



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΚΤΙΝΩΝ  $\gamma$  ΤΥΠΟΥ GEIGER-MULLER»**

**«EXPERIMENTAL CONSTRUCTION AND EVALUATION  
OF A GAMMA RAY RADIATION DETECTOR (GEIGER-  
MULLER)»**

**ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΧΑΤΖΗΠΕΤΡΟΣ**

**48015120**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δαβίδ Ευστράτιος**

**ΑΘΗΝΑ 2021**

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής  
[Χατζηπέτρος Εμμανουήλ]©[2021] – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

**Εξεταστική Επιτροπή Διπλωματικής Εργασίας:**

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΚΤΙΝΩΝ  $\gamma$  ΤΥΠΟΥ GEIGER-MULLER»**

Ευστράτιος Δαβίδ, Επίκουρος Καθηγητής ΠΑΔΑ:

Παναγιώτης Λιαπαρίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑΔΑ:

Ιωάννης Κανδαράκης, Ομότιμος Καθηγητής ΠΑΔΑ:

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο υπογράφων Εμμανουήλ Χατζηπέτρος του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 48015120 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

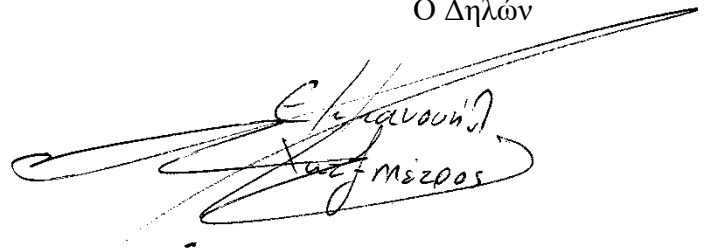
«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό 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».

Ημερομηνία

21/07/2021

Ο Δηλών



Εμμανουήλ  
Χατζηπέτρος

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής Δρ. Δαυίδ Ευστράτιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή της συνεργασίας μας, αλλά και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην Δρ. Καλλέργη Μαρία καθώς η συμβολή της στην ακαδημαϊκή μου πορεία ήταν τεράστια, όπως και στον Δρ. Ιωάννη Βαλαή και Δρ. Παντελεήμων Ασβεστά που με τον δικό τους ξεχωριστό τρόπο και γνώσεις με βοήθησαν τόσο κατά την διάρκεια της φοίτησης μου, όσο και στην διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριζαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει σαν σκοπό το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός ανιχνευτή τύπου Geiger-Muller, καθώς και την αξιολόγηση του με κλειστές ραδιενεργές πηγές (ισότοπα).

Στο Μέρος Α' της εργασίας, το θεωρητικό, πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή στις βασικές αρχές και έννοιές της Ραδιενέργειας, των Ραδιοφαρμάκων καθώς και τα είδη των ανιχνευτών των ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Αναφορά έγινε επίσης και στον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας των ανιχνευτών τύπου Geiger-Muller.

Στο Μέρος Β' αναλύθηκαν τα υλικά και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας, εξηγώντας αναλυτικά όλα τα βήματα και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της πειραματικής διάταξης.

Στο Μέρος Γ' παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις κλειστές ραδιενεργές πηγές και τέλος στο μέρος Δ' γίνεται μια σύνοψη και συζητούνται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές εργασίες καθώς και κάποιες πιθανές εφαρμογές του ανιχνευτή που κατασκευάσαμε και αξιολογήσαμε.

## **ABSTRACT**

The purpose of this Thesis is the design and the construction of a Geiger-Muller type detector, as well as its experimental evaluation with closed radioactive sources (isotopes).

In Part A of the work, the theoretical one, an introduction was made to the basic principles and concepts of Radioactivity, Radiopharmaceuticals as well as the types of ionizing radiation detectors. Reference was also made to the construction and operation of Geiger-Muller type detectors.

In Part B, the materials and methods used to carry out the present work were analyzed, explaining in detail all the steps and components used to complete the experimental setup.

Part C presents the results of the measurements with the closed radioactive sources and finally in part D a summary is made and the conclusions or future works are discussed as well as some possible applications of the detector that we have constructed and evaluated.

## Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΜΕΡΟΣ Α΄.....	10
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ.....	10
1.1 Οι Ατομικές Δομές.....	10
1.2 Η Έννοια της Ακτινοβολίας.....	10
1.3 Ιονισμός και Ιοντίζουσα Ακτινοβολία.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Η ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	12
2.1 Η Ιστορία της Ραδιενέργειας.....	12
2.2 Τα κύρια είδη της Ραδιενέργειας.....	13
2.3 Νόμοι Ραδιενέργειας.....	15
2.4 Αλληλεπιδράσεις Φωτονίων με την Ύλη.....	19
2.5 Βασικά Δοσιμετρικά Μεγέθη.....	20
2.6 Κίνδυνοι από την Ραδιενέργεια.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΙΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	23
3.1 Η Εξέλιξη της Πυρηνικής Ιατρικής.....	23
3.2 Τεχνητή Ραδιενέργεια.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ GEIGER-MULLER.....	25
4.1. Βασική Δομή και Λειτουργία Ανιχνευτών Ιονισμού Αερίου.....	25
4.2 Αλληλεπιδράσεις στο εσωτερικού του Θαλάμου Αερίου.....	26
4.3 Η Λειτουργία των ανιχνευτών τύπου Geiger-Muller.....	27
4.4 Χρονικοί Παράμετροι.....	29
ΜΕΡΟΣ Β΄.....	31
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	32
5.1 Ο Θάλαμος Αερίου.....	32
5.2. Κύκλωμα Voltage Booster (ανύψωσης τάσης).....	34
5.3 Κύκλωμα Ανάγνωσης-Αναστροφής και Ενίσχυσης Παλμών.....	36
5.4 Ο Ενισχυτής Παλμών.....	37
5.5 Επίδειξη και επεξήγηση των παλμών.....	41
5.6 Ο Τετραγωνικός Παλμός.....	43



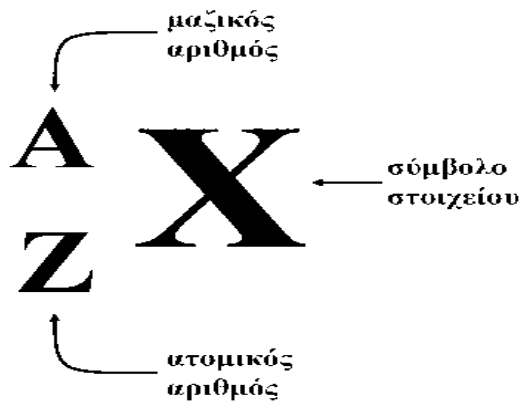
5.7 Χρήση του Arduino Uno για την καταμέτρηση των παλμών .....	44
ΜΕΡΟΣ Γ΄ .....	47
Μετρήσεις και Βαθμονομήσεις .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	47
6.1 Η καταγραφή του Cs-137 .....	47
6.2 Η καταγραφή του Ba-133 .....	49
6.3 Η καταγραφή του Co-60 .....	51
6.4 Μετατροπή και αντιστοίχιση cpm σε δόση .....	53
ΜΕΡΟΣ Δ΄ .....	54
Συμπεράσματα και συζήτηση .....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....	55
7.1 Σύνοψη .....	55
7.2 Μελλοντική εργασία .....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	57

## ΜΕΡΟΣ Α΄ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

#### 1.1 Οι Ατομικές Δομές:

- **Ατομικός Αριθμός(Z):** Κάθε άτομο χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των πρωτονίων του πυρήνα του. Ο ατομικός αριθμός καθορίζει την χημική συμπεριφορά των στοιχείων και πρόκειται για τον συνολικό αριθμό των *πρωτονίων* μέσα σε έναν πυρήνα του ατόμου, συμβολίζεται με το γράμμα **Z**. Σε ένα ουδέτερο ηλεκτρικά άτομο ο αριθμός αυτός είναι ίσος με τον αριθμό των περιφερειακών ηλεκτρονίων.
- **Μαζικός Αριθμός(A):** Αποτελεί το άθροισμα των *πρωτονίων* αλλά και των *νετρονίων* και καθορίζει την μάζα του ατόμου του εκάστοτε στοιχείου.



Εικόνα 1: Συμβολισμός των στοιχείων του περιοδικού πίνακα

- **Ισότοπα:** Χαρακτηρίζονται τα άτομα τα οποία έχουν ίδιο ατομικό *αριθμό Z*, αλλά διαφορετικό *μαζικό αριθμό A*. Ουσιαστικά διαφέρουν μόνο στο πλήθος των νετρονίων τους και είναι άτομα του ίδιου στοιχείου και έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες.
- **Ισότονα:** Χαρακτηρίζονται ως τα άτομα που έχουν ίδιο αριθμό *νετρονίων* και διαφορετικό ατομικό αριθμό **Z**
- **Ισοβαρή:** Χαρακτηρίζονται τα άτομα που έχουν ίδιο *μαζικό αριθμό A*.

#### 1.2 Η Έννοια της Ακτινοβολίας

Η έννοια της ακτινοβολίας σχετίζεται με την “μεταφορά ενέργειας” καθώς και το πως αυτή εκδηλώνεται. Ανάλογα λοιπόν τις αρχικές ή/και τις τελικές συνθήκες της κατηγοριοποιείται σε διάφορες μορφές. Στην επιστήμη της Βιοϊατρικής Μηχανικής αλλά και της σύγχρονης Πυρηνικής Ιατρικής οι κυρίαρχες μορφές ακτινοβολιών που μας ενδιαφέρουν καθώς παρουσιάζουν και πρακτικό ενδιαφέρον είναι δύο.

**Η πρώτη** της μορφή είναι η **Σωματιδιακή Ακτινοβολία**. Σε αυτήν εδώ την περίπτωση η ακτινοβολία είναι ατομικής (ατομικά σωματίδια) ή υποατομικής (υποατομικά σωματίδια) φύσεως (νετρόνια, πρωτόνια, ηλεκτρόνια, κ.α.) που είναι ικανά να μεταφέρουν την ενέργεια της μάζας κατά την διεύθυνση της κίνηση τους.

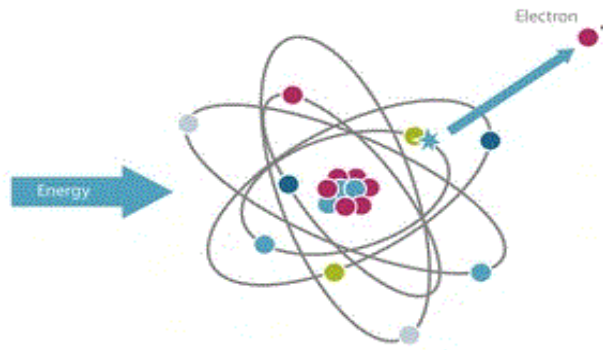
**Στην δεύτερη** της μορφή, συμπεριφέρεται ως την λεγόμενη **Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία** κατά την οποία η ενέργεια μεταφέρεται από την ταλάντωση Μαγνητικών και Ηλεκτρικών πεδίων που ταξιδεύουν στον χώρο υπό την μορφή κύματος με ταχύτητα ίση με αυτή την διάδοσης της ταχύτητας του φωτός. Τα διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με τη συχνότητα ή το μήκος του διαδιδόμενου κύματος. Ιδιαίτερο σημαντικό ρόλο στην Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία διαδραματίζουν οι ιδιότητές τους καθώς καθορίζουν την ενέργεια των φωτονίων που την αποτελούν. Λόγου χάριν εάν η ενέργεια των φωτονίων είναι περίπου της τάξεως μερικών μεV τότε έχουμε ακτινοβολία της μορφής Ραδιοκυμάτων ενώ εάν είναι της τάξεως μερικών keV τότε η ακτινοβολία θα είναι Ακτίνες -X. [6][10]

### 1.3 Ιονισμός και Ιοντίζουσα Ακτινοβολία

Το φαινόμενο κατά το οποίο έχουμε την μετατροπή ενός ατόμου ή ενός μορίου ηλεκτρικά ουδέτερου σε θετικό ή αρνητικό ιόν μέσω της διαδικασίας της πρόσληψης ή της αποβολής ενός ή και περισσότερων ηλεκτρονίων (δημιουργία ιόντων) καλείται ως **Ιονισμός**. Παρατηρείται σε όλες της μορφές της ύλης (στερεά, υγρά, αέρια) και οι κυρίαρχοι μηχανισμοί που μπορεί να γίνει είναι δυο. Συγκεκριμένα μπορεί να προκληθεί από: την σύγκρουση (κρούση) δύο σωματιδίων που έχουν μεγάλη ταχύτητα (ιονισμός κρούσης) αλλά και από την απορρόφηση ενέργειας μιας ακτινοβολίας (ιονισμός "δι' απορροφήσεως ακτινοβολίας").

Πρέπει να αναφερθεί πως το άτομο ή το μόριο και στις δύο περιπτώσεις δέχεται ενέργεια εξωτερική. Επιπλέον σύμφωνα με την θεωρία του Bohr τα ηλεκτρόνια, περιφέρονται σε αυστηρές καθορισμένες τροχιές (στοιβάδες) γύρω από τους πυρήνες των ατόμων τους. Ακριβώς εξ' αιτίας αυτής της κίνησής τους, έχουν συγκεκριμένη ενέργεια σε κάθε τροχιά τους. Ωστόσο αν για κάποιο λόγο, η ενεργειακή κατάσταση ενός τροχιακού ηλεκτρονίου αυξηθεί τότε αυτό:

**Είτε** μπορεί να μεταπηδήσει σε μία εξωτερική στοιβάδα μεγαλύτερης απαιτούμενης ενέργειας (αν φυσικά η αύξηση της ενέργειας είναι ανάλογη) **είτε** να διαφύγει εντελώς από το άτομο, (αν η αύξηση της ενέργειας είναι η απαιτούμενη). Τέλος η ενέργεια που απαιτείται, για να αποδεσμευτεί το ηλεκτρόνιο από το άτομο, ορίζεται ως **Ενέργεια Ιονισμού**.



Εικόνα 2: Αναπαράσταση του ιονισμού ενός ατόμου

- Αν ένα άτομο **αποβάλλει** ηλεκτρόνιο τότε χαρακτηρίζετε ως **θετικό ιόν** και καλείτε **Κατιόν**.
- Αν ένα άτομο **λάβει** ηλεκτρόνιο τότε χαρακτηρίζετε ως **αρνητικό ιόν** και καλείτε **ανιόν**.

## Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες

Σύμφωνα με έναν ορισμό: “είναι οι ακτινοβολίες που μεταφέρουν ενέργεια ικανή να εισχωρήσει στην ύλη, να προκαλέσει ιονισμό των ατόμων, δηλαδή να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό. Ανάλογα λοιπόν αν μπορούν να προκαλέσουν Ιονισμό ή όχι κατηγοριοποιούνται σε Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες ή σε Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες”

Αν λοιπόν η ακτινοβολία έχει ενέργεια ικανή να αφαιρέσει ηλεκτρόνια από ένα άτομο τότε καθίσταται σαν Ιοντίζουσα. Από την άλλη Ακτινοβολίες με χαμηλές ενέργειες καθίστανται αδύνατες να προκαλέσουν ιοντισμό και επομένως αποτελούν άλλες μορφές ακτινοβολίας όπως Ραδιοκύματα, Υπεριώδες Ακτινοβολίες κ.α. Οι γνωστότερες ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι οι ακτίνες X που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική, καθώς και οι ακτινοβολίες α, β, και γ που εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες ατόμων. Οι τελευταίες μορφές ακτινοβολίας καθίστανται και ως Ραδιενεργές (Ακτίνες γ) (βλέπε περισσότερα παρακάτω) [3] [6] [10]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Η ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 2.1 Η Ιστορία της Ραδιενέργειας

Ένα χρόνο μετά την ανακάλυψη των ακτίνων X από τον Willem Rotgen (1895), ο Γάλλος φυσικός Henri Becquerel (1896) παρατήρησε πρώτος πως μια φωτογραφική πλάκα μπορεί να επιστρωθεί και να αφήσει το στίγμα μια εικόνας, αν έχει έρθει σε

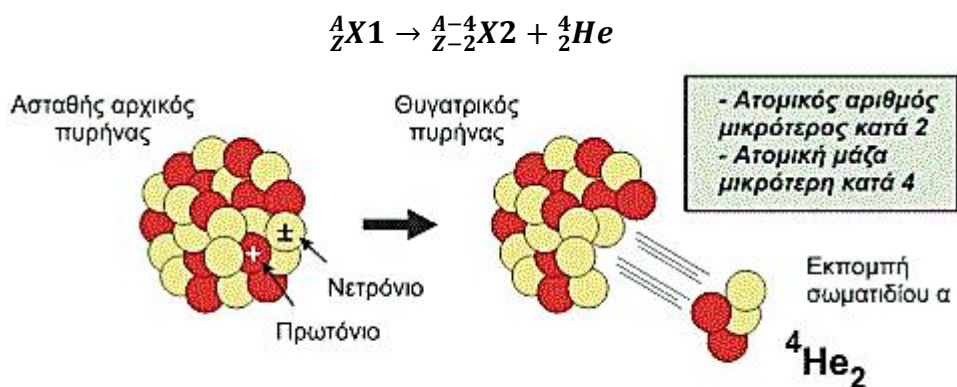
αλληλεπίδραση με άλας ουρανίου. Τελικά, παρατηρήθηκε πως αυτό δεν συμβαίνει τυχαία καθώς εκπέμπει μια μορφή ακτινοβολίας, η οποία συμπεριφέρεται όπως οι ακτίνες X, δηλαδή μπορεί να διαπεράσει αδιαφανή υλικά και εντέλει να προκαλέσει ιονισμό του αέρα. Αυτές, οι άγνωστες μέχρι τότε ακτίνες αρχικά θα ονομαστούν «ακτίνες Μπεκερέλ» και θα αποτελέσουν μια επανάσταση στον χώρο της φυσικής. Δυο χρόνια αργότερα το ζεύγος Pierre Curie και Maria Sklodowska Curie (1898) θα κατάφερνε να απομονώσει ένα νέο χημικό στοιχείο, το Ράδιο (Ra), και μέχρι το τέλος του έτους το ζευγάρι θα κατόρθωνε να ανακαλύψει και άλλα δυο παρόμοια συμπεριφοράς στοιχεία, το Θόριο (Th) και το Πολώνιο (Po). Μετά από έναν χρόνο περίπου, ο Νεοζηλανδός επιστήμονας Ernst Rutherford (1899) μέσω μιας σειράς διαδοχικών πειραμάτων ξεχώρισε δυο μορφές ραδιενέργειας, ωστόσο τα παραπάνω πειράματά, με την χρήση μαγνητικού πεδίου, έδειξαν πως τα σωματίδια έχουν διαφορετική πολικότητα και ότι τελικά υπήρχε και μια τρίτη μορφή ραδιενέργειας. Οι μορφές αυτές της ραδιενέργειας ονομάστηκαν **διάσπαση-α**, **διάσπαση-β** και **ακτίνες-γ**. Το 1933 με την σειρά της το ζεύγος Irene-Frederick Jolliot-Curie θα κατάφερναν να δημιουργήσουν τα πρώτα τεχνητά ραδιενεργά στοιχεία (ισότοπα).

## 2.2 Τα κύρια είδη της Ραδιενέργειας

- **Διάσπαση-α ή Πυρήνες Ηλίου (2p & 2n)**

Η **διάσπαση α** καθίσταται από την αυθόρμητη εκπομπή ενός σωματιδίου α από έναν πυρήνα. Με την βοήθεια πειραματικών διατάξεων προσδιορίστηκαν πως τα σωματίδια α είναι πυρήνες  ${}^4_2\text{He}$ . Συνήθως τέτοιου είδους εκπομπή παρουσιάζονται σε βαρείς πυρήνες ( $A > 200$ ) που είναι ασταθείς. Μετά την εκπομπή ο πυρήνας μεταπίπτει σε μια νέα κατάσταση.

Η διάσπαση-α έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του μαζικού και του ατομικού αριθμού του μητρικού του πυρήνα.



Εικόνα 3: Αναπαράσταση της ραδιενεργής διάσπασης άλφα  
 Πηγή: [www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm](http://www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm)

Όπου

X1= ο μητρικός πυρήνας

X2= ο θυγατρικός πυρήνας

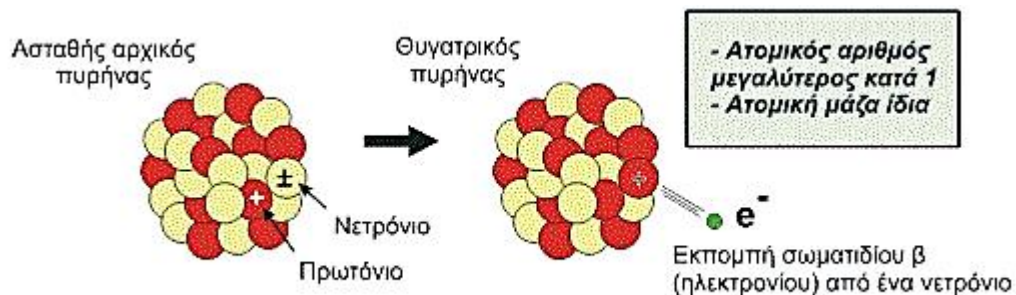
- **Διάσπαση-β**

Κατά την **διάσπαση-β** χαρακτηρίζονται τρεις τύποι πυρηνικών μετασχηματισμών.

