



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Προηγμένα Συστήματα και Μέθοδοι στη Βιοϊατρική Τεχνολογία»

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή Βρωμιούχου Δημητρίου (CeBr₃) για ιατρικές εφαρμογές

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Βελισσαράκος

Αριθμός Μητρώου: 1901

Επιβλέπων Καθηγητής

Χρήστος Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, 23/05/2022

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Χρήστος Μιχαήλ

Επίκουρος Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

Γεώργιος Φούντος

Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

Νεκτάριος Καλύβας

Αναπληρωτής Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

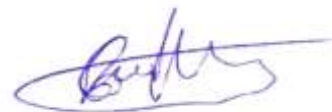
Ο υπογράφων **Κωνσταντίνος Βελισσαράκος** του **Γεωργίου**, με αριθμό μητρώου **1901** φοιτητής του Τμήματος **Μηχανικών Βιοϊατρικής** της Σχολής **Μηχανικών** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της 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 διπλώματός μου».

Ημερομηνία

Ο Δηλών



23/05/2022

Κωνσταντίνος Βελισσαράκος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ελληνικά

Οι σπινθηριστές με τιμές υψηλής απόδοσης φωταύγειας (LY) παρουσιάζουν ενδιαφέρον για εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης, εφαρμογές σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, σε μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) κ.λπ. Το CeBr_3 έχει LY 60000 φωτονίων ανά MeV, τιμή πολύ υψηλότερη από άλλα αποτελεσματικά υλικά, όπως το $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (25000 φωτόνια/MeV). Συνεπώς, οι ιδιότητες ανίχνευσης ακτίνων-Χ του συγκεκριμένου υλικού, θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστούν για εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης. Εξετάστηκαν οι ιδιότητες ανίχνευσης και απορρόφησης ακτίνων-Χ ενός δείγματος CeBr_3 μονοκρυστάλλου, καθώς και η συμβατότητα του παραγόμενου φωτός του, με διάφορους οπτοηλεκτρονικούς αισθητήρες. Σε αυτή τη μελέτη υπολογίστηκαν η κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα (QDE) και η αποδοτικότητα απορρόφησης ενέργειας (EAE) του CeBr_3 . Τα ευρήματα συγκρίθηκαν με δεδομένα για μονοκρυστάλλους $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ και $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$. Το οπτικό φάσμα που παρήχθη από το CeBr_3 βρέθηκε να παρουσιάζει αρκετά καλή συσχέτιση με τη φασματική απόκριση διαφόρων εμπορικών οπτικών αισθητήρων, αποδίδοντας τιμές φασματικής συμβατότητας υψηλότερες από 93% για διάφορες φωτοκαθόδους, π.χ. GaAs (94%), E-S20 (95%), bialkali and multialkali (95-97%), καθώς και με επίπεδους φωτοπολλαπλασιαστές ευαισθησίας θέσης (95-99%). Οι ιδιότητες απορρόφησης ενέργειας του CeBr_3 βρέθηκαν υψηλότερες από εκείνες των $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ και $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ για τάσεις ακτίνων-Χ μεγαλύτερες από 100 kVp. Η κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα ήταν 100% σε όλο το εξεταζόμενο εύρος ενεργειών. Παρόλο που το CeBr_3 είναι υγροσκοπικό και έχει μέτρια πυκνότητα $5,1 \text{ g/cm}^3$, τα αποτελέσματα QDE, EAE και φασματικής συμβατότητας είναι πολλά υποσχόμενα για εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης.

Αγγλικά

Scintillators with high light yield (LY) values are of interest for medical imaging applications, in harsh environments, non-destructive testing (NDT), etc. CeBr_3 has a LY of 60000 photons per MeV, a value much higher than other efficient materials, such as $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (25000 photons/MeV); thus its X-ray detection properties would be of interested to be examined for medical imaging applications. The X-ray detection and absorption properties of a single crystal CeBr_3 sample, along with the compatibility of its produced light with various optoelectronic sensors were examined. In this study the quantum detection (QDE) and the energy absorption efficiency (EAE) of CeBr_3 were calculated. The findings were compared with data for $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ and $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ single crystals. The measured optical spectrum produced by CeBr_3 was well correlated with the spectral response of commercial optical sensors, yielding spectral matching higher than 93% for various photocathodes, e.g., GaAs (94%), E-S20 (95%), bialkali and multialkali (95-97%), as well as with flat panel position sensitive photomultipliers (95-99%). The energy absorption properties of CeBr_3 were found higher than those of $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ and $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ for X-ray tube voltages greater than 100 kVp. The quantum detection efficiency was 100% across the examined energy range. Even though CeBr_3 is hygroscopic and has a mediocre 5.1 g/cm^3 density, the QDE, EAE and spectral correlation results are promising for medical imaging applications.

Λέξεις Κλειδιά: Διπλωματική εργασία, Κρυσταλλικός σπινθηριστής, Ιατρική απεικόνιση, CeBr_3 .

Keywords: Final project, Single crystals, medical imaging, CeBr_3 .

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Χρήστο Μιχαήλ για την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής, δίνοντας μου έτσι την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο σημαντικό και ενδιαφέρον ζήτημα. Τον ευχαριστώ για την καθοδήγησή του, κατά την διάρκεια συγγραφής, καθώς και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και επισημάνσεις του, οι οποίες συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Επιπρόσθετα αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου διότι μου δίδαξαν να θέτω στόχους και να αγωνίζομαι για την επίτευξή τους. Τέλος ευχαριστώ όλους όσους, με διάφορους τρόπους, στάθηκαν δίπλα μου τα τελευταία χρόνια, στηρίζοντάς με σε κάθε σημαντικό βήμα.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Εισαγωγή | 8 |
| Κεφάλαιο 1 | 9 |
| 1.1 Ιστορική αναδρομή σε συστήματα απεικόνισης | 9 |
| 1.2 Ακτίνες-Χ | 9 |
| 1.2.1 Ανίχνευση ακτίνων Χ-Ανιχνευτής ακτίνων-Χ | 10 |
| 1.2.2 Ακτίνες-Χ εφαρμογές | 13 |
| 1.2.2.1 Ακτινογραφία | 13 |
| 1.2.2.2 Μαστογραφία | 14 |
| 1.2.2.3 Φθοροσκόπηση | 17 |
| 1.2.2.4 Αξονική Τομογραφία (CT) | 17 |
| 1.2.2.5 Ακτινοθεραπεία..... | 18 |
| 1.2.2.6 Πυρηνική Ιατρική | 18 |
| 1.2.2.7 Ασφάλεια Αεροδρομίου | 21 |
| 1.2.2.8 Αποκάλυψη Πλαστών Τεχνών | 21 |
| 1.2.2.7 Φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων-Χ | 22 |
| Κεφάλαιο 2 | 23 |
| 2.1 Κρυσταλλικοί σπινθηριστές για απεικονιστικές εφαρμογές | 23 |
| 2.2 Χαρακτηριστικά κρυστάλλου Βρωμιούχου Δημητρίου ($CeBr_3$) | 27 |
| 2.3 Εφαρμογές κρυστάλλου Βρωμιούχου Δημητρίου ($CeBr_3$) | 32 |
| 2.3.1 Εφαρμογή $CeBr_3$ στην βελτίωση της ενεργειακής διακριτική ικανότητας | 32 |
| 2.3.2 Εφαρμογή στην ανίχνευση ακτινοβολίας γ | 32 |
| 2.3.3 Εφαρμογή στην πυρηνική φυσική..... | 33 |
| 2.3.4 Εφαρμογή στην Φασματοσκοπία πλανητικών ακτίνων γάμμα | 34 |
| 2.3.5 Εφαρμογή $CeBr_3$ σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα | 36 |
| 2.3.6 Χρήση $CeBr_3$ σε μετρήσεις ακτινοβολίας περιβάλλοντος | 37 |
| 2.3.7 Εφαρμογή στον έλεγχο του εδάφους με φασματόμετρο βασισμένο σε κρύσταλλο $CeBr_3$ | 40 |
| 2.3.8 Εφαρμογή $CeBr_3$ σε Πυρηνικούς Σταθμούς..... | 42 |
| 2.3.9 Εφαρμογή $CeBr_3$ σε μετρήσεις φάσματος..... | 44 |
| 2.3.10 Εφαρμογή σε μορφή λεπτών μεμβρανών | 45 |
| 2.3.11 Εφαρμογή $CeBr_3$ για μέτρηση φασμάτων..... | 46 |
| 2.3.12 Μελλοντικές Εφαρμογές..... | 47 |
| Κεφάλαιο 3 | 49 |
| 3.1 Πειραματική Διαδικασία..... | 49 |
| 3.1.1 Κβαντική Ανιχνευτική Αποδοτικότητα (QDE)..... | 49 |

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή $CeBr_3$ για ιατρικές εφαρμογές

| | |
|--|----|
| 3.1.2 Απόδοση Ενεργειακής Απορρόφησης (ΕΑΕ) | 50 |
| 3.1.3 Παράγοντας Φασματικής Συμβατότητας (SMF) | 50 |
| Κεφάλαιο 4 | 51 |
| 4.1 Αποτελέσματα και συζήτηση | 51 |
| Βιβλιογραφία..... | 56 |

Εισαγωγή

Τον τελευταίο αιώνα η ιατρική απεικόνιση έχει παρουσιάσει μεγάλη εξέλιξη, με τον μηχανισμό λήψης ακτινογραφίας να παίζει θεμελιώδη ρόλο. Με την βοήθεια του οπτικού αισθητήρα, γίνεται η μετατροπή των ακτίνων-Χ σε φωτόνια μέσω των κατάλληλων υλικών σπινθηρισμού.

Οι σπινθηριστές χρησιμοποιούνται ευρέως στη φυσική υψηλών ενεργειών, στην εθνική ασφάλεια και σε διάφορους κλάδους της ιατρικής απεικόνισης, όπως η τομογραφία (αξονική τομογραφία-CT, τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων-PET) ή στην προβολική απεικόνιση (ακτινογραφία και μαστογραφία). Σε τελευταίας τεχνολογίας PET είναι αναγκαίοι σπινθηριστές που έχουν ως κύρια χαρακτηριστικά τον μικρό χρόνο απόσβεσης, την υψηλή πυκνότητα και την υψηλή απόδοση φωτός. Υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά είναι τα: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ -BGO, το Lu_2SiO_5 :Ce-LSO:Ce, το CaF_2 :Eu και το $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: - LuAG: Ce μεταξύ άλλων, τα οποία είναι κατάλληλα για χρήση σε ιατρική απεικόνιση.

Οι σπινθηριστές με ενεργοποιητή Δημήτριο (Ce) έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης, ανίχνευσης φορτισμένων σωματιδίων, σε ανιχνευτές που μελετούν τη διάσπαση βήτα, στην αναζήτηση σκοτεινής ύλης που υπάρχει με τη μορφή Ασθενώς Αλληλεπιδρώντων Σωματιδίων με Μάζα (WIMP), χαμηλής ενέργειας ανιχνευτές ακτινοβολίας, εφαρμογές χρόνου πτήσης (TOF), κινητές κάμερες Compton, ηλιακά κύτταρα, εθνική ασφάλεια κ.λπ.

Αντίθετα ο σπινθηριστής Βρωμιούχου Δημητρίου ή αλλιώς CeBr_3 παρουσιάζει απόδοση φωταύγειας (LY) 60 φωτονίων/keV, η οποία είναι περίπου 2.5 φορές η αντίστοιχη τιμή LY του LuAG:Ce (25 φωτόνια/keV). Επιπλέον, έχει πολύ μικρό χρόνο απόσβεσης περίπου 19ns, πυκνότητα 5,18 g/cm³ και μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής στα 380nm.

Ο εν λόγω σπινθηριστής βρίσκει εφαρμογή σε εφαρμογές TOF-PET, σε πυρηνικούς και real time ακτινοσκοπικούς ανιχνευτές και σε φασματομέτρα ακτίνων γάμμα. Το μειονέκτημα του CeBr_3 είναι η υγροσκοπικότητά του.

Στην συγκεκριμένη εργασία, ιδιαίτερη ανάλυση έγινε στην απορρόφηση των ακτίνων-Χ του σπινθηριστή CeBr_3 καθώς επίσης και η φασματική συμβατότητά του με οπτικούς αισθητήρες. Επιπλέον έγινε υπολογισμός και σύγκριση των παραμέτρων QDE και EAE ενός κρυστάλλου CeBr_3 με προηγούμενα δημοσιευμένα δεδομένα για τους κρυστάλλους CaF_2 :Eu και LuAG:Ce (Linardatos et al., 2022).

Κεφάλαιο 1

1.1 Ιστορική αναδρομή σε συστήματα απεικόνισης

Η ιατρική απεικόνιση ξεκίνησε το 1895, από τον Γερμανό καθηγητή φυσικής, Wilhelm Rontgen, ο οποίος ήταν και ο άνθρωπος που εφηύρε την ακτινογραφία. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες, οι οποίες κατά το πέρασμά τους από το σώμα, προβάλλονται σε εικόνες μέσω της φωτοευαίσθητης πλάκας που υπάρχει πίσω από το σώμα. Λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων που διαθέτουν οι ιστοί στο σώμα, ανιχνεύονται και με την βοήθεια της πλάκας μπορούν να προβληθούν τυχόν ανωμαλίες. Στις αρχές του 1900 διαπιστώθηκε ότι με τη χρήση φαρμακευτικών σκιαγραφικών παραγόντων είναι εφικτή η προβολή οργάνων και αιμοφόρων αγγείων (Bradley, 2008).

1.2 Ακτίνες-Χ

Οι ακτίνες-Χ έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις ακτίνες φωτός, με διαφορά τα μήκη κύματος που είναι 1000 φορές μικρότερα από αυτά του φωτός.

Η ανακάλυψη του Röntgen χαρακτηρίστηκε ιατρικό θαύμα και οι ακτινογραφίες έγιναν σύντομα ένα σημαντικό διαγνωστικό εργαλείο. Το 1897, χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία της ακτινογραφίας κατά τη διάρκεια του Βαλκανικού Πολέμου, όπου ο στόχος ήταν είτε να δουν που είναι οι σφαίρες είτε να δουν σπασμένα οστά στους τραυματίες (Nüsslin, 2020).

Η ανακάλυψη των Ακτινών-Χ, ήταν μια από τις σημαντικότερες του αιώνα και είναι χαρακτηριστική η επίδραση που είχαν στην επιστήμη και στην τεχνολογία. Η παρέμβαση είναι χαρακτηριστική σε κάθε τμήμα της υγείας και της υγειονομικής περίθαλψης. Καμία από τις καινοτομίες του τελευταίου αιώνα, δεν είχε τέτοια επίδραση στην ιατρική απεικόνιση (Nüsslin, 2020).

Το πειραματικό σκέλος της εργασίας του Roentgen, αποτελούταν από έναν γυάλινο θάλαμο με δύο κομμάτια κλειστού μετάλλου σε κάθε άκρο που συνδέονταν σε μια μπαταρία. Την στιγμή που εκείνος εφάρμοζε υψηλές τάσεις διαπίστωσε ότι ένα κομμάτι φωσφόρου, που βρίσκεται αλλού στο δωμάτιο, έλαμπε.

Αναλυτικότερα όταν εφαρμόζεται μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων, στην προκειμένη περίπτωση στη λυχνία Crookes, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή αλλιώς κάθοδο. Όταν ένα ηλεκτρόνιο βομβαρδίζει το θετικό ηλεκτρόδιο, η ενέργεια του μεταφέρεται στον πυρήνα του ατόμου και ακολούθως απελευθερώνεται εκ νέου από τον πυρήνα με μια μορφή ακτινοβολίας την λεγόμενη ακτινοβολία-Χ.

Λόγω της υψηλής τους ενέργειας, οι ακτίνες-Χ μπορούν να διεισδύσουν σε πολλά αντικείμενα, αλλά από υλικό σε υλικό η διείσδυση διαφέρει. Αυτό γίνεται γιατί η διείσδυση εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού. Ένα χαρακτηριστικό

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή $CeBr_3$ για ιατρικές εφαρμογές

παράδειγμα είναι ότι οι ακτίνες-Χ μπορούν να διεισδύσουν ευκολότερα στο λίπος παρά στα οστά.

Τον Νοέμβριο του 1895 τα πρώτα πειράματα του Roentgen πραγματοποιήθηκαν και μετά από έναν χρόνο άλλοι επιστήμονες μπόρεσαν να επιτύχουν τα ίδια αποτελέσματα με τον ίδιο εξοπλισμό.

