαύρες τρύπες, το διαστελλόμενο Σύμπαν, έχουν επιβεβαιωθεί σήμερα, παρέχοντας παράλληλα τεχνικές όπως η ερυθρά βαρυτική μετατόπιση για την ανακάλυψη ακόμη περισσότερων στοιχείων, που η Νευτώνεια θεωρία δεν θα μπορούσε να προσφέρει.

Η ιδιοφυΐα του Αϊνστάιν δεν σταμάτησε εκεί, αφού πριν από αυτά είχε συμβάλει στην γέννηση μιας άλλης θεωρίας, που ερμηνεύει τον υποατομικό Κόσμο, της Κβαντικής μηχανικής. Η νευτώνεια φυσική αποδείχθηκε ότι είχε άλλο ένα όριο, αφού δεν ερμήνευε την συγκρότηση των ατόμων, αλλά το κάλυψε η προαναφερθείσα θεωρία. Οι ενοποιήσεις δεν σταμάτησαν αφού έγινε μια προσπάθεια να συνδυαστεί ο ηλεκτρομαγνητισμός με την βαρύτητα σε μια ενοποιημένη θεωρία πεδίου. Αυτή απέτυχε, αλλά τα κατάφερε η κβαντική θεωρία δημιουργώντας την Κβαντική Ηλεκτροδυναμική, η οποία συμπεριέλαβε και την μια από τις πυρηνικές δυνάμεις που ανακαλύφθηκαν στην συνέχεια, την ασθενή. Ακόμη η ι-

σχυρή πυρηνική ερμηνεύτηκε από την κβαντική θεωρία στο πλαίσιο της Κβαντικής χρωμοδυναμικής και η συνολική αυτή επιτυχία οδήγησε στο Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής, το οποίο περιλαμβάνει την βαρύτητα μόνο υποθετικά.

Η κατάσταση όμως των σημειακών ιδιομορφιών που προβλέπει η ΓΘΣ στο εσωτερικό μελανών οπών, όπως και στην αρχή της Μ. Έκρηξης έθεσε την ανάγκη μια θεωρίας κβαντικής βαρύτητας. Η θεωρία αυτή απαιτούσε μια επιπλέον ενοποίηση, της ΓΘΣ και της Κβαντικής θεωρίας, ωστόσο οι διαφορετικές Αρχές των δυο θεωριών σχετικά με την φύση του χωροχρόνου, όσο και με την σχέση παρατηρητή-συστήματος έκαναν το έργο πολύ δύσκολο. Οι κύριες θεωρίες που διατυπώθηκαν, η Θεωρία των Χορδών και η Κβαντική Βαρύτητα Βρόχων, παρά τις προσπάθειες και τις προόδους που σημείωσαν η καθεμιά στο πεδίο της, δεν έδωσαν το αποτέλεσμα μιας ενοποιημένης θεωρίας, αυτόνομα και τουλάχιστον μέχρι στιγμής και βάσει των πειραματικών δυνατοτήτων στην Κλίμακα Πλανκ. Πιθανότατα να χρειάζεται μελλοντικά μια ακόμη ενοποίηση αυτών των δυο.

Εκτός αυτού η επιβεβαίωση της επιταχυνόμενης διαστολής του Σύμπαντος σε συνδυασμό με την ανεξήγητη επιτάχυνση των γαλαξιών στις εξωτερικές περιοχές, είχαν ως αποτέλεσμα τόσο η Νευτώνεια θεωρία, όσο και η ΓΘΣ να θεωρούνται λειτουργικές σε αυτές τις κλίμακες, μόνο εάν υποτεθούν τα μοντέλα της σκοτεινής ενέργειας και ύλης αντίστοιχα. Σε αυτό ίσως να έχει απάντηση η Θεωρία της Υπερσυμμετρίας, που χρησιμοποιεί και η Θεωρία Μ, η οποία με την σειρά της αποτελεί την ενοποίηση, χάρη στους δυϊσμούς και τις βράνες, των διαφορετικών θεωριών των Χορδών. Εναλλακτικά υπήρξε μια πρόταση τροποποιημένης Νευτώνειας βαρύτητας αλλά εμφανίζει προβλήματα εκτός του Γαλαξία. Άλλες επιστημονικές προτάσεις στρέφονται σε καινούργιες κατευθύνσεις όπως αυτή της Ολογραφικής Αρχής, όπου η βαρύτητα αναδύεται από τους Νόμους της Θερμοδυναμικής μέσω της εντροπίας ή μέσω της πιθανής σχέσης της με την ισχυρή δύναμη με τα διπλά γλοιόνια. Άλλη πρόταση περιλαμβάνει τη μελέτη της βαρυτικής συμπεριφοράς της αντύλης, ένας τομέας, που ελάχιστα έχει μελετηθεί πειραματικά.