- Εκπομπή Σωματίου  $\beta^-$
- Εκπομπή Σωματίου  $\beta^+$
- Ηλεκτρονική Σύλληψη

Οι μετασχηματισμοί δίνονται από τις σχέσεις:

- ${}^A_ZX1 \rightarrow {}^A_{Z+1}X2 + \beta^- + \bar{\nu}$
- ${}^A_ZX1 \rightarrow {}^A_{Z-1}X2 + \beta^+ + \nu$
- ${}^A_ZX1 + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}X2 + \nu$



Εικόνα 4: Αναπαράσταση της ραδιενεργής διάσπασης β  
Πηγή [www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm](http://www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm)

Όπου:

$\bar{\nu}$  = αντινεutrίνο

$\nu$  = νεutrίνο

- Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μετασχηματισμό ενός νετρονίου σε πρωτόνιο στο εσωτερικό του πυρήνα X1, αυτό συμβαίνει καθώς ο θεωρούμενος πυρήνας έχει περισσότερα νετρόνια από το κανονικό.
- Στην δεύτερη περίπτωση ένα πρωτόνιο μετασχηματίζεται σε νετρόνιο. Ο πυρήνας X1 έχει περισσότερα πρωτόνια.

- Στην τρίτη περίπτωση ο πυρήνας X1 συλλαμβάνει ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο του ατόμου (από τη K στιβάδα συνήθως).

Και στις τρεις περιπτώσεις ο μαζικός αριθμός A διατηρείται σταθερός

- **Ακτινοβολία-γ**

Πρόκειται για Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το εσωτερικό του πυρήνα. Οι διασπάσεις α και β αφήνουν συνήθως τον θυγατρικό πυρήνα σε κατάσταση διέγερσης. Αυτός αποδιεγείρεται με αποτέλεσμα να αποβάλει ενέργεια με την μορφή ενός ή περισσοτέρων φωτονίων. Τα φωτόνια αυτά λοιπόν ονομάζονται **ακτίνες-γ** και διαφέρουν από τις ακτίνες-χ μόνο ως προς τον τρόπο παραγωγής τους, μιας και αυτά παράγονται στους πυρήνες των ραδιενεργών ατόμων<sup>[6][13][23]</sup>. Οι τιμές τους καθορίζονται από τις σχέση:

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

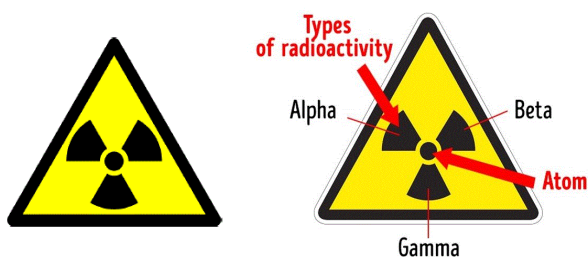
**Όπου:**

$E_1$  = ενέργεια αρχικής διεγερμένης κατάστασης

$E_2$  = Ενέργεια νέας κατάστασης (θεμελιώδη) μετά την αποδιέγερση του πυρήνα

$\nu$  = η συχνότητα του φωτονίου

$h\nu$  = ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου



Εικόνα 5: Σήμανση και επεξήγηση του συμβόλου της Ραδιενέργειας

### 2.3 Νόμος της Ραδιενέργειας

Η Ραδιενέργεια είναι «*το φαινόμενο του αυθόρμητου μετασχηματισμού ενός πυρήνα του ατόμου που είναι ασταθές σε σταθερό, με την αντίστοιχη συνοδεία εκπομπής ακτινοβολίας (φωτόνια ή σωματίδια)*». Ο αρχικός πυρήνας που είναι ασταθής ονομάζεται **μητρικός**, ενώ αυτός που επρόκειτο να προκύψει ονομάζεται **θυγατρικός**. Συνήθως, ο θυγατρικός πυρήνας ανήκει σε άλλο, διαφορετικό χημικό στοιχείο ενώ ο όρος που χρησιμοποιείται για να χαρακτηριστεί αυτή η μεταβολή ορίζεται ως **μεταστοιχείωση**. Υπάρχει βέβαια η πιθανότητα ο θυγατρικός πυρήνας να μην είναι σταθερός (ασταθής), τότε λαμβάνει χώρα ένας νέος μετασχηματισμός με την συνοδεία εκπομπής ενέργειας υπό την μορφή ακτινοβολίας, έτσι ώστε να

προκύπτει ένας σταθερός πυρήνας. Οι ασταθείς πυρήνες είναι επίσης γνωστοί και ως «**ραδιενεργά ισότοπα**» [6].

### ➤ Γενικός Νόμος Ραδιενέργειας

Η ελάττωση ή η εξασθένηση μια ποσότητας ραδιενεργών πυρήνων συνάρτηση του χρόνου δίνεται από την σχέση:

$$dN = -\lambda N dt$$

Όπου:

*Εξίσωση 1*

$N$  = αρχική ποσότητα πυρήνων.

$\lambda$  = σταθερά διάσπασης (σταθερά ραδιενεργού φθοράς).

$dN$  = ποσότητα ραδιενεργών πυρήνων που μετασηματίστηκε σε χρόνο  $t$ .

Αν τώρα ολοκληρώσουμε την παραπάνω σχέση προκύπτει ο γενικός νόμος της Ραδιενέργειας

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

*Εξίσωση 2*

Όπου:

$N_0$  = Αρχική ποσότητα πυρήνων,  $N$  = πυρήνες που παραμένουν

$\lambda$  = πιθανότητα μετασηματισμού (ραδιενεργού διάσπασης) ενός πυρήνα ανά μονάδα χρόνου  $t$ .

### ➤ Ρυθμός Ραδιενεργού Φθοράς ή Ενεργότητα ή Ραδιενέργεια:

**Ενεργότητα** είναι ο αριθμός των ραδιενεργών διασπάσεων  $dN$  που συμβαίνουν σε χρονικό διάστημα  $dt$ .

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

*Εξίσωση 3*

Επίσης ισχύει η εκθετική σχέση:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

*Εξίσωση 4*

**Μονάδες μέτρησης Ενεργότητας/ ραδιενέργειας:**

❖ Το **Μπεκερέλ- Bq** που αντιστοιχεί σε μια διάσπαση ανά δευτερόλεπτο

$$1\text{Bq}=1\text{s}^{-1}$$



❖ Το **Κιουρί-Ci** που αντιστοιχεί με την σχέση :

$$1\text{Ci}=3,7*10^{10s-1}$$

➤ **Χρόνος Υποδιπλασιασμού ή Χρόνος Ημιζωής**

Αφορά το χρόνο που μετά την διέλευση του οποίου, η ποσότητα ραδιενεργών πυρήνων του συγκεκριμένου ισότοπου ελαττώνεται στο μισό γνωστό και σαν μέγεθος **Ημιπερίοδος** ή απλά **Περίοδος**, χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε ραδιενεργό ισότοπο και συνδέεται με την σταθερά  $\lambda$  [1].

Αν από την σχέση εάν θέσουμε όπου  $t=T$  τότε θα έχουμε ότι:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$$

Με λογαρίθμηση προκύπτει ότι:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ όπου } \ln 2 = 0,693$$

ή

$$T = \frac{0,693}{\lambda}$$

Εξίσωση 5

➤ **Ένταση Ακτινοβολίας από σημειακή πηγή**

Η ένταση της επίδρασης μιας σημειακής πηγής **S**, της οποίας η επίδραση είναι ισοδύναμη προς όλες τις κατευθύνσεις για κάθε γνωστή απόσταση **r** θα είναι ίση με το πηλίκο της ισχύος της πηγής **S** προς την προέκταση της νοητής επιφάνειας ακτίνας **r**. Επομένως η σχετική **γωνία  $\omega$**  που σχηματίζουν τα προσπίπτουσα στον ανιχνευτή φωτόνια μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση :

$$\omega = \frac{A}{4\pi r^2}$$

Όπου αν **A** το εμβαδόν της επιφάνειας ενός κυκλικού ανιχνευτή με διάμετρο επιφάνειας **d** και μικρές γωνίες θα ισχύει πως:

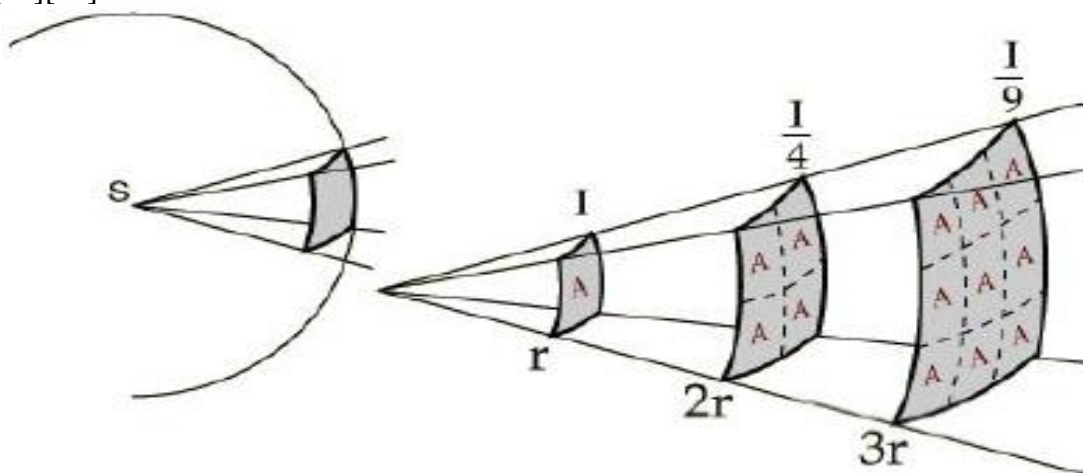
$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Τελικώς από τις δυο παραπάνω σχέσεις και για κυκλική επιφάνεια ανιχνευτή θα έχουμε:

$$\omega = \frac{d^2}{16r^2}$$

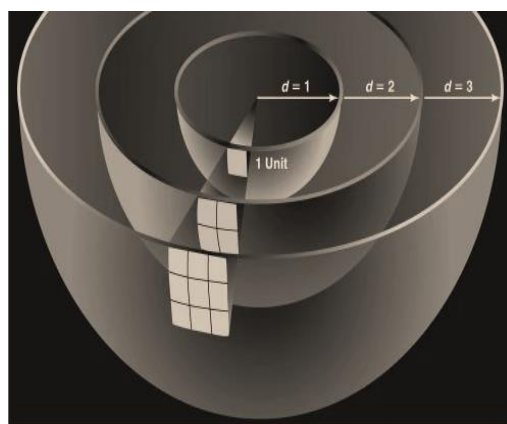
Εξίσωση 6

Στην παρακάτω εικόνα 6, **I** είναι η ένταση της πηγής **S** σε απόσταση **r** όπου αντιστοιχεί σε επιφάνεια **εμβαδού A**. Εύκολα λοιπόν μπορεί κάποιος να παρατηρήσει πως σε διπλάσια απόσταση **2r** το ποσό της ενέργειας «θα επεκταθεί» ή «θα απλωθεί» σε επιφάνειες τέσσερις φορές μεγαλύτερη (**4A**) επομένως και η ένταση της ακτινοβολίας θα υποτετραπλασιαστεί κοκ οπότε βγαίνει το συμπέρασμα πως η Ένταση (**I**) είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. [1][11][23]



Εικόνα 6: Αναπαράσταση του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου

Πηγή: *Ο Νόμος του Αντιστρόφου Τετραγώνου» στο ολοκληρωμένο τεχνολογικά και Μεθοδολογικά Εκπαιδευτικό Εργαστήριο Φυσικών Επιστημών*



Εικόνα 7: Αναπαράσταση του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου για τρεις αποστάσεις d.

Πηγή: Atlantic Fleet Training and Testing Draft EIS/OEIS

## 2.4 Αλληλεπιδράσεις Φωτονίων με την Ύλη

Όπως οι **Ακτίνες X** έτσι και οι **Ακτίνες γ** όταν διέρχονται μέσα από την ύλη αρχίζουν να υφίστανται διάφορες μορφές εξασθένησης. Όταν λοιπόν αναφερόμαστε στον όρο εξασθένηση στην φυσική και στην ακτινολογία αναφερόμαστε στην ελάττωση του αριθμού φωτονίων ή της **έντασης I** της ακτινοβολίας (Ηλεκτρομαγνητικής).

Ο νόμος που υπακούει στον όρο εξασθένηση δεν είναι άλλος από :

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

*Εξίσωση 7*

Όπου:

$I_0$  = Η αρχική ένταση της ακτινοβολίας

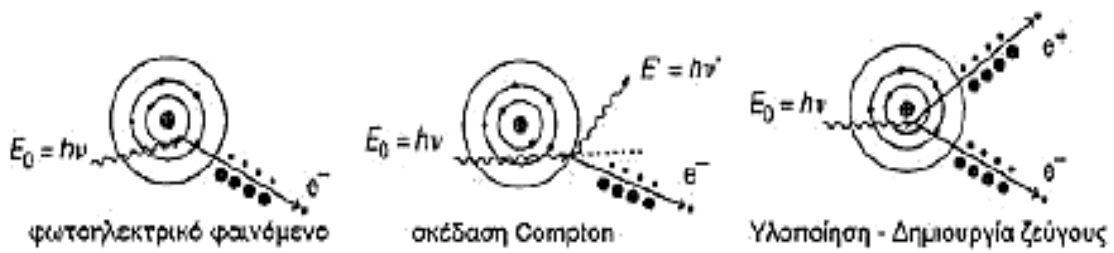
$I$  = Η τελική εξασθενημένη ένταση

$\mu$  = γραμμικός συντελεστής εξασθένησης

$x$  = το μήκος της διαδρομής των φωτονίων μέσα στην ύλη

Εν συνεχεία γίνεται μια αναφορά στα σημαντικότερα φαινόμενα εξασθένησης της ακτινοβολίας με την ύλη.

- **Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (ΦΦ).** Λαμβάνει χώρα όταν ένα φωτόνιο X ή γ αλληλεπιδράσει με κάποιο ηλεκτρόνιο το οποίο είναι ισχυρά συνδεδεμένο σε εσωτερική στοιβάδα ενός ατόμου (K, L κτλ). Εκεί ένα μέρος της ενέργειας του φωτονίου καταναλώνεται προκειμένου να προκαλέσει την απόσπαση του ηλεκτρονίου από το άτομο του, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια του μετατρέπεται σε κινητική η οποία μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο με την μορφή της κινητικής ενέργειας .
- **Ανελαστική Σκέδαση ή Σκέδαση Compton (ΣC).** Αφορά την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο είναι χαλαρά συνδεδεμένο ή ελεύθερο με το άτομο του. Κατά την αρχή της αλληλεπίδρασής τους ένα μέρος την ενέργειας του φωτονίου προσφέρεται στο ηλεκτρόνιο με την μορφή της κινητικής ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας παραμένει στο φωτόνιο, το οποίο με την σειρά του μετά το τέλος αλληλεπίδρασης αλλάζει διεύθυνση διάδοσης. Η αλλαγή αυτή της διεύθυνσης, γίνεται υπό γωνία όπου η γωνία αυτή ονομάζεται **γωνία σκέδασης**.
- **Ελαστική Σκέδαση ή Σκέδαση Rayleigh (ΣR).** Αφορά την σύγκρουση/αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων των ατόμων με τα φωτόνια. Μετά από αυτή τους την αλληλεπίδραση τα φωτόνια αλλάζουν απλά την διεύθυνση διάδοσης τους ενώ η ενέργεια τους διατηρείται σταθερή. Δεν προκαλούν φαινόμενα ιονισμού μιας και δεν μεταφέρεται ενέργεια στα ηλεκτρόνια.



Εικόνα 8: Διαγράμματα των φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ φωτονίων και ύλης

Πηγή: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Εργαστήριο Ατομικής & Πυρηνικής Φυσικής

- **Δίδυμη Γένεσης (ΔΓ).** Ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας ( $E > 1,022 \text{ MeV}$ ) αλληλοεπιδρά με τον πυρήνα ενός ατόμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξαφάνιση του φωτονίου και την εμφάνιση δυο σωματιδίων ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου <sup>[5][6][17][21][7]</sup>.

## 2.5 Βασικά Δοσιμετρικά Μεγέθη

Σύντομα με το πέρασμα του χρόνου και την απόκτηση της απαραίτητης εμπειρίας ανακαλύφθηκε πως οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες καθίστανται απειλητικές και θανάσιμες για τον ανθρώπινο οργανισμό. Σταδιακά λοιπόν άρχισε να γίνεται η οργάνωση της επιστημονικής κοινότητας που είχε σαν σκοπό την προστασία του ανθρώπου από αυτές. Εν συνεχεία λοιπόν παρουσιάζονται τα βασικά Δοσιμετρικά μεγέθη που έχουν φυσική έννοια στην επιστήμη της Ακτινολογίας και της Πυρηνικής Ιατρικής.

### ➤ Έκθεση X (Exposure)

Χαρακτηρίζεται ως το άθροισμα όλων των ηλεκτρικών φορτίων που έχουν παραχθεί σε έναν στοιχειώδη όγκο αέρα. Ουσιαστικά μετρά την ικανότητα της ακτινοβολίας να ιονίζει τον αέρα

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Μονάδες Μέτρησης : **C/Kg** ή **R**

### ➤ Απορροφούμενη Δόση D

$$D = \frac{de}{dm}$$

Όπου  $de$  η μέση ενέργεια που εναποτίθεται από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες προς την ύλη μέσα έναν στοιχειώδη όγκο, καθώς και  $dm$  η μάζα της ύλης που εμπεριέχεται σε αυτό τον χαρακτηριστικό όγκο. Η Απορροφούμενη δόση αφορά ιστό ή όργανο.

Μονάδες Μέτρησης: **Gy** ή **RAD** ή **Joule/Kg**

➤ **KERMA (Kinetic Energy Released per unit MAss)**

Μέτρο έκφρασης της κινητικής ενέργειας που μεταφέρεται από σωματίδια αφόρτιστα ή κύματα (πχ φωτόνια και νετρόνια) προς φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια και πρωτόνια) ανά μάζα του υλικού που ακτινοβολείται.

Μονάδες Μέτρησης: **Joule/Kg**

➤ **Ισοδύναμη Δόση HT**

Η δόση που απορροφάτε σε ιστό ή όργανο (T) σταθμισμένη για το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας R

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$$

Όπου:

$D_{T,R}$  = Απορροφούμενη δόση σε ιστό ή/και όργανο λόγω ακτινοβολίας R

$W_R$  = Συντελεστής Στάθμισης Ακτινοβολίας

Μονάδες Μέτρησης: **Sv ή Joule/Kg**

➤ **Ενεργός Δόση E**

Αποτελεί το άθροισμα όλων των σταθμισμένων ισοδύναμων δόσεων για όλους τους ιστούς και τα όργανα του σώματος από εσωτερική και εξωτερική έκθεση.

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

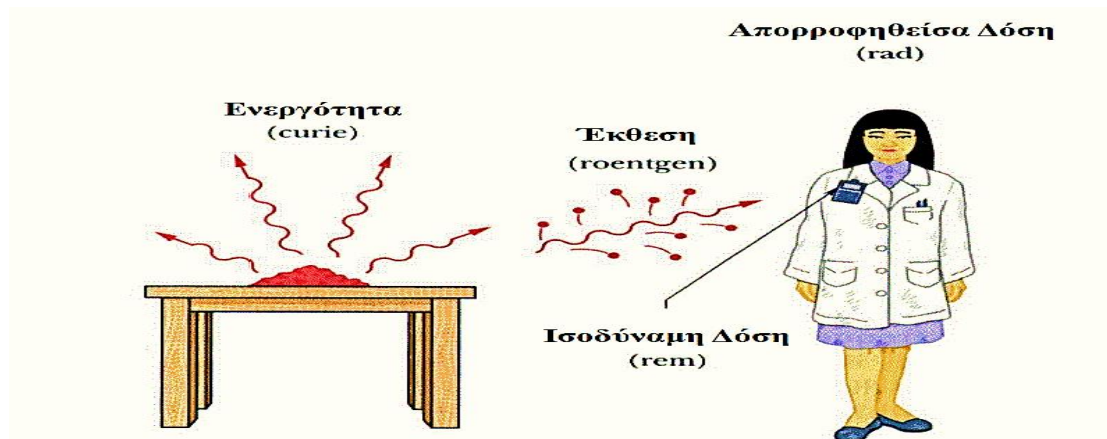
Όπου

$D_{T,R}$  = Απορροφούμενη δόση σε ιστό ή/και όργανο λόγω ακτινοβολίας R

$W_R$  = Συντελεστής Στάθμισης Ακτινοβολίας

Μονάδες Μέτρησης: **Sv ή Joule/Kg ή REM**

Η απορριφθείσα δόση αναφέρεται ειδικά σε όλες τις ακτινοβολίες και αποτελεί μέτρηση της ολικής ενέργειας που απορροφά δεδομένο τεμάχιο ύλης ή οργανισμός. Δεν αποτελεί μόνη της μέτρο των βιολογικών επιπτώσεων διότι τα βιολογικά αποτελέσματα δεν εξαρτώνται μόνο από τη δόση αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας<sup>[9]</sup>.