Σύντομα ανακαλύφθηκε η ευεργετική λειτουργία των ακτινών-Χ στην καταπολέμηση και πιο συγκεκριμένα στην συρρίκνωση των όγκων.

Αρνητικός παράγοντας ήταν η υψηλή έκθεση σε ακτινοβολία χωρίς προφανή λόγο. Για παράδειγμα, σε στούντιο φωτογραφίας που προσέφεραν πορτρέτα με ακτίνες-Χ. Με την πάροδο του χρόνου, οι πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία έγιναν καλύτερα κατανοητοί και η χρήση των ακτίνων-Χ περιορίστηκε στους ιατρούς, αν και η ακτινογραφία συνέχισε να χρησιμοποιείται σε καταστάματα παπουτσιών μέχρι τη δεκαετία του 1950 για να μελετήσει την εφαρμογή των υποδημάτων (Sunnybrook, 2022).

Ωστόσο, μετά από κάποια χρόνια, δεν ήταν λίγοι οι ερευνητές που άρχισαν να αναφέρουν περιστατικά εγκαυμάτων δέρματος μετά από έκθεση σε ακτίνες-Χ. Με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τον βοηθό του Thomas Edison, Clarence Dally, ο οποίος δούλευε ως επί το πλείστον με ακτίνες-Χ, πέθανε από καρκίνο του δέρματος (Nüsslin, 2020).

1.2.1 Ανίχνευση ακτίνων-Χ. Ανιχνευτής ακτίνων-Χ

Για να αναλυθεί η αρχή ανίχνευσης των φωτονίων, πρέπει να κατανοηθεί η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη. Κάθε τύπος σωματιδίου αλληλοεπιδρά με διαφορετικό τρόπο, για αυτόν τον λόγο πρέπει να αναλυθούν οι αλληλεπιδράσεις των φωτονίων υψηλής ενέργειας ξεχωριστά.

Παρόλο που είναι γνωστές κάποιες από τις αλληλοεπιδράσεις, υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης με την ύλη. Επιπλέον, η ισχύς των αλληλεπιδράσεων που στηρίζεται στην ενέργεια των ακτίνων-Χ και τη στοιχειακή σύνθεση του υλικού, αξίζει να σημειωθεί ότι εξαρτάται ελάχιστα από τις χημικές ιδιότητες, καθώς η ενέργεια των φωτονίων των ακτίνων-Χ είναι πολύ υψηλότερη από τις ενέργειες χημικής δέσμησης. Η φωτοηλεκτρική απορρόφηση είναι αρκετά κοινή σε χαμηλές ενέργειες ακτίνων-Χ, ενώ η σκέδαση Compton εμφανίζεται αρκετά συχνά σε υψηλότερες ενέργειες.

Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο το φωτόνιο απορροφάται πλήρως, ενώ μόνο μερική ενέργεια εναποτίθεται σε οποιαδήποτε σκέδαση Compton. Η πιθανότητα φωτοηλεκτρικής απορρόφησης ανά μονάδα μάζας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\tau(\text{φωτοηλεκτρικό}) = \text{σταθερά} \times ZN/E^{3.5} \quad (1)$$

Z: Ατομικός αριθμός

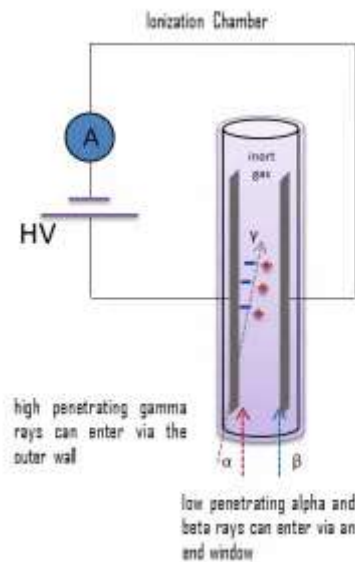
Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή $CeBr_3$ για ιατρικές εφαρμογές

N: Εκθέτης που κυμαίνεται από 4 έως 5

Η πιθανότητα σκέδασης Compton ανά μία αλληλεπίδραση με ένα άτομο αυξάνεται γραμμικά με τον ατομικό αριθμό Z , αυτό γίνεται γιατί είναι εξαρτώμενη από τον αριθμό των ηλεκτρονίων, τα οποία είναι διαθέσιμα για σκέδαση στο άτομο στόχο.

Οι ανιχνευτές μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την ευαισθησία των υλικών και τις μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση:

Οι ακτίνες γάμμα αντιμετωπίζουν δυσκολία κατά την διείσδυση στα μεταλλικά τοιχώματα του εκάστοτε θαλάμου. Για αυτό άλλωστε τον λόγο, οι θάλαμοι ιονισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της ακτινοβολίας γάμμα και των ακτίνων- X και αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιείται ανιχνευτής χωρίς παράθυρο. Οι θάλαμοι ιονισμού συχνά χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των επιπέδων της ακτινοβολίας γάμμα.



Εικόνα 1. Θάλαμος ιονισμού (Nuclear Power, 2022).

Για την ανίχνευση και την καταμέτρηση του ποσοστού εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε διάφορες εφαρμογές, χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι μετρητές σπινθηρισμού. Λαμβάνουν μέρος σε εφαρμογές όπως:

- ❖ Επίβλεψη προσωπικού και περιβάλλοντος για τυχόν ραδιενεργή μόλυνση
- ❖ Ιατρική απεικόνιση
- ❖ Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα
- ❖ Πυρηνική ασφάλεια
- ❖ Ασφάλεια πυρηνικών εγκαταστάσεων

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή CeBr₃ για ιατρικές εφαρμογές

Σημαντικό χαρακτηριστικό σε αυτούς τους μετρητές είναι το κόστος που είναι ιδιαίτερα χαμηλό, αυτός είναι και ένας από τους λόγους που χρησιμοποιούνται ευρέως.

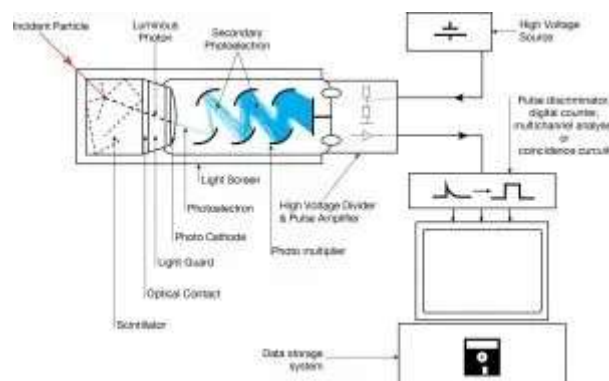
Επιπλέον οι μετρητές σπινθηρισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν τα κάτωθι είδη ακτινοβολίας:

- ❖ Ακτινοβολία Άλφα
- ❖ Ακτινοβολία Βήτα
- ❖ Ακτίνων-Χ
- ❖ Ακτίνων Γάμμα

Συνήθως προτιμώνται σπινθηριστές για τον εντοπισμό ακτίνων γάμμα οι οποίοι διαθέτουν μεγάλο ατομικό αριθμό. Πιο συχνά χρησιμοποιείται το NaI:TI και αυτό γιατί αναστέλλεται η λειτουργία του ιωδιούχου νατρίου με την βοήθεια του Ιωδίου. Οι σπινθηριστές τέτοιου τύπου έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ❖ Υψηλή πυκνότητα,
- ❖ Υψηλό ατομικό αριθμό
- ❖ Μικρούς χρόνους απόσβεσης του παλμού

Εάν συγκριθεί η ταχύτητα σπινθηρισμού ανάμεσα σε οργανικούς και ανόργανους κρυστάλλους, στους ανόργανους είναι πιο αργή. Παρουσιάζουν υψηλή απόδοση για την ανίχνευση ακτίνων γάμμα και είναι σε θέση να χειρίζονται υψηλά ποσοστά καταμέτρησης. Το θετικό στοιχείο που έχουν οι ανόργανοι είναι η ευαισθησία θέσης και αυτό λόγω του ότι μπορεί να μεταβληθεί το σχήμα τους. Για αυτόν τον λόγο βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στην ιατρική απεικόνιση, καθώς χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των ακτίνων-Χ και γάμμα. Οι ανόργανοι σπινθηριστές είναι αποδοτικότεροι στην ανίχνευση των ακτίνων γάμμα και των ακτίνων-Χ (Nuclear Power, 2022).



Εικόνα 2. Συσκευή με κρύσταλλο σπινθηριστή, φωτοπολλαπλασιαστή και στοιχεία λήψης δεδομένων (Nuclear Power, 2022).

1.2.2 Ακτίνες-Χ εφαρμογές

1.2.2.1 Ακτινογραφία

Το σημαντικότερο ρόλο σήμερα στην ιατρική έχουν οι ακτινογραφίες. Καθώς προσφέρουν εικόνες του εσωτερικού του σώματος του ασθενούς, απεικονίζοντας τα οστά του. Οι ακτίνες-Χ περνούν πιο εύκολα από το δέρμα από ότι από τα οστά του ασθενούς. Αυτός είναι ο λόγος που τα οστά στις ακτινογραφίες φαίνονται πιο ανοιχτόχρωμα. Χρησιμοποιώντας τις ακτινογραφίες, οι γιατροί μπορούν να αναπτύξουν αποτελεσματικά σχέδια θεραπείας (Mould, 1995).

Μια ακτινογραφία θώρακα χρησιμοποιείται συχνότερα για τον εντοπισμό ανωμαλιών στους πνεύμονες. Ωστόσο, μπορεί επίσης να ανιχνεύσει ανωμαλίες στην καρδιά, την αορτή και τα οστά της θωρακικής περιοχής. Οι ακτινογραφίες θώρακα χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση:

- ❖ Κύστης
- ❖ Όγκου
- ❖ Άσθματος
- ❖ Καρκίνου
- ❖ Καρδιακής ανεπάρκειας
- ❖ Κατάγματος

Είναι δεδομένο ότι ο κίνδυνος από την ακτινοβολία της ακτινογραφίας είναι αρκετά μικρός, ωστόσο αυτό δεν σημαίνει ότι μια έγκυος γυναίκα δεν θα πρέπει να προσέχει και να τις αποφεύγει. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται ακόμα και οι ελάχιστες πιθανότητες να υπάρξει κάποια ενδεχόμενη βλάβη στο έμβρυο. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε το γεγονός ότι ο γιατρός θα πρέπει να ενημερώνεται για ενδεχόμενη ύπαρξη εγκυμοσύνης πριν πάρει την απόφαση να προτείνει την λήψη ακτινογραφίας.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι από περιοχή σε περιοχή που γίνεται η εκάστοτε ακτινογραφία δεν είναι ίδιος ο βαθμός έκθεσης των γενετικών οργάνων σε ακτινοβολία. Μεγαλύτερη έκθεση υπάρχει όταν η περιοχή λήψης ακτινογραφίας είναι:

- ❖ Η κοιλιά
- ❖ Το στομάχι
- ❖ Τα νεφρά
- ❖ Η μέση
- ❖ Η λεκάνη

Η λήψη ακτινογραφίας στις περιοχές αυτές μπορεί δυνητικά να εκθέσει ένα αγέννητο παιδί σε άμεσο κίνδυνο. Η εξέταση η οποία σχετίζεται με λήψη ακτινογραφίας μπορεί να τροποποιηθεί για να μειωθεί η έκθεση σε ακτινοβολία.

Ένα άλλο μεγάλο θέμα συζήτησης είναι αν ενδείκνυται μια γυναίκα να βγάλει ακτινογραφία την περίοδο που θηλάζει. Η απάντηση είναι πως μπορεί καθώς μια

συμβατική ακτινογραφία δεν μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο μωρό καθιστώντας με αυτόν το τρόπο τον θηλασμό ασφαλής.

Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι δεν είναι λίγες οι φορές που οι μαστογραφίες είναι δύσκολο να διαβαστούν στις θηλάζουσες γυναίκες. Παρόλο που μια γυναίκα μπορεί να θηλάζει, η χορήγηση σκιαγραφικού δεν είναι σκιαγραφικός παράγοντας από την στιγμή που δεν χορηγείται παράλληλα ραδιενεργό ισότοπο για την αντίθεση. Παρόλα αυτά, εάν είναι απαραίτητη η χορήγηση ραδιενεργού ισότοπου, υπάρχει η πιθανότητα ο γιατρός να προτείνει τερματισμό του θηλασμού για μικρό χρονικό διάστημα. Εάν η μαστογραφία είναι συμπληρωματική με εξέταση πυρηνικής ιατρικής στην οποία έχει χορηγηθεί ραδιενεργό ισότοπο συνίσταται ο τερματισμός του θηλασμού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και σύμφωνα με τις οδηγίες που θα δοθούν (Cunha and Shiel, 2020).

1.2.2.2 Μαστογραφία

Η εξέταση της μαστογραφίας χρησιμοποιείται για να είναι εφικτή η διάγνωση του καρκίνου. Το είδος καρκίνου Triple-negative breast cancer (TNBC), είναι αρκετά δύσκολο στον εντοπισμό του κατά την εξέταση της μαστογραφίας. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι ο συγκεκριμένος τύπος καρκίνου έχει υψηλή θνησιμότητα ακόμη και στην περίπτωση που εντοπιστεί στα αρχικά στάδια.

Η συγκεκριμένη εξέταση βοηθάει στην έγκαιρη διάγνωση του καρκίνου του μαστού, με κύριο στόχο την μείωση του ποσοστού θνησιμότητας. Επιπλέον, πληθυσμιακά δεδομένα δείχνουν ότι τα ποσοστά θνησιμότητας από καρκίνο του μαστού είναι υψηλότερα για το TNBC σε σύγκριση με το μη TNBC ακόμη και μετά από διαστρωμάτωση κατά στάδιο κατά τη διάγνωση (Bayard et al., 2021).

Όσον αφορά τον πιο κοινό τύπο καρκίνο στις γυναίκες, είναι αυτός του πνεύμονα, ενώ ο δεύτερος αυτός του μαστού. Κατά την Αμερικάνικη Εταιρία Καρκίνου, τα ποσοστά εμφάνισης καρκίνου είναι τα κάτωθι:

- ❖ Μείωση 2,1% εμφάνισης καρκίνου του μαστού ετησίως.
- ❖ Αύξηση 0,3% ετησίως εμφάνισης καρκίνου του μαστού από τα έτη 2012 έως 2016.

Αξίζει να αναφερθεί ότι μελέτες που χρησιμοποίησαν Surveillance, Epidemiology, and End Results (SEER), έδειξαν πτώση στην θνησιμότητα του καρκίνου του μαστού. Το 2020 υπήρχαν 276.489 νέες επεμβατικές διαγνώσεις καρκίνου του μαστού και 42.170 θάνατοι. Οι Siegel et al. υποστήριξαν πρόσφατα ότι η αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται μείωση της θνησιμότητας, αλλά από το 2010 η μείωση της θνησιμότητας από καρκίνο του μαστού επιβραδύνθηκε σε σύγκριση με άλλους καρκίνους.

Οι τακτικές εξετάσεις μαστογραφίας, συνεπάγονται μείωση της θνησιμότητας από καρκίνο του μαστού. Θεωρείται σίγουρο, ότι ο καρκίνος του μαστού που ανιχνεύεται μέσα από τον προσυμπτωματικό έλεγχο, παρουσιάζει πολύ μικρότερη θνησιμότητα από αυτόν που ανιχνεύεται κατόπιν παρουσίας συμπτωμάτων. Σαφέστατα ο

προσυμπτωματικός έλεγχος για τον καρκίνο δεν είναι ακίνδυνος, για αυτόν τον λόγο άλλωστε, η έναρξη τακτικού ελέγχου βασίζεται συχνά στην ηλικία και σε τεκμηριωμένους παράγοντες κινδύνου.

Δεν είναι λίγοι οι οργανισμοί που έχουν ήδη δημοσιεύσει οδηγίες σχετικά με τον τακτικό έλεγχο του καρκίνου του μαστού. Πιο συγκεκριμένα οι κάτωθι οργανισμοί:

- ❖ Αμερικάνικη Εταιρεία Καρκίνου
- ❖ Ομάδα Προληπτικών Υπηρεσιών των Ηνωμένων Πολιτειών
- ❖ Αμερικάνικη Ακαδημία Οικογενειακών Ιατρών

Αν και αποτελούν πολύτιμο κλινικό εργαλείο, αυτές οι οδηγίες συχνά αντιτίθενται μεταξύ τους σχετικά με την κατάλληλη ηλικία έναρξης και τη συχνότητα που πρέπει να γίνονται οι εξετάσεις. Επιπλέον, καθώς η έρευνα συνεχίζεται, υπάρχει η πιθανότητα οι νέες κατευθυντήριες οδηγίες να αντιτίθενται με παλαιότερες.