Όπως και να έχει η Ιστορία θα δείξει ποια από όλες αυτές τις θεωρίες θα λύσουν το πρόβλημα της Κβαντικής βαρύτητας που ταυτόχρονα θα οδηγήσει σε μια Θεωρία των Πάντων. Ίσως υπάρχουν ακόμα πολλά πράγματα ακόμη να διερευνηθούν ή ίσως βρεθεί μια νέα ριζοσπαστική θεωρία, όπως αυτή του Αϊνστάιν ή της Κβαντικής μηχανικής. Αυτό που όμως σίγουρα έχουν μάθει επιστήμονες μέσα από την Ιστορία Φυσικών Επιστημών είναι ο τρόπος που θα επιβεβαιωθεί και δεν είναι άλλος από το πείραμα και την καθολική ισχύ της μέσα από τις προβλέψεις της.

Πέρα από τη βιβλιογραφική διερεύνηση της ιστορικής εξέλιξης της θεωρίας της βαρύτητας διεξήχθη και ποιοτική έρευνα, που αφορά τις αντιλήψεις τεσσάρων εκπαιδευτικών πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης για τα οφέλη, τις πρακτικές, τα εμπόδια και βελτιωτικές ενέργειες σχετικά με τη χρήση της ΙΦΦΕ στη διδασκαλία του μαθήματος της Φυσικής στο Δημοτικό. Η συλλογή των δεδομένων έγινε τηλεφωνικά, μέσα από ερωτήσεις ημιδομημένης συνέντευξης και στην συνέχεια ακολούθησε η θεματική ανάλυση τους. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν στο σύνολο τους, βρίσκονται σε συμφωνία με ευρήματα από άλλες έρευνες και βιβλιογραφικές πηγές.

Σχετικά με τα οφέλη των μαθητών από τη διδασκαλία μέσω της ΙΦΦΕ κατηγοριοποιήθηκαν σε γνωστικά, μεταγνωστικά και συναισθηματικά. Τα σημαντικότερα από αυτά περιλαμβάνουν την καλύτερη κατανόηση και εμβάθυνση στο περιεχόμενο του μαθήματος, την ανάπτυξη κριτικής σκέψης, την εξοικείωση με την μεθοδολογία της Επιστήμης, τον επιστημονικό εγγραμματισμό και την ανάπτυξη θετικής στάσης απέναντι στο μάθημα. Επίσης οι κατάλληλες πρακτικές εφαρμογής της γίνονται μέσα από σενάρια και εποικοδομητικές-διαθεματικές δραστηριότητες αξιοποιώντας βιογραφίες επιστημόνων, πρωτογενείς πηγές, δραματοποιημένους διαλόγους επιστημόνων συνδυαστικά με το θέατρο ή παιχνίδια ρόλων και ψηφιακές αφηγήσεις για συζήτηση μέσα στην τάξη. Ακόμη τα εμπόδια που αποτρέπουν τους εκπαιδευτικούς από την χρήση της ΙΦΦΕ κατηγοριοποιήθηκαν σε αυτά τα οποία σχετίζονται με τη νοοτροπία των δασκάλων και τη λογική του εκπαιδευτικού συστήματος, την κατάρτιση των ίδιων των εκπαιδευτικών και την υλικοτεχνική επάρκεια των σχολείων. Τα σημαντικότερα από αυτά, αφορούν την προσκόλληση στο αναλυτικό πρόγραμμα και στα εγχειρίδια, τον αυξημένο χρόνο προετοιμασίας συνδυαστικά με την πίεση για κάλυψη της ύλης, την ανεπάρκεια γνώσεων για την ΙΦΦΕ από τους εκπαιδευτικούς, τις έλλειψη απαραίτητου υλικού για τέτοιες δράσεις και το περιορισμένο και αποσπασματικό ιστορικό περιεχόμενο από τα σχολικά εγχειρίδια.