Εικόνα 9: Δοσιμετρικά Μεγέθη (Αναπαράσταση)

## 2.6 Κίνδυνοι από την Ραδιενέργεια

Όπως αναφέραμε η Έκθεση του ανθρώπου σε ιοντίζουσα ακτινοβολία που μπορεί να προκαλέσει ποικίλα προβλήματα και παρενέργειας, καθώς από την φύση του οι ακτινοβολίες είναι επιβλαβές για του ιστούς και τα κύτταρα όλων των ζωντανών οργανισμών αν δεν γίνεται η σωστή χρήση τους. Βασικά κριτήρια για το πόσο επιβλαβές ή όχι μπορεί να καθίσταται η έκθεση ενός οργανισμού σε ραδιενέργεια εξαρτάται από την **απόσταση** του από αυτή, από τον **χρόνο** του παραμονής καθώς και από τον **προστατευτικό ρουχισμό/ εξοπλισμό θωράκισης** που μπορεί να φοράει. Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δίνεται και στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και στα εργαστήρια καθώς η ιστορία μας έχει αποδείξει πως αρκούν ελάχιστα δευτερόλεπτα για να προκαλέσουν μια τεράστια καταστροφή<sup>[8][9]</sup>.



Εικόνα 10: Διεθνές Σύμβολο επισήμανσης του κινδύνου της ραδιενέργειας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΡΑΔΙΟΪΣΟΤΟΠΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

### 3.1 Η Εξέλιξη της Πυρηνικής Ιατρικής

Με το πέρασμα του χρόνου και την εδραίωση της Κλασσικής Ακτινοδιαγνωστικής στην επιστήμη της Ιατρικής και της υγείας όπου μέχρι τότε το βασικό θεμέλιο της ήταν η ύπαρξη μιας πηγής ακτινοβολίας εξωτερικά του εξεταζόμενου με σκοπό της ακτινογράφιση των δομών του (συνήθως οστά, για παθήσεις όπως κατάγματα και σπασίματα) σταδιακά λοιπόν προέκυψε η ιδέα και ύστερα η ανάγκη για την απεικόνιση της φυσιολογίας και των λειτουργιών συγκεκριμένων ιστών και οργάνων του εσωτερικού του ανθρώπινου οργανισμού πράγμα που στο παρελθόν καθίστανται αδύνατον στην Ακτινοδιαγνωστική.

Στις Αρχές λοιπόν τις δεκαετίας του 40' διάφοροι επιστήμονες έκαναν τις πρώτες απόπειρες για τον σχεδιασμό και την λειτουργία μιας νέας διάταξης με βασική ιδέα να αποτελεί η παρακολούθηση του θυρεοειδούς αδένος των εξεταζόμενων με την χρήση μια μικρής ποσότητας ραδιενεργού υλικού και συγκεκριμένα **I-131**, η παρακολούθηση και ο προσδιορισμός έγινε με την χρήση μετρητών-απαριθμητών τύπου Geiger-Muller, ουσιαστικά η επιστήμη της Πυρηνικής Ιατρικής είχε μόλις γεννηθεί.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό οι βασικές διαφορές που συναντάμε μεταξύ της Ακτινοδιαγνωστικής και την Πυρηνικής Ιατρικής είναι το που τοποθετείται η πηγή ακτινοβολίας (εξωτερική πηγή στην Ακτινοδιαγνωστική, εσωτερική πηγή στην Πυρηνική Ιατρική απεικόνιση), το είδος της παραγόμενης ακτινοβολίας (Ακτίνες-X, Ακτίνες-γ, με την βασική αυτή διάκριση/διαφορά τους να γίνεται μόνο ως προς τον τρόπο παραγωγής τους) και τέλος τι ακριβώς μπορούμε να δούμε σε καθεμιά από αυτές (στην Ακτινοδιαγνωστική μπορούμε να δούμε δομές ενώ στην Πυρηνική Ιατρική βλέπουμε την λειτουργικότητα των οργάνων) <sup>[6][28]</sup>.

Στις μέρες μας συναντάμε υβριδικά συστήματα που μπορούν να συνδυάσουν τις απεικονιστικές τεχνικές και των δύο αυτών κλάδων με σχετική επιτυχία. Τα νέα αυτά συστήματα ουσιαστικά είναι τα PET-MRI και τα PET-CT-MRI.

### 3.2 Τεχνητή Ραδιενέργεια

Οι πρώτες μελέτες για την δημιουργία τεχνητής Ραδιενέργειας άρχισαν περίπου στα τέλη τις δεκαετίας του 20' του περασμένου αιώνα. Από τους πρώτους που είχαν συλλάβει την ιδέα ήταν το ζεύγος Irene και Frederic Joliot-Curie όπου και το 1933 παρατήρησαν πως το Αργίλιο με βομβαρδισμό *σωματιδίων-α* μπορεί να παράγει Φώσφορο-30, το πρώτο λοιπόν τεχνητό ραδιενεργό ισότοπου είχε επιτευχθεί.

Σύντομα και συγκεκριμένα 4 χρόνια αργότερα το 1937 οι Carlo Perrier και Emilio Serge θα κατάφερναν να παράγουν ένα νέο στοιχείο που παράχθηκε στο εργαστήριο από ένα άλλο στοιχείο, το όνομα του οποίου προέρχεται από την ελληνική λέξη *τεχνητός* και θα άκουγε στο όνομα Τεχνητίο (Tc) <sup>[17]</sup>.

Η βασική αρχή λειτουργίας της Πυρηνικής Ιατρικής όπως έχει γίνει είδη αναφορά είναι η χορήγηση κάποιας ραδιενεργής ουσίας που έχει παραχθεί σε κάποιο

εργαστήριο προκειμένου να γίνει η διάγνωση ή η θεραπεία των εξεταζόμενων/ασθενών οι ραδιενεργές αυτές λοιπόν ουσίες που χορηγούνται για να εξυπηρετήσουν αυτόν το σκοπό ονομάζονται **Ραδιοφάρμακα**.

*Ραδιοφάρμακο = Χημική Ένωση/Βιολογική Ουσία + Ραδιενεργό Ισότοπο*

Τα **Ραδιοφάρμακα** πιο συγκεκριμένα

*«Είναι φαρμακευτικά σκευάσματα (ή μια επισημασμένη με ραδιονουκλίδιο ένωση) που αποτελούνται από την ένωση μια χημικής ουσίας ή κάποιου βιολογικού μορίου (μη ραδιενεργά συστατικά) σε συνδυασμό και ενός ραδιενεργού ισότοπου»*

Τα ραδιενεργά ισότοπα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην Πυρηνική Ιατρική έχουν σαν σκοπό την απεικόνιση οργάνων και είναι τεχνητά ενώ τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα δεν χρησιμοποιούνται καθώς έχουν βαρείς πυρήνες και μεγάλους χρόνος υποδιπλασιασμού θεωρούνται έτσι ακατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Το ραδιενεργό ισότοπο ή ραδιοϊσότοπο ή ραδιονουκλίδιο πρόκειται για ασταθείς πυρήνες που εκπέμπουν ακτινοβολία ικανή να μπορεί να διεισδύσει και να καταγραφεί από κατάλληλα απεικονιστικά συστήματα. Όλες οι μέθοδοι παραγωγής ισωτόπων βασίζονται πάνω στην ανάπτυξη πυρηνικών αντιδράσεων με την ακόλουθη λογική:

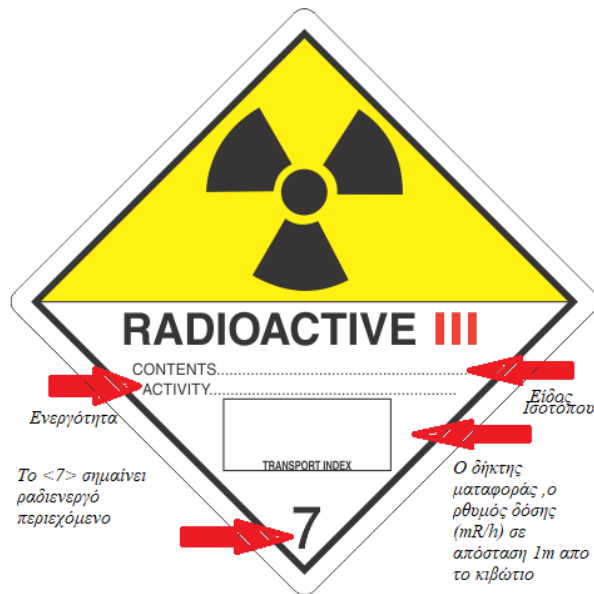
*Σωματίδιο βλήμα + Σωματίδιο στόχος = Ραδιενεργό στοιχείο*

Συχνά στα ραδιοφάρμακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο όρος «**Ιχνηθέτης** ή **Tracer**». Όταν λοιπόν μια ουσία εμπεριέχει κάποιο ραδιενεργό ισότοπο χαρακτηρίζεται ως **επισημασμένη (labeled)**. Ο όρος «**Ελεύθερων Φορέων**» συναντάται όταν ένα Ραδιοϊσότοπο είναι απαλλαγμένο από άλλους σταθερούς η ραδιενεργούς πυρήνες του ίδιου στοιχείου [6].

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται στα Ραδιοφάρμακα:

- **Ειδική Ενεργότητα:** αναφερόμαστε στην ενεργότητα ανά μονάδα βάρους (mCi/mg ή MBq/mg), τα δείγματα ενός ραδιονουκλιδίου ελεύθερων φορέων έχουν την υψηλότερη ειδική ενεργότητα.
- **Ειδική Συγκέντρωση:** καθορίζεται ως η ενεργότητα ανά μονάδα όγκου (mCi/ml ή MBq/ml).
- **Φυσικός Χρόνος Υποδιπλασιασμού (T<sub>p</sub>):** ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός των ατόμων ενός πυρήνα να διασπαστεί στο ήμισυ αυτών [6][7][8].





Εικόνα 11: Σήμανση ραδιενεργών πηγών τύπου III

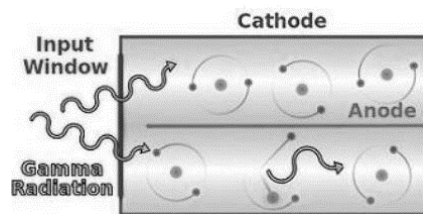
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ GEIGER-MULLER

### 4.1. Βασική Δομή και Λειτουργία Ανιχνευτών Ιονισμού Αερίου

Μια βασική και μεγάλη κατηγορία ανιχνευτών ραδιενέργειας είναι αυτή της οποίας οι ανιχνευτές της στηρίζονται στον ιονισμό που λαμβάνει χώρα στα αέρια από την αλληλεπίδραση με διάφορα σωματίδια ή/και με φωτόνια. Η βασική δομή τέτοιου τύπου ανιχνευτών απαρτίζεται από ένα θάλαμο-δοχείο-chamber με δυο ηλεκτρόδια, που το ένα χαρακτηρίζεται ως *άνοδος* και το άλλο ως *κάθοδος*. Η άνοδος είναι θετικά πολωμένη ενώ η κάθοδος αρνητικά. Μέσα στον θάλαμο υπάρχει αέριο όπου σε περίπτωση που το αέριο αρχίζει να ιονίζεται από κάποια αλληλεπίδραση του με ιονίζουσα ακτινοβολία τα φορτία του αρχίζουν να συλλέγονται από τα ηλεκτρόδια τους. Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που έχει συλλεχθεί σχετίζεται με τα σωματίδια ή φωτόνια που προσπίπτουν στον θάλαμο. Κάτω υπό συγκεκριμένες παραμέτρους μπορεί να παρουσιαστούν στα αέρια ορισμένα φαινόμενα που χαρακτηρίζονται ως δευτερογενή, τα οποία μπορεί να έχουν μεγάλη ένταση και μπορούν ανάλογα να βοηθήσουν την διαδικασία ενίσχυσης της ανίχνευσης. Ανάλογα λοιπόν το είδος και την μορφή των φαινομένων αυτών μπορούμε να κατατάσσουμε τους ανιχνευτές μας σε διάφορες κατηγορίες. Μια ξεχωριστή από αυτές τις κατηγορίες είναι οι ανιχνευτές τύπου Geiger-Muller <sup>[6][16]</sup>.

Ο ιονισμός που προκαλείται σε πρώτο χρόνο σε ένα αέριο εξαρτάται τόσο από την ενέργεια όσο και από το είδος του προσπίπτοντος σωματιδίου. Στα κυριότερα είδη ραδιενεργού ακτινοβολίας παρατηρείτε μια αναλογία μεταξύ των ιονισμών που προκαλούνται από αυτή και είναι περίπου 2.500 ζεύγη ιόντων για *σωμάτια-α*, 100 ζεύγη ιόντων για τα *σωμάτια-β*, και 1 ζεύγος ιόντων για τα *φωτόνια των Ακτινών-γ*. (Για τις αναλογίες αυτές οποιαδήποτε άλλη παράμετρο πλην την μορφή της ακτινοβολίας θεωρείται όμοια) .

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνει ο σωστός χαρακτηρισμός των ακτινοβολιών είναι ο **Ειδικός Ιονισμός (Specific Ionization)** που ουσιαστικά είναι ο αριθμός των ιόντων ανά μονάδα μήκους. Ωστόσο το συνολικό ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να συλλεχθεί εξαρτάται άμεσα και από την διαφορά δυναμικού που παρουσιάζεται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της καθόδου και της ανόδου. Όταν αυτή η διαφορά έχει χαμηλές τιμές τότε παρουσιάζεται σε μικρό ή ακόμα και σε μεγάλο βαθμό το λεγόμενο **Φαινόμενο Επανασύνδεσης Ιόντων (Recombination)**. Σύμφωνα με αυτό, τα θετικά ιόντα επαναπροσλαμβάνουν ένα ηλεκτρόνιο και καθίστανται ως ουδέτερα άτομα/μόρια. Σε περίπτωση που η διαφορά δυναμικού αυξηθεί το φαινόμενο αυτό βαθμιαία αρχίζει να εξασθενεί, φτάνοντας όμως αυτή η διαφορά σε μια ορισμένη τιμή που ονομάζεται **Τάση Κορεσμού (Saturation Voltage)** και η διαδικασία της επανασύνδεσης παύει. Μόλις σταματήσει η διαδικασία αυτή τότε όλα τα ιόντα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση συλλέγονται στα ηλεκτρόδια. Η τιμή της τάσης κορεσμού ξεκινάει από μερικές δεκάδες Volts και φτάνει σε εκατοντάδες Volts εξαρτώμενη άμεσα από τον τρόπο σχεδίασης των ηλεκτροδίων [6][4].



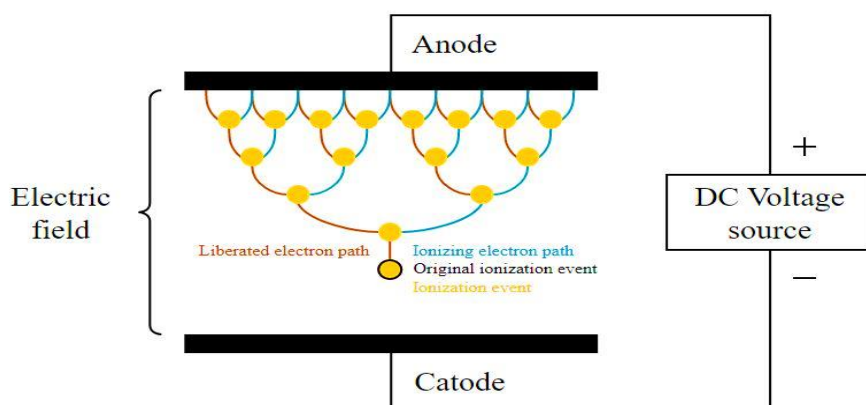
Εικόνα 12: Τυπικός Θάλαμος αερίου ιονισμών  
 Πηγή: commons.wikimedia.org

#### 4.2 Αλληλεπιδράσεις στο εσωτερικού του Θαλάμου Αερίου

Όπως είδη αναφέραμε οι ανιχνευτές της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στους οποίους ο τρόπος λειτουργίας τους στηρίζεται στην ύπαρξη ενός σωλήνα εμπλουτισμένο με αέριο, αφορά την εκμετάλλευση των πρωτογενών και δευτερογενών ιονισμών που ενδέχεται να λάβει χώρα μέσα στο αέριο αυτό, μετά από διέλευση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Επομένως μπορεί να λεχθεί πως η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον ιονισμό ενός αερίου-αισθητήρα από το σωματίδιο που προσπίπτει και αντίστοιχα στην καταγραφή του ρεύματος εξ επαγωγής που προκαλείται στα ηλεκτρόδια του, λόγω των δευτερογενών ηλεκτρονίων που δημιουργούνται μέσω των διαδοχικών αλληλεπιδράσεων. **Οι μετρητές G-M δεν μετρούν ενέργεια ιοντίζουσων σωματιδίων ή της ακτινοβολίας ωστόσο μπορούν να ανιχνεύσουν την ύπαρξή τους καθώς ο τελικός παλμός δεν εξαρτάται από τον αριθμό των πρωτογενών ιόντων [13].**

Σπουδαίο ρόλο στην εν λόγω διαδικασία διαδραματίζει το φαινόμενο της **χιονοστιβάδας (χιονοστιβάδα Townsend)**. Πρόκειται για ένα φαινόμενο κατά το οποίο τα ζεύγη ιόντων-ηλεκτρονίων που σχηματίζονται κατά την παρουσία ενός ηλεκτρικού πεδίου αρχίζουν να ολισθαίνουν προς τα ηλεκτρόδια τα οποία έχουν χαμηλή κινητική ενέργεια. Στο ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται, τα ηλεκτρόνια παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερο μέσο διαδρομής. Ωστόσο στην περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο αυτό τυχαίνει να είναι αρκετά μεγάλο, η ίδια η ενέργεια τους (κινητική) θα έχει σαν αποτέλεσμα να πυροδοτήσει φαινόμενα δευτερογενών

ιονισμών. Τα νέα αυτά δευτερογενή ηλεκτρόνια διαχέονται με την σειρά τους και επιταχύνονται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο. Το συνολικό άθροισμα όλων αυτών των διαδοχικών αλληλεπιδράσεων και διαδικασιών οδηγεί στο λεγόμενο **φαινόμενο της χιονοστιβάδας**. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ζευγών ιόντων και ηλεκτρονίων να δημιουργείται μόνο από ένα αρχικό σωματίδιο (πχ φωτόνιο). Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως **ενίσχυση αερίου (gas amplification)** μια διαδικασία που εκφράζει πρακτικά την αύξηση του φορτίου που συλλέγεται. Το πηλίκο δηλαδή του τελικού φορτίου προς το αρχικό. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται άμεσα την διαφορά της τάσης δυναμικού που παρουσιάζεται στα ηλεκτρόδια, από το είδος των αερίων και τέλος από την σχεδίαση-γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής του θαλάμου <sup>[4][23]</sup>.



Εικόνα 13: Απεικόνιση του φαινομένου της Χιονοστιβάδας

Πηγή: SW Test Workshop

Τα ηλεκτρόνια των ιόντων της χιονοστιβάδας χαρακτηρίζονται ως περισσότερο ευκίνητα από τα θετικά ιόντα και συλλέγονται πολύ ταχύτερα από την άνοδο του, επειδή έχουν αρκετή ενέργεια και ιονίζουν τα μόρια του αερίου (συνήθως Αργό). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα παραγόμενα θετικά ιόντα να δημιουργούν ένα χωρικό φορτίο (ή φορτίο χώρου) περιμετρικά του συλλέκτη ώστε τα ηλεκτρόδια να μην συμμετέχουν παρά μόνο ελάχιστα κατά την δημιουργία του παλμού εξόδου, ο οποίος με την σειρά του εξαρτάται αποκλειστικά σχεδόν από τον χρόνο συλλογής των θετικών ιόντων. <sup>[29][30][31]</sup>

Επειδή ωστόσο τα θετικά ιόντα επιβραδύνουν είναι ικανά καθώς οδεύουν προς την κάθοδο να παρουσιάσουν την πιθανότητα να επανασυνδεθούν με ηλεκτρόνια. Στις επανασυνδέσεις αυτές μπορεί να γίνει εκπομπή φωτονίων που προκαλούν εκ νέου χιονοστιβάδες μη οφειλόμενες στα ιονίζοντα σωματίδια <sup>[6][4]</sup>. Για την αποφυγή του ανωτέρου φαινομένου εκτός του Αργού προστίθεται και ατμός αλκοόλης. Η ευαισθησία των G-M είναι περίπου της τάξεως 1% για τις ακτίνες γ και X. Ο χρόνος ζωής τους είναι της τάξεως των  $10^{10}$  ανιχνεύσεων <sup>[13][32]</sup>.

### 4.3 Η Λειτουργία των ανιχνευτών τύπου Geiger-Muller

Όπως είδη αναφέρθηκε προηγουμένως οι ανιχνευτές τέτοιου τύπου καθίστανται ανίκανοι να στο να μπορούν να διακρίνουν το είδος της ακτινοβολίας, για τον λόγο αυτό οι παλμοί στην έξοδο τους σήματος είναι ανεξάρτητοι από το είδος και την ενέργεια των μετρούμενων σωματιδίων/φωτονίων. Βασικό πλεονέκτημα λοιπόν

αυτών των ανιχνευτών είναι το μεγάλο μέγεθος παλμών καθώς επίσης ότι δεν αιτούνται ακριβιά για πολύπλοκα ηλεκτρονικά και διατάξεις για την κατασκευή τους, επομένως και αποτελούν μια εύκολη σχετικά κατασκευή. Επιπροσθέτως οι ανιχνευτές τύπου Geiger-Muller είναι πολύ ευαίσθητοι και ικανοί να ανιχνεύσουν ραδιενεργές εργαστηριακές πηγές πολύ μικρής ενεργότητας < 1μCi.