Η έλλειψη συνέπειας μεταξύ των οδηγιών υπονομεύει σημαντικά το πιθανό όφελος των προσυμπτωματικών εξετάσεων και οδηγεί σε μη συμμόρφωση, αδυναμία υιοθέτησης επικαιροποιημένων οδηγιών, διαφωνία μεταξύ γιατρών και σύγχυση ασθενών. Αυτά τα αποτελέσματα είναι από την περίοδο 2009 και μετά, καθώς το 2009 υπήρξαν οι κατευθυντήριες γραμμές του US preventive services task force (USPSTF), όπου πρότειναν στις γυναίκες να ξεκινούν τακτικό έλεγχο σε ηλικία 50 ετών και να ελέγχονται ανά διετία. Αυτό ήταν σε πλήρη αντίθεση με τις προηγούμενες οδηγίες, οι οποίες συνιστούσαν την έναρξη τακτικού ελέγχου σε ηλικία 40 ετών και τον έλεγχο κάθε χρόνο.

Σύμφωνα με το ACS, οι γυναίκες οι οποίες βρίσκονται στην ηλικιακή ομάδα 40-44 ετών έχουν την επιλογή να ξεκινήσουν ετήσιο έλεγχο για τον καρκίνο του μαστού. Οι γυναίκες στην ηλικιακή ομάδα 45 - 54 ετών συμβουλεύονται να κάνουν μαστογραφίες ετησίως και οι κατευθυντήριες οδηγίες για τις γυναίκες ηλικίας 55 ετών και άνω είναι είτε να στραφούν σε διετή μαστογραφία είτε να συνεχίσουν τις ετήσιες μαστογραφίες κατά την κρίση τους.

Παρά τη σημασία του προσυμπτωματικού ελέγχου για τον καρκίνο του μαστού, είναι συνηθισμένο το φαινόμενο της μη συμμόρφωσης ειδικά σε ασθενείς που έχουν ιδιαίτερα χαμηλό εισόδημα. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα εύρος δειγματοληπτικού ελέγχου 210 νοσηλεύομενων γυναικών ηλικίας 50-75 ετών, το 13% δεν είχε κάνει ποτέ μαστογραφία και το 39% είχε καθυστερήσει να πραγματοποιήσει. Οι πιο συχνοί λόγοι για τους οποίους δεν συμμορφώνονται με τον προληπτικό έλεγχο είναι:

- ❖ Οικονομικά προβλήματα
- ❖ Θρησκευτικές πεποιθήσεις
- ❖ Έλλειψη πρόσβασης στην υγειονομική περίθαλψη (Pal Mudaranthakam et al., 2021).

Οι πιο συχνές μέθοδοι για την ανίχνευση καρκίνου του μαστού είναι σαφώς η μαστογραφία αλλά παράλληλα ο υπέρηχος και η ψηφιακή τομοσύνθεση. Ο σημαντικότερος δείκτης στον καρκίνο του μαστού είναι οι μικροαποτιτανώσεις (μCs),

καθώς ενώ είναι μικρός σε μέγεθος, εξασθενεί πιο εύκολα με την χρήση ακτίνων-Χ από ότι ο περιβάλλοντας ιστός, με αποτέλεσμα να γίνονται ορατές. Ο ρόλος των ακτίνων-Χ διπλής ενέργειας είναι να μειώσει την αντίθεση ανάμεσα σε λιπώδη και αδενικό ιστό. Αυτό γίνεται καθώς βελτιώνει την ανιχνευσιμότητα των μικροαποτιτανώσεων (μCs).

Οι μελέτες έχουν δείξει ότι το ελάχιστο πάχος αποτιτάνωσης είναι 250 μm . Προηγούμενη μελέτη προσομοίωσης έδειξε ότι για να επιτευχθεί βελτιωμένη ανιχνευσιμότητα αποτιτανώσεων, πρέπει να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες ενέργειες από αυτές στο μαστογραφικό εύρος. Επιπλέον, ανιχνευτές όπως οι ανιχνευτές συζευγμένου φορτίου (CCD) και οι συμπληρωματικοί ημιαγωγοί μεταλλικού οξειδίου (CMOS), με ενεργό μέγεθος μm μικρότερο από αυτό των σημερινών συσκευών flat panel (70–100 μm), μπορούν να βελτιώσουν την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των μικροαποτιτανώσεων (Κουκου et al., 2015).

Σε ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό και συγκεκριμένα στο 86% εμφανίζονται οι μικροαποτιτανώσεις κατά την μαστογραφία σε ηλικία 76-79 ετών. Οι μη ψηλαφητοί καρκίνοι που ανέρχονται σε ένα ποσοστό από 30 έως 50% ανιχνεύονται αποκλειστικά μέσω της εμφάνισης μCs κατά τη διάρκεια μιας μαστογραφίας. Ο πιο κοινός τύπος διηθητικού καρκίνου είναι ο in situ (DCIS), ο οποίος ανιχνεύεται λόγω της ύπαρξης αποτιτανώσεων στις μαστογραφίες.

Οι περισσότερες από τις αποτιτανώσεις συναντιούνται μέσα σε καλοήθεις βλάβες και μόνο στο 20% συναντιούνται σε κακοήθεις βλάβες. Η ψηφιακή μαστογραφία διπλής ενέργειας (DEDM) έχει τον ρόλο της καταστολής της αντίθεσης ανάμεσα σε λιπώδους και αδενικούς ιστούς έτσι ώστε να βελτιωθεί η ανιχνευσιμότητα των μCs και των μαζών. Για να εφαρμοστεί η τεχνική, χρειάζονται δύο ψηφιακές εικόνες, που λαμβάνονται με φάσματα ακτίνων-Χ. Στην συνέχεια γίνεται αφαίρεση του λογαριθμικού μετασχηματισμού έτσι ώστε να ληφθεί μια εικόνα που ενισχύει τις μCs .

Οι Asaga et al χρησιμοποιήσαν τη μέθοδο DEDM. Η μέθοδος αυτή εκτελέστηκε σε κλινικές εφαρμογές, απαιτήθηκε μια λυχνία με άνοδο μολυβδαινίου, στα 28 και 40 kV μαζί με ένα σύστημα υπολογιστικής ακτινογραφίας. Για την εν λόγω μελέτη χρησιμοποιήθηκε το σύστημα GE Senographe 2000D, το οποίο διαθέτει 2 ανόδους που είναι διπλής τροχιάς. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιήθηκε σε μελέτες διπλής ενέργειας για ανίχνευση μCs , με υψηλές τάσεις που κυμαίνονται από 25 έως 49 kV και έναν επίπεδο ανιχνευτή άμορφου υδρογονωμένου πυριτίου ($aSi:H$) σε συνδυασμό με επίστρωση σπινθηριστή ιωδιούχου καισίου (CsI:Tl) με πρόσμειξη θαλλίου (Κουκου et al., 2017).

Οι αποτιτανώσεις τύπου I αποτελούνται από οξαλικό ασβέστιο (CaC_2O_4) και σχετίζονται με καλοήθεις βλάβες του μαστού ή το πολύ με μη διηθητικό λοβιακό καρκίνωμα in situ. Οι αποτιτανώσεις τύπου II που αποτελούνται από φωσφορικό ασβέστιο είναι συνδυασμένες με κακοήθεις βλάβες ενώ αυτές που αποτελούνται από ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) σχετίζονται με καλοήθεις βλάβες του μαστού.

Η τεχνική της μαστογραφίας και της Διπλής Ενέργειας χρησιμοποιούνται για να παρέχουν πληροφορίες για την σύνθεση των ασβεστοποιήσεων ενώ παράλληλα ταξινομούν τις καλοήθεις και κακοήθεις βλάβες. Έρευνες οι οποίες είναι μη επεμβατικές και χρησιμοποιούν την φασματοσκοπία τύπου Raman, διέκριναν κακοήθεις και καλοήθεις βλάβες σε βάθη διείσδυσης από 0,96 έως 27 mm (Martini et al., 2017).

Οι Koukou et al. παρουσίασαν μια πειραματική μέθοδο διπλής ενέργειας για την ανίχνευση των μικροαποτιτανώσεων. Χρησιμοποίησαν μια τροποποιημένη ακτινογραφική λυχνία, με άνοδο βολφραμίου που λειτουργεί στα 40 kV με 100 μm φίλτρο καδμίου και στα 70 kV με 1000 μm φίλτρο χαλκού για χαμηλή και υψηλή ενέργεια, αντίστοιχα.

Η μέση αδενική δόση και η αναλογία αντίθεσης προς θόρυβο υπολογίστηκαν από τις εικόνες αφού πρώτα έγινε αφαίρεση της διπλής ενέργειας για διάφορες δόσεις επιφάνειας εισόδου. Το ελάχιστο ορατό πάχος αποτιτάνωσης μειώθηκε στα 93 μm με μια μέση αδενική δόση 1,62 mGy μετά από επεξεργασία στις εικόνες διπλής ενέργειας που ελήφθησαν από το ανομοιογενές ομοίωμα. Λόγω των μικρών pixel του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε, η μέθοδος pixel binning επιτράπηκε να εφαρμοστεί στις τελικές εικόνες διπλής ενέργειας αυξάνοντας την αναλογία αντίθεσης προς θόρυβο. Το συμπέρασμα ήταν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με αξιώσεις για την βελτίωση της ορατότητας των αποτιτανώσεων σε εικόνες διπλής ενέργειας (Martini et al., 2020).

1.2.2.3 Φθοροσκόπηση

Μια τεχνική για την παρακολούθηση της ροής του αίματος είναι η Φθοροσκόπηση, η οποία χρησιμοποιεί ακτίνες-X μαζί με μια οθόνη φθορισμού για την διακριτική ικανότητα κινούμενων ή σταθερών δομών στο σώμα σε πραγματικό χρόνο, όπως η παρακολούθηση του καρδιακού παλμού.

Μια κλασική εφαρμογή είναι η καρδιοαγγειοπλαστική, η οποία χρησιμοποιεί την τεχνική της Φθοροσκόπησης με παράγοντα αντίθεσης, έτσι ώστε να είναι εφικτή η καθοδήγηση ενός καθετήρα εσωτερικής σπείρωσης για να επιτευχθεί το άνοιγμα τυχών φραγμένων αρτηριών. Επιπλέον, η τεχνική της Φθοροσκόπησης χρησιμοποιείται για την ακριβή τοποθέτηση οργάνων σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στο σώμα, όπως κατά τη διάρκεια της επισκληριδίου (Cunha and Shiel, 2020; Tian et al., 2022).

1.2.2.4 Αξονική Τομογραφία (CT)

Το 1940 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η τομογραφία με ακτίνες-X, η οποία βοηθάει στην απεικόνιση όλων των ιστών του σώματος. Η σάρωση συγκεκριμένης περιοχής του σώματος του ασθενή, έγινε εφικτή με την περιστροφή της λυχνίας των ακτίνων-X γύρω από τον ασθενή. Μια τεχνολογία που μετέπειτα αντικαταστάθηκε

από την τεχνολογία της αξονικής τομογραφίας. Πλέον, και τα δύο είδη απεικόνισης χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση. Οι παράγοντες αντίθεσης εισήχθησαν για να βοηθήσουν την ανίχνευση οργάνων και αγγείων. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την απεικόνιση της αρτηρίας για την ανίχνευση θρόμβωσης ή την απόφραξη με έγχυση σκιαγραφικού στον καθετήρα της αρτηρίας που χρησιμοποιείται υπό την καθοδήγηση της ακτινοβολίας. Την δεκαετία του 1950, άρχισε να χρησιμοποιείται η μέθοδος Seldinger, όπου, ένα ελαστικό σύρμα οδηγός εισάγεται μέσω του ελαστικού καθετήρα και διαπερνά τα αιμοφόρα αγγεία στο επιθυμητό όργανο (Cierniak, 2011).

Ένας συνδυασμός της ακτινοβολίας με την επεξεργασία από υπολογιστή γίνεται στην σάρωση Υπολογιστικής Τομογραφίας (CT), έτσι ώστε να δημιουργηθούν πιο λεπτομερές σαρώσεις, οι οποίες συνδυάζονται δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια τρισδιάστατη εικόνα ακτίνων-Χ (Cunha and Shiel, 2020).

Στη σημερινή κλινική πράξη, η αξονική τομογραφία (CT) είναι μια μέθοδος απεικόνισης που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για την αναπαράσταση της ανθρώπινης ανατομίας και παίζει σημαντικό ρόλο ως διαγνωστικό εργαλείο. Συχνά η εκπαίδευση στην ανατομία γίνεται με εφαρμογή πάνω σε πτώματα από την στιγμή που η αξονική τομογραφία ως τεχνική, μιλάει για απεικόνιση εικόνας 3 επιπέδων (οβελιαία, στεφανιαία και εγκάρσια), δίνουν την δυνατότητα τρισδιάστατης ανατομίας.

Οι Slon et al. ανέφεραν ότι οι τομογραφίες σε πτώματα βοηθούν στην χωρική κατανόηση της ανατομίας, οπότε με αυτόν το τρόπο οι μαθητές βελτιώνουν την παρατηρητική τους ικανότητα και την ψηλάφηση δομών. Επίσης, έχει υποστηριχθεί ότι τα ευρήματα στις αξονικές τομογραφίες πτώματος διαφέρουν σημαντικά από τις αξονικές τομογραφίες ζώντων ασθενών, λόγω μεταθανάτιας κατάστασης και λοιπών παραγόντων (Chytas et al., 2021).

1.2.2.5 Ακτινοθεραπεία

Μια ακόμα εφαρμογή που έχουν οι ακτίνες-Χ, είναι η θεραπεία κατά του καρκίνου και πιο συγκεκριμένα η λεγόμενη ακτινοθεραπεία. Πολλές φορές για να επιτευχθεί είτε σμίκρυνση των όγκων είτε καταστροφή τους είναι απαραίτητη η χορήγηση ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας. Συνήθως οι θεραπείες τέτοιου τύπου ονομάζονται είτε θεραπεία εκτός σώματος είτε εισαγωγή ραδιενεργού υλικού στο σώμα (σε μικρή απόσταση από το καρκινικό κύτταρο). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ακτινοθεραπεία μπορεί να αποδειχθεί επικίνδυνη ωστόσο σε ποσοστό 50% των ασθενών με καρκίνο βρίσκει εφαρμογή κατά τη διάρκεια της θεραπείας τους (Pashazadeh et al., 2019).

1.2.2.6 Πυρηνική Ιατρική

Το σκιαγραφικό μέσο είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της διαφοράς ιστών ή υγρών στο σώμα κατά την ακτινοβολήση. Τα σύγχρονα είδη σκιαγραφικών ουσιών οδηγούν σε βελτίωση του σήματος ακτίνων-Χ και απεικόνισης

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή $CeBr_3$ για ιατρικές εφαρμογές

μαγνητικού συντονισμού (MRI). Το ιώδιο και το βάριο είναι από τα πιο κοινά είδη σκιαγραφικών μέσων που χρησιμοποιούνται. Οι μη ιονικοί παράγοντες προτιμώνται για τη μικρή τους ωσμωτικότητα, ωστόσο, το υψηλό τους κόστος αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα.

Το 1920, ο Geroge de Hevesy έκανε δοκιμές με ραδιενεργές ουσίες πάνω σε ποντίκια για να παρατηρήσει τυχόν αλλαγές στον μεταβολισμό τους. Το πρώτο ραδιενεργό υλικό που εισάχθηκε σε άνθρωπο ήταν ο φωσφόρος-32 το 1936, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την καταπολέμηση της λευχαιμίας (Cierniak, 2011)

Η εκβιομηχάνιση του τεχνήτιου-99m, έγινε το 1937 από τους Perrier και Segre, το οποίο αργότερα χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στην πυρηνική ιατρική. Το 1946, ο Sam Seidlin εισήγαγε το Ιώδιο 131 για την θεραπεία όγκων του θυρεοειδούς (Cierniak, 2011).

Το 1950, άρχισε να χρησιμοποιείται η πυρηνική ιατρική ως τρόπος διάγνωσης στους παθολογίας στο σώμα. Η αρχή λειτουργίας είναι ότι στον ασθενή εγχέονται ραδιονουκλεοτίδια, τα οποία με την σειρά στους συνδυάζονται με φαρμακευτικές ενώσεις που κατευθύνονται στους όργανα ή ομάδες κυττάρων που είναι πιο δραστικά από άλλα. Αυτές οι εικόνες καταγράφονται από μια κάμερα γάμμα και μπορούν να ανιχνεύσουν ιατρικά προβλήματα νωρίτερα από άλλου είδους εξετάσεις (Bradley, 2008).