Τέλος με βάση τα παραπάνω στοιχεία διατυπώθηκαν προτάσεις, οι σημαντικότερες από τις οποίες αναφέρονται σε ανάγκη ουσιαστικής επιμόρφωσης των εκπαιδευτικών στο θέμα χρήση της ΙΦΦΕ, στην αναδιαμόρφωση των σχολικών εγχειριδίων και του αναλυτικού προγράμματος ως προς αυτή την κατεύθυνση και στην χρηματοδότηση των σχολείων για την υποστήριξη σχετικών δράσεων. Ακόμη γίνονται προτάσεις για επανάληψη της έρευνας με τους ίδιους όρους, αλλά με μεγαλύτερο δείγμα εκπαιδευτικών, για έρευνα των αντιλήψεων των μαθητών έπειτα από εφαρμογή σχετικής διδακτικής πρακτικής και για έρευνα αξιολόγησης πρακτικών σχετικών με την ΙΦΦΕ στη διδασκαλία της βαρύτητας στο Δημοτικό.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- Abd-El-Khalick, F. (2005). Developing deeper understandings of nature of science: The impact of a philosophy of science course on preservice science teachers' views and instructional planning. *international Journal of Science education*, 27(1), σσ. 15-42.
- Aiton, E. (1959). The Cartesian theory of gravity. *Annals of Science*, 15(1), σσ. 27-49.
- Albanay, Y. (2015). Black hole entropy[Παρουσίαση Σεμιναρίου]. University of Leipzig: Institute of Theoretical Physics.
- Al-Khalili, J. (2005). *Quantικά Παράδοξα*. Αθήνα: Τραύλος.
- Anderson, E. (2017). *The problem of Time:Quantum Mechanics versus General Relativity*. Switzerland: Springer.
- Anjum, A., & Mishra, S. (2020). The timeline of Gravity. *arxiv:popular Physics*.
- Arbuzov, A. (2018). Quantum Field Theory and the Electroweak Standard Model. *ArXiv preprint*, 1-35.
- Ashby, N. (2017). *Relativity in Global Satellite Navigation Systems*. Ανάκτηση 5 23, 2022, από <https://www.ill.eu/>.
- Ashtekar, A., & Bianchi, E. (2021). A short review of loop quantum gravity. *Reports on Progress in Physics*, 84, σσ. 1-19.
- Baez, J., & Bunn, E. (2005). The meaning of Einstein's equation. *American journal of Physics*, 73, σσ. 644-652.
- Banks, T., Fischler, W., Shenker, S., & Susskind, L. (1997). M theory as a matrix model:A conjecture. *Physical Review*, 55(8), σσ. 5112-5127.
- Blown, E., & Bryce, T. (2012). Thought experiments about gravity in the history of science and in research into childrens thinking. *Science and Education*, 22(3), σσ. 419-483.
- Boccalletti, D. (2016). *Galileo and the equations of motion*. Switzerland: Springer.
- Bondi, H. (1957). Negative mass in General Relativity. *Reviews of Modern Physics*, 29(3), σσ. 423-428.
- Brasch, F. (1962). The Isaac Newton collection. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*(74), σσ. 366-391.
- Breton, N. (2011). An introduction to General Relativity, Black holes and gravitational waves. *AIP conference proceedings*, 1396(1), σσ. 5-27.

- Britzen, S. (2016). Black Hole observations-Towards the event horizon. Στο P. Nicolini, M. Kaminski, J. Mureika, & M. Bleicher, *1st Karl Schwarzschild Meeting on Gravitational Physics* (Τόμ. 170, σσ. 15-21). Switzerland: Springer Cham.
- Camelia, G. (2010). Doubly-special Relativity:facts, myths and some key open issues. *Symmetry, 2*, σσ. 230-271.
- Capozziello, S., & De Laurentis, M. (2011). Extended Theories of Gravity. *Physics Reports*(509), σσ. 167-321.
- Casper, B. (1977). Galileo and the fall of Aristotle: a case of historical injustice? *American Journal of Physics, 45*(4), σσ. 325-330.
- Cassidy, D., Holton, G., & Rutherford, J. (2005). *Understanding Physics*. Switzerland: Springer.
- Cervantes-Cota, J. L., Galindo-Uribarri, S., & Smoot, G. F. (2016). A Brief History of Gravitational Waves. *Universe, 2*(3), 22.
- Chamani, A., & Ahmadi, F. (2010). The elementary teaching of String Theory. *AIP Conference Proceedings, 1263*(1), σσ. 242-244.
- Ciufolini, I., & Matzner, R. (2010). *General Relativity and John Archibald Wheeler*. New York: Springer.
- Corry, L. (1998). The influence of David Hilbert and Hermann Minkowski on Einstein's views over the interrelation between Physics and Mathematics. *Endeavour, 22*(3), 95-97.
- Ebison, M. G. (1993). Newtonian in mind but Aristotelian at heart. *Science & Education, 2*, 345-362.
- Egdall, M. (2009). Teaching General Relativity to the layperson. *The Physics Teacher, 47*, σσ. 522-527.
- Einstein, A. (2010). *Η Θεωρία της Σχετικότητας*. (Μ. Σταύρος, Μεταφρ.) Αθήνα: Σελίδες.
- Eisenstaedt, J. (2007). From Newton to Einstein:A forgotten relativistic optics of moving bodies. *American Journal of Physics, 75*(8), σσ. 741-746.
- Elkana, Y. (1970). Science, philosophy of science and science teaching. *Educational Philosophy and Theory, 2*(1), σσ. 15-35.
- Encyclopedia Britannica. (2022). *Encyclopedia Britannica*. Ανάκτηση 2 19, 2022, από <https://www.britannica.com>
- Erstein, L. (1990). *Εικόνες της Σχετικότητας:1.Ειδική θεωρία*. Αθήνα: Κάτοπτρο.
- Erstein, L. (1992). *Εικόνες της Σχετικότητας:2.Γενική θεωρία*. Αθήνα: Κάτοπτρο.