Κατά την διαδικασία του ιονισμού τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από κάποια ραδιενεργή πηγή ή από κάποια ακτινοβολία αρχικά επιταχύνονται και μετέπειτα προσπίπτουν με πολύ μεγάλη ταχύτητα στην άνοδο του θαλάμου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η παραγωγή φωτονίων που προέρχονται από την πέδηση (φρενάρισμα-επιβράδυνση) των ηλεκτρονίων. Τα φωτόνια αυτά έχουν συχνότητες στην μαλακή περιοχή των ακτίνων X (10 nm - 100 pm) αλλά κυρίως στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) (380 – 60 nm). Τα φωτόνια αυτά αλληλοεπιδρούν με το αέριο καθώς επίσης μπορεί να αλληλοεπιδράσουν και με τα τοιχώματα του θαλάμου με αποτέλεσμα την δημιουργία εκ νέου του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και της απορρόφησής τους. Η παραγωγή του οποίου έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία νέων ηλεκτρονίων όπου τα οποία με την σειρά τους επιταχύνονται ως προς την άνοδο όπου και τελικά θα επιβραδυνθούν και εν τέλει θα γίνει εκπομπή νέων φωτονίων. Από τα ζεύγη των θετικών ιόντων εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία UV τα οποία προσεγγίζουν διαδοχικά την κάθοδο με την μορφή νέφους. Όντας πολύ κοντά αρχικά ελκύουν όπου και τελικά προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια από τα τοιχώματα της καθόδου. Αυτά λοιπόν τα ηλεκτρόνια αρχικά καταλαμβάνουν εξωτερικές στοιβάδες ιόντων. Εν συνέχεια όμως μεταπίπτουν σε χαμηλότερες με την εκπομπή ακτινοβολίας αυτή η τελευταία αυξάνει τελικός τον ιονισμό<sup>[13]</sup>.

Ο τρόπος εκδήλωσης της παραπάνω διαδικασίας εξελίσσεται ραγδαία άρα πολλά ηλεκτρόνια εκπέμπονται σε διευθύνσεις παράλληλες προς την άνοδο και προς την προέκταση του άξονα του θαλάμου. Μια διαδικασία όπου με την σειρά της οφείλεται στην χαμηλή ενέργεια των φωτονίων που προκαλούν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με τελικό αποτέλεσμα ο ιονισμός να διαδίδεται ταχύτατα σε όλη την έκταση του έγκλειστου αερίου και κυρίως κατά την προέκταση της ίδιας της ανόδου. Διαδοχικά λοιπόν προκαλείται έτσι μια μεγάλη αλληλουχία εκδήλωσης χιονοστιβάδων ιονισμού όπου η τελική επέκταση-εκδήλωση αυτών είναι ανεξάρτητη από το είδος και την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στο παρελθόν η όλη αυτή η επανάληψη των φαινομένων καθιστούσε τον μετρητή ανίκανο να καταγράψει νέα ακτινοβολία ωστόσο στις μέρες μας έχουμε νέες μεθόδους προς αποφυγή αυτή της αδυναμίας που ονομάζονται **Μηχανισμοί Απόπνιξης (Quenching Mechanisms)** που αποσκοπούν στην διακοπή της ολικής διεργασίας.

Στους πρώτους τύπους ανιχνευτών η αποφυγή αυτή γινόταν με την ελάττωση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων της ανόδου και της καθόδου. Στις μέρες μας στο εσωτερικό των θαλάμου (όπως έγινε αναφορά την παράγραφο 4.2) χρησιμοποιούνται διάφορες προσμίξεις από κατάλληλο **Αποπνικτικό αέριο (Quenching gas)** στο εσωτερικό του θαλάμου (**Αυτοδιακοπτόμενοι Ανιχνευτές/ Self-Quenching**).

Τα **Αποπνικτικά αέρια** χωρίζονται σε δύο κυρίαρχες κατηγορίες τους:

1. **οργανικούς αποπνίκτες**

## 2. αποπνίκτες αλογόνου

Οι οργανικοί αποπνίκτες αποτελούνται από κάποιο οργανικό ατμό/αέριο με το μόριο του να αποτελείται από διάφορα άτομα (Ισοβουτάνιο, Αιθυλική Αλκοόλη, Μεθάνιο, Ξυλένιο, Αιθυλένιο). Ο πιο διαδεδομένος τύπος αερίου που συναντάται στους ανιχνευτές Geiger-Muller είναι το μίγμα Αιθυλικής Αλκοόλης και Αργό (Ar) σε αντιστοιχίες 10% και 90% αντίστοιχα (10% και 90%). Ευρέως διαδεδομένα είναι τα μίγματα που χρησιμοποιούν αντιστοιχίες με βασικά αέρια το Αργό ή Νέο με προσμίξεις αλογόνου. Να σημειωθεί πως οι οργανικοί αποπνίκτες έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής <sup>[6][13]</sup>.

### 4.4 Χρονικοί Παράμετροι

#### ➤ Χρόνος Ασάφειας ή Καθυστερήσης tl (Latency Time)

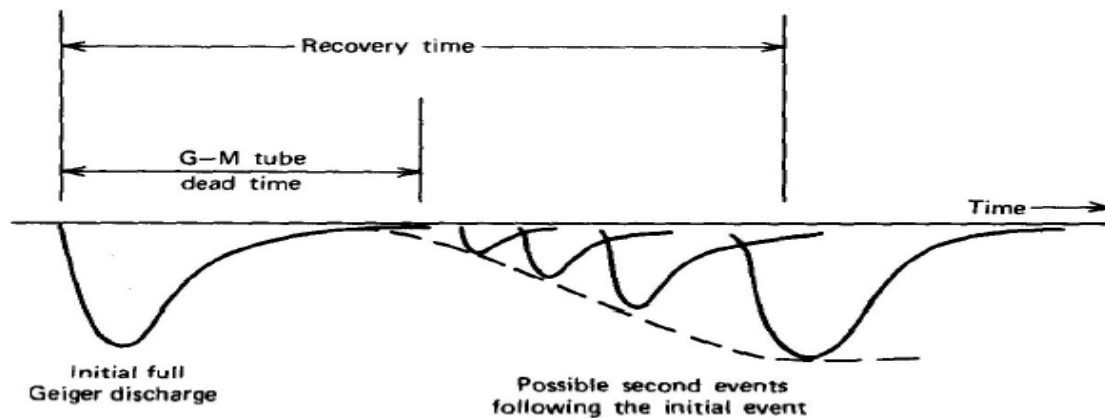
Αφορά τον χρόνο που απαιτείται μεταξύ της χρονικής στιγμής που το σωματίδιο περνά από τον ανιχνευτή και της διαδικασίας έναρξης της καταγραφής του ηλεκτρικού παλμού από την ανιχνευτική διάταξη. Πρακτικά εκφράζει το χρονικό διάστημα που χρειάζεται έτσι ώστε το μέγεθος του παλμού να ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, την λεγόμενη **στάθμη σκανδαλισμού (trigger level)** ή αλλιώς το λεγόμενο **κατώφλι του ηλεκτρικού κυκλώματος**. Ουσιαστικά σχετίζεται για μια συγκεκριμένη τιμή δυναμικού, που εξαρτάται από το ηλεκτρικό σχεδιασμό του κυκλώματος και αφορά τον εκάστοτε ανιχνευτή. Έτσι προκύπτει πως ο κάθε παλμός ο οποίος έχει τελικό πλάτος μικρότερο από αυτήν την συγκεκριμένη τιμή καθίσταται αδύνατο να καταμετρηθεί. Για τους ανιχνευτές τύπου G.M ο χρόνος καθυστέρησης είναι της τάξεως των  $10^{-7}$  με μέγιστο όριο ως  $10^{-6}$  s.

#### ➤ Νεκρός Χρόνος td ( Dead Time)

Είναι το χρονικό διάστημα από την έναρξη της καταμέτρησης ενός παλμού κατά το οποίο ο ανιχνευτής παραμένει τελείως αδρανής. Καθίσταται δηλαδή ανίκανος να μπορεί να καταγράψει οποιαδήποτε εκ νέου μέτρηση που μπορεί να προκύψει. Κατά το διάστημα του νεκρού χρόνου η διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου εμφανίζει μια αρκετά μεγάλη πτώση, ικανή να παραλύσει τον ανιχνευτή. Η απότομη και μεγάλη πτώση αυτή παρουσιάζεται λόγω της διαφοράς της κινητικότητας μεταξύ των ηλεκτρονίων και των ιόντων που είναι θετικός φορτισμένα. Όταν λοιπόν τα ηλεκτρόνια τελικά φθάνουν στον συλλέκτη το εκ φύσεως αρνητικό τους φορτίο ελαττώνει το θετικό φορτίο του ηλεκτροδίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου να ελαττώνεται και επειδή αυτή η ελάττωση είναι πολύ πιο κάτω από την στάθμη του σκανδαλισμού ουσιαστικά έχει σαν αποτέλεσμα να παραλύει τον ανιχνευτή. Αυτή η πτώση τάσης διαδραματίζεται μέσα σε πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα της τάξεως των μερικών μs. Όσο περνάει ο χρόνος τα θετικά ιόντα τα οποία είναι πιο αργά σε σχέση με τα ηλεκτρόνια κινούνται και τελικά καταφθάνουν προς την κάθοδο, αποτέλεσμα του οποίου είναι τελικά μια βαθμιαία αποκατάσταση της αρχικής διαφοράς δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου τα θετικά ιόντα να αρχίσουν να καταφθάνουν στην κάθοδο είναι της τάξεως των μερικών εκατοντάδων μs. Αυτός είναι ο **Νεκρός Χρόνος** του ανιχνευτή. Γενικά όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κυκλώματος .

### ➤ Χρόνος Διάκρισης $t_r$ (Resolving Time)

Πρόκειται για τον χρόνο μετά από την έναρξη της καταγραφής ενός παλμού που πρέπει να παρέλθει έτσι ώστε το ηλεκτρονικό σύστημα να μπορέσει πάλι να είναι σε θέση να καταγράψει έναν εκ νέου παλμό. Ουσιαστικά είναι ο χρόνος όπου ο ανιχνευτής καθίσταται ικανός να μπορεί να διακρίνει δύο διαδοχικά σωματίδια ή φωτόνια. Αποτελεί πρακτικά τον χρόνο όπου με την διέλευσή του κάποιος παλμός μπορεί να λάβει πλάτος ίσο με αυτό του κατωφλίου του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Με λίγα λόγια λοιπόν αφορά τον χρόνο κατά τον οποίο η βαθμιαία αυξανόμενη τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να λάβει τιμή ίση με την στάθμη σκανδαλισμού. Ο χρόνος διάκρισης είναι μεγαλύτερος από τον νεκρό χρόνο με τις τιμές του να κυμαίνονται από 150 έως 500  $\mu\text{s}$ .



Εικόνα 14: Διάγραμμα επεξήγησης του χρόνου αποκατάστασης

Πηγή: Emulation of a Geiger-Mueller-Tube on a XILINX FPGA board by Bernd Pohlmann

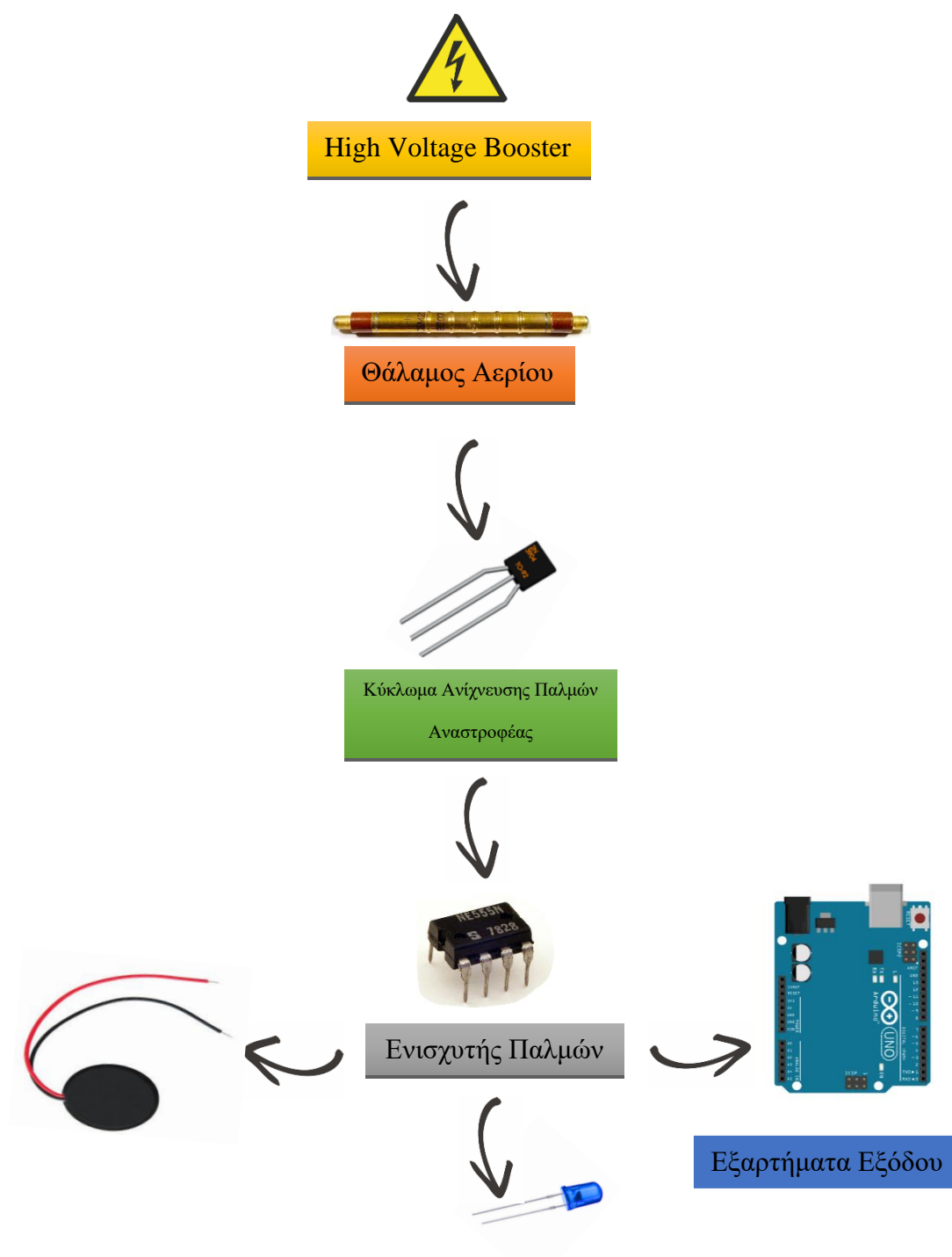
### ➤ Χρόνος Αποκατάστασης $t_{rr}$ (Recovery Time)

Ορίζεται ως ο χρόνος μετά την έναρξη της καταμέτρησης ενός παλμού, που απαιτείται να προέλθει έτσι ώστε ο επόμενος παλμός που θα καταγράψει να λάβει το κανονικό του πλάτος. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων επανέρχεται στην αρχική τιμή (πριν η πρώτη καταμέτρηση ξεκινήσει, αυτό συμβαίνει πάλι όταν όλα τα θετικά ιόντα φθάνουν στην κάθοδο) <sup>[6][22][20]</sup>.

## ΜΕΡΟΣ Β΄

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την κατασκευή και την υλοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν σχετικά απλά ηλεκτρονικά στοιχεία σε συνδυασμό με έναν θάλαμο αερίου. Στην συνέχεια του μέρους αυτού θα γίνει επακριβής αναφορά για τον τρόπο και τον σκοπό κατασκευή της εκάστοτε διάταξης καθώς και την συμβολή τους πάνω στο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Επιπλέον θα γίνει αναφορά για τον ρόλο και τον τρόπο που χρησιμοποιείται το Arduino Uno καθώς και για τον προγραμματισμό του. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που βοηθάει να καταλάβουμε την λογική σχεδίασή του ανιχνευτή υπό την μορφή μπλοκ διαγράμματος.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 Ραδιενεργές πηγές κλειστού τύπου

Οι ραδιενεργές πηγές κλειστού τύπου είναι εύκολα διαθέσιμες και χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα εφαρμογών. Σε γενικές γραμμές είναι μικρού μεγέθους (της τάξεως των μερικών εκατοστών) και το ραδιενεργό υλικό είναι εγκιβωτισμένο σε κάψουλες συνήθως κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ατσάλι, τιτάνιο ή άλλα αδρανή μέταλλα και σε κάποιες περιπτώσεις πλαστικό. Ο χρόνος ζωής των πηγών αυτών ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ασφάλεια είναι 5-15 χρόνια. Συνήθως οι πηγές αυτές σημειώνονται από το εκάστοτε όργανο το οποίο τις διαθέτει, με ένα σειριακό αριθμό και/ή την ημερομηνία κατασκευής και την αρχική ενεργότητα κατά την κατασκευή τους. Η ενεργότητα των πηγών κυμαίνονται στα  $10^5$  έως  $10^{17}$  Bq και ο χρόνος ζωής των ισοτόπων από 70 μέρες έως και 1600 χρόνια ανάλογα το εκάστοτε ισότοπο [34, 35].



Εικόνα 15: Ραδιενεργή πηγή κλειστού τύπου Cs-137

Πηγή: [pectrumtechniques.com/products/sources/disk-sources-and-source-sets/](http://pectrumtechniques.com/products/sources/disk-sources-and-source-sets/)

Οι ραδιενεργές πηγές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του ανιχνευτή μας ήταν μια πηγή του καϊσίου-137 με ενεργότητα 0,81  $\mu\text{Ci}$  (με το καϊσίο να έχει χρόνο ημιζωής τα 30,08 χρόνια και εκπέμπει ακτίνες  $\gamma$  στα 662 keV) η οποία χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση φωτονίων μέσης ενέργειας. Μια πηγή βαρίου με ενεργότητα 0,60  $\mu\text{Ci}$  (με το βάριο να έχει χρόνο ημιζωής τα 10,51 χρόνια και εκπέμπει στα 81 και 356 KeV) που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση σε χαμηλές ενέργειες και μία πηγή Κοβαλτίου 60 που χρησιμοποιήθηκε για τις υψηλές ενέργειες (1,17 και 1,33 MeV).

### 5.2 Ο Θάλαμος Αερίου

Ο θάλαμος αερίου είναι και ο ανιχνευτής των ιοντιζουσών ακτινοβολιών που έχεις ως σκοπό την σύνδεσή του με το κύκλωμα υψηλής τάσης (400V) έτσι ώστε να μπορεί



να ενεργοποιηθεί στο εσωτερικό του καθιστώντας τον έτοιμο να ανιχνεύσει τις αλληλεπιδράσεις με την Ιοντίζουσα ακτινοβολία και να παράγει έναν παλμό ρεύματος, όπου αυτός στην συνέχεια θα υποστεί εξεργασία έτσι ώστε να μπορέσει να καταγράψει. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο θάλαμος αερίου SBM-20. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικοί παράμετροι του <sup>[21]</sup>.



#### Γενικές Παράμετροι

Παράμετροι	SBM-20
Εμπλουτισμός σε Αέριο	Ne + Br <sub>2</sub> + Ar
Υλικό Καθόδου	Ανοξειδωτο Ατσάλι
Μέγιστο Μήκος (mm)	108 / 101
Χρήσιμο Μήκος (mm)	91.0 / 83.5
Μέγιστη Διάμετρος (mm)	11
Χρήσιμη Διάμετρος (mm)	10
Τρόπος Σύνδεσης	Pin
Εύρος Λειτουργίας Θερμοκρασίας °C	-60 με +70

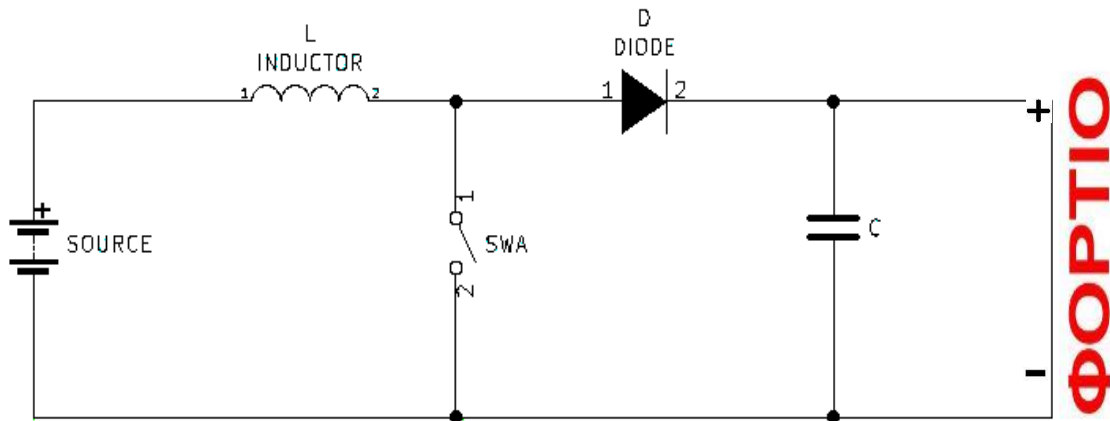
#### Προτεινόμενοι Παράμετροι Σύνδεσης

Παράμετροι	SBM-20
Ελάχιστη Αντίσταση Ανόδου (ΜΩ)	1
Προτεινόμενη Αντίσταση Ανόδου (ΜΩ)	5.1
Προτεινόμενα Volts Λειτουργίας (V)	400
Εύρος Τάσεως Λειτουργίας (V)	350-475
Αρχικό Εύρος Λειτουργίας (V)	260-320
Μήκος Κατωφλιού	Ελάχιστο-100
Ευαισθησία Ra <sup>226</sup> (cps/mR/hr)	29
Ευαισθησία Co <sup>60</sup> (cps/mR/hr)	22
Χρόνος Ζωής (Σε Παλμούς)	Ελάχιστο- 2*10 <sup>10</sup>

### 5.3 Κύκλωμα Voltage Booster (ανύψωσης τάσης)

Το βασικό καθήκον του κυκλώματος Ανύψωσης Τάσης είναι να λαμβάνει 9V από μια πηγή τροφοδοσίας η οποία μπορεί να είναι είτε από μπαταρία είτε από τροφοδοτικό μετατρέποντας τα σε 400V που είναι απαραίτητα για την αρχή λειτουργίας του Θαλάμου Αερίου. Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη τέτοιων τάσεων είναι η ύπαρξη ενός **πηνίου** (inductor) ενός διακόπτη καθώς και μιας **διόδου**.