Η πυρηνική ιατρική ως επί το πλείστον χρησιμοποιεί ραδιενεργούς ιχνηθέτες ή αλλιώς ραδιοφάρμακα για την αξιολόγηση των σωματικών λειτουργιών, στη διάγνωση και στη θεραπεία. Μέσω ειδικών καμερών δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να παρακολουθούν την πορεία των χορηγημένων ραδιοφαρμάκων.

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι απεικόνισης είναι:

- ❖ Υπολογιστική Τομογραφία Εκπομπής Μονού Φωτονίου (SPECT)
- ❖ Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων (PET)

Οι εν λόγω ιχνηθέτες αποτελούνται από μόρια φορείς που είναι συνδεδεμένοι με ραδιενεργό άτομο. Το κάθε μόριο ποικίλει ανάλογα με το είδος σάρωσης που ο κάθε χρήστης θέλει να πραγματοποιήσει. Υπάρχουν περιπτώσεις, όπου κάποιος από τους ιχνηθέτες αλληλοεπιδρούν με κάποια πρωτεΐνη στο σώμα και μπορούν ακόμη και να χρησιμοποιήσουν τα κύτταρα του σώματος. Ενδεικτικό παράδειγμα είναι όταν ο εκάστοτε γιατρός θέλει να εντοπίσει την πηγή μιας ενδεχόμενης εντερικής αιμορραγίας, συνήθως προστίθενται ραδιενεργά άτομα σε δείγμα ερυθρών αιμοσφαιρίων από τον ασθενή. Στη συνέχεια, τοποθετούν το αίμα πίσω και παράλληλα χρησιμοποιούν SPECT σάρωση για να παρατηρήσουν την ροή του αίματος στον ασθενή. Οποιαδήποτε συσσώρευση ραδιενέργειας στο οποιοδήποτε σημείο του εντέρου ενημερώνει στους γιατρούς για το σημείο που ενδέχεται να έχει πρόβλημα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο ιχνηθέτης χορηγείται με ενδοφλέβια ένεση. Ο τρόπος με τον οποίο θα χορηγηθεί ο ιχνηθέτης εξαρτάται από την νόσο που πρέπει να μελετηθεί.

Οι εγκεκριμένοι ιχνηθέτες ονομάζονται ραδιοφαρμακευτικά προϊόντα, την ονομασία αυτήν την έχουν καθώς πρέπει να πληρούν τα αυστηρά πρότυπα του FDA για την ασφάλεια και την κατάλληλη απόδοση για την εγκεκριμένη κλινική χρήση. Το είδος του ιχνηθέτες είναι αυτό που θα καθορίσει και το είδος της σάρωσης, αν δηλαδή θα είναι SPECT ή PET (Schöder et al., 2003).

1.2.2.6.1 Υπολογιστική Τομογραφία Εκπομπής Μονοφωτονιακής Εκπομπής (SPECT)

Τα όργανα απεικόνισης SPECT παρέχουν τρισδιάστατες εικόνες στους κατανομή των μορίων ραδιενεργού ιχνηθέτη που έχουν εισαχθεί στο σώμα του ασθενούς. Οι εικόνες 3D είναι αυτές που προκύπτουν από τον υπολογιστή και συγκεκριμένα από τις εικόνες προβολής του σώματος, οι συγκεκριμένες εικόνες έχουν ληφθεί από πολλές διαφορετικές γωνίες. Οι συσκευές απεικόνισης SPECT διαθέτουν ανιχνευτές γάμμα κάμερας, οι οποίοι ανιχνεύουν ακτίνες γάμμα που εκπέμπονται από τους ιχνηθέτες που έχουν εγχυθεί στον ασθενή. Οι κάμερες είναι τοποθετημένες σε μια περιστρεφόμενη βάση, που επιτρέπει στους ανιχνευτές να κινούνται σε στενό κύκλο γύρω από έναν ασθενή που βρίσκεται ακίνητος σε οριζόντια θέση (Schöder et al., 2003).

1.2.2.6.2 Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων (PET)

Η σάρωση τύπου PET χρησιμοποιεί και εκείνη με την σειρά της ραδιοφάρμακα για τη δημιουργία τρισδιάστατων εικόνων. Αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ PET και SPECT είναι το είδος των ραδιοϊχνηθετών. Για παράδειγμα, οι σαρώσεις SPECT μετρούν τις ακτίνες γάμμα, ωστόσο στις σαρώσεις PET προκαλείται διάσπαση των ραδιοανιχνευτών, παράγοντας μικρά σωματίδια που ονομάζονται ποζιτρόνια. Το ποζιτρόνιο είναι ένα σωματίδιο με τάξη μεγέθους, ίδια με αυτήν του ηλεκτρονίου αλλά αντίθετα φορτισμένο. Τα ποζιτρόνια αντιδρούν με την σειρά τους με τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο σώμα και όταν συνδυάζονται μεταξύ τους εκμηδενίζει το ένα το άλλο. Το αποτέλεσμα της εκμηδένισης είναι η ενέργεια με τη μορφή δύο φωτονίων που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η καταμέτρηση των εν λόγω φωτονίων γίνεται μέσω των ανιχνευτών που υπάρχουν στον σαρωτή PET.

Πλέον, οι σαρώσεις SPECT αρχίζουν και έχουν σημαντικό διαγνωστικό ρόλο, ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η διάγνωση και η παρακολούθηση της εξέλιξης των καρδιακών παθήσεων, όπως οι αποφραγμένες στεφανιαίες αρτηρίες. Επιπλέον, για τον εντοπισμό διαταραχών στα οστά, τη νόσο της χοληδόχου κύστης και την εντερική αιμορραγία υπάρχουν συγκεκριμένοι ραδιοανιχνευτές. Ο εξοπλισμός για σαρώσεις SPECT άρχισε να χρησιμοποιείται πρόσφατα για διάγνωση της νόσου του Πάρκινσον στον εγκέφαλο.

Αντίθετα, οι σαρώσεις PET χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση και παρακολούθηση του καρκίνου όπως επίσης στην παρακολούθηση της εξέλιξής του, την ανταπόκριση στη θεραπεία και τον εντοπισμό μεταστάσεων. Συχνά η επιθετικότητα του καρκίνου παρομοιάζεται με το ποσοστό χρήσης γλυκόζης. Τα τελευταία χρόνια, ως ανιχνευτής τόσο του καρκίνου όσο και της μεταστατικής εξάπλωσής του στο σώμα χρησιμοποιείται ελαφρώς τροποποιημένο ραδιοσημασμένο μόριο γλυκόζης.

Ο FDA ενέκρινε την χρήση PET για την έγκαιρη και ακριβή διάγνωση της νόσου Alzheimer. Αν δεν χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο μηχάνημα, η διάγνωση θα προκύψει από την αγγειακή άνοια ή κάποιο άλλο είδος άνοιας που είναι κοινό στους ηλικιωμένους.

Τα ραδιοφάρμακα όπως είναι φυσικό έχουν και αυτά ένα ποσοστό δόσης ακτινοβολίας, το οποίο είναι παρόμοιο με το ποσοστό στις κοινές ακτινογραφίες θώρακα. Παρόλο που υπάρχουν ανησυχίες πως μπορεί να προκληθεί καρκίνος ακόμα και από την ακτινοβολία από τις κοινές ακτινογραφίες. Θεωρείται από τους ειδικούς ότι ο κίνδυνος αυτός είναι αποδεκτός, καθώς θεωρείται αρκετά μικρός σε σύγκριση με το αναμενόμενο όφελος που προκύπτει από μια ιατρικά αναγκαία διαγνωστική μελέτη απεικόνισης (Schöder et al., 2003).

Τα ραδιενεργά υλικά είναι χημικές ουσίες που απελευθερώνουν ακτινοβολία. Τα ραδιενεργά υλικά μπορεί να είναι φυσικά ή μπορεί να είναι τεχνητά. Μπορεί επίσης να είναι σε στερεή ή υγρή μορφή ή μπορούν επίσης να είναι αέρια που μπορούν να αναπνεύσουν οι άνθρωποι (όπως το ραδόνιο). Ο χρόνος όπου το τα ραδιενεργό υλικό σταματάει να είναι ραδιενεργό καθορίζεται από τον χρόνο ημιζωής (CDC, 2021).

Λόγω της δόσης που επιτρέπεται να εφαρμοστεί στον ασθενή αλλά και των χαρακτηριστικών του συστήματος απεικόνισης, η προκύπτουσα εικόνα είναι ιδιαίτερα θορυβώδης με χαμηλή διακριτική ικανότητα.

Η ποσοτικοποίηση των στατιστικών στοιχείων του θορύβου μπορεί να γίνει όταν το ψηφιακό σύστημα απεικόνισης σχεδιάζεται με στόχο την βελτιστοποίηση της κατάστασης κβαντισμού με αποδοτική απόδοση bit (Christos Michail et al., 2018).

1.2.2.7 Ασφάλεια Αεροδρομίου

Πλέον όλα τα αεροδρόμια διαθέτουν σύστημα ασφαλείας το οποίο αποτελείται από κάποιας μορφής ακτίνων-Χ έτσι ώστε να σαρώνει τις αποσκευές για έλεγχο για επικίνδυνα αντικείμενα. Πλέον γίνονται και σαρώσεις όλου του σώματος και όχι τμηματικές για μεγαλύτερη ασφάλεια.

1.2.2.8 Αποκάλυψη Πλαστών Τεχνών

Είναι μια από τις λιγότερο γνωστές εφαρμογές που έχουν οι ακτίνες-Χ καθώς χρησιμοποιούνται από ιστορικούς για να διαπιστωθεί εάν μια εικόνα έχει ζωγραφιστεί ή όχι πάνω σε ένα υπάρχον κομμάτι (Fieberg and Smith, 2021).

1.2.2.7 Φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων-Χ

Η ΧPS ή αλλιώς φασματοσκοπία ηλεκτρονίων για χημική διακριτική ικανότητα (ESCA), είναι μια τεχνική που επιτρέπει την διακριτική ικανότητα της σύστασης μεσοπορώδους υλικού με βάση την ηλεκτρονική κατάσταση των ειδών που υπάρχουν στα υλικά. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί φωτοηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από τα στοιχεία μέσα στο μεσοπορώδες δείγμα κατά τον φωτισμό με ακτίνες-Χ με συγκεκριμένη ενέργεια.

Ο προσδιορισμός της σύνθεσης των μεσοπορωδών υλικών είναι εφικτός, και αυτό γιατί κάθε στοιχείο στο συγκεκριμένο υλικό (μεσοπορώδες υλικό), ή σε οποιοδήποτε δείγμα για αυτό το υλικό, έχει μια συγκεκριμένη ενέργεια δέσμευσης που έχει ως στόχο να οδηγήσει σε μια σειρά από χαρακτηριστικές κορυφές στο φάσμα των φωτοηλεκτρονίων. Οι μετατοπίσεις στις κορυφές προκαλούνται από τις αλλαγές στις ηλεκτρονικές αλληλεπιδράσεις του μορίου.

Η τεχνική επιτρέπει επίσης τον προσδιορισμό πιθανών αλλαγών που μπορεί να υποστεί η λειτουργική ομάδα στα υλικά κατά τη διάρκεια χημικών μετατροπών, ενδεικτικό παράδειγμα είναι οι αλλαγές στις καταστάσεις οξείδωσης κατά την κατάλυση. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ισχυρή σε συνδυασμό με τεχνικές Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) και φασματοσκοπία πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (Nuclear magnetic resonance) (NMR) στερεάς κατάστασης και μπορεί να επιτρέψει την πλήρη αποσαφήνιση των συνθέσεων και των διαφορετικών ομάδων που υπάρχουν στα μεσοπορώδη υλικά (Asefa and Dubonoy, 2017).

Κεφάλαιο 2

2.1 Κρυσταλλικοί σπινθηριστές για απεικονιστικές εφαρμογές

Στις εφαρμογές απεικόνισης, πολύ συχνή είναι η χρήση απλών κρυστάλλων ως μετατροπέων ακτινοβολίας, ακόμα περισσότερο σε συνδυασμό με οπτικούς αισθητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνά σε ανιχνευτές ακτινοβολίας. Βρίσκουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς, ενδεικτικά αναφέρονται η ιατρική απεικόνιση και η φυσική στοιχειωδών σωματιδίων.

Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στα σημερινά συστήματα απεικόνισης απαιτούν σπινθηριστές, οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι για κάθε εφαρμογή. Αυτό γίνεται καθώς είναι αναγκαίο οι διαγνωστικές εικόνες να είναι υψηλής ποιότητας. Αυτός είναι ο σημαντικότερος λόγος που οι ανιχνευτές ιατρικής απεικόνισης θα πρέπει σιγά σιγά να ενσωματώνουν σπινθηριστές με βελτιστοποιημένα χαρακτηριστικά όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και την απεικονιστική απόδοση.

Το φθοριούχο ασβέστιο (CaF_2) ως σπινθηριστής έχουν βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η φασματοσκοπία, η αναζήτηση σκοτεινής ύλης και οι ανιχνευτές ακτινοβολίας χαμηλής ενέργειας. Ο συγκεκριμένο σπινθηριστής μαζί με SiPMs χρησιμοποιείται στην φασματομετρία γάμμα. Χαρακτηριστικά όπως η βιοσυμβατότητα και η σταθερότητα του υλικού, είναι αναγκαία για σήμανση με φθορισμό σε εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά που κάνουν το υλικό CaF_2 κατάλληλο για απεικόνιση είναι ο δείκτης διάθλασης και η ενέργεια φωτονίου (Michail et al., 2019).

Η πολύ μεγάλη εξέλιξη των συσκευών απεικόνισης πυρηνικής ιατρικής έχει καταστήσει αναγκαία την εύρεση νέων και βελτιωμένων κρυστάλλων σπινθηρισμού. Είθισται οι κρύσταλλοι σπινθηρισμού να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πυρηνικής ιατρικής. Ο κάθε ένας από αυτούς προτιμάται για τις δικές του ιδιότητες. Οι παράγοντες που έχουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή του είναι η πυκνότητα και ο χρόνος απόσβεσης. Επειδή οι τιμές απόδοσης των κρυστάλλων είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, η επιλογή του κατάλληλου κρυστάλλου είναι πάντα δύσκολη. Ως εκ τούτου, έχουν δημοσιευθεί έρευνες με στόχο τη χρήση μεθόδων λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, για να αξιολογήσουν και να συγκρίνουν επιλεγμένους κρυστάλλους σπινθηρισμού με βάση τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Η μεθοδολογία χρειάζεται μια συγκέντρωση δεδομένων με συγκεκριμένες ιδιότητες των κρυστάλλων σπινθηρισμού. Τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί εισάγονται στην PROMETHEE, έτσι ώστε να γίνει αξιολόγηση για την δημιουργία πλήρους κατάταξης. Βάσει της κατάταξης φαίνεται η χειρότερη και η καλύτερη εναλλακτική. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται τυχόν δυσκολίες σε λήψεις αποφάσεων σε εφαρμογές πυρηνικής ιατρικής, ενδεικτικά αναφέρονται τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων και υπολογιστική τομογραφία εκπομπής φωτονίων. Έτσι με

σιγουριά μπορεί να επιλέξει το ιδανικό υλικό σπινθηρισμού με βάση την κατάταξη και την αξιολόγηση.

Η μελέτη είχε στόχο στους κρυστάλλους σπινθηρισμού και τις ιδιότητές τους, οι οποίες είναι:

- ❖ Πυκνότητα
- ❖ Χρόνος Απόσβεσης
- ❖ Ατομικός Αριθμός
- ❖ Δείκτης Διάθλασης
- ❖ Απόδοση Φωταύγειας
- ❖ Μήκος Κύματος
- ❖ Υγροσκοπικότητα

Η πυκνότητα και ο ατομικός αριθμός καθορίζουν την κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα του κρυστάλλου. Η απόδοση του κρυστάλλου σε ότι έχει να κάνει με τα scattered Compton events εξαρτάται από την απόδοση του κρυστάλλου. Τα χρονικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τον χρόνο απόσβεσης. Η παραγωγή φωτός είναι η ποσότητα του εκπεμπόμενου φωτός ανά μονάδα ενέργειας ακτίνων γάμμα που εναποτίθεται (Ozsahin et al., 2018).