- Ernst, F. (2009, Μάϊος 5). Physics of th twentieth century, and beyond. *AIP Conference Proceedings*(1122), σσ. 55-62.
- Ferraro, R. (2007). *Einstein's Space-Time: An introduction to Special and General Relativity*. New York: Springer.
- Ferreira, P., & Starkman, G. (2009). Einstein's theory of Gravity and the problem of missing mass. *Science*, 326, σσ. 812-815.
- Fowler, M. (2003). News: Galileo and Einstein: Using History to teach basic Physics to Nonscientists. *Science & Education*, 12, 229-231.
- Fraser, G. (2003). *Αντιύλη:ο απόλυτος καθρέφτης*. (Γ. Φάνης, Μεταφρ.) Αθήνα: Leader Books.
- Galili, I., Bar, V., & Brosh, Y. (2016). Teaching Weight-Gravity and Gravitation in Middle School. *Science&Education*, 25, σσ. 977-1010.
- Gautreau, R. (2000). Newton's absolute time and space in General Relativity. *American Journal of Physics*, 68, σσ. 350-366.
- Glesne, C. (2018). *Η Ποιοτική Έρευνα:Οδηγός για νέους επιστήμονες*. (Γ. Κουλαουζίδης, Μεταφρ.) Αθήνα: Μεταίχμιο.
- Goehring, D. (1980). Aristotle and the increasing weight of falling bodies. *American Journal of Physics*, 48(1), σ. 82.
- Gould, R. (2016). Why does a ball fall?:A new visualization for Einstein's model of Gravity. *American Journal of Physics*, 84, σσ. 396-402.
- Grego, P., & Mannion, D. (2010). *Galileo and 400 years of telescopical astronomy*. Switzerland: Springer.
- Grøn, Ø. (2009). *Lecture notes on the General Theory of Relativity*. New York: Springer.
- Grøn, Ø. (2016). Celebrating the centenary of the Schwarzschild solutions. *American Journal of Physics*, 84(7), σσ. 537-541.
- Gubser, S. (2020). *Το μικρό βιβλίο της Θεωρίας Χορδών*. (Δ. Πέτρος, Μεταφρ.) Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Guerra-Ramos, M. (2012). Teachers' ideas about the nature of science: A critical analysis of research approaches and their contribution to pedagogical practice. *Science & Education*, 21(5), σσ. 631-655.
- Hajdukovic, D. (2014). Virtual gravitational dipoles:The key for the understanding of the Universe? *Physics of the Dark Universe*, 3, σσ. 34-40.

- Halpern, P. (2019). Albert Einstein,celebrity physicist. *Physics Today*, 72(4), σσ. 38-45.
- Hawking, S. (2000). *Το χρονικό του χρόνου*. Κάτοπτρο.
- Hecht, E. (2019). Kepler and the origins of the theory of gravity. *American Journal of Physics*, 87(3), σσ. 176-185.
- Hewitt, P. (1997). *Οι έννοιες της Φυσικής* (Τόμ. ΙΙ). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Hewitt, P. G. (1997). *Οι έννοιες της Φυσικής* (Τόμ. Ι). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.
- Hlavacek, J. (2013). On the Trail of Monster Black Holes. *American Scientist*, 101(6), 450.
- Höttecke, D., & Silva, C. (2011). Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: An analysis of obstacles. *Science & Education*, 20, σσ. 293-316.
- Houghton , G., & Houghton, R. (2021). Gravity as shown by gluons:the proposed gravity equation. *Intrenational Journal of Physics and Research*, 11(1), σσ. 21-34.
- Huggins, E. (2010). Gravity, Time, and Lagrangians. *The Physics Teacher*, 48, σσ. 512-514.
- Jones, A., & Robbins, D. (2010). *String Theory For Dummies*. Canada: Wiley Publishing,Inc.
- Kafai, Y., & Gilliland-Swetland, A. (2001). The use of historical materials in elementary science classrooms. *Science & Education*, 85(4), σσ. 349-367.
- Kaiser, N. (2016). *The Physics of Gravitational Redshifts*. Ανάκτηση από <https://cosmology.lbl.gov/>.
- Kaku, M. (2022). *Η Θεϊκή εξίσωση:Η αποκάλυψη της Θεωρίας των Πάντων*. (Σ. Πανέλης, Μεταφρ.) Αθήνα: Τραυλός.
- Kalhor, B., & Mehrparvar, F. (2020). Theory of Black Hole Structure. *SSRN Electronic Journal*, 1-9.
- Kalinski, M. (2020). *Gravitational time dilation within the Special Theory of the Relativity*. Ανάκτηση από Research Gate: <https://www.researchgate.net/publication/341286560>
- Kampourakis, K. (2015). Succeeding Michael R. Matthews. *Science & Education*, 24, σσ. 807-811.
- Karaca, K. (2012). Kitcher's Explanatory Unification, Kaluza–Klein Theories, and the Normative Aspect of Higher Dimensional Unification in Physics. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 63(2), 287-312.