Έστω ότι έχουμε το παρακάτω κύκλωμα

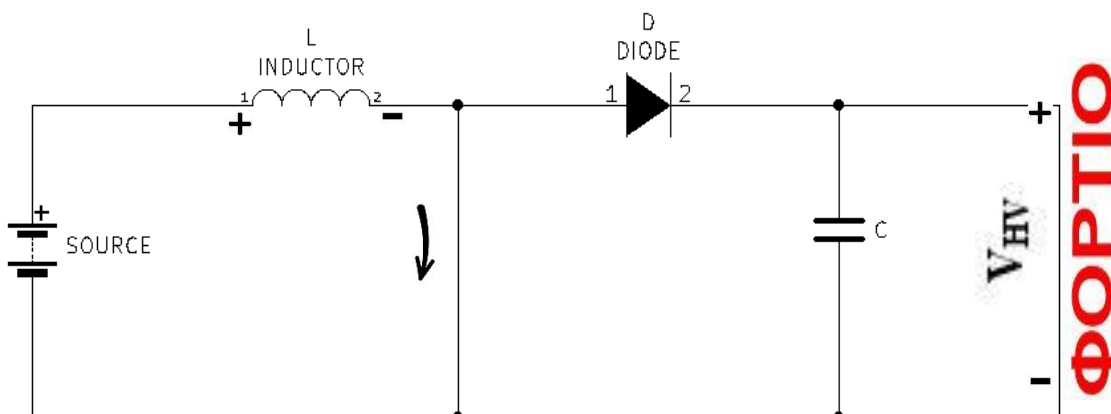


Εικόνα 16: Κύκλωμα ανύψωσης τάσεως από 9V σε 400V (φάση ανοικτού διακόπτη)

Ο διακόπτης SWA ανοιγοκλείνει συνεχόμενα και μένει **ανοικτός** για το χρονικό διάστημα  $t_{on}$  και αντίστοιχα παραμένει **κλειστός** για το χρονικό διάστημα  $t_{off}$

- Στην περίπτωση που ο διακόπτης παραμένει μόνιμως κλειστός το ρεύμα δεν μπορεί να περάσει από τη **δίοδο**, επομένως σε αυτή την περίπτωση ο **πυκνωτής** (C) θα είναι υπεύθυνος να παρέχει ρεύμα στο φορτίο. Η τάση ωστόσο του πηνίου θα είναι ίση με την τάση παροχής από την πηγή.

$$V_L = V_s$$



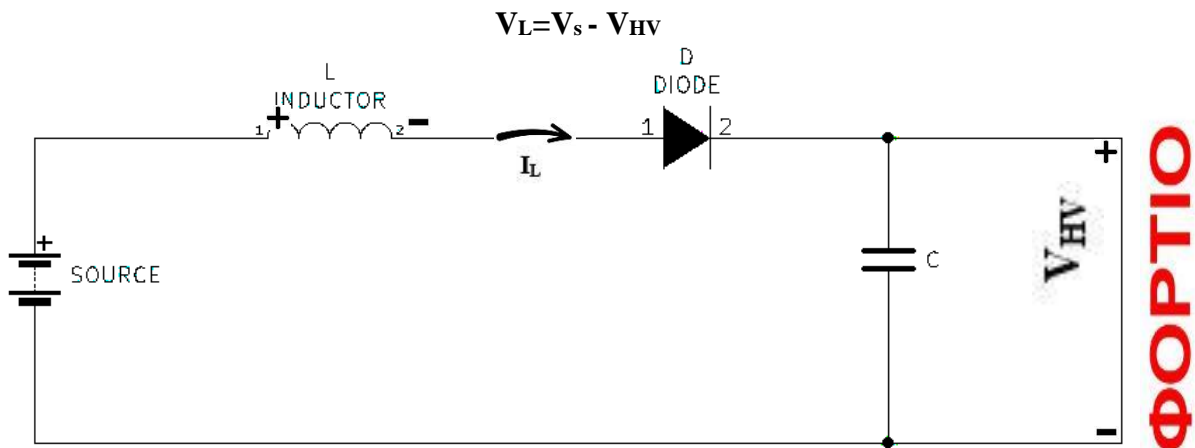
Εικόνα 17: Κύκλωμα ανύψωσης τάσεως από 9V σε 400V (φάση ανοικτού διακόπτη)

Όταν λοιπόν το ρεύμα διαρρέει το πηνίο, αυτό θα αυξάνεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \Rightarrow \Delta I_{L,on} = \frac{t_{on}}{L} * V_S$$

Σχέση α

- Στην άλλη περίπτωση που ο διακόπτης θα είναι **ανοικτός**, το ρεύμα θα ρέει τόσο από την δίοδο όσο και από τον πυκνωτή με αποτέλεσμα να τον φορτίζει αλλά και να «τροφοδοτεί» τα άκρα του σημείου του φορτίου. Η τάση ωστόσο μπορεί να αλλάζει στιγμιαία επομένως σε αυτή εδώ την περίπτωση για την τάση του πηνίου θα ισχύει ότι :



κατά την χρονική διάρκεια που μεσολαβεί για να λάβει χώρα αυτό το γεγονός το ρεύμα του πηνίου θα αρχίσει να φθίνει σύμφωνα με τον κανόνα:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_S - V_{HV}}{L} \Rightarrow \Delta I_{L,off} = \frac{t_{off}(V_S - V_{HV})}{L}$$

Σχέση β

Προκειμένου όμως το κύκλωμα να λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση το ρεύμα θα πρέπει να «επιστρέφει» στην αρχική του τιμή μετά το πέρας κάθε διαδικασία που λαμβάνει χώρα.

Έτσι από τις σχέσεις α, β ισχύει ότι :

$$\Delta I_{L,on} + \Delta I_{L,off} = 0 \Rightarrow \Delta I_{L,on} = - \Delta I_{L,off} \Rightarrow \frac{t_{on}}{L} * V_S = - \frac{t_{off}(V_S - V_{HV})}{L} \Rightarrow \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = \frac{V_{HV}}{V_S} = \frac{1}{1-D}$$

❖ Όπου  $D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$  είναι ο **κύκλος εργασιών» (Duty Circle)**

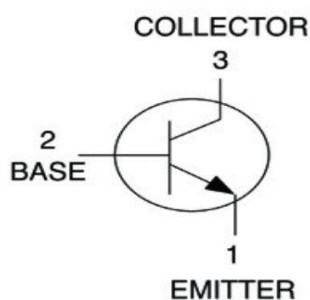
Έτσι λοιπόν αφού το **D** παίρνει τιμές από 0 έως 1 δηλαδή ισχύει ότι :  $0 < D < 1$  η τάση εξόδου θα είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση από την τάση εισόδου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το ολοκληρωμένο κύκλωμα που βοηθά στο να εκλέξουμε την παράμετρο D του κυκλώματος είναι το **TL5001** όπου σε συνδυασμό με την παρουσία του ποτενσιόμετρου (trimmer) διευκολύνουν την τήρηση της επιθυμητής τάσης εξόδου που όπως αναφέραμε παραπάνω, η επιθυμητή του τιμή είναι στα 400V <sup>[18][19][22]</sup>.

#### 5.4 Κύκλωμα Ανάγνωσης-Αναστροφής και Ενίσχυσης Παλμών

Ο Θάλαμος αερίου όταν τροφοδοτείται από υψηλή τάση και ταυτόχρονα συμβεί μια αλληλεπίδραση ιοντίζουσας ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα να μπορεί να ανιχνεύσει-παράγει έναν παλμό ρεύματος. Ο παλμός αυτός ωστόσο δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από την διάταξη του συγκεκριμένου κυκλώματος επομένως θα πρέπει να μετατραπεί σε παλμό τάσεως. Η συγκεκριμένη μετατροπή γίνεται αν στην κάθοδο του θαλάμου αερίου τοποθετηθεί μια αντίσταση (στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί δυο εν παραλλήλω αντιστάσεις της τιμής των 22kΩ) στην γη και κατά συνέπεια όπως θα γίνει αναφορά παρακάτω καταλήγει στον κύκλωμα του Ενισχυτή Παλμών.

Ο Ενισχυτής Παλμών πρακτικά χρειάζεται το ανάστροφο αυτού του παλμού (-), ένα σήμα που στην πράξη σταθεροποιείται με την ύπαρξη κατωφλίου τάσεως της τάξης των 5V ( $V_s=5V$ ). Όταν λοιπόν δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση στο θάλαμο αερίου-ιοντισμού (αυτός ο παλμός που θα ερχόταν από τον θάλαμο) «πέφτει» προσωρινά στα 0V. Έτσι σε μια εκ νέου αλληλεπίδραση θα ξανά ανεβάσει την τιμή του και θα γίνετε αυτή η επανάληψη. Για αυτή λοιπόν την λειτουργία και τον λογικό σχεδιασμό που ακολουθούν οι παλμοί (από τα 0V στα 5V που χρειάζεται για σταθεροποίηση) και αντίστροφα χρησιμοποιείτε ένα **transistor** και συγκεκριμένα το **2N3904** που στην ουσία λειτουργεί και ως διακόπτης ρύθμισης της ροής του ρεύματος αναλόγως την τάση την οποία δέχεται (λειτουργεί και σαν διακόπτης και αναστροφέας) <sup>[22][28]</sup>.

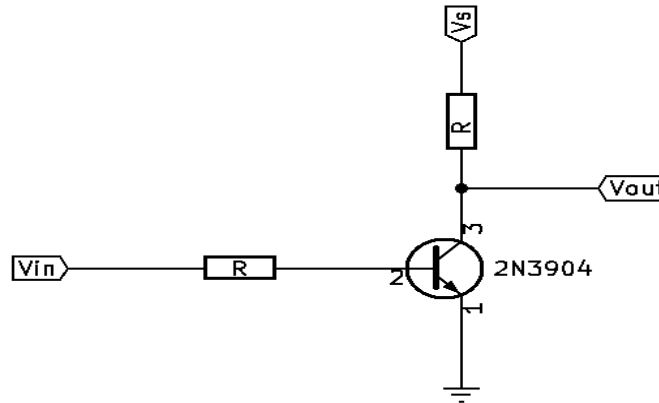


Εικόνα 18: Κύκλωμα των ακροδεκτών του τρανζίστορ

- ❖ Αν λοιπόν  $V_b > V_e$  το ρεύμα ρέει από τον Συλλέκτη (c) προς τον Εκπομπό (e)
- ❖ Αν λοιπόν  $V_b < V_e$  το ρεύμα δεν διαρρέετε καθόλου

Επομένως με βάσει ότι έχει ήδη ειπωθεί ένα τυπικό κύκλωμα αναστροφέα μπορεί να είναι της μορφής: <sup>[18][19]</sup>

Ο Παλμός που έρχεται από την κάθοδο του θαλάμου  $V_{in}$



Εικόνα 19: Πόλωση και συνδεσμολογία του τρανζίστορ

Όταν  $V_{in}$  υψηλό, το ρεύμα διαρρέει το transistor και το  $V_{out}$  «παίρνει» και οδηγεί τον παλμό.

Όταν  $V_{in}$  χαμηλό, το ρεύμα δεν διαρρέει το transistor και το  $V_{out}$  τροφοδοτείται μόνο από  $V_s$ .

## 5.5 Ο Ενισχυτής Παλμών

Ο παλμός ρεύματος που παράγεται από τον θάλαμο αερίου είναι σύντομος σε χρονική διάρκεια και επομένως δεν μπορεί τόσο να γίνει αντιληπτός από τις ανθρώπινες αισθήσεις όσο και ακατόρθωτο να οδηγηθεί απευθείας στα ανιχνευτικά μέσα (τέτοια μέσα, είναι το μικρό ηχείο και το μπλε LED που αναβοσβήνει συναρτήσει της θέσης - απόστασης από ραδιενεργή πηγή). Ο Ενισχυτής παλμών είναι ένα ευρέως διαδεδομένο και χρήσιμο εργαλείο γνωστός και ως «*Μονοσταθής Πολυδομητής (Monostable Multivibrator)*» όπου με την χρήση του **555-χρονιστή** (Ολοκληρωμένο chip 555) μετατρέπει ένα παλμό που έχει μικρή χρονική διάρκεια και αλλοπρόσαλλη μορφή σε τετραγωνικό παλμό διάρκειας 1,5 ms.

Όπως έγινε μνεία παραπάνω, λόγω της κατασκευαστικής δομής του χρονιστή ο παλμός εισόδου που θα φτάσει σε αυτόν μέσω του TRIG θα πρέπει να φθάνει αναστραμμένος, έτσι το σήμα ξεκινά όταν ξεπεραστεί το  $\frac{1}{3} V_{cc}$  (Voltage Common Collector) όπου μετέπειτα θα ξανά πέσει από αυτή την τιμή προκειμένου να προκαλέσει παλμό σκανδαλισμού. Σε αυτό εδώ το σημείο ουσιαστικά γίνεται εύκολα αντιληπτός ο ρόλος του Αναστροφέα.

Για την καλύτερη κατανόηση του κυκλώματος αναφέρουμε τον τρόπο λειτουργίας του αναλυτικά παρακάτω:

**Πριν ο παλμός φθάσει:**

1. Αρχικά δεν υπάρχει ρεύμα από τον Θάλαμο Αερίου άρα και ο αναστροφέας θέτει στο TRIG τάση  $V_s$ .

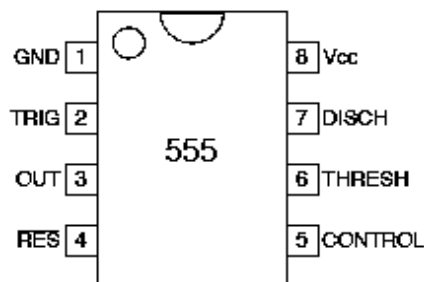
2. Ο χρονιστής δεν έχει ενεργοποιηθεί ακόμα, οπότε η έξοδος του (OUT) είναι στα 0V.
3. Στο DISCH αρχίζει η ενεργοποίηση - εκφόρτιση ως εκ τούτου ο πυκνωτής που συνδέεται με αυτό αρχίζει να αποφορτίζεται ολοκληρωτικά.

**Όταν ο παλμός καταφθάσει:**

1. Η τάση του TRIG οριακά πέφτει κάτω από το  $1/3 V_{cc}$ .
2. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η έξοδος OUT να τεθεί στην θέση του  $V_{cc}$ .
3. Αυτό επίσης έχει σαν αποτέλεσμα να σταματά η εκφόρτιση του DISCH.
4. Αποτέλεσμα του οποίου είναι ο πυκνωτής C να αρχίζει να φορτίζει μέσω της αντίστασης του που τον συνδέει.
5. Μετά από χρόνο  $t_{on} = 1.1RC$  ο πυκνωτής είναι φορτισμένος στο σημείο στο οποίο το THRESH να είναι πάνω από τα  $2/3 V_{cc}$ .
6. Αυτό τελικώς θα έχει σαν αποτέλεσμα η έξοδος (OUT) να τεθεί στα 0V και το DISCH να ενεργοποιείται, έτσι επανειλημμένα γίνεται η φόρτιση-εκφόρτιση του πυκνωτή θέτοντας το κύκλωμα έτοιμο να δεχθεί τον νέο παλμό.

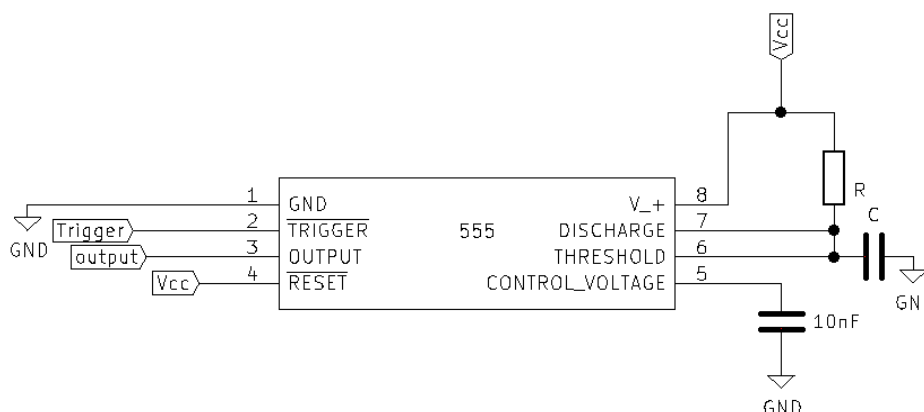
## Το κύκλωμα του χρονιστή 555

Εξωτερικά το ολοκληρωμένο 555 αποτελείται από 8 ακροδέκτες που αναλύονται παρακάτω:



Εικόνα 20: Οι ακροδέκτες του ολοκληρωμένου κυκλώματος 555

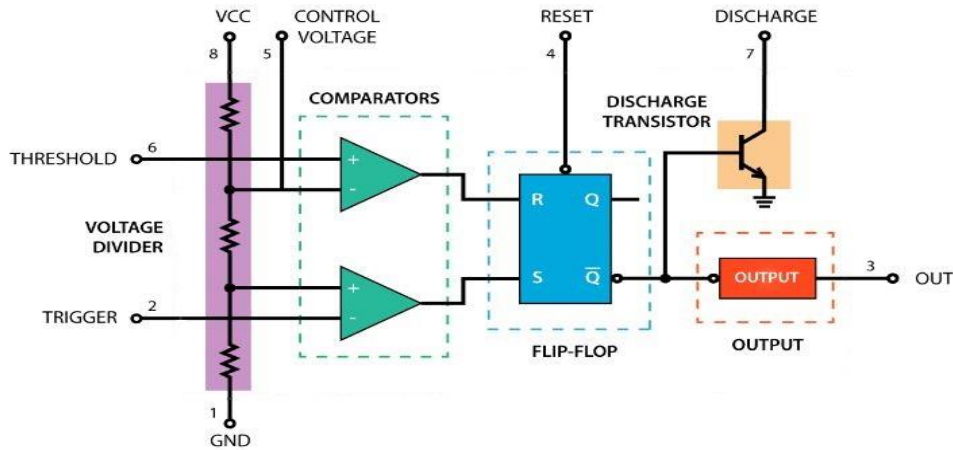
Πηγή: Texas Instruments



Εικόνα 21: Διάγραμμα και συνδεσμολογία του ολοκληρωμένου 555

Το Pin.4 (RES) είναι συνδεδεμένο με Vcc προκειμένου να διατηρεί σε λειτουργία το Flip-Flop που υπάρχει στο εσωτερικό του 555. Τα 10nF είναι συνδεδεμένα προκειμένου να γίνετε μείωση του θορύβου<sup>[18][19][20]</sup>.