Πιο συχνά οι σπινθηριστές συναντώνται στην φυσική υψηλών ενεργειών και σε διάφορους κλάδους της ιατρικής απεικόνισης. Ενδεικτικά αναφέρονται: Τομογραφία και επίπεδη απεικόνιση. Σε εφαρμογές που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια που βασίζονται σε ηλεκτρονικά τελευταίας γενιάς σε PET, χρειάζονται ανόργανους σπινθηριστές που έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό τον χαμηλό χρόνο απόσβεσης και την απόδοση φωτός. Διάφορα υλικά σπινθηρισμού έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής, όπως οξειδίο γερμανικού βισμούθιου ($Bi_4Ge_3O_{12}$ – BGO), οξυορθοπυριτικό λουτέτιο ($Lu_2SiO_5:Ce$ – LSO:Ce), φθοριούχο ασβέστιο ενεργοποιημένο με ευρώπιο ($CaF_2:Eu$) και το $LuAG:Ce$ μεταξύ άλλων, που χαρακτηρίζονται από μια σειρά ιδιοτήτων που τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση σε εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης.

Οι σπινθηριστές $CaF_2:Eu$ και $LuAG:Ce$ έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές: Ιατρικής φυσικής και φασματοσκοπίας, ανίχνευσης φορτισμένων σωματιδίων, διερεύνησης της διπλής διάσπασης βήτα, στην αναζήτηση για σκοτεινή ύλη που υπάρχει με τη μορφή WIMPs, χαμηλής ενέργειας ανιχνευτές ακτινοβολίας, εφαρμογές χρόνου πτήσης (TOF), φορητές κάμερες Compton, ηλιακές κυψέλες, εσωτερική ασφάλεια κ.λπ.

Ωστόσο, ο σπινθηριστής $CeBr_3$ είναι σχετικά πρόσφατος με απόδοση 60 φωτονίων/keV. Επιπλέον, έχει πολύ μικρό χρόνο απόσβεσης (~19 ns), πυκνότητα 5,18 g/cm³, μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής στα 380 nm. Αυτός είναι άλλωστε ο λόγος που αξίζει να αναλυθούν οι ιδιότητές του σχετικά με τις ιατρικές εφαρμογές.

Ο $CeBr_3$ έχει χρησιμοποιηθεί σε TOF-PET, σε φασματόμετρα ακτίνων γάμμα, σε τομογραφία σκέδασης Compton, σε εφαρμογές με ακραίες περιβαλλοντικές

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή $CeBr_3$ για ιατρικές εφαρμογές

συνθήκες, στην αστρονομία κ.λπ. Τα μειονεκτήματα του $CeBr_3$ περιλαμβάνουν την υγροσκοπικότητά του, επομένως την ανάγκη να διατηρείται σε κάψουλα, καθώς και το υψηλό κόστος παραγωγής του (Linardatos et al., 2022).

Οι ενώσεις σε μορφή κρυστάλλου (SC) που ενεργοποιούνται με ιόντα σπάνιων γαιών βρίσκουν ως επί το πλείστον τις κάτωθι εφαρμογές:

- ❖ Λέιζερ
- ❖ Οθόνες καθολικής φωταύγειας
- ❖ Σπινθηριστές
- ❖ Φωτεινοί μετατροπείς για διόδους εκπομπής λευκού φωτός (wled)

Τα ιόντα σπάνιων γαιών, ενδεικτικά αναφέρονται: Ce^{3+} ($4f^1$), Pr^{3+} ($4f^2$), Nd^{3+} ($4f^3$), Eu^{2+} ($4f^7$), έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την γρήγορη απόκριση σπινθηρισμού λόγω των επιτρεπόμενων $5d \rightarrow 4f$ ηλεκτρονικών μεταβάσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα από τα προαναφερθέντα ιόντα, το Ce^{3+} έχει ως κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή κβαντική απόδοση και τον χρόνο απόσβεσης φωτοφωταύγειας (PL). Η υψηλή απόδοση φωτός σπινθηρισμού (light yield, LY) και η κυρίαρχη άμεση απόκριση σπινθηρισμού είναι τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά για τους σπινθηριστές που βασίζονται στους κρυστάλλους Ce^{3+} .

Οι πηγές λευκών LED που βασίζονται σε μπλε LED χρειάζονται υψηλής απόδοσης φωσφόρους για να είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν μετατροπή του μπλε φωτός σε κίτρινο/πορτοκαλί φως. Ο πλέον διαδεδομένος κίτρινος σπινθηριστής στην παραγωγή WLED είναι ο YAG:Ce.

Η αντικατάσταση Gd^{3+} για ιόντα Y^{3+} ή Lu^{3+} σε $Y_3Al_5O_{12}$: Ce και $Lu_3Al_5O_{12}$: Ce μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη συνολική απόδοση. Ωστόσο, η ενσωμάτωση του ιόντος Gd^{3+} , λόγω του μεγάλου μεγέθους του, στη δωδεκαεδρική θέση σε δομές αλουμινίου έχει πολλούς περιορισμούς.

Επιπλέον, μια μεγάλη διαφορά μεταξύ ιοντικών ακτίνων στη δωδεκαεδρική και την τετραεδρική θέση (μέγεθος ατόμου μη ισορροπίας) έχει ως αποτέλεσμα τα στελέχη του πλέγματος, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν μικρο-ρωγμές στον όγκο των κρυστάλλων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σύνθεση του κρυστάλλου $Gd_3Al_5O_{12}$:Ce να περιπλέκεται λόγω του πρώτου σχηματισμού φάσης περοβσκίτη αντί για γρανάτη κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των κρυστάλλων από το τήγμα.

Η μέθοδος micro-pull-down (μ -PD) δίνει την δυνατότητα στους κρυστάλλους να αναπτυχθούν με μικρή ποσότητα πρώτης ύλης και υψηλό βαθμό ανάπτυξης. Η δυνατότητα ανάπτυξης των προσαρμοσμένων κρυστάλλων με τη μορφή ινών, ράβδου και πλάκας είναι μια εξαιρετική προσέγγιση για την παραγωγή σπινθηριστών καθώς και μετατροπέων για WLEDs (Markovskiy et al., 2021).

Οι ανιχνευτές ακτίνων-X στοχεύουν στην όσο το δυνατόν πιο χαμηλή εκπεμπόμενη δόση. Το πιο κοινά διαδεδομένο υλικό ημιαγωγού είναι το άμορφο σεληνίο (a-Se) και αυτό γιατί υπάρχει στο εμπόριο για χρήση στην απεικόνιση ακτίνων-X, καθώς μπορεί εύκολα να εναποτεθεί σε ένα τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης. Ωστόσο, όπως κάθε

υλικό τέτοιου τύπου έχει και αρνητικά χαρακτηριστικά, το πιο σημαντικό είναι η χαμηλή διάρκεια ζωής του. Κάποιοι άλλοι ημιαγωγοί (όπως το Si) έχουν επίσης μελετηθεί για εφαρμογές στην ανίχνευση ακτίνων-Χ και ακτίνων γάμμα λόγω των προϊόντων τους που διαθέτουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Στηριζόμενη στον μικρό ατομικό αριθμό η ευαισθησία είναι χαμηλή, με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η εφαρμογή στην μαστογραφία. Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν μεμονωμένοι κρύσταλλοι αλογονιδίων χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής σύνθεσης διαλύματος (PSC) που έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό, γεγονός που δημιουργεί τη δυνατότητα κατασκευής ανιχνευτών ακτίνων-Χ υψηλής ευαισθησίας με χαμηλό κόστος.

Όσον αφορά τους περοβσκίτες και πιο συγκεκριμένα τους τρισδιάστατους, τους χαρακτηρίζει η μετανάστευση ιόντων, αυτή με την σειρά της δημιουργεί μετατόπιση βάσης και επιδεινωμένη διακριτική ικανότητα απεικόνισης (Liu et al., 2020).

Ο κρύσταλλος $CeBr_3$ χρησιμοποιείται πολύ συχνά στους σπινθηριστές υψηλής απόδοσης και ο λόγος είναι η υψηλή απόδοση φωταύγειας.

Η αποτελεσματικότητά του έχει μελετηθεί με κώδικα Monte Carlo. Οι μετρούμενες πειραματικές αποδόσεις συγκρίνονται με προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο των PENELOPE και GEANT4 (Picado et al., 2017).

Οι κρύσταλλοι σπινθηριστή αλογονιδίου δημητρίου και οι κρύσταλλοι αλογονιδίου λανθανίου με πρόσμιξη δημητρίου χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε εφαρμογές:

- ❖ Πυρηνικής φασματοσκοπίας
- ❖ Ιατρικής απεικόνισης

Αυτό γίνεται επειδή έχουν πολύ υψηλή απόδοση στο κομμάτι της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας και της χρονικής απόκρισης.

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το $LaBr_3:Ce$. Αυτό γίνεται επειδή έχει 3% διακριτική ικανότητα (FWHM) στα 662 keV. Η σταθερά απόσβεσης της τάξης των 16 ns οδηγεί σε εξαιρετική χρονική διακριτική ικανότητα, η οποία μπορεί να φτάσει τα 98 ps για κρυστάλλους κυλίνδρου ύψους 1 ίντσας και διαμέτρου 1 ίντσας σε ενέργειες ^{60}Co .

Εναλλακτικά του $LaBr_3:Ce$ χρησιμοποιείται ο σπινθηριστής $CeBr_3$, που διαθέτει γρήγορο χρόνο ανόδου, υψηλή απόδοση φωταύγειας και είναι οικονομικότερος έναντι του ανταγωνισμού στην αγορά. Σε έρευνες έχει αποδειχθεί ότι με ^{137}Cs η ενεργειακή διακριτική ικανότητα είναι 4% και παρόμοια χρονική απόκριση του $CeBr_3$ με το $LaBr_3:Ce$. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η έλλειψη εσωτερικής ραδιενέργειας.

Για να είναι εφικτή η αξιολόγηση των ανιχνευτών $CeBr_3$ σε διαφορετικά σενάρια, είναι συνηθισμένο το φαινόμενο να υπάρχει ένα μοντέλο εκπομπής.

Υπάρχουν πολλές ρουτίνες Μόντε Κάρλο, οι οποίες είναι σε θέση να προσομοιώνουν τη μεταφορά ακτινοβολίας μέσω της ύλης. Χαρακτηριστικά αναφέρονται: GEANT4, MCNP, EGS5 και PENELOPE μεταξύ άλλων. Στην εργασία των Picado et al είχε επιλεγεί τόσο το PENELOPE όσο και το GEANT4 για την προσομοίωση της

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή CeBr_3 για ιατρικές εφαρμογές

φωτοαιχμής CeBr_3 και της συνολικής απόδοσης, μαζί με τα ενεργειακά φάσματα (Picado et al., 2017).

Προσομοιώσεις PENELOPE

Το PENELOPE είναι ένας κώδικας Monte Carlo γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN για την προσομοίωση της μεταφοράς ύλης ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων με ενέργειες από μερικές εκατοντάδες eV έως 1 GeV. Για προσομοιώσεις PENELOPE, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα renmain (Picado et al., 2017).

Αυτό το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να κάνει παραμετροποίηση της προσομοίωσης. Επιπλέον επιλέχθηκε μια σημειακή πηγή, που εκπέμπει φωτόνια των ενεργειών που αντιστοιχούν στα ισότοπα: ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba και ^{152}Eu . Η εκπομπή ηλεκτρονίων ή ποζιτρονίων κατά τη διάσπαση αυτών των ισωτόπων δεν ελήφθη υπόψη, αυτό έγινε διότι τα σωματίδια απορροφήθηκαν από το κάλυμμα του ανιχνευτή (Picado et al., 2017).

Προσομοιώσεις GEANT4

Ο GEANT4 είναι ένας κώδικας βασισμένος στην γλώσσα προγραμματισμού C++, η συγκεκριμένη γλώσσα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να θέσει ποικίλες γεωμετρικές ρυθμίσεις και αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε σωματίδια. Στον τομέα της φυσικής υπάρχουν διαθέσιμα προς χρήση πολλαπλά ηλεκτρομαγνητικά πακέτα. Στην συγκεκριμένη εργασία των Picado et al., χρησιμοποιήθηκε το τυπικό πακέτο φυσικής καθώς και τα πακέτα Penelope και Livermore (για φυσική χαμηλής ενέργειας). Το GEANT4 ως πρόγραμμα έχει πολλαπλές βιβλιοθήκες. Ενδεικτικά αναφέρεται η βιβλιοθήκη εκπομπής σωματιδίων β από τις β-διασπάσεις.

Η επικύρωση των προσομοιώσεων απόδοσης για απλές γεωμετρικές πηγών θα καταστήσει δυνατή τη διεύρυνση των υπολογισμών σε άλλες γεωμετρίες, όπως οι εκτεταμένες πηγές και οι σύνθετες συστοιχίες ανιχνευτών (Picado et al., 2017).

2.2 Χαρακτηριστικά κρυστάλλου Βρωμιούχου Δημητρίου (CeBr_3)

Πλέον έχουν γίνει διαθέσιμοι στο ελεύθερο εμπόριο οι κρύσταλλοι σπινθηριστή Βρωμιούχου Δημητρίου (CeBr_3), οι οποίοι έχουν αποδειχθεί πολύ ικανοί ανιχνευτές σε εφαρμογές φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ και ακτίνων γάμμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένοι κρύσταλλοι όχι μόνο είναι υγροσκοπικοί, αλλά επιπλέον μπορούν να παρέχονται τόσο με και χωρίς ενθυλάκωση.

Οι κρύσταλλοι σπινθηριστή CeBr_3 έχουν:

- ❖ Σύντομο χρόνο απόσβεσης (19ns)
- ❖ Υψηλή απόδοση φωτός (60.000 φωτόνια/MeV)
- ❖ Εξαιρετική ενεργειακή διακριτική ικανότητα (3,8keV)

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή CeBr₃ για ιατρικές εφαρμογές

- ❖ Εγγενή χαμηλή ακτινοβολία υποβάθρου (0,004 Bq/cm³)

Το Βρωμιούχο Δημήτριο CeBr₃ είναι ένας χρήσιμος σπινθηριστής που έχει τις κάτωθι εφαρμογές (Advatech UK, 2022):

- ❖ Τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET)
- ❖ Υπολογιστική Τομογραφία (CT)
- ❖ Γεωφυσική - Μέτρηση κατά τη γεώτρηση (MWD)
- ❖ Ασφάλεια - Σάρωση φορτίου και αποσκευών
- ❖ Εξειδικευμένες εφαρμογές στην πυρηνική και τη φυσική υψηλής ενέργειας

| CeBr ₃ Scintillation Crystals - Properties | | |
|---|--------------------|--------------|
| Properties Scintillator/Optical | Units | Value |
| Wavelength (Max. Emission) | nm | 380 |
| Wavelength Emission Range | nm | 325 - 475 |
| Decay Times | ns | 19 |
| Light Yield | photons/keV | 60 |
| Photoelectron Yield | % of NaI(Tl) | 122 |
| Energy Resolution @662 keV | keV | 3.8 |
| Radiation Length | cm | 1.96 |
| Background Radioactivity | Bq/cm ³ | 0.004 |
| Optical Transmission | μm | TBA |
| Transmittance | % | TBA |
| Refractive Index | | 2.09 @ 380nm |
| Reflection Loss/Surface | % | TBA |

| CeBr ₃ Scintillation Crystals - Properties | | |
|---|----------------------------------|--------------------------|
| Properties Mechanical | Units | Value |
| Chemical Formula | | CeBr ₃ |
| Density | g/cm ³ | 5.1 |
| Atomic Number (Effective) | | 43.9 |
| Melting Point | °C | 722 |
| Thermal Conductivity | Wm ⁻¹ K ⁻¹ | 5.66 |
| Thermal Expansion Coeff. | C ⁻¹ | 17.66 x 10 ⁻⁶ |
| Crystal Structure | | Hexagonal |
| Hardness | Mho | TBA |
| Hygroscopic | | Yes |
| Solubility | g/100gH ₂ O | TBA |

Πίνακας 1. Ιδιότητες CeBr₃ (Advatech UK, 2022).

Το βασικό πλεονέκτημα του σπινθηριστή Βρωμιούχου Δημητρίου σε σύγκριση με άλλους σπινθηριστές, είναι ο πολύ χαμηλός ενδογενής θόρυβος.

Η τυπική ενεργειακή διακριτική ικανότητα που παρέχεται από το υλικό είναι 4% FWHM για 662 keV. Χάρη στον γρήγορο χρόνο ανόδου του παλμού φωτός, οι ανιχνευτές του εν λόγω υλικού (CeBr₃) μπορούν να παρέχουν χωρική διακριτική ικανότητα υπό νανοδευτερόλεπτο μόνο ελαφρώς κατώτερες από τους ανιχνευτές BaF₂.