- Kersting, M., & Steier, R. (2018). Understanding curved spacetime. *Science&Education*, 27, σσ. 593-622.
- Khamehchi, M., Hossain, K., Mossman, M., Yongping, Z., Busch, T., Forbes, M., & Engels, P. (2017). Negative-Mass Hydrodynamics in a spin-orbit-coupled Bose-Einstein Condensate. *Physical Review Letters*, 118(15), σσ. 155-301.
- Kochhar, R. (2010). Ancient Indian astro-mathematical tradition: evolution and linkages. *AIP conference proceedings*, 1283(1), σσ. 156-160.
- Kokkotas, P., & Rizaki, A. (2011). Does history of science contribute to the construction of knowledge in the constructivist environments of learning? Στο *Adapting historical knowledge production to the classroom* (σσ. 61-84). Brill.
- Kruckemyer, G. (2013). *Optical Experiment Mimics Futuristic System for Space Propulsion*. Ανάρτηση 4 5, 2022, από <https://www.ucf.edu>
- Kubli, F. (2001). Can the theory of narratives help science teachers be better storytellers? *Science Education and Culture*, σσ. 179-183.
- Kuehn, K. (2015). *A student's guide through the great physics texts* (Τόμ. II). New York: Springer.
- Lecian, M. (2008). Modern approaches to generalized theories of gravity [Thesis for Ph.D]. University of Roma Sapienza.
- Lederman, N., Abd-El Khalick, F., Bell, R., & Schwartz, R. (2002). Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), σσ. 497-521.
- Lehavi, Y., & Galili, I. (2009). The status of Galileo's law of free-fall and its implications for physics education. *American Journal of Physics*, 77(5), σσ. 417-423.
- Levi, M. (2020). Effective field theories of post-Newtonian Gravity: a comprehensive review. *Rept. Prog. Phys.*, 83(7), σσ. 1-73.
- Lincoln, D. (2017). How things get heavy: The nature of mass. *The Physics Teacher*, 55, σσ. 401-405.
- Lineweaver, C., & Egan, C. (2010). Dark Energy and the Entropy of the Observable Universe. *AIP Conference Proceedings*, 1241, 645-651.
- Lorenzi, L. (2014). A briefing on the expansion center universe. *International Journal of Astronomy, Astrophysics and Space Science*, 1(1), 1-5.

- MacDougal, D. (2012). *Newton's Gravity: An introductory guide to the mechanics of the Universe*. New York: Springer Science&Business.
- Maldacena, J. (2016). The symmetry and simplicity of the laws of physics and the Higgs boson. *European Journal of Physics*, 37(1), σσ. 1-30.
- Markatos, K. (2009). *Θεωρία Χορδών και αντικειμενικότητα*[Thesis for MSc]. Ανάκτηση από Research Gate.
- Matthews, M. (2004). Thomas Kuhn's Impact on Science Education: What Lessons Can Be Learned? *Science & Education*, 88, σσ. 90-118.
- Matthews, M. (2014). *Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge.
- Mccomas, W. (2011). The history of science and the future of science education: a typology of approaches to history of science in science instruction. Στο *Adapting historical knowledge production to the classroom* (σσ. 37-53). Brill.
- Milsom, J. (2018). *The hunt for Earth Gravity*. Switzerland: Springer.
- Modinos, A. (2014). *From Aristotle to Schrödinger the curiosity of Physics*. Switzerland: Springer.
- Narlikar, J. (1999). *Η ελαφρότητα της βαρύτητας*. Τροχαλία.
- NASA. (χ.χ.). *Hubble Space Telescope*. Ανάκτηση 4 15, 2022, από National Aeronautics and Space Administration: <https://www.nasa.gov/>
- NCERT. (2021). *National Council of Educational Research and Training*. Ανάκτηση Ιανουάριος 12, 2022, από Physical World: [www.ncert.nic.in](http://www.ncert.nic.in)
- Neiland, P., & Hooper, D. (2022, Ιούνιος). Ask Astro: How did the Big Bang start from the size of a pinhead? *Astronomy*.
- Newburgh, R. (2007). Inertial forces, absolute space, and Mach's principle:The genesis of relativity. *American Journal of Physics*, 75, σσ. 427-430.
- Okun, L. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, 42(6), σσ. 31-36.
- Pfister, H., & King, M. (2015). *Inertia and Gravitation*. Switzerland: Springer Cham.
- Pickover, C. (2016). *Το Βιβλίο της Φυσικής*. Αθήνα: Επιστημονικές Εκδόσεις Παρισιανού.
- Piliouras, P., Siakas, S., & Seroglou, F. (2011). Pupils produce their own narratives inspired by the history of science: Animation movies concerning the geocentric–heliocentric debate. *Science & Education*, 20, σσ. 761-795.