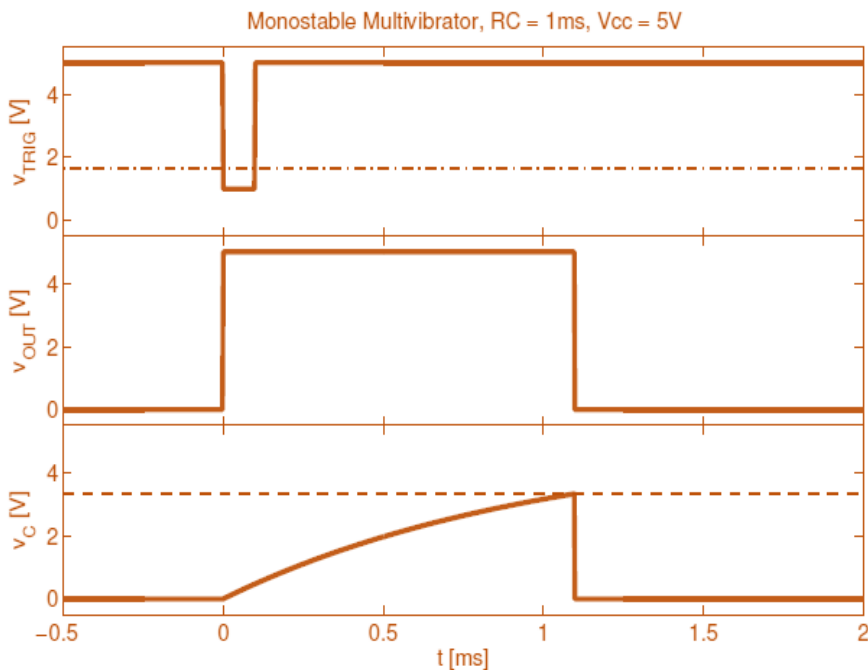
Περιγραφή των ακροδεκτών του ολοκληρωμένου 555		
Ακροδέκτης (PIN)	ΟΝΟΜΑ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
1	GND	Γείωση
2	TRIG	Ενεργοποιείται όταν η τάση αυτού του pin πέφτει κάτω από $1/3 V_{cc}$ , το flip-flop είναι έτοιμο όπου και αποστέλλει υψηλό OUT.
3	OUT	Τίθεται υψηλά όταν το TRIG πέφτει κάτω από το $1/3 V_{cc}$ και τίθεται χαμηλά όταν το TRESH ξεπερνάει τα $2/3 V_{cc}$ .
4	RES	Όταν η τάση σε αυτό το pin πέσει σε χαμηλές τιμές το flip-flop ανακατατάσσετε. Άρα και το OUT τίθεται σε χαμηλές τιμές ανεξαρτήτως του TRIG και του TRESH.
5	CONTROL	Έχει πρόσβαση στο εσωτερικό του διαιρέτη τάσεως επιτρέποντας την ρύθμιση των επιθυμητών κατωφλίων
6	THRESH	Όταν το κατώφλι αυτού του pin αυξηθεί πάνω από το $2/3 V_{cc}$ το flip-flop ανακατατάσσετε όπου και θέτει το OUT σε χαμηλές τιμές.
7	DISCH	Όταν το flip-flop είναι ενεργό (Το OUT είναι σε υψηλές τιμές) δεν υπάρχει ρεύμα από την βάση και το transistor δεν ενεργοποιείται. Όταν το flip-flop είναι ανενεργό (Το OUT έχει χαμηλές τιμές) και το transistor έχει ενεργοποιηθεί επιτρέποντας έτσι στον πυκνωτή την φόρτιση -εκφόρτιση με την γείωση του .
8	Vcc	Παροχή Τάσης



Εικόνα 22: Εσωτερική δομή – κυκλώματος ολοκληρωμένου του 555

Πηγή: [howtomechatronics.com](http://howtomechatronics.com)

Το διάγραμμα των τάσεων συναρτήσει του χρόνου του ολοκληρωμένου χρονιστή 555 παρουσιάζεται παρακάτω:



- ❖ Στην πρώτη γραφική παράσταση παρατηρείται η τάση στο **pin.2 (TRIG)**. Σημειώνεται πως ο παλμός δεν χρειάζεται να πέσει μέχρι το 0 όπως και δεν χρειάζεται να είναι πλήρως τετραγωνικός παλμός – Όταν  $V_{TRIG} < 1/3 V_{cc}$  ο κύκλος εργασίας ξεκινά.
- ❖ Η μεσαία γραφική παράσταση δείχνει την τάση στο **pin.3 (OUT)**. Ο παλμός θα ξεκινήσει όταν η τάση στο **pin.2 (TRIG)** πέσει κάτω από το  $1/3 V_{cc}$  και συνεχίζει για χρόνο  $t_{on} = 1.1RC$ .
- ❖ Στην τελευταία γραφική παρουσιάζεται η τάση κατά μήκος του πυκνωτή **C (pin.6)**. Ο παλμός θα «χαθεί» και ο πυκνωτής τελικά θα εκφορτιστεί επαναλαμβανόμενα μέσω του **pin.7** μέχρι να ισχύει  $V_c = 2/3 V_{cc}$  <sup>[26][23]</sup>

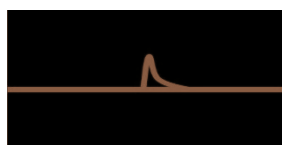
Εικόνα 23: Γραφικές παραστάσεις που εξηγούν το πώς συμπεριφέρεται η τάση στο εσωτερικό του Μονοσταθή Πολυδονητή

Πηγή: Short Michael, Chilenski Mark, D’Asaro Matthew- “Build your own Geiger-Müller counter”-MIT Open Course-2015



## 5.6 Επίδειξη και επεξήγηση των παλμών

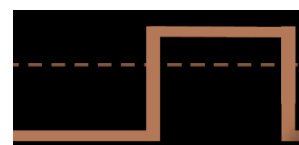
Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις παλμοί, όπου ο καθένας αντιπροσωπεύει το πλήθος των παλμών που παράγονται στα διάφορα στάδια του ανιχνευτή μας. Έτσι ο  $\alpha$  παλμός αντιστοιχίζεται σε έναν παλμό ρεύματος σύντομης διάρκειας που έρχεται απευθείας από την κάθοδο του θαλάμου αερίου, πριν αυτός συναντηθεί με την αντίσταση. Ο  $\beta$  αφορά παλμό τάσης ο οποίος έχει επεξεργασθεί και αναστραφεί λίγο πριν κατευθυνθεί στο pin 2 (TRIG) του 555, ενώ ο  $\gamma$  παλμός αντιστοιχεί σε τετραγωνικό παλμό τάσεως που οδηγείται προς τα μέσα καταγραφής όπως είναι το ηχείο, το μπλε LED και τέλος το Arduino Uno.



Παλμός  $\alpha$

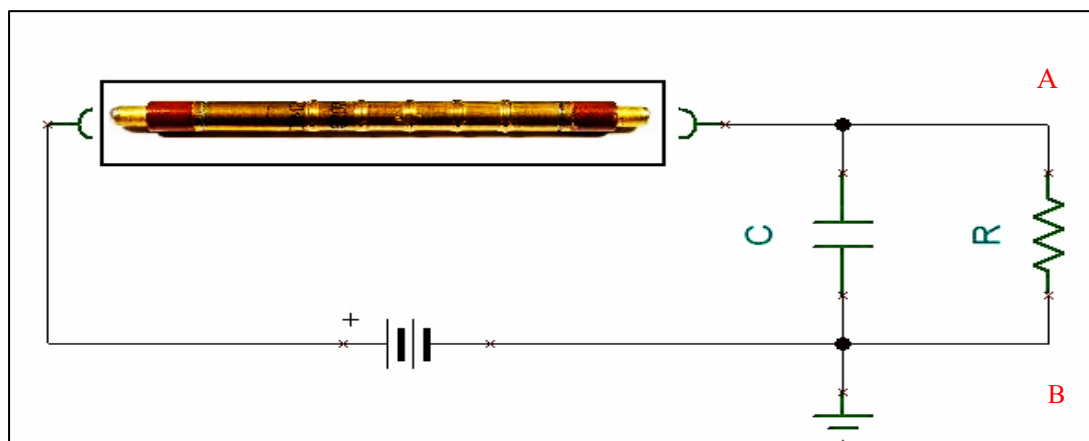


Παλμός  $\beta$



Παλμός  $\gamma$

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο μικρότερο κύκλωμα (που συγκαταλέγεται στο κυρίως κύκλωμα) με βάσει το οποίο μπορεί να γίνει αντιληπτή η παραγωγή των παλμών έπειτα από την ανίχνευση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

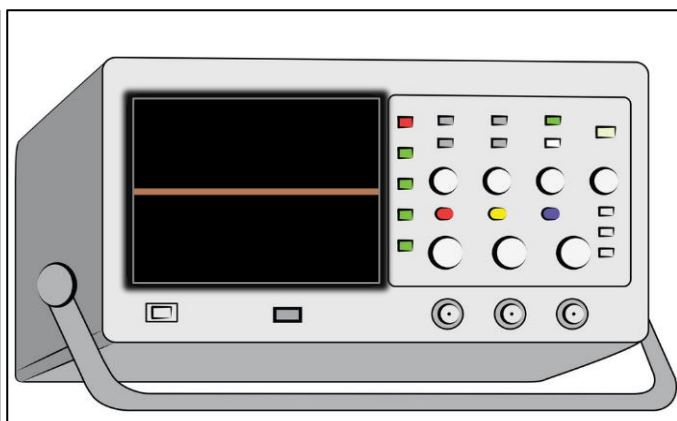
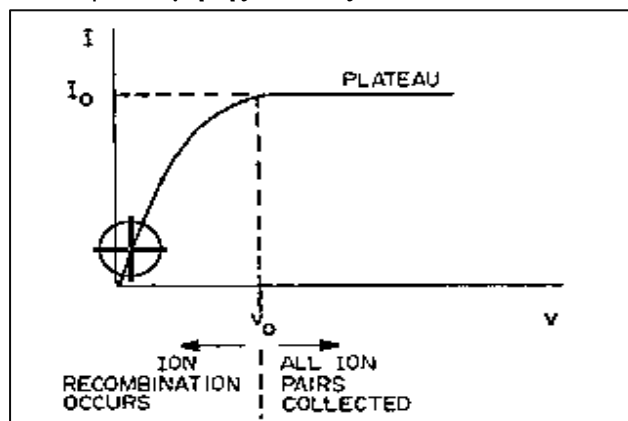


Εικόνα 24: Κύκλωμα παραγωγής παλμών από το θάλαμο αερίου.

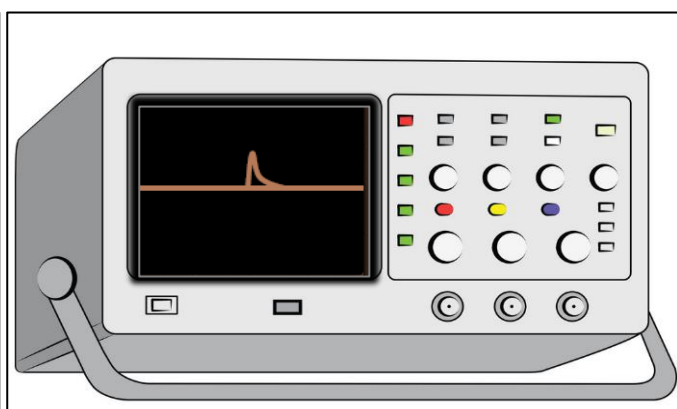
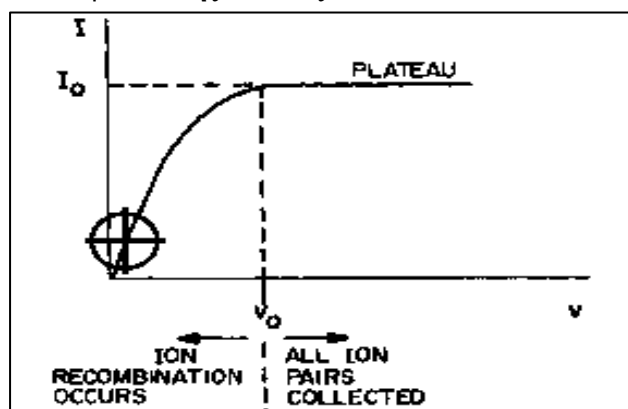
Έστω στο σημείο A έχει τοποθετηθεί καλώδιο που συνδέεται με κανάλι ενός παλμογράφου και πως στο σημείο B συνδέεται καλώδιο, που καταλήγει και αυτό σε παλμογράφο καθιστώντας εφικτή την σύνδεση με την γη.

Αναλόγως λοιπόν την τάση παρουσιάζονται τα κατόφλια που μπορούν να διαμορφωθούν καθώς και πως οι παλμοί συμπεριφέρονται σε αυτά.

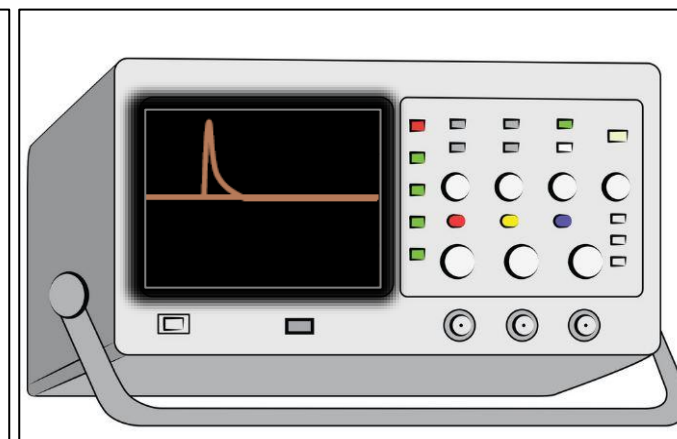
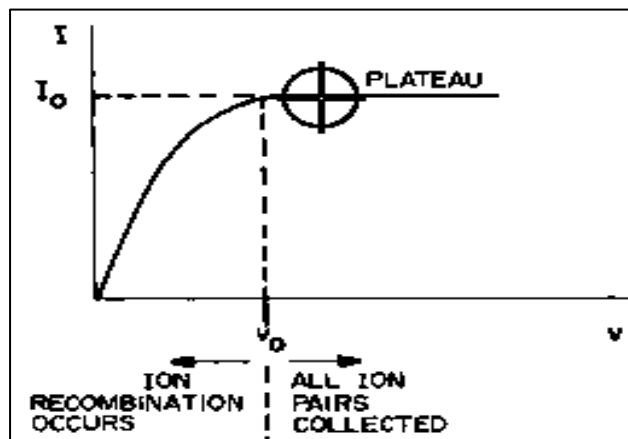
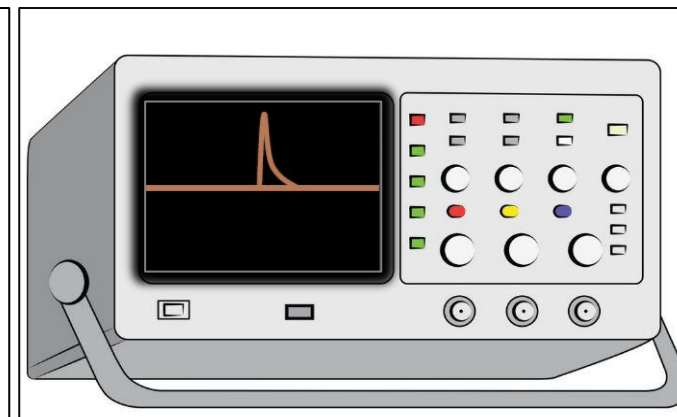
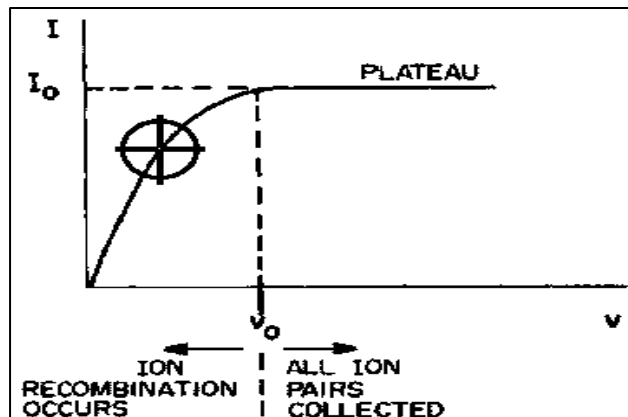
**Κατόφλι Χαμηλής Τάσεως:**



**Κατόφλι Μέσης Τάσεως:**



**Κατόφλι Υψηλής Τάσεως:**

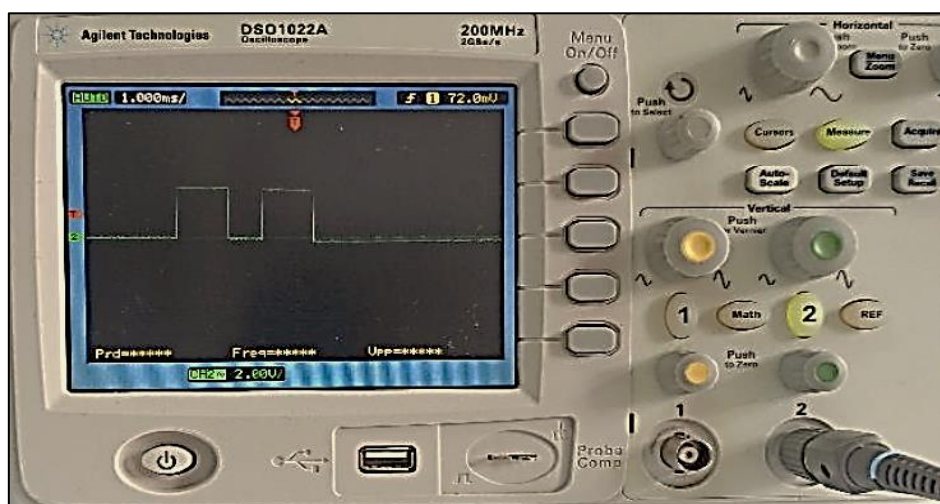


Με βάσει τα παραπάνω μπορεί κάποιος να διακρίνει την συμπεριφορά των παλμών αναλόγως της ύπαρξης της τάσης <sup>[22][27]</sup>.

### 5.7 Ο Τετραγωνικός Παλμός

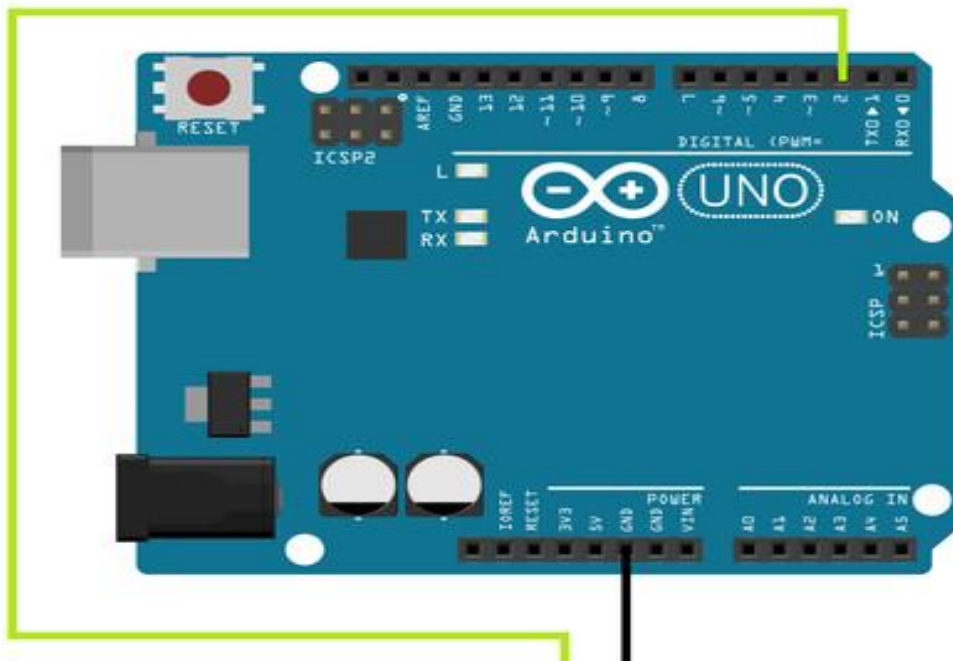
Ο Τετραγωνικός Παλμός διαδραματίζει ίσως τον πιο σπουδαίο ρόλο μέσα στο κύκλωμα καθώς είναι ο παλμός που θα σταλεί :

- Στο **ηχείο**, όπου εκεί μπορεί κάποιος να ακούσει την διαδοχικές χιονοστιβάδες να πραγματοποιούνται και όσο πιο γρήγορο και δυνατό ήχο έχει, σημαίνει πως τόσο πιο κοντά είναι κάποιος σε ραδιενεργή πηγή ή αντίστοιχα σε πηγή μεγαλύτερης ενεργότητας / ραδιενέργειας.
- Στο **μπλε LED** , όπου εκεί το LED λειτουργεί ταυτόχρονα με το ηχείο και ο σκοπός του είναι να αναβοσβήνει κάθε φορά που καταφθάνει ένας παλμός. Επομένως όσο πιο κοντά είναι κάποιος τόσο πιο πολύ γρήγορα αυτό θα αναβοσβήνει αφού οι παλμοί θα καταφθάνουν πιο γρήγορα ενώ αντιστοίχως όσο πιο μακριά είναι κάποιος αυτό εξασθενεί (το ίδιο και το ηχείο). Επομένως το ηχείο και LED λειτουργούν συγχρονισμένα έτσι ώστε να υπάρχει τόσο οπτική αναγνώριση σε περίπτωση έκθεσης σε ραδιενεργό περιβάλλον όσο και ηχητική.
- Στο **Arduino Uno**, εκεί με βάσει την συγκεκριμένη συνδεσμολογία ο σκοπός είναι ο τετραγωνικός παλμός να αποσταλεί στο Arduino και από εκεί μέσω συγκεκριμένου κώδικα να καθίσταται ικανή η καταμέτρηση των CPM (count per minute), δηλαδή το πόσο πλήθος παλμών μπορούν να καταγραφούν από την συγκεκριμένη διάταξη ανά ένα λεπτό. Παρακάτω θα γίνει αναφορά για τον τρόπο σύνδεσης αλλά και του αντίστοιχου κώδικα <sup>[23][24][17][25]</sup>.



Εικόνα 25: Δύο διαδοχικοί παλμοί που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια κατασκευής του κυκλώματος σε εργαστήριο του τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

## 5.8 Χρήση του Arduino Uno για την καταμέτρηση των παλμών



Εικόνα 26: Φωτογραφία του μικροεπεξεργαστή Arduino Uno που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των CPM

Πηγή: <https://www.instructables.com/Arduino-DIY-Geiger-Counter/>

Μετά την μορφοποίηση των παλμών σε τετραγωνικούς παλμών αυτό που μένει είναι να οδηγηθούν σε ένα καταγραφικό μέσο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας εμπορικός μικροεπεξεργαστής ο Arduino Uno που φαίνεται παραπάνω. Η σύνδεση της εισόδου των τετραγωνικών παλμών έγινε από το pin 2 του Arduino Uno. Επίσης θα πρέπει και αυτό να γειωθεί επομένως αυτό γίνεται με την κατάλληλη σύνδεση στο δεύτερο pin της γείωσης ενώ τελικώς η τροφοδοσία του θα παρθεί από την σύνδεση του με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή<sup>[12][15][20]</sup>.