Αυτοί οι κρύσταλλοι που χρησιμοποιούνται ως σπινθηριστές για ακτίνες γάμμα είναι οι απλοί κρύσταλλοι ντοπαρισμένων αλογονιδίων μετάλλων. Ωστόσο, ανασταλτικός παράγοντας σε τέτοιου είδους κρυστάλλους είναι ότι η ανάπτυξή τους είναι όχι μόνο δαπανηρή αλλά και ιδιαίτερα δύσκολη. Θεωρείται βέβαιο πως η χρήση πιο οικονομικών λύσεων θα ήταν ιδιαίτερα επωφελής. Οι σπινθηριστές όπως τα πλαστικά δεν βρίσκουν εφαρμογή στην φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα λόγω των χαμηλών επιδόσεων φωταύγειας.

Οι σπινθηριστές οι οποίοι έχουν σωματίδια της τάξης μεγέθους νάνο εμπεριέχονται σε μια διαφανή μήτρα και χρησιμοποιούνται σε πολλές μελέτες. Η κύρια πρόκληση για την ανάπτυξη ενός νανοσύνθετου σπινθηριστή είναι:

- ❖ Η διατήρηση υψηλού βαθμού οπτικής διαφάνειας προκειμένου να μεταφερθεί αποτελεσματικά το φως σπινθηρισμού στον φωτοανιχνευτή.

Το πυρίτιο έχει δείκτη διάθλασης περίπου 1.5. Η τάξη μεγέθους των σωματιδίων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην σκέδαση. Όσο μικραίνει η τάξη μεγέθους των σωματιδίων, τόσο πιο αμελητέα θα πρέπει να γίνεται η σκέδαση.

Το 1990 χρησιμοποιήθηκε το μεσοπορώδες πυρίτιο για πρώτη φορά από την εταιρία Mobil και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από τότε σε μια ποικιλία εφαρμογών, με πιο κοινές εφαρμογές τις κάτωθι (Boncher et al., 2015):

- ❖ Αέριο
- ❖ Κατάλυση
- ❖ Βιολογικές εφαρμογές όπως η χορήγηση φαρμάκων
- ❖ Απεικόνιση

Στην εργασία των Kobayashi et al, τα φάσματα φωτοφωταύγειας σκόνης $CeBr_3$ με διάφορες πιέσεις συμπίεσης έχουν μετρηθεί υπό συνθήκες περιβάλλοντος και βρέθηκαν σημαντικά μετατοπισμένα προς το κόκκινο σε σύγκριση με εκείνα της αρχικής σκόνης κατά σχεδόν 20 nm (1440 cm^{-1}) σε πίεση συμπίεσης 1,0 GPa. Η φασματική μετατόπιση αυξάνεται εξαιρετικά γρήγορα με την πίεση συμπίεσης και στη συνέχεια μειώνεται στο 1,0 GPa. Η παρατηρούμενη επίδραση υπολειπόμενης τάσης της σκόνης $CeBr_3$ στα φάσματα φωταύγειας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της σκόνης $EuCl_2$. Η μέγιστη τιμή του μήκους κύματος της φωταύγειας, μπορεί εύκολα να μεταβληθεί σε ένα εύρος 360 έως 380 nm αλλάζοντας απλώς την πίεση συμπίεσης που εφαρμόζεται στη σκόνη $CeBr_3$.

Οι ηλεκτρονικές μεταβάσεις 4f-5d των ιόντων σπάνιων γαιών (RE) είναι μεταβάσεις ηλεκτρικού διπόλου και επιτρεπόμενης περιστροφής, ενώ οι μεταβάσεις 4f-4f (intra-4f) είναι απαγορευμένες μεταβάσεις και παρατηρούνται ως πολύ λιγότερο έντονα φάσματα. Κατόπιν τούτου, οι ενώσεις ιόντων RE οι οποίες διαθέτουν έντονα ηλεκτρονικά φάσματα, τα οποία με την σειρά τους προέρχονται από μεταβάσεις 4f-5d εφαρμόζονται ιδιαίτερα συχνά υπό μορφή υλικών φωσφόρου υψηλής φωτεινότητας.

Έντονες γραμμές οι οποίες διαθέτουν φωταύγεια μεγάλης διάρκειας προκύπτουν από φάσματα φωταύγειας ιόντων τα οποία αντιστοιχούν στις μεταβάσεις 4f-4f. Ωστόσο, τα ορατά ή σχεδόν ορατά φάσματα φωταύγειας που προκύπτουν από την μετάπτωση ιόντων RE παρατηρούνται μόνο σε περιορισμένα ιόντα RE και εμφανίζονται ως φάσματα ευρείας ζώνης. Τα ιόντα τα οποία ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι το Eu^{2+} ως δισθενές ιόν και το Ce^{3+} ως τρισθενές ιόν. Κάτι τέτοιο γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό αναλύοντας τις ενέργειες ηλεκτρονικής μετάβασης 4f-5d των ιόντων RE. Για τα δισθενή και τρισθενή ιόντα οι μεταβάσεις τέτοιου τύπου γίνονται συναρτηθεί του ατομικού αριθμού. Όσον αφορά την ενέργεια μετάπτωσης, στο Ce^{3+} είναι η μικρότερη στα τρισθενή ιόντα RE, τα οποία βρίσκονται στην υπεριώδη περιοχή. Το μέγιστο μήκος κύματος της φωταύγειας το οποίο βρίσκεται στην ορατή ή στην υπεριώδη περιοχή μεταβάλλεται ανάλογα με το περιβάλλον του

ιόντος Ce^{3+} . Παρόλο που οι ενέργειες μετάβασης 4f-5d των ιόντων RE είναι πιο πολύπλοκες από ό,τι αναφέρθηκε, τα μέγιστα μήκη κύματος φωταύγειας των ιόντων είναι ως επί το πλείστον σε υπεριώδεις ή υπέρυθρες περιοχές (Kobayashi and Hirotsaki, 2011).

Οι ενώσεις Ce^{3+} και Eu^{2+} είναι παρεμφερείς μεταξύ τους, υπό την έννοια ότι έχουν υψηλά φάσματα φωταύγειας κατά κύριο λόγο στην ορατή περιοχή και τα μήκη κύματος κορυφής τους ποικίλλουν σε μεγάλο εύρος ανάλογα με το υλικό.

Όσον αφορά τα ηλεκτρόνια 5d σε αντίθεση με τα 4f εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Από την άλλη μεριά τα 4f θωρακίζονται από ηλεκτρόνια που βρίσκονται γύρω τους και πιο συγκεκριμένα τα 5s και 5p.

Οι ενέργειες που προκύπτουν από μεταβάσεις 4f–5d των ιόντων RE μεταβάλλονται εύκολα από εξωτερικά πεδία, ενδεικτικά αναφέρεται η πίεση. Οι ενώσεις Ce^{3+} έχουν ως στόχο να δείξουν την επίδραση της πίεσης ως ενώσεις Eu^{2+} . Υπάρχει η πιθανότητα παραπλήσιες ενώσεις RE να διαθέτουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτές της σκόνης EuCl_2 . Οι Kobayashi et al., ανέφεραν ότι υπάρχει μια μεγαλύτερη επίδραση υπολειπόμενης τάσης της σκόνης CeBr_3 στα φάσματα φωταύγειας.

Στην έρευνα των Kobayashi et al., χρησιμοποιήθηκε δείγμα CeBr_3 σε κοκκώδη μορφή, το οποίο είχε ποσοστιαία καθαρότητα 99,9%. Το δείγμα ήταν από τη Sigma–Aldrich και μετατράπηκε σε συμπαγή σκόνη σε μορφή δίσκου, ο οποίος έχει διαστάσεις 10 mm διάμετρο. Για να γίνει κάτι τέτοιο ήταν αναγκαία η χρήση καλουπιού από σκληρομένο χάλυβα και υδραυλικής πρέσας. Πριν φτάσει στο σημείο της συμπύκνωσης, ήταν αναγκαία η σκόνη να αλεστεί ελαφρά με την χρήση μύλου κονιάματος, έτσι ώστε να είναι βέβαιο ότι δεν θα υπάρχουν κόκκοι. Το φάσμα φωταύγειας του δείγματος δεν άλλαξε με αυτή τη διαδικασία λείανσης. Υπήρξε μεταβολή της πίεσης από 0,075 έως 1,44 GPa.

Η συμπίεση πραγματοποιήθηκε με γρήγορους ρυθμούς, σε ξηρή ατμόσφαιρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η σκόνη να διατηρηθεί συμπαγής λόγω της επαφής με τον αέρα. Τα φάσματα μετρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος με την βοήθεια ενός ειδικού ανιχνευτή, ο οποίος διέθετε πολλά κανάλια (OTSUKA MCPD-7000) με διέγερση 280 nm. Για τον προσδιορισμό τους μήκους κύματος χρησιμοποιήθηκε η προσαρμογή καμπύλης.

Για να υπολογιστεί η πίεση συμπίεσης με την βοήθεια των μετρήσεων υδραυλικής πρέσας, μετρήθηκαν οι διάμετροι του δείγματος. Ο προσδιορισμός της πίεσης συμπίεσης, με τον συγκεκριμένο τρόπο ενδέχεται να περιέχει αβεβαιότητες μέχρι και $\pm 14\%$, σε αυτήν εμπεριέχεται η δυσκολία συμπίεσης υλικών σκόνης. Η διαδικασία της συμπίεσης γίνεται με την βοήθεια υδραυλικής πρέσας.

Τα φάσματα φωτοφωταύγειας της συμπαγούς σκόνης CeBr_3 που μετρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος παρουσίασαν πολύ μεγάλες μετατοπίσεις στο κόκκινο σε σύγκριση με εκείνα της αρχικής σκόνης λόγω υπολειπόμενης τάσης. Παρατηρήθηκε μια εξαιρετικά μεγάλη μετατόπιση σχεδόν 20 nm (1450 cm^{-1}) στην πίεση συμπίεσης

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή CeBr_3 για ιατρικές εφαρμογές

1,0 GPa, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της σκόνης EuCl_2 που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Με την βοήθεια της επίδρασης που ασκεί η υπολειμματική τάση στα φάσματα φωταύγειας, η σκόνη CeBr_3 χρησιμοποιείται καθώς έχει την ικανότητα να δημιουργήσει ένα υλικό μνήμης πίεσης όπου βρίσκει εφαρμογή σε *in situ* μετρήσεις πίεσης. Το εύρος πίεσης το οποίο ασκείται είναι από 0-1,0 GPa. Ωστόσο, στις χαμηλότερες περιοχές πίεσης, έχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα η σκόνη CeBr_3 , η οποία χρησιμοποιείται ως υλικό μνήμης από τη σκόνη EuCl_2 , αυτό γίνεται λόγω των ασυνήθιστα μεγάλων φασματικών μετατοπίσεων της συμπύκνωσης (Kobayashi et al, 2011).

Στην εργασία των Lutter et al., διερευνήθηκε η εγγενής δραστηριότητα των ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτίνες γάμμα σε έναν κρύσταλλο CeBr_3 με διαστάσεις 38,1 mm 38,1 mm (διάμετρος- ύψος). Επιπλέον, βρέθηκαν δύο αρχέγονα ραδιονουκλίδια (^{227}Ac με μαζική δραστηριότητα 0,3070,02 Bq/kg και ^{138}La με μαζική δραστηριότητα 7,471,0 mBq/kg). Παρατηρήθηκαν δύο προϊόντα ενεργοποίησης (^{139}Ce και ^{82}Br).

Δεν παρατηρήθηκε κάποιο άλλο αρχέγονο ραδιονουκλίδιο (^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th και ^{235}U) και τα όρια ανίχνευσης ήταν κάτω από 2 mBq/kg εκτός από τα ^{238}U για τα οποία το ανώτατο όριο ήταν 135 mBq/kg.

Με την πάροδο των χρόνων έχουν εμφανιστεί ανόργανοι σπινθηριστές οι οποίοι έχουν ενδιαφέρουσες ιδιότητες βρίσκοντας εφαρμογή στην πυρηνική φυσική. Οι Billnert et al. ανέλυσαν τα χαρακτηριστικά του κρυστάλλου CeBr_3 ο οποίος είχε συζευχθεί με φωτοπολλαπλασιαστή. Το συμπέρασμα στο οποίο οδηγήθηκαν ήταν ότι οι ιδιότητες που έχει τον καθιστούν ενδιαφέρον για την ανίχνευση ιονίζουσας ακτινοβολίας. Χρησιμοποίησαν κρύσταλλο με διαστάσεις 25,4 x 25,4 mm. Η μέτρηση της διακριτικής ικανότητας έδειξε ότι είναι 4,4% στα 662 keV, η τιμή αυτή είναι συγκρίσιμη με την τιμή του ανιχνευτή χλωριούχου λανθανίου. Η σχετική απόδοση ήταν ανώτερη σε σύγκριση με έναν κρύσταλλο NaI:Tl ίδιου μεγέθους.

Πλέον είναι εφικτή η δημιουργία κρυστάλλων CeBr_3 , οι οποίοι είναι κατάλληλοι για την χρήση ως ανιχνευτές σπινθηρισμού έως 75 mm. Μπορεί έτσι να καταστεί δυνατό στο μέλλον η αντικατάσταση του NaI από τον CeBr_3 ως τον επιλεγμένο ανιχνευτή που λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου για συγκεκριμένες εφαρμογές στη φασματομετρία ακτίνων γάμμα. Είναι απαραίτητο ο ανιχνευτής να είναι καθαρός από υπολείμματα εσωτερικής ραδιενέργειας, όταν πραγματοποιούνται εφαρμογές που περιλαμβάνουν περιβαλλοντική ραδιενέργεια. Η μέτρηση της ραδιοκαθαρότητας radiopurity στην εργασία των Lutter et al., παρεμποδίστηκε από τη φυσική ραδιενέργεια, η οποία εικάζεται ότι εντοπίζεται στο PMT. Οι Lutter et al., είχαν ως στόχο την περαιτέρω ανάλυση της εγγενούς ραδιοκαθαρότητας ενός γυμνού κρυστάλλου CeBr_3 , ο οποίος με την σειρά του δεν ήταν συνδεδεμένος με πιεζοηλεκτρικό ανιχνευτή (Lutter et al., 2013).

2.3 Εφαρμογές κρυστάλλου Βρωμιούχου Δημητρίου (CeBr_3)

2.3.1 Εφαρμογή CeBr_3 στην βελτίωση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας

Ένα από τα θεμελιώδη όρια για την ενεργειακή διακριτική ικανότητα που μπορεί να επιτευχθεί με τους ανιχνευτές ακτινοβολίας σπινθηριστή επιβάλλεται από τη μη αναλογικότητα της απόκρισης (nPR) (Quarati et al., 2014).

Κατά τη διαδικασία ανίχνευσης, η ενέργεια μιας προσπίπτουσας ακτίνας γάμμα υποδιαιρείται στοχαστικά σε έναν αριθμό δευτερευόντων ηλεκτρονίων. Το nPR δείχνει ότι η ειδική απόδοση είναι ασταθής αναλογικά με την ενέργεια των ηλεκτρονίων.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των δισθενών στοιχείων και πιο συγκεκριμένα του Βαρίου είναι ότι μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό το φάσμα ραδιοφωταύγειας του CeBr_3 , η μεταβολή μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 10 nm μετατόπισης του κόκκινου. Επιπλέον, κατά την διάρκεια της έρευνας των Quarati et al., βρέθηκε επίσης μια παρόμοια μετατόπιση κόκκινου για μερικά από τα συν-ντοπαρισμένα CeBr_3 . Ωστόσο, με το $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ υπήρξαν ακανόνιστες συμπεριφορές της μετατόπισης του κόκκινου σε δείγματα με την ίδια χημική σύνθεση. Ακόμη και από το 2008 είχε παρατηρηθεί υπάρχει με μεταβολή 20 nm στο ερυθρό στον κρύσταλλο CeBr_3 .

Αξίζει να αναφερθεί, ότι παρόλο που υπάρχει μετατόπιση του κόκκινου, αυτή δεν μεταβάλλει την απόδοση του φωτός σπινθηρισμού (LY), η οποία με την σειρά της επιτυγχάνεται με την βοήθεια φωτοπολλαπλασιαστή με φωτοκάθοδο διαλκαλίων.