- Pound-Rebka experiment.* (χ.χ.). Ανάκτηση 5 21, 2022, από Time Theory: <https://time-theory.info/>
- Randall, L. (2014). *Η ανακάλυψη του σωματιδίου HIGGS: η δύναμη του κενού.* (Η. Κολέτσου, Μεταφρ.) Αθήνα: Εκκρεμές.
- Roca-Rosell, A., & Schneider, H. (2010). The Value of History of Science as a Medium for the Integral and Specific Education of the Individual: Translation of Antoni Quintana-Marí's *Valor de la Historia de la Ciencia como medio de Educación Integral y Específica del Individuo (1935)*. *Science & Education*, 19(9), σσ. 919-923.
- Rothleitner, C., & Schlamming, S. (2017). Measurements of the Newtonian Constant of gravitation, *G*. *Review of Scientific Instruments*, 88(111101), σσ. 1-25.
- Ryle, M. (1955). Radio stars and their cosmological significance. *The Observatory*, 75, σσ. 137-147.
- Salisbury, F. (1996). *Units, symbols and terminology for plant physiology*. New York: Oxford University Press.
- Schwarz, J. (1982). Superstring theory. *Physics Reports*, 89(3), 223-322.
- Semon, M., Malin, S., & Wortel, S. (2009). Exploring the transition from special to general relativity. *American Journal of Physics*, 77(5), σσ. 434-437.
- Seroglou, F., & Koumaras, P. (2001). The contribution of the history of physics in physics education: A review. *Science Education and Culture*, σσ. 327-346.
- Siegel, E. (2022, Οκτώβριος). *How does Hawking radiation lead to black hole evaporation?* Ανάκτηση 11 3, 2022, από Big Think: <https://bigthink.com/>
- Singham, M. (2007). The Copernican myths. *Physics Today*, 60(12), σσ. 48-52.
- Skordoulis, K., & Halkia, K. (2005). Introduction: Notes on the Development of History, Philosophy and Science in Greece. *Science & Education*, 14, σσ. 601-605.
- SLAC National Accelerator Laboratory. (χ.χ.). *Theoretical Physics*. Ανάκτηση 3 20, 2022, από <https://theory.slac.stanford.edu/>
- Smith, D. (2022). *Πως να σκέφτεστε όπως ο Αϊνστάιν*. Αθήνα: Πεδίο.
- Smith, M. (2013). The role of authority in science and religion with implications for science teaching and learning. *Science & Education*, 22, σσ. 605-634.
- Smolin, L. (2002). *Τρεις δρόμοι προς την κβαντική βαρύτητα*. (Π. Παναγιώτα, Μεταφρ.) Αθήνα: Κάτοπτρο.

- Smolin, L. (2008). *Θεωρία χορδών: όλα ή τίποτα;*. (Σ. Κωνσταντίνος, Μεταφρ.) Αθήνα: Τραυλός.
- Solbes, J., & Traver, M. (2003). Against a Negative Image of Science: History of Science and the Teaching of Physics and Chemistry. *Science & Education*, 12, σσ. 703-717.
- Stinner, A., Mcmillan, B., Metz, D., Jilek, J., & Klassen, S. (2003). The renewal of case studies in science education. *Science & Education*, 12, σσ. 617-643.
- Swenson, L. (1970). The Michelson-Morley-Miller Experiments before and after 1905. *Journal for the History of Astronomy*, 1(1), 56-78.
- t Hooft, G. (2001). The Holographic principle: Opening lecture. *Subnucl. Ser.*, 37, 72-100.
- T.Cushing, J. (2003). *Φιλοσοφικές έννοιες στη Φυσική*. Αθήνα: Leader books.
- Texeira, E., Greca, I., & Freire, O. (2012). The history and philosophy of science in physics teaching: A research synthesis of didactic interventions. *Science & Education*, 21, σσ. 771-796.
- Thomson, I. (2002, Ιούλιος-Σεπτέμβριος). Are quantum physics and spirituality related? *The New Philosophy*, 333-355.
- Thorne, K. (2019). *Η Επιστήμη του Interstellar*. (Π. Δρεπανιώτης, Μεταφρ.) Θεσσαλονίκη: Ροπή.
- Tito, E., & Pavlov, V. (2018). Relativistic Motion of Stars near Rotating Black Holes. *Galaxies*, 6(2), 1-25.
- Tong, D. (2009). Lectures on String Theory. *ArXiv*, 1-210.
- Triay, R. (2010). Dark Energy: fiction or reality? *AIP Conference Proceedings*, 1246(1), σσ. 105-113.
- Valtonen, M., Anosova, J., Kholshchevnikov, K., Mylläri, A., & Orlov, V. (2016). *The Three-body Problem from Pythagoras to Hawking*. Switzerland: Springer.
- Varvoglis, H. (2014). *History and evolution of concepts in Physics*. Switzerland: Springer.
- Vecchiato, A. (2017). *Variational approach to Gravity field theories: From Newton to Einstein and beyond*. Switzerland: Springer.
- Vegetti, M. (2000). *Ιστορία της Αρχαίας Φιλοσοφίας*. Αθήνα: Τραύλος.
- Verlinde, E. (2017). Emergent Gravity and the Dark Universe. *SciPost Phys.*, 2(3), σσ. 1-50.
- Vigoureux, J.-M. (2006). *Τα μήλα του Νεύτωνα*. Κέδρος.