## Περιγραφή του Κώδικα που χρησιμοποιήθηκε

### Open Arduino IDE and load the code.

“#define LOG\_PERIOD 60000”; θέτει τον χρόνο μέτρησης στο 1 λεπτό (60sec) , η αλλαγή της μεταβλητής αυτής από 60000 σε 15000 δηλαδή σε 15sec ή ακόμα και σε 5000 δηλαδή σε 5 sec δεν παρουσιάζει μεγάλο πρόβλημα στις μετρήσεις αφού οι μέσοι όροι τους παρατηρούνται ότι δεν έχουν μεγάλη απόκλιση , έτσι η αλλαγή μπορεί να γίνει και σε “#define LOG\_PERIOD 15000” για 15 seconds ή “#define LOG\_PERIOD 5000” για 5 seconds αναλόγως λοιπόν τον διαθέσιμο χρόνο μέτρησης μπορεί να προσαρμοστεί ο αντίστοιχος χρόνος αναμονής

```
#include
```

```
#define LOG_PERIOD 15000 // Ο χρόνος αναμονής σε milliseconds, προτεινόμενες τιμές από 15000-60000. (Logging period in milliseconds, recommended value 15000-60000)
```

```
#define MAX_PERIOD 60000 // Μέγιστος χρόνος αναμονής χωρίς τροποποίηση του κώδικα (Maximum logging period without modifying this sketch)
```

```
unsigned long counts; // Μεταβλητές για τις αλληλεπιδράσεις του Θάλαμο Αερίου (variable for GM Tube events)
```

```
unsigned long cpm; // Μεταβλητή για την παράμετρο των CPM (variable for CPM)
```

```
unsigned int multiplier; // Μεταβλητή για τον υπολογισμό του CPM (variable for calculation CPM in this sketch)
```

```
unsigned long previousMillis; / Μεταβλητή για την καταγραφή του χρόνου (variable for time measurement)
```

```
void tube impulse(){ // Υποδιαδικασία καταγραφής αλληλεπιδράσεων από το κύκλωμα του ανιχνευτή (subprocedure for capturing events from Geiger)
```

```
counts++;
```

```
}
```

```
void setup(){ // Θέτει την Υποδιαδικασία (setup subprocedure)
```

```
counts = 0;
```

```
cpm = 0;
```

```
multiplier = MAX_PERIOD / LOG_PERIOD; // Υπολογισμός πολλαπλασιαστή εξαρτάται από την παράμετρο χρόνο που έχει τεθεί (calculating multiplier, depend on your log period)
```

Serial.begin(9600); // Passes the value 9600 to the speed parameter. This tells the Arduino to get ready to exchange messages with the Serial Monitor at a data rate of 9600 bits per second. That's 9600 binary ones or zeros per second, and is commonly called a baud rate.

attachInterrupt(0, tube impulse, FALLING); // Καθορισμός εξωτερικών διακοπών (define external interrupts)

Serial.println("Start counter"); // Εκκίνηση για την διαδικασία καταγραφής

}

void loop(){ // Έναρξη κύριας επανάληψης (main cycle)

unsigned long currentMillis = millis();

if(currentMillis - previousMillis > LOG\_PERIOD){

previousMillis = currentMillis;

cpm = counts \* multiplier;

Serial.println(cpm);

counts = 0;

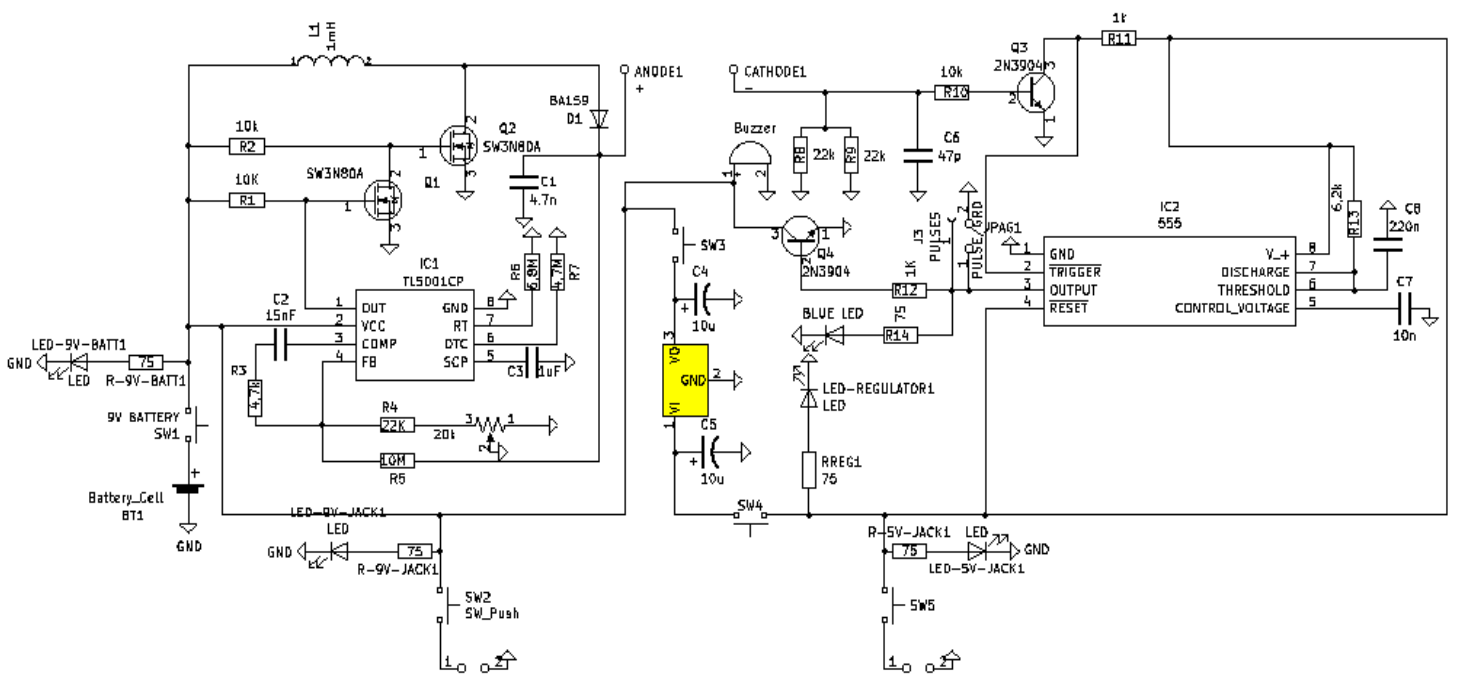
}

}

}

Πηγή Κώδικα: *Josehf Murchison*<sup>[33]</sup>

### Το Ηλεκτρονικό Σχέδιο του κυκλώματος



Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι τιμές των μετρήσεων που καταγράφηκαν από την σύνδεση του Arduino Uno με την διάταξη του ανιχνευτή.

## ΜΕΡΟΣ Γ΄

### Μετρήσεις και Βαθμονομήσεις

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

##### 6.1 Η καταγραφή του Cs-137

Η πρώτη πειραματική καταγραφή που έγινε, ήταν από πηγή **Καισίου-137 (Cs-137)**

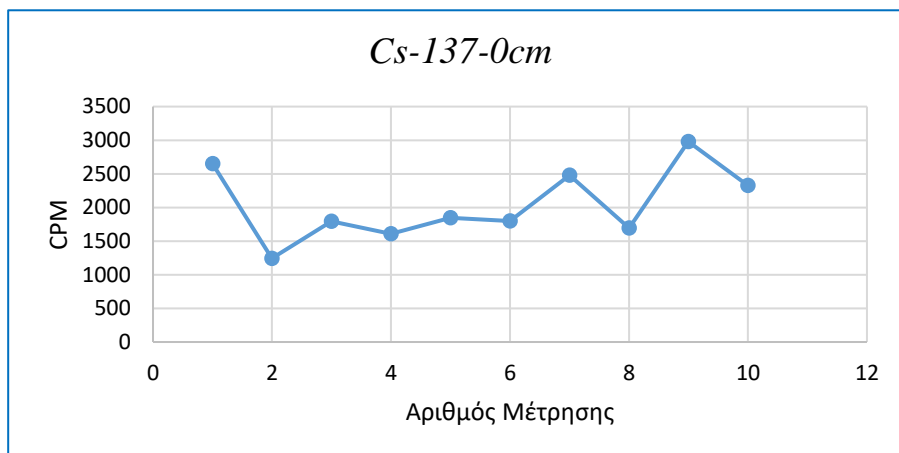
Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι καταγραφές των CPM όπως αυτές καταγράφηκαν από κώδικα του Arduino για αποστάσεις 0-3-6 cm.

##### Cs-137

**Απόσταση: 0 cm**

COM3
Cs-137-0mm
Start counter
2652
1244
1796
1608
1848
1800
2480
1692
2980
2328

Απόσταση 0cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=0 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

$$CsMO_{CPM0}=2043$$

Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

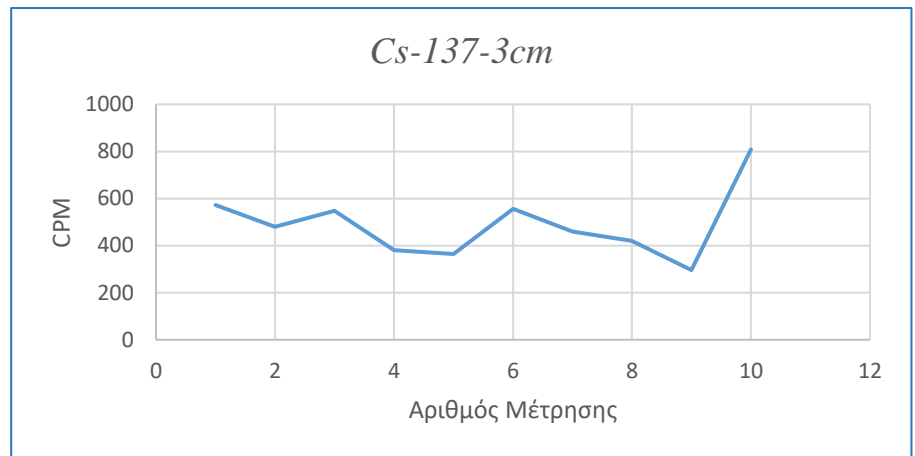
$$CsSD_0=540$$

❖ Cs-137

Απόσταση: 3 cm

COM3
Cs-137-3cm
Start counter
572
480
548
380
364
556
460
420
296
808

Απόσταση 3cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=3 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

$$CsMO_{CPM3}=488$$

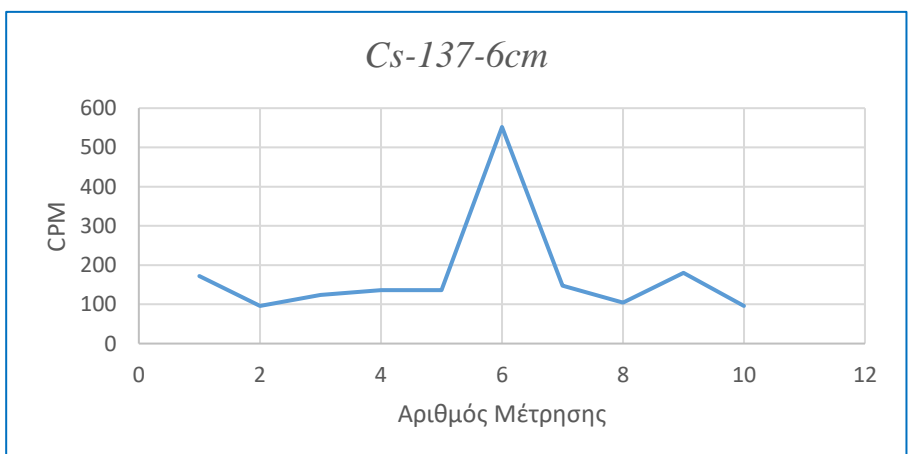
Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$CsSD_3=144$$

Απόσταση: 6 cm

COM3
Cs-137-6cm
Start counter
172
96
124
136
136
552
148
104
180
96

Απόσταση 6cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=6 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

$$CsMO_{CPM6}=175$$

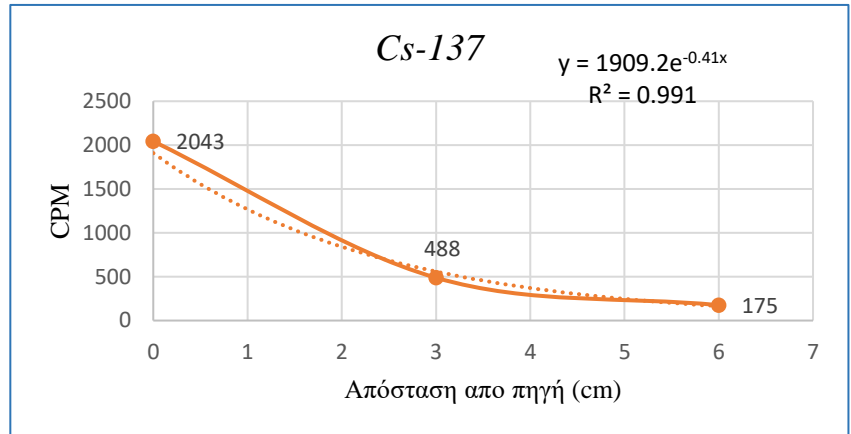
Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$CsSD_6=136$$



Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη του τρεις μέσους όρους από κάθε μέτρηση στις τρεις αυτές διαφορετικές αποστάσεις μπορεί να δημιουργηθεί μια εκ νέου γραφική παράσταση. Τα συμπεράσματα θα αναλυθούν εν συνεχεία.

Απόσταση (cm)	ΜΟ CPM
0	2043
3	488
6	175



## 6.2 Η καταγραφή του Βα-133

Η δεύτερη πειραματική καταγραφή που έγινε, ήταν από πηγή **Βάριου-133 (Ba-133)**

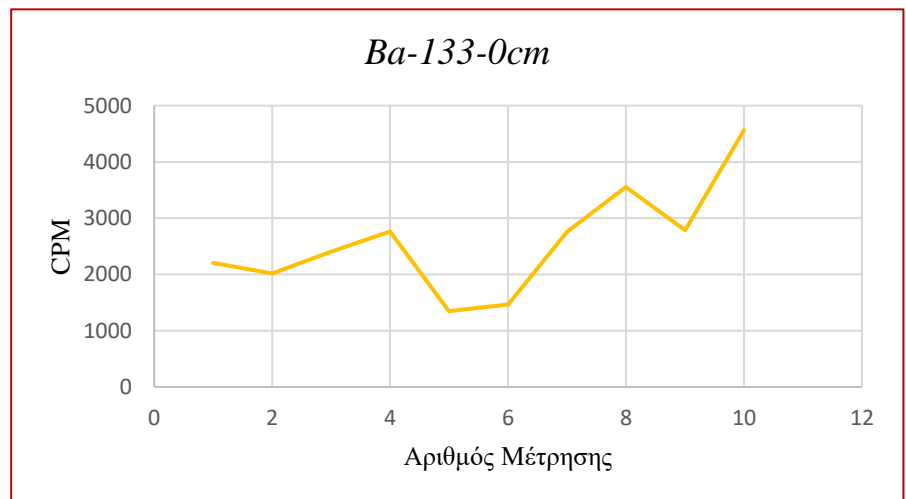
Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι καταγραφές των CPM όπως αυτές καταγράφηκαν από κώδικα του Arduino για αποστάσεις 0-3-6 cm.

### ❖ Ba-133

**Απόσταση: 0 cm**

COM3
Ba-133-0mm
Start counter
2204
2020
2404
2760
1348
1468
2756
3552
2784
4564

Απόσταση 0cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=0 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

$$\mathbf{BaMO_{CPM0}=2586}$$

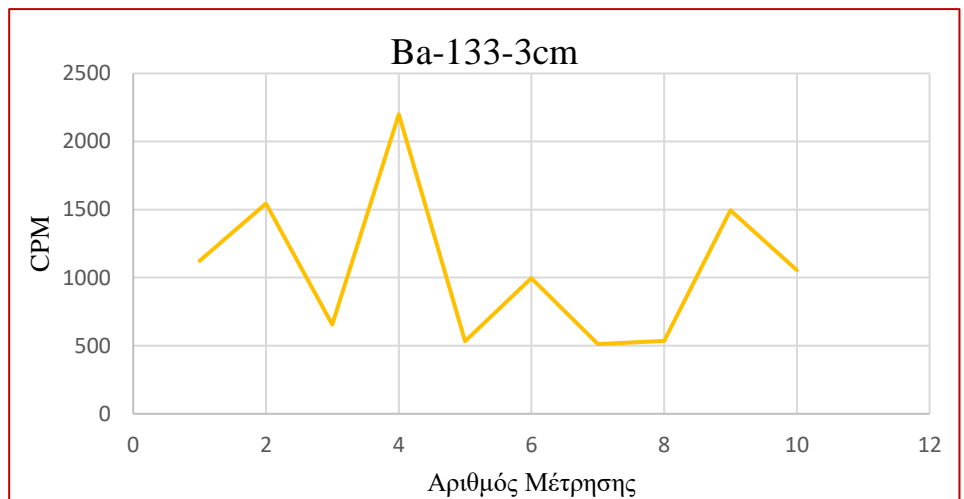
Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$\mathbf{BaSD_0=956}$$

### Απόσταση: 3 cm

COM3
Ba-133-3cm
Start counter
1124
1544
656
2200
532
996
512
536
1496
1056

Απόσταση 3cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=3 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

$$\mathbf{BaMO_{CPM3}=1065}$$

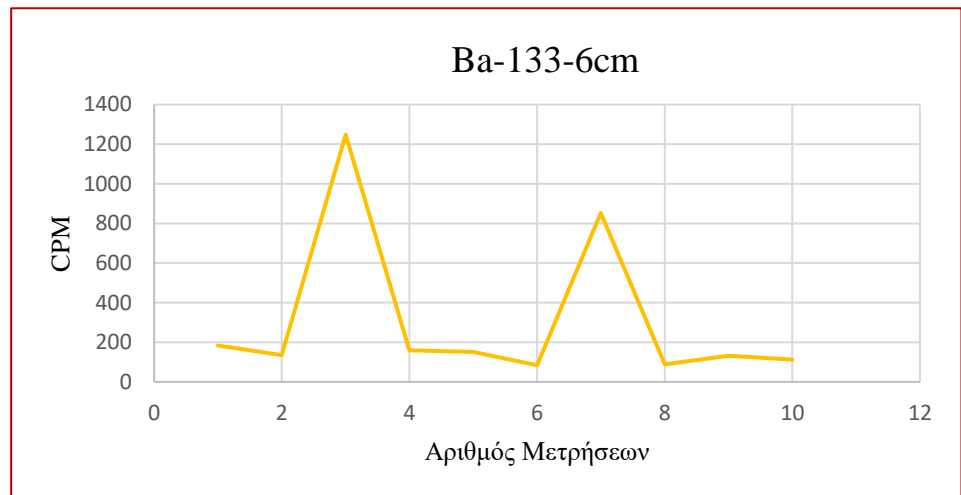
Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$\mathbf{BaSD_3=552}$$

### Απόσταση:6cm

COM3
Ba-133-6cm
Start counter
184
136
1248
160
152
84
852
88
132
112

Απόσταση 6cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=6 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

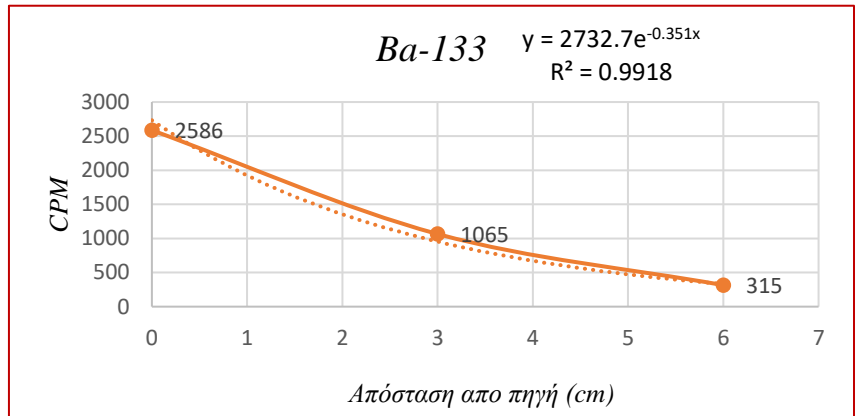
$$\mathbf{BaMO_{CPM6} = 315}$$

Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$\mathbf{BaSD_6=400}$$

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη του τρεις μέσους όρους από κάθε μέτρηση στις τρεις αυτές διαφορετικές αποστάσεις μπορεί να δημιουργηθεί μια εκ νέου γραφική παράσταση. Τα συμπεράσματα θα αναλυθούν εν συνεχεία.