Οι τυποποιημένοι και συν-ντοπαρισμένοι κρύσταλλοι CeBr_3 αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Βέρνης από τους Quarati et al., με την κάθετη τεχνική Bridgman σε σφραγισμένες φύσιγγες χαλαζία και με τη μορφή πλινθωμάτων διαμέτρου 8 mm, και στη συνέχεια διασπάστηκαν σε δείγματα 30-50 mm³. Όντας εξαιρετικά υδροσκοπικά, όλα τα δείγματα έχουν υποβληθεί σε χειρισμό μέσα σε ντουλάπι γαντιών γεμάτο άζωτο ή φυλάσσονται μέσα σε προσαρμοσμένα ερμητικά περιβλήματα για να αποφευχθεί οποιαδήποτε επαφή με τον αέρα ή/και την υγρασία.

Με το συν-ντόπινγκ Mg και Ba παρατηρήθηκε μια επιδείνωση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας R που μπορεί να εξηγηθεί από συμβολή Rin_h.

Συμπερασματικά, η τεχνική αλλοσθενούς συν-ντόπινγκ αποδείχθηκε αποτελεσματική για τη βελτίωση του nPR και τη βελτίωση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας που ενθαρρύνει περαιτέρω εμπειρική έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση (Quarati et al., 2014).

2.3.2 Εφαρμογή στην ανίχνευση ακτινοβολίας γ

Η έρευνα των Guss et al., είχε ως στόχο την ποσοτικοποίηση της δυνατότητας του CeBr_3 ως ανιχνευτή ακτίνων γάμμα υψηλής διακριτικής ικανότητας σε θερμοκρασία

δωματίου. Έγινε σύγκριση ιδιοτήτων του κρυστάλλου CeBr_3 με κρυστάλλους παρεμφερών διαστάσεων και περιβαλλόντων ανίχνευσης. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της αυτοδραστηριότητας του CeBr_3 με το τριβρωμιούχο λανθάνιο με πρόσμειξη δημητρίου ($\text{LaBr}_3:\text{Ce}$).

Στην εργασία των Guss et al. διερεύνησε ένα νέο υλικό υψηλής διακριτική ικανότητας σε θερμοκρασία δωματίου που έχει τη δυνατότητα να παρέχει απόδοση ανώτερη είτε από τριβρωμιούχο λανθάνιο με πρόσμειξη δημητρίου ($\text{LaBr}_3:\text{Ce}$) είτε από τριχλωριούχο λανθάνιο με πρόσμειξη δημητρίου ($\text{LaCl}_3:\text{Ce}$), τα οποία συχνά χρησιμοποιούνται λόγω της ενέργειάς τους. Σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου, το υλικό που έχει την καλύτερη διακριτική ικανότητα είναι το ($\text{NaI}:\text{TI}$). Τόσο το $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ όσο και το $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ έχουν ως μειονέκτημα την παρουσία ενός ραδιενεργού συστατικού, του ^{138}La . Λόγω της χαμηλής εσωτερικής δραστηριότητας, ο κρύσταλλος ο οποίος έχει υψηλή διακριτική ικανότητα με μεγάλη ευαισθησία είναι ο CeBr_3 . Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν να ληφθούν μετρήσεις με CeBr_3 και άλλους ανιχνευτές θερμοκρασίας δωματίου για τον χαρακτηρισμό της απόδοσής τους, τον προσδιορισμό της διακριτική ικανότητας, της γραμμικότητας, της αποτελεσματικότητας και της αυτοδραστηριότητας προκειμένου να παρασχεθεί μια χρήσιμη σύγκριση αυτών των ανιχνευτών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός σε ότι έχει να κάνει με τα φάσματα ενέργειας γάμμα το CeBr_3 έχουν χαμηλότερο εσωτερικό υπόβαθρο από αυτά του $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$. Αυτό οφείλεται στη φύση των συστατικών. Η ρύπανση που προκαλεί το στοιχείο ^{138}La εκπέμπει τόσο ηλεκτρόνια όσο και σωματίδια β με ιδιαίτερα υψηλές ενέργειες. Η εμφάνιση του ^{138}La στον κρύσταλλο έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία γραμμών ενέργειας γάμμα στα 789 και 1436 keV. Μία πιθανότητα είναι η δραστηριότητα του $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ να μεταβάλλει τα σενάρια ανίχνευσης, τα οποία περιέχουν χαμηλή ισχύ σήματος. Από την άλλη ο κρύσταλλος CeBr_3 , αποδίδει εξίσου με τον $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$.

Για να βοηθήσει την Εθνική Διοίκηση Πυρηνικής Ασφάλειας (NNSA) να επενδύσει σοφά στον τομέα της πυρηνικής αναζήτησης και αναγνώρισης, αυτή η εργασία τεκμηρίωσε μια σύγκριση των χαρακτηριστικών και της απόδοσης των διαφόρων υλικών ανιχνευτών. Μέρος της εργασία των Guss et al., περιλάμβανε την ανάπτυξη μεγάλων κρυστάλλων CeBr_3 και την αξιολόγηση των ιδιοτήτων σπινθηρισμού και της ενεργειακής τους διακριτική ικανότητας. Η εργασία είχε ως στόχο να συγκρίνει αξιολογήσεις των υλικών των ανιχνευτών με υψηλή διακριτική ικανότητα, τα οποία βρίσκουν εφαρμογές σε μονάδες αναγνώρισης οι οποίες εφαρμόζονται από το NNSA (Guss et al., 2009).

2.3.3 Εφαρμογή στην πυρηνική φυσική

Ο κρύσταλλος CeBr_3 έχει παρόμοια ενεργειακή διακριτική ικανότητα με τον $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$. Η εξαιρετική χρονική διακριτική ικανότητα, που μετρείται στα 93 ps στα 511 keV για κρυστάλλους 1 cm^3 , προσφέρεται για άμεσες ηλεκτρονικές μετρήσεις της διεγερμένης διάρκειας ζωής της πυρηνικής κατάστασης σε εύρος από νανοδευτερόλεπτο έως υπο-νανοδευτερόλεπτο.

Μέχρι σήμερα, αρκετές δημοσιεύσεις έχουν διερευνήσει χαρακτηριστικά του $CeBr_3$, όπως το φάσμα οπτικών εκπομπών, την ενεργειακή διακριτική ικανότητα, την χρονική διακριτική ικανότητα και την απόδοση (D'Olympia et al., 2013).

Το στοιχείο του Ce^{3+} έχει τον ρόλο του ενεργοποιητή έχοντας ως στόχο την μεγάλη απόδοση φωτός με χαμηλό χρόνο απόσβεσης σπινθηρισμού (μερικών δεκάδων δευτερολέπτων). Μια φυσική επέκταση αυτού ήταν η διερεύνηση των σπινθηριστών που ενσωματώνουν τον Ce ως κύριο συστατικό. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι διαθέτει προφίλ διάσπασης σπινθηρισμού αποτελούμενο από συστατικά με σταθερά χρόνου περίπου 22 ns και χρόνο ανόδου ≤ 0.5 ns.

Η υψηλή απόδοση φωτός είναι αυτή που καθορίζει το $CeBr_3$, καθώς διαθέτει τυπική διακριτική ικανότητα 4% στα 662 keV και υψηλότερο ενεργό ατομικό αριθμό από το NaI:Tl. Σε σύγκριση με τον κρύσταλλο NaI:Tl, η απόδοση $CeBr_3$ είναι υψηλότερη στο ενεργειακό εύρος 122-2614 keV.

Η ευρεία χρήση του $CeBr_3$ σε εφαρμογές στην πυρηνική φυσική και την ιατρική φυσική γίνεται λόγω των χαρακτηριστικών που διαθέτει. Οι έμμεσες τεχνικές είναι αναγκαίες για την μέτρηση της διάρκειας ζωής στο ισομερές. Αυτό γίνεται λόγω της χαμηλής χρονικής διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών Ge. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι με την χρήση του $CeBr_3$, σε μεγαλύτερες σειρές ανιχνευτών Ge θα δίνει την δυνατότητα της ορατής βελτίωσης του κατώτατου ορίου μετρήσεων άμεσης διάρκειας πυρηνικής ζωής. Κάτι τέτοιο αποδεικνύεται από το ζεύγος ανιχνευτών $LaBr_3:Ce$.

Τα χαρακτηριστικά που καθιστούν αναγκαία την χρήση του $CeBr_3$ σε PET είναι η υψηλή απόδοση και η καλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα. Με την βοήθεια νέων στοιχείων που προκύπτουν από την συνεχή έρευνα οδηγούν στην βελτίωση της αναλογίας του σήματος προς τον θόρυβο σε ανακατασκευασμένες εικόνες σε σύγκριση με το συμβατικό PET. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η αβεβαιότητα, παράλληλα επιταχύνεται η διαδικασία σάρωσης με μικρότερα ενεργειακά παράθυρα (D'Olympia et al., 2013).

2.3.4 Εφαρμογή στην Φασματοσκοπία πλανητικών ακτίνων γάμμα

Η χημική σύνθεση διαφόρων αντικειμένων του ηλιακού συστήματος όπως πλανήτες, δορυφόροι και αστεροειδείς παρέχει σημαντικά στοιχεία για την κατανόηση όχι μόνο της προέλευσης αλλά και της εξέλιξής τους. Ορισμένα από αυτά τα αντικείμενα έχουν τέτοια θερμική διαφοροποίηση ούτως ώστε να οδηγήσουν στην δημιουργία πυρήνα, μανδύα και φλοιού.

Η κατανόηση του σχηματισμού και της εξέλιξης πλανητών όπως ο Άρης απαιτεί γνώση της στοιχειακής σύνθεσης της επιφάνειάς του. Προηγούμενες μελέτες στον Άρη στόχευαν στον προσδιορισμό της σύνθεσης της επιφάνειας του Άρη, συμπεριλαμβανομένων προγραμμάτων παρατήρησης με βάση τη Γη χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως φασματοσκοπία ανάκλασης και τροχιακών μελετών σε περιφερειακή έως παγκόσμια κλίμακα που πραγματοποιήθηκαν με χρήση ορατής και υπέρυθρης απεικόνισης.

Οι ερευνητικές εργασίες που είχαν πραγματοποιηθεί παλιότερα ήταν ελλιπής, κυρίως λόγω των ελλιπών δεδομένων. Φασματομετρία σε ολόκληρη την επιφάνεια του Άρη έχει γίνει από το σύστημα Mars Odyssey GRS, το οποίο με αυτόν τον τρόπο παρείχε χάρτες συγκέντρωσης για τα στοιχεία H, Si, Cl, K, Fe και Th για χαμηλά και μεσαία γεωγραφικά πλάτη (Panda et al., 2017).

Συνήθως όσοι από τους πλανήτες είτε έχουν λεπτή ατμόσφαιρα είτε δεν έχουν καθόλου ακτινοβολούνται από Galactic Cosmic Radiation (GCR). Τα συγκεκριμένα σωματίδια GCR καθώς εισάγονται στην επιφάνεια της σελήνης, δημιουργούν δευτερογενή σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων 7 νετρονίων με ενέργειες 0,1–20 MeV, ανά πρωτογενές σωματίδιο. Κάποια από τα δευτερεύοντα νετρόνια δημιουργούν ακτίνες γάμμα κατά την διάρκεια της αντίδρασής τους με την ανελαστικής σκέδαση (n, γ), όπου το x είναι συνήθως ένα νετρόνιο.

Τα νετρόνια με ενέργειες κάτω από το πρώτο διεγερμένο επίπεδο των πυρήνων στόχων στην πλανητική επιφάνεια μπορούν να διασκορπιστούν με ελαστικό τρόπο από τους πυρήνες, να διαφύγουν από την επιφάνεια (περίπου το ένα τρίτο των νετρονίων) όταν η ενέργεια νετρονίων είναι της τάξης των 0,025 eV. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα να δημιουργηθούν ακτίνες γάμμα κατά την διάσπαση ραδιονουκλιδίων, τα οποία με την σειρά τους δημιουργούνται κατά την διάρκεια αντιδράσεων και πιο συγκεκριμένα πυρηνικών αντιδράσεων οι οποίες γίνονται από κοσμικές ακτίνες. Οι ακτίνες γάμμα, που παράγονται με αυτόν τον τρόπο, μεταφέρονται εντός της πλανητικής επιφάνειας. Μερικά από αυτά απορροφώνται, ενώ άλλα μπορούν να προκαλέσουν παραγωγή ζευγαριών ή διασκορπίζονται έξω από την πλανητική επιφάνεια. Κατά την διάρκεια πλανητικών εφαρμογών επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν γραμμές δέσμευσης νετρονίων ακτίνων γάμμα. Πιο αντιπροσωπευτικό κομμάτι της πλανητικής υποεπιφάνειας είναι τα δεδομένα σύνθεσης από τη φασματομετρία γάμμα και αυτό γιατί ακτίνες-Χ έχουν μέγιστο βάθος αλληλεπίδρασης της τάξης των δεκάδων μικρών, αντίθετα με τις γάμμα που έχουν βάθος διείσδυσης δεκάδων εκατοστών.

Για το συγκεκριμένο εύρος ενέργειας, οι τύποι ανιχνευτών που ενδείκνυνται είναι οι NaI(Tl), CsI(Tl) και Γερμανικό Βισμούθιο (BGO), οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε αποστολές για φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα. Στα πλεονεκτήματά τους είναι αποτελεσματικότητα ανίχνευσης και οι ανιχνευτές μεγάλης επιφάνειας.

Αντίθετα, μεγάλο μειονέκτημα είναι η χαμηλή διακριτική ικανότητα. Οι Ανιχνευτές Υψηλής Καθαρότητας Γερμάνιου (HPGe) είχαν χρησιμοποιηθεί στην αποστολή του Οδυσσέα του Άρη 2001, αποστολή του φεγγαριού Selene (Kaguya) και στην πρόσφατη αποστολή MESSENGER για αποστολή υδραργύρου. Αυτού του είδους οι ανιχνευτές έχουν πολύ καλύτερη διακριτική ικανότητα εάν συγκριθούν με ανιχνευτές σπινθηρισμού από παλιές αποστολές. Το όργανο GRS στο Odyssey χρησιμοποίησε έναν παθητικά ψυχόμενο κρύσταλλο γερμανίου τύπου n υψηλής καθαρότητας (85 K) που ανιχνεύει ακτίνες γάμμα στην περιοχή ενέργειας 0,1–10 MeV.

Ωστόσο, οι ανιχνευτές HPGe πρέπει να ψυχθούν σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου (77 K) για να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα ενεργειακής διακριτική ικανότητας, που συνεπάγεται τη χρήση ψυγείου κύκλου Stirling ή παθητικού συστήματος ψύξης.

Μειονέκτημα είναι ότι έχουν μεγάλο βάρος και χρειάζονται μεγάλο χρονικό διάστημα για να δημιουργηθούν. Τα ψυγεία τέτοιου τύπου απαιτούν ισχύ περίπου 50 W. Ο πρόσφατα αναπτυγμένος ανιχνευτής αλογονιδίων σπανίων γαιών, ειδικά το βρωμιούχο λανθάνιο με πρόσμιξη δημητρίου ($\text{LaBr}_3:\text{Ce}$) και το βρωμιούχο δημήτριο (CeBr_3), είναι οι πιο πρόσφατοι μεταξύ της οικογένειας των μετρητών σπινθηρισμού και έχουν πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών ανιχνευτών θερμοκρασίας δωματίου. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά για το $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, όπως:

- ❖ Μεγάλος ατομικός αριθμός
- ❖ Μεγάλη απόδοση φωταύγειας

Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα αυτού του ανιχνευτή είναι 2,8% στα 662 keV (^{137}Cs) και 1,6% στα 2615 keV (^{208}Tl). Σε σύγκριση με τον BGO και τον NaI:Tl , ο σπινθηριστής έχει μεγαλύτερη απόδοση φωτός κατά 7 φορές από το BGO και 1,6 φορές από το NaI:Tl . Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι δεν χρειάζεται παθητικό ή ενεργητικό σύστημα ψύξης, όπως άλλοι ανιχνευτές όπως ο HPGe που είναι σε θέση να λειτουργήσει σε θερμοκρασία δωματίου.

Η αποτελεσματικότητα ανίχνευσης είναι υψηλότερη σε σύγκριση με το $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$. Ο μηχανισμός σπινθηρισμού του CeBr_3 είναι παρόμοιος με αυτόν του $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ και χαρακτηρίζεται από μια εκπομπή Ce^{3+} που προκύπτει από μια μετάβαση από τη χαμηλότερη βασική κατάσταση 5d σε 4f που οδηγεί σε χαρακτηριστική ζώνη διπλής εκπομπής (Panda et al., 2017).

2.3.5 Εφαρμογή CeBr_3 σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα

Πλέον έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούν πολλοί ερευνητές στις εφαρμογές τους τον κρύσταλλο CeBr_3 . Οι Maheng Ye et al. χρησιμοποίησαν τον εν λόγω κρύσταλλο σε φασματόμετρο ακτίνων γάμμα για συστήματα παρακολούθησης της ακτινοβολίας των μικροσκοπικών μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), καθώς είναι συστήματα που χρησιμοποιούν εφαρμογές ιδιαίτερα υψηλής εμβέλειας (Ye et al., 2021). Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι η χρονική διάρκεια πτήσης και το μέγεθος φορτίου που μπορεί να υποστηρίξει. Για αυτό είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός χαμηλής ισχύος φορτίου παρακολούθησης ακτινοβολίας. Ο σκοπός δημιουργίας του φασματομέτρου ακτίνων γάμμα CeBr_3 είναι η δημιουργία συστημάτων παρακολούθησης ακτινοβολίας μικρών UAV.

Σε πολλές μελέτες, τα συστήματα παρακολούθησης ακτινοβολίας UAV έχουν βρει εφαρμογές σε ραδιομετρικές έρευνες πυρηνικών εγκαταστάσεων, εντοπισμό ραδιενεργών πηγών και χαρτογράφηση της ακτινοβολίας εδάφους.

Τα συστήματα παρακολούθησης ακτινοβολίας που βασίζονται σε μικρά UAV, τα οποία έχουν μέγιστο βάρος απογείωσης 25 κιλά, έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλή λόγω των πλεονεκτημάτων τους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που διαθέτουν

είναι το χαμηλό κόστος και ο εύκολος χειρισμός. Ωστόσο, υπάρχουν και περιορισμοί, όπως η ισχύς της μπαταρίας και η χαμηλή χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου. Η μείωση του βάρους, του όγκου και της κατανάλωσης ισχύος του ωφέλιμου φορτίου ανίχνευσης ακτινοβολίας είναι πολύ σημαντική για την επέκταση του χρόνου πτήσης ή των λειτουργικών μονάδων ενός μικρού συστήματος παρακολούθησης ακτινοβολίας UAV (Ye et al., 2021).

Είναι συχνό το φαινόμενο τα φασματόμετρα ακτίνων γάμμα, τα οποία υιοθετούν ανιχνευτές σπινθηρισμού να τοποθετούνται σε μικρά UAV. Στα UAV, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές φορές τα φασματόμετρα των σπινθηριστών LaBr_3 και NaI .

Παρόλο που το συγκεκριμένο πρόβλημα χρίζει επίλυσης με τον κατάλληλο αλγόριθμο, τα φασματόμετρα NaI έχουν χαμηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα και τα φασματόμετρα LaBr_3 έχουν σχετικά υψηλό εσωτερικό υπόβαθρο ακτινοβολίας. Επιπλέον, τα φασματόμετρα ακτίνων γάμμα σπινθηριστή, τα οποία χρησιμοποιούν φωτοπολλαπλασιαστές (PMTs) με μεγάλο όγκο και μάζα, δεν ευνοούν το σχεδιασμό συστημάτων παρακολούθησης ακτινοβολίας UAV (Kromeck, 2022).

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου (SiPMs) πλεονεκτούν συγκριτικά με τους PMT στις οπτικές μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, πλεονεκτούν στα κάτωθι χαρακτηριστικά:

- ❖ Έχουν μικρότερο μέγεθος
- ❖ Χαμηλότερο βάρος
- ❖ Χαμηλότερη τάση λειτουργίας
- ❖ Μεγαλύτερη στιβαρότητα

Τέλος, ο CeBr_3 διαθέτει τόσο υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα όσο και χαμηλή εσωτερική ακτινοβολία (Ye et al., 2021).

2.3.6 Χρήση CeBr_3 σε μετρήσεις ακτινοβολίας περιβάλλοντος

Τα τελευταία χρόνια ο κρύσταλλος CeBr_3 έχει βρει εφαρμογή σε μετρήσεις ακτινοβολίας περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βαθμονόμηση ενός υποβρύχιου φασματόμετρου, που αποτελείται από κρύσταλλο CeBr_3 , για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε δείγματα ιζήματος, μέσω πειραματικών δεδομένων και προσομοιώσεων Monte Carlo. Έχει βρει εφαρμογή σε μέτρηση δραστηριότητας σε θαλάσσια ιζήματα. Για να αποδειχθεί ότι το σύστημα έχει υψηλή ακρίβεια, που είναι και το ζητούμενο σε τέτοιου είδους συστήματα συγκρίθηκε με αντίστοιχες μετρήσεις υψηλής διακριτικής ικανότητας.

Το μεγάλο ενδιαφέρον για μετρήσεις φασματομετρίας ακτίνων γάμμα για έρευνες οι οποίες αποδίδουν στο οικονομικό κομμάτι, είναι η αιτία που σταδιακά αντικαθίστανται τα συστήματα που έχουν υψηλή διακριτική ικανότητα. Για να γίνει κάτι τέτοιο εφικτό χρησιμοποιούνται ανιχνευτές σπινθηρισμού και στις πιο πολλές μετρήσεις ραδιενεργού υλικού στο εργαστήριο (Androulakaki et al., 2020).

Δεν είναι λίγες φορές που χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι με χαμηλή διακριτική ικανότητα καθώς βρίσκουν εφαρμογή σε μετρήσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων.

Πρόσφατα, νέα φασματόμετρα μέσης διακριτική ικανότητας που βασίζονται στους κρυστάλλους $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ και CeBr_3 , έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμα και έχουν χρησιμοποιηθεί για:

- ❖ Μετρήσεις *in situ*, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM)
- ❖ Για μετρήσεις ραδιενέργειας σε δείγματα νερού
- ❖ Σε υλικά χαλυβουργίας

Τέτοια φασματόμετρα μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στο πεδίο για επιτόπιες μετρήσεις (σε δείγματα που συλλέγονται). Παρόλο που υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί ανιχνευτές, αυτός που χρησιμοποιείται περισσότερο ο CeBr_3 για μετρήσεις NORM, αυτό γίνεται γιατί έχει χαμηλή εγγενή δραστηριότητα εάν συγκριθεί με τον κρύσταλλο $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$.

Οι Androulakaki et al., στην εργασία τους χρησιμοποίησαν το σύστημα GeoMAREA, το οποίο αποτελείται από έναν κρύσταλλο CeBr_3 , ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ένα κύπελλο ακετάλης. Ο κρύσταλλος βαθμονομήθηκε για *in situ* μετρήσεις συγκέντρωσης ραδιονουκλεϊδίων. Στην εργασία των Androulakaki et al., εξετάζεται η εναλλακτική χρήση του φασματόμετρου GeoMAREA, για επιτόπιες και εργαστηριακές μετρήσεις ραδιενέργειας σε δείγματα θαλάσσιων ιζημάτων.

Στόχος της έρευνας είναι να εξεταστεί η δυνατότητα εφαρμογής ενός συστήματος ανίχνευσης το οποίο χρησιμοποιεί κρύσταλλο CeBr_3 για μετρήσεις ραδιενέργειας. Αυτό γίνεται για να δημιουργηθεί ένα συμπληρωματικό εργαλείο για την υποστήριξη χαρτογράφησης ραδιενέργειας για τον χαρακτηρισμό της τοποθεσίας και τον εντοπισμό επικίνδυνων σημείων στο θαλάσσιο (βυθό) και στο χερσαίο (άμμο παραλίας και έδαφος) στοιχείο. Οι μετρήσεις έχουν γίνει έτσι ώστε να είναι εφικτή η *in situ* ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, εξετάζεται και συζητείται η δυνατότητα χρήσης συστήματος βασισμένου σε CeBr_3 , αντί για δαπανηρές εργαστηριακές μετρήσεις υψηλής διακριτική ικανότητας.

Για τον λόγο αυτό, οι Androulakaki et al. βαθμονόμησαν το σύστημα GeoMAREA έτσι ώστε να είναι κατάλληλο για μετρήσεις δειγμάτων ιζημάτων χρησιμοποιώντας εργαστηριακά δεδομένα και προσομοιώσεις Monte Carlo (MC). Τα πειραματικά δεδομένα είχαν ως στόχο την βελτίωση των αποτελεσμάτων και την επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια, μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, έγιναν επιπλέον δοκιμές για την βελτιστοποίηση της βαθμονόμησης σε ένα φάσμα ενέργειας (150 keV–2600 keV).

Οι τιμές *minimum detectable activity* (MDA) υπολογίστηκαν για την επιλεγμένη γεωμετρία μέτρησης, σε ένα ευρύ φάσμα ενέργειας (238 keV–2614 keV). Τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης δραστηριότητας συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις χρησιμοποιώντας σύστημα υψηλής διακριτική ικανότητας (HPGe).

Βάσει των αποτελεσμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι το σύστημα GeoMAREA δίνει ακριβείς συγκεντρώσεις δραστηριότητας για τα ανιχνευθέντα ραδιονουκλίδια (Androulakaki et al., 2020).

Ο ανιχνευτής CeBr_3 έχει βρει εφαρμογή ακόμη και σε διακριτική ικανότητα δειγμάτων NORM. Οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές είναι κατάλληλοι για μετρήσεις πεδίου καθώς διαθέτουν μια σειρά από χαρακτηριστικά. Επιγραμματικά αναφέρεται ότι:

- ❖ Λειτουργούν σε θερμοκρασία $37\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ❖ Υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα
- ❖ Δεν υπάρχει το φαινόμενο της ραδιενεργής μόλυνσης, όπως σε άλλους ανιχνευτές αλογονιδίων του λανθανίου.

Οι Peyres et al., σύγκριναν τα αποτελέσματά τους για τρία υλικά αναφοράς με αυτά που προέκυψαν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα φασματομέτρου ακτίνων γάμμα HPGe.

Ενώ υπάρχουν Φυσικά Εμφανιζόμενα Ραδιενεργά Υλικά (NORM) στην φύση, χρησιμοποιώντας τα στην βιομηχανία, μπορούν σε σημαντικές ποσότητες αποβλήτων, ορισμένες μάλιστα να περιέχουν συγκεντρώσεις NORM. Οι βιομηχανικοί τομείς που έχουν αναγνωρισθεί ως τομείς που παράγουν απόβλητα τέτοιου είδους είναι η βιομηχανία φωσφορικών αλάτων, τα υδρευτήρια, τα χυτήρια κασσίτερου, η βιομηχανία οικοδομικών υλικών, η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, η επεξεργασία μεταλλευμάτων νιοβίου/τανταλίου και η εξόρυξη σπάνιων γαιών.

Η συγκέντρωση δραστηριότητας των νουκλιδίων είναι αναγκαία έτσι ώστε να είναι σε θέση να ανακυκλωθούν ή να επεξεργαστούν ξανά. Η φασματομετρία γάμμα χρησιμοποιείται για την διακριτική ικανότητα αυτών των υλικών, με μετρήσεις, στις οποίες χρησιμοποιείται ανιχνευτής NaI:TI, αντίθετα οι ανιχνευτές ημιαγωγών (HPGe) εφαρμόζονται περισσότερο σε εργαστηριακές μελέτες.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει συζητήσεις για την εφαρμογή ανιχνευτών $LaBr_3$ σε μετρήσεις NORM σύμφωνα με τους Peyres et al. Στα θετικά τους στοιχεία είναι το γεγονός ότι έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα από το NaI:TI αλλά και από τους $CeBr_3$. Στα αρνητικά τους είναι ότι υπάρχουν φαινόμενα ραδιενεργής μόλυνσης εξαιτίας ενός μικρού κλάσματος (0,09%) ^{138}La , το οποίο είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο που μπορεί να εμποδίσει τη χρήση τους υπό ορισμένες συνθήκες. Κατόπιν τούτου, οι ανιχνευτές $CeBr_3$ θεωρούνται οι βέλτιστοι για μέτρηση δραστηριοτήτων χαμηλού επιπέδου.

Η πειραματική διάταξη των Peyres et al., βασίζεται σε έναν κυλινδρικό κρύσταλλο $CeBr_3$ με διάμετρο 7 cm και ύψος 7 cm που κατασκευάζεται από την SCIONIX και συνδέεται οπτικά με έναν φωτοπολλαπλασιαστή HAMAMATSU διαμέτρου 7,6 cm. Η ηλεκτρονική ρύθμιση ολοκληρώθηκε από έναν προενισχυτή και έναν ψηφιακό πολυκαναλικό αναλυτή (DSPEC PRO) της ORTEC. Εσωτερικά ενός κυλίνδρου μόλυβδου πάχους 5cm εισάχθηκε ο ανιχνευτής.

Τα υλικά που αναλύθηκαν τοποθετήθηκαν μέσα σε σφραγισμένα κυλινδρικά δοχεία από πολυπροπυλένιο με εσωτερική διάμετρο 5,38 cm και ύψος 1,5 cm. Σε κοντινό σημείο με το υλικό (0.5 cm) τοποθετήθηκε ένα συρόμενο κάλυμμα.

Τρία δείγματα NORM αναλύθηκαν στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή $CeBr_3$ 7 cm × 7 cm ως πρώτο βήμα για επιτόπιες μετρήσεις στις εγκαταστάσεις παραγωγής. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των μετρήσεων με αυτές από τους ανιχνευτές HPGe. Παρόλο που και οι δύο μετρήσεις είναι συμβατές, του $CeBr_3$

παρουσιάζουν μεγαλύτερες αβεβαιότητες, οι οποίες οφείλονται στην χαμηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα αυτών των ανιχνευτών καθώς και στους χαμηλότερους χρόνους μέτρησης. Ωστόσο, η ευχρηστία αλλά και η πολύ καλή απόδοση ανίχνευσης είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τον εξοπλισμό επιτόπιας παρακολούθησης (Peyres et al., 2017).

2.3.7 Εφαρμογή στον έλεγχο του εδάφους με φασματόμετρο βασισμένο σε κρύσταλλο $CeBr_3$

Στόχος της έρευνας των Litvak et al., η διακριτική ικανότητα των αποτελεσμάτων μιας σειράς δοκιμών εδάφους με ένα πρωτότυπο ενεργού φασματόμετρου ακτίνων γάμμα που βασίζεται σε μια νέα γενιά κρυστάλλου σπινθηρισμού ($CeBr_3$). Έγινε αξιολόγηση της δυνατότητας που έχει το όργανο να προσδιορίσει την στοιχειακή σύνθεση των στοιχείων σχηματισμού πετρωμάτων όπως: O, Na, Mg, Al, Si, K και Fe. Υπολογίστηκε ότι επιτυγχάνεται ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια, της τάξεως 1–10% για το χημικό στοιχείο που μελετάται.

Τα πυρηνικά όργανα τα οποία στηρίζονται σε μεθόδους φασματοσκοπίας νετρονίων και ακτίνων γάμμα έχουν συχνές εφαρμογές σε πλανητικές αποστολές έτσι ώστε να είναι εφικτή η εξαγωγή της στοιχειακής αφθονίας των επιφανειακών υλικών.

Είναι συνηθισμένο φαινόμενο τα πυρηνικά όργανα να βρίσκουν εφαρμογές σε τροχιακές αποστολές με κύριο στόχο την δημιουργία παγκόσμιων στοιχειωδών χαρτών. Οι μετρήσεις των περιβαλλόντων νετρονίων και ακτίνων γάμμα του περιβάλλοντος στην επιφάνεια είναι σπάνιες μέχρι τώρα, αλλά έχουν ληφθεί υπόψη, σχεδιαστεί και αναπτυχθεί ενεργά για αρκετές μελλοντικές αποστολές προσγείωσης στη Σελήνη, τον Άρη και την Αφροδίτη.

Τα φασματόμετρα γάμμα έχει την ικανότητα να προσδιορίζει τις χαρακτηριστικές γραμμές ακτίνων γάμμα και είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν αξιολόγηση των χημικών στοιχείων που εκπέμπουν αυτές τις γραμμές. Στα παθητικά φασματόμετρα νετρονίων και ακτίνων γάμμα, το σήμα που λαμβάνεται στηρίζεται στις επιδράσεις ανάμεσα στα δευτερεύοντα νετρόνια με τα στοιχεία που αποτελούν το έδαφος. Οι συγκεκριμένες γραμμές προέρχονται από τη διέγερση των πυρήνων του εδάφους που προκαλείται από πυρηνικές με δευτερεύοντα νετρόνια. Αυτού του τύπου οι αλληλεπιδράσεις διαθέτουν ανελαστική σκέδαση, αντιδράσεις σύλληψης νετρονίων και αντιδράσεις ενεργοποίησης νετρονίων.

Η πρώτη κατηγορία προκαλεί εκπομπή γάμμα στο άμεσο χρονικό διάστημα αντίθετα η δεύτερη κατηγορία προκαλεί εκπομπή γάμμα σε δεύτερο