- Wang, H., & Cox-Petersen, A. (2002). A Comparison of Elementary, Secondary and Student Teachers' Perceptions and Practices Related to History of Science Instruction. *Science & Education*, 11, σσ. 69-81.
- Wang, H., & Marsh, D. (2002). Science Instruction with a Humanistic Twist: Teachers' Perception and Practice in Using the History of Science in Their Classrooms. *Science & Education*, 11, σσ. 169-189.
- Weinberg, S. (2016). *Πως να εξηγήσουμε τον κόσμο*. Θεσσαλονίκη: Ροπή.
- Weinstein, S., & Rickles, D. (2008). Quantum Gravity. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.  
Ανάκτηση Μάϊος 24, 2022
- White, C. (2018). The double copy: gravity from gluons. *Contemporary Physics*, 59(2), σσ. 109-125.
- Wilczek, F. (2016). Physics in 100 years. *Physics Today*, 69(4), σσ. 32-39.
- Wolchover, N. (2014). Betting on the Future of Quantum Gravity. *Quantamagazine*.
- Αντωνοπούλου, Ε., & Μαστιχιάδης, Α. (2012). *Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*. Ανάκτηση Απρίλιος 10, 2022, από Αστροφυσική Ι: [www.eclass.uoa.gr](http://www.eclass.uoa.gr)
- Βρούλος, Α., & Καρνάβας, Σ. (2021). *Φυσική* (γ' εκδ.). Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- Γραμματικοπούλου, Ε. (2006). *Αλβέρτος Αϊνστάιν(1879-1955): Η θεωρία της Ειδικής και της Γενικής Σχετικότητας(1916)*. Αθήνα: Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών.
- Δανέζης, Μ., & Θεοδοσίου, Σ. (2018). *Έτσι βλέπω τον κόσμο*. Αθήνα: Δίαυλος.
- Δεληβοριάς, Α. (2018). *Ίδρυμα Ευγενίδου*. Ανάκτηση Μάρτιος 20, 2021, από Αναζητώντας την σκοτεινή ύλη: [www.eef.edu.gr](http://www.eef.edu.gr)
- Δεληκαράογλου, Δ. (2010). *Φυσική Γεωδαισία: Θεωρητικές και Τεχνολογικές Βάσεις*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ευαγγελόπουλος, Δ. (2001). *Αντιβαρύτητα*. Αθήνα: Αρχέτυπο.
- Ζδέτσης, Α. (2003). *Εισαγωγή στην Σύγχρονη Φυσική*. Πανεπιστήμιο Πάτρας.
- Ίσαρη, Φ., & Πουρκός, Μ. (2015). *Ποιοτική Μεθοδολογία Έρευνας: Εφαρμογές στην Ψυχολογία και στην Εκπαίδευση*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Καλδούδη, Ε., & Ελευθεριάδης, Χ. (2015). *Η Φυσική της Ζωής*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Καλκάνης, Γ. (2005). *Εκπαιδευτική Φυσική Ι. οι Θεωρίες*. Αθήνα.

- Κόκκοτας , Π. (2022). *Διδακτική των Φυσικών Επιστημών: Σύγχρονες προσεγγίσεις στη διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών* (Τόμ. ΙΙ). Αθήνα: Γρηγόρη.
- Κορδαλής , Π. (2019). *Σύγχρονες κοσμολογικές θεωρίες* [διπλωματική εργασία]. Καλαμάτα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Λάιος, Ε. (2018). *Αστρονομικές παρατηρήσεις και πειράματα που έλεγχουν τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας*[Διπλωματική εργασία]. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο:Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας.
- Λιοδάκης, Σ., Γάκης , Δ., Θεοδωρόπουλος , Δ., Θεοδωρόπουλος , Π., & Κάλλης, Α. (χ.χ.). *Χημεία Γ' λυκείου Θετικών Σπουδών* (Τόμ. Β). Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων Διόφαντος.
- Μαρούδας , Μ. (2015). *Ενοποιημένες Θεωρίες Πεδίου πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής*[Ειδική ερευνητική εργασία]. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Φυσικής.
- Μούστος, Δ. (2014). *Η βαρύτητα ως θερμοδυναμικό φαινόμενο*[Ειδική Μεταπτυχιακή εργασία]. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Φυσικής.
- Μπογδάνος , Χ. (2008). *Βαρύτητα και Κοσμολογία σε πολυδιάστατα μοντέλα μεμβρανών*[Διδακτορική διατριβή]. Ιωάννινα: Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων Τμήμα Φυσικής.
- Νίντος, Α., & Αλυσσανδράκης, Κ. (2015). *Γαλαξιακή και εξωγαλαξιακή Αστροφυσική(με στοιχεία Κοσμολογίας)*. Ιωάννινα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Παιδαγωγικό Ινστιτούτο. (2011). *Πρόγραμμα Σπουδών Φυσικών Επιστημών Δημοτικού για το «Νέο Σχολείο»*. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο. Ανάκτηση από [http://ebooks.edu.gr/info/cps/24aps\\_erebno\\_to\\_fisiko\\_kosmo.pdf](http://ebooks.edu.gr/info/cps/24aps_erebno_to_fisiko_kosmo.pdf)
- Σκαρά, Φ. (2018). *Βαρυτικά κύματα και Κοσμολογία* [Διπλωματική εργασία]. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Σκουμιός , Μ. (2012). *Εφαρμοσμένη Διδακτική των Φυσικών Επιστημών*. Ρόδος: Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Στεφανίδου , Κ. (2013). *Ο ρόλος της Ιστορίας και Φιλοσοφίας των Φυσικών Επιστημών στη Διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών:Διαδικασίες Διδασκαλίας και Μάθησης της Φύσης της Επιστήμης-Νόμοι-Μοντέλα-Θεωρίες-μέσα από την Ιστορία του*



- Ηλεκτρισμού [Διδακτορική διατριβή]. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης.
- Τριανταφυλλόπουλος, Η. (1999). *Η Ιστορία της Φυσικής από τον Αριστοτέλη έως τον Γαλιλαίο*. Ιωάννινα: Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
- Χριστιανίδης, Γ., Διαλέτης, Δ., Παπαδόπουλος, Γ., & Γαβρόγλου, Κ. (2000). *Ελληνική Φιλοσοφία και Επιστήμη: Από την Αρχαιότητα έως τον 20ό αιώνα* (Τόμ. Β). Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Χριστοδουλάκης, Θ., & Κορφιάτης, Ε. (2015). *Θεωρία της Ειδικής Σχετικότητας*. Πάτρα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

# Παράρτημα

Ερωτηματολόγιο οδηγού ημιδομημένης συνέντευξης ποιοτικής έρευνας



Σχολή Επιστημών Υγείας και Πρόνοιας  
Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών  
Σχολή Διοικητικών, Οικονομικών και Κοινωνικών  
Επιστημών  
Τμήμα Αγωγής και Φροντίδας στην Πρώιμη Παιδική  
Ηλικία



Παιδαγωγικό τμήμα



Διδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών  
Σπουδών  
**Παιδαγωγική μέσω Καινοτόμων Τεχνολογιών  
και Βιοϊατρικών Προσεγγίσεων**

**Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία: Διερεύνηση της θεωρίας της βαρύτητας μέσα από την Ιστορία Φυσικών Επιστημών και η εξέλιξη της από την αρχαιότητα έως τη σύγχρονη εποχή.**

Ερωτήσεις ημιδομημένης συνέντευξης εκπαιδευτικών πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης σχετικά με τις αντιλήψεις τους για τη χρήση της Ιστορίας Φυσικών Επιστημών στο μάθημα της Φυσικής.

Φύλο:

- 1.Είστε μόνιμος εκπαιδευτικός ή αναπληρωτής; .....
- 2.Πόσα έτη υπηρεσίας έχετε; .....
- 3.Έχετε σπουδές σχετικές με τις Φυσικές Επιστήμες ή με άλλο πεδίο;.....
- 4.Πόσα έτη έχετε διδάξει στην Ε΄ και ΣΤ΄ Δημοτικού;.....

5. Ποιες παιδαγωγικές προσεγγίσεις χρησιμοποιείτε στην διδασκαλία της Φυσικής και ποια από αυτές είναι η πιο αποτελεσματική κατά τη γνώμη σας;

6. Έχετε κάνει ποτέ χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στο μάθημα της Φυσικής;

A.) Αν ναι μπορείτε να περιγράψετε σύντομα τη δράση/εις αυτή/ες;

B.) Αν όχι δεν το είχατε σκεφτεί ή υπάρχουν άλλοι λόγοι; Μπορείτε να τους αναφέρετε;

Γ.) Πόσο πιθανό είναι να το επιχειρήσετε στο μέλλον;

7. Ποια πιστεύετε ότι είναι τα οφέλη για τους μαθητές από την χρήση της Ιστορίας και Φιλοσοφίας Φυσικών Επιστημών στην διδασκαλία του μαθήματος;

8. Με ποιες διδακτικές πρακτικές θα εφαρμόζατε αυτή την προσέγγιση;

9. Ποια θεωρείτε ότι είναι τα εμπόδια ή και οι δυσκολίες που συναντά ένας εκπαιδευτικός πρωτοβάθμιας στην εφαρμογή αυτής της προσέγγισης;

B.) Ποιοι παράγοντες θα μπορούσαν να οδηγήσουν, κατά τη γνώμη σας, στην αντιμετώπιση τους;

10. Θα θεωρούσατε κατάλληλη, κατά τη γνώμη σας, τη χρήση αυτής της προσέγγισης στη διδασκαλία της βαρύτητας στο κεφάλαιο της Μηχανικής;

A.) Αν ναι, μπορείτε να αναφέρετε ένα παράδειγμα εφαρμογής της;

B.) Αν όχι, ποια προσέγγιση θεωρείτε κατάλληλη γι' αυτό το μάθημα;