Απόσταση (cm)	ΜΟ (CPM)
0	2586
3	1065
6	315



### 6.3 Η καταγραφή του Co-60

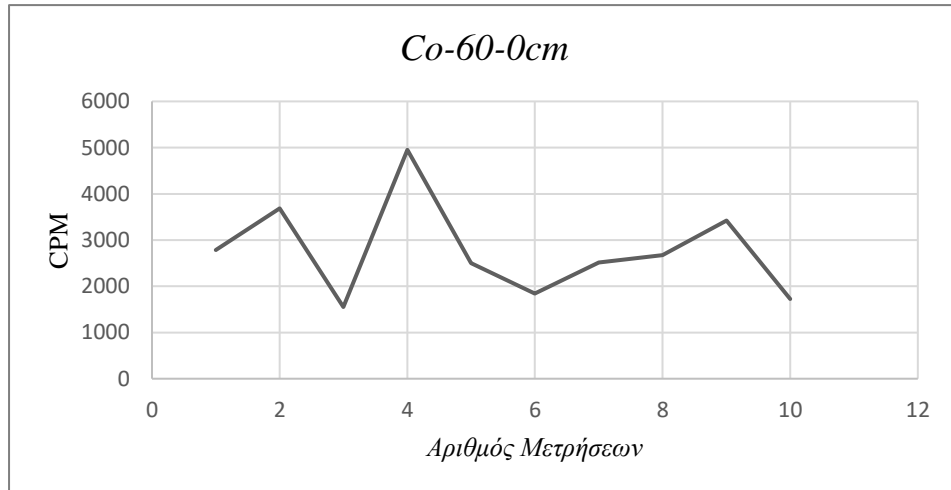
Η τρίτη και τελευταία πειραματική καταγραφή που έγινε ,ήταν από πηγή **Κοβαλτίου-60 (Co-60)** Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι καταγραφές των CPM όπως αυτές καταγράφηκαν από κώδικα του Arduino για αποστάσεις 0-3-6 cm.

❖ **Co-60**

Απόσταση: 0cm

COM3
Co-60-0mm
Start counter
2788
3684
1552
4952
2504
1844
2516
2672
3424
1728

Απόσταση 0cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=0 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

$$\text{CoMO}_{\text{CPM}0} = 2766$$

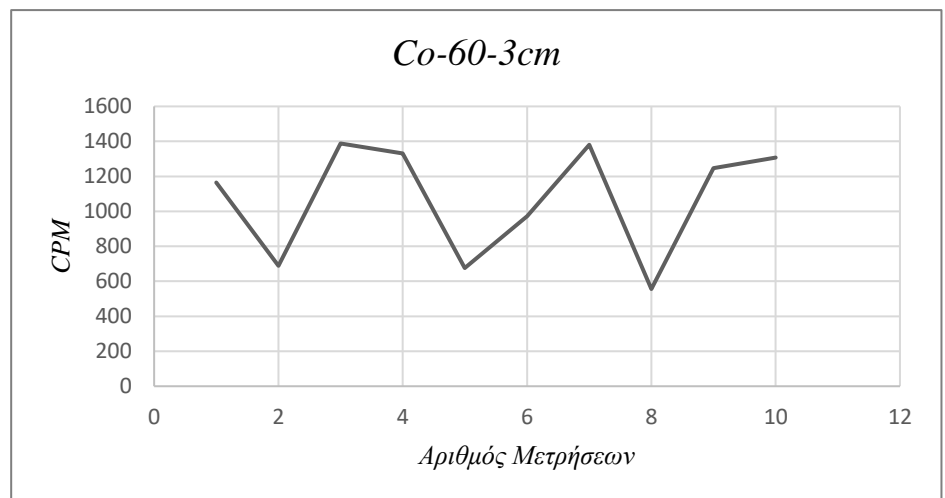
Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$\text{CoSD}_0 = 1033$$

### Απόσταση: 3cm

COM3
Co-60-3cm
Start counter
1164
688
1388
1332
676
972
1380
556
1240
1308

Απόσταση 3cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=3 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

$$CoMO_{CPM3} = 1071$$

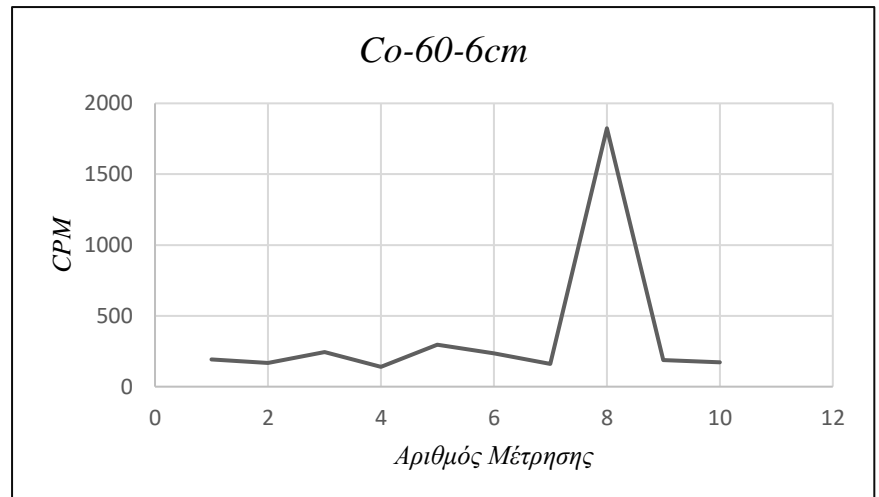
Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$CoSD_3 = 323$$

### Απόσταση:6cm

COM3
Co-60-6cm
Start counter
192
168
244
140
296
236
160
1824
188
172

Απόσταση 6cm



Γραφική Παράσταση CPM/Αρ.Μέτρησης για d=6 cm

Μέσος Όρος μετρήσεων:

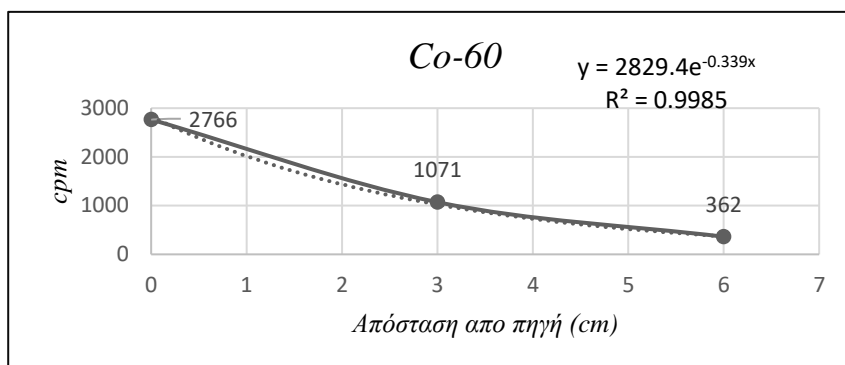
$$CoMO_{CPM3} = 362$$

Τυπική Απόκλιση μετρήσεων:

$$CoSD_3 = 515$$

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη του τρεις μέσους όρους από κάθε μέτρηση στις τρεις αυτές διαφορετικές αποστάσεις μπορεί να δημιουργηθεί μια εκ νέου γραφική παράσταση. Τα συμπεράσματα θα αναλυθούν εν συνεχεία.

Απόσταση (cm)	ΜΟ CPM
0	2766
3	1071
6	362



#### 6.4 Μετατροπή και αντιστοίχιση CPM σε δόση

Από την στιγμή που έχουν ληφθεί οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνει η αντιστοίχιση των CPM σε δόση προκειμένου να υπάρχει μια σχετική εικόνα για το περιβάλλον στο οποίο είναι εκτεθειμένος ο άνθρωπος. Για την μετατροπή αυτή λοιπόν από το κατασκευαστικό φυλλάδιο του θαλάμου αερίου (SBM-20 Datasheet) προκύπτει με βεβαιότητα ότι ο συντελεστής ευαισθησίας που έχει για το **Co-60** είναι στα **22cps/mR/h**. Για το **Cs-137** σύμφωνα με παρόμοιο κατασκευαστικό εγχειρίδιο [πηγή.15] ο συντελεστής ευαισθησίας ανέρχεται στα **18cps/mR/h** και τέλος η αντιστοίχιση σε δόση από την πηγή του Βαρίου θα εξαιρεθεί καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα εύρεσης του συντελεστή του από τον συγκεκριμένο τύπου θαλάμου. Επιπροσθέτως επειδή γίνεται αναφορά σε δόση το **1mR/h** αντιστοιχεί περίπου σε **8,77 μSv/h**<sup>[14]</sup>. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω:

➤ Για το **Co-60** ισχύει ότι :

$$22 \text{ cps/mR/h} \Rightarrow 22 \times 60 \text{ cpm/mR/h} = 1320/8.77 \approx 150 \text{ cpm}/\mu\text{Sv/h}$$

Άρα και

$$1 \text{ cpm} \sim 1/150 = 0.006644 \mu\text{Sv/h}.$$

➤ Ενώ για το **Cs-137** ισχύει πως:

$$18 \text{ cps/mR/h} \Rightarrow 18 \times 60 \text{ cpm/mR/h} = 1080/8.77 \approx 124 \text{ cpm}/\mu\text{Sv/h}$$

Άρα και

$$1 \text{ cpm} \sim 1/124 = 0.008064 \mu\text{Sv/h}.$$

Ολοκληρώνοντας λοιπόν τον κύκλο των μετατροπών/αντιστοιχιών εύκολα προκύπτουν τα νούμερα της δόσης από την πηγή του Cs-137 και του Co-60<sup>[25][14][21]</sup> πολλαπλασιάζοντας την τιμή του κάθε συντελεστή με κάθε τιμή των μέσων όρων για τις συγκεκριμένες αποστάσεις προκύπτει ότι:

Ισότοπο	Συντελεστής	ΜΟ CPM 0(cm)	ΜΟ CPM 3(cm)	ΜΟ CPM 6(cm)	Δόση 0(cm)	Δόση 3(cm)	Δόση 6(cm)
Cs-137	0.006644 μSv/h.	2043	488	175	16,47 μSv/h	3,39 μSv/h	1,4 μSv/h
Co-60	0.008064 μSv/h	2766	1071	362	18,4 μSv/h	7,12 μSv/h	2,4 μSv/h

Σε ό,τι αφορά την δόση, αυτή μετρήθηκε σε πολύ μικρά επίπεδα, τάξης μικρότερης των 20μSv/h επομένως και δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος καθώς απέχει αρκετά από τη κλίμακα των mSv/h όπου και εκεί ξεκινούν τα περιοριστικά όρια δόσεων που έχει θεσπίσει η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (20mSv/h για επαγγελματική έκθεση). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι ραδιενεργές πηγές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ήταν για εκπαιδευτική χρήση. Η πηγή του καισίου-137 είχε ενεργότητα 0,81 μCi (με το καισίο να έχει χρόνο ημιζωής τα 30,08 χρόνια και εκπέμπει ακτίνες γ στα 662 keV) η οποία χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση φωτονίων μέσης ενέργειας. Μια πηγή βαρίου με ενεργότητα 0,60 μCi (με το βάριο να έχει χρόνο ημιζωής τα 10,51 χρόνια και να εκπέμπει σε χαμηλές ενέργειες στα 81 και 356 KeV) και μία πηγή Κοβαλτίου 60 για τις υψηλές ενέργειες (1,17 και 1,33 MeV).

## ΜΕΡΟΣ Δ

### Συμπεράσματα και συζήτηση

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

##### 7.1 Σύνοψη

Συνοπτικά θα λέγαμε ότι ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας εκπληρώθηκε μιας και καταφέραμε να σχεδιάσουμε και να αναπτύξουμε μια πειραματική διάταξη ενός ανιχνευτή ακτινοβολίας  $\gamma$  τύπου Geiger-Muller.

Ο ανιχνευτής μας ανεξάρτητα από την ενέργεια των φωτονίων  $\gamma$  (μιας και χρησιμοποιήθηκαν ραδιενεργές πηγές που εκπέμπουν ακτίνες  $\gamma$  σε εύρος από 88 keV έως 1.33 MeV) ήτανε ικανός να ανιχνεύσει και να καταγράψει την ιοντίζουσα ακτινοβολία με ακρίβεια.

Ανάλογα με την απόσταση που τοποθετήθηκαν οι ραδιενεργές πηγές παρατηρήσαμε ότι επαληθεύτηκε η μείωση της Ενεργότητας/ραδιενέργειας σύμφωνα με τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου.

Σε ότι αφορά το ρυθμό της απορροφούμενης δόση που υπολογίστηκε για τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν, αυτή βρέθηκε σε πολύ μικρά επίπεδα, τάξης μικρότερης των 20 $\mu$ Sv/h που απέχει αρκετά από τη κλίμακα των mSv/h όπου εκεί ξεκινούν τα περιοριστικά όρια δόσεων που έχει θεσπίσει η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (20mSv/h για επαγγελματική έκθεση) επομένως δεν υπήρξε και ο παραμικρός κίνδυνος από την χρησιμοποίησή τους.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να επισημάνω ότι κατά την διάρκεια των καταγραφών των CPM με τις 3 διαφορετικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν παρατηρήθηκαν πειραματικές καταγραφές/ μετρήσεις από τον Arduino Uno οι οποίες ξέφευγαν αρκετά από το ΜΟ των δέκα τιμών. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρατήρησα ότι ο μεγάλος αριθμός των καταγεγραμμένων CPM οφειλότανε κυρίως στην ενεργοποίηση του κινητού μου τηλεφώνου (έτυχε να χτυπήσει κατά την διάρκεια κάποιων μετρήσεων) καθώς και στο άνοιγμα και κλείσιμο των τροφοδοτικών της τάσης των 9V.

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι ένας τέτοιος ανιχνευτής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών, μιας και είναι ικανός να μετρήσει και να εντοπίσει τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες με ακρίβεια (ακόμη και σε πολύ μικρές ενεργότητες). Ένα παράδειγμα εφαρμογής του θα μπορούσε να είναι σε διεγχειρητικά ανιχνευτικά συστήματα τύπου  $\gamma$ -probe που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της εγχείρισης για τον εντοπισμό του λεμφαδένα φρουρού κατά την διάρκεια της μαστεκτομής ή της αφαίρεσης ενός μικρότερου όγκου. Το μέγεθος του ανιχνευτή είναι κατάλληλο μιας και έχει τις διαστάσεις περίπου ενός στυλό ή ενός λεπτού μαρκαδόρου. Επιπροσθέτως όπως ήδη αναφέρθηκε θα μπορούσε ο ανιχνευτής αυτός να χρησιμοποιηθεί και για εκπαιδευτικούς σκοπούς ώστε να επαληθεύουν οι φοιτητές τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου, το απαιτούμενο πάχος υποδιαπλασιασμού για κάθε ραδιενεργή πηγή, το γραμμικό συντελεστή εξασθένισης των υλικών κτλ.

## **7.2 Μελλοντική εργασία**

Ως μελλοντική εργασία θα φροντίσουμε η κατασκευή του ανιχνευτή μας να μπει σε ένα κλειστό κουτί (housing) ώστε να μπορεί να είναι λειτουργικός ο ανιχνευτής από τους μελλοντικούς φοιτητές του τμήματος καθώς και να μελετήσουμε την συμπεριφορά του ανιχνευτή μας σε ακτινοβολία τύπου  $\beta^+$  που θα προέρχεται από πηγή Na-22 (511MeV και 1.275 MeV) που βρίσκεται στον Δημόκριτο.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δαυίδ Στράτος, Κανδαράκης Ιωάννης Λιαπαρίνος Παναγιώτης-«*Εργαστήριο Τεχνολογίας Απεικονιστικών Συστημάτων και Ιοντίζουσων & Μη Ακτινοβολιών*»-Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος-Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (πρώην ΤΕΙ Αθηνών) 2010
2. Δελούσης Σ. , Ελευθεριάδης Χ. ,Ζαμανή-Βαλασιάδου Μ. ,Ζιούτας Κ. ,Λιόλιος Α.,Μανωλοπούλου Μ. ,Παπαστεφάνου Κ. ,Σαββίδης Η.-«*Εργαστηριακές Ασκήσεις Πυρηνικής Φυσικής*»- Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης-Θεσσαλονίκη 2000
3. Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας ΕΕΑΕ ιστοσελίδα <https://eeae.gr/>
4. Καλαμάρης Αθανάσιος- Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία- «*Μελέτη ανιχνευτή Μικρομέγας, τεχνολογίας Microbulk, με μικροπλέγμα χωρισμένο σε λωρίδες*»- Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»
5. Κανδαράκης Ιωάννης-«*Ακτινοδιαγνωστική*»- Εκδόσεις Αράκυνθος
6. Κανδαράκης Ιωάννης-«*Πυρηνική Ιατρική*»- Εκδόσεις Αράκυνθος
7. Καρκαβίτσας Ν.-«*Βασικές Αρχές και Κλινικές Εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής*»-Σχολή Επιστημών Υγείας,Τμήμα Ιατρικής, Εργαστήριο Πυρηνικής Ιατρικής-Πανεπιστήμιο Κρήτης-Ηράκλειο 2002
8. Κόττου Σοφία, «*Φυσική της Απεικόνισής στην Ιατρική*»-Ιατρική Σχολή, Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής-Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών ,Σεπτέμβριος 2007
9. Κούκου Β, Μαρτίνη Ν.- Ακτινοπροστασία – «*Έλεγχοι Ασφάλειας & Ποιότητας Δοσιμετρικά Μεγέθη*»-Εργαστήριο Ακτινοφυσικής, Τεχνολογίας Υλικών και Βιοϊατρικής Απεικόνισης-Αθήνα 2020
10. Κρατημένου Μαρία -Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία-«*Υπολογισμός Θωρακίσεων Ακτινοπροστασίας στην Ιατρική Φυσική*»-Πανεπιστήμιο Πατρών-Πάτρα 2014
11. Οικονομίδης Σαράντος ,Καλκάνης Γεώργιος-«*Ο Νόμος του Αντιστρόφου Τετραγώνου*» στο ολοκληρωμένο τεχνολογικά και Μεθοδολογικά Εκπαιδευτικό Εργαστήριο Φυσικών Επιστημών», *Διδακτική Φυσικών Επιστημών και Νέες Τεχνολογίες στην Εκπαίδευση-5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο-Τεύχος Γ'*
12. Πογαρίδης Δημήτρης-«*Ενσωματωμένα Συστήματα ,Οι Μικροελεγτές AVR και ARDUINO*»-Εκδόσεις Δίσιγμα 2015

13. Ψαρράκος Κυριάκος ,Ε.Μολυβδά-Αθανασοπούλου, Άννα Γκοτζαμάνη-Ψαρράκου, Αναστάσιος Σιούντας-«*Επίτομη Ιατρική Φυσική*»-Εκδότης Κυριάκος Ψαρράκος-University Studio Press - Θεσσαλονίκη 2012
14. Andriy Holovatyy, Vasyl Teslyuk, Natalia Kryvinska and Artem Kazarian-«Development of Microcontroller-Based System for Background Radiation Monitoring»-December 2020
15. Aung Myat Maw<sup>1</sup>, Dr. Thaw Tun Ko, Dr. Khin Khin Lay-«Arduino Based Geiger Muller Counter with SMS Alert System»- Mandalay Technological University, Department of Nuclear Engineering, Patheingyi, Mandalay, Myanmar-International Journal of Science and Research- Volume 7 Issue 8- August 2018
16. Bernd Pohlmann- Bachelor Thesis-«*Emulation of a Geiger-Mueller-Tube on a XILINX FPGA board*»
17. Ebbing, Gammon-«*Γενική Χημεία*»-Εκδόσεις Τραυλός-6<sup>η</sup> έκδοση 2011
18. Floyd-«*Ψηφιακά Ηλεκτρονικά*»-Εκδόσεις Ίων-1<sup>η</sup> Έκδοση 2007
19. Malvino Albert, Bates David-«*Ηλεκτρονική*» Εκδόσεις Τζιόλα-8<sup>η</sup> Έκδοση 2017
20. N.N. Ghuge, Sapna Jasrotia, Anamika and Chilsea Sadhu-« Geiger Muller: A thin end window tube radiation detector»-International Journal of Research in Engineering and Technology- Volume: 04 Issue: 05–May 2015
21. SBM-20 Datasheet
22. Short Michael, Chilenski Mark, D’Asaro Matthew- “Build your own Geiger-Müller counter”-MIT Open Course-2015
23. Short Michael, Chilenski Mark, D’Asaro Matthew- “Radiation Basics”-MIT Open Course-2015
24. Short Michael, Chilenski Mark, D’Asaro Matthew- “Geiger Tube Theory, Dead Time”-MIT Open Course-2015
25. Short Michael, Chilenski Mark, D’Asaro Matthew- “Shielding and Range Radiation Protection”-MIT Open Course-2015-
26. Texas Instruments 555 datasheet
27. Turner James-«*Atoms, Radiation, and Radiation Protection*»-Third Edition-2007
28. Webster John-«*Ιατρική Οργανολογία*» Εκδόσεις Ίων/Ελλην 2004

29. G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley&Sons, Inc., Hoboken, USA, 2000
30. T. Kano, In Phosphor Handbook, ed. by S. Shionoya, W.M. Yen (CRC Press, Boca Raton), pp.177-186, 1999
31. C. Grupen, I. Buvat (eds.), Handbook of Particle Detection and Imaging, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012
32. <https://www.giangrandi.org/electronics/twin-tube-geiger/twin-tube-geiger.shtml>
33. Josehf Murchison-[Instructables.com/Arduino-DIY-Geiger-Counter](https://www.instructables.com/Arduino-DIY-Geiger-Counter)
34. International Atomic Energy Agency, Disposal Options for disused Radioactive Sources, 2005  
[https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS436\\_web.pdf](https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS436_web.pdf)
35. <http://www.spectrumtechniques.com/products/sources/disk-sources-and-source-sets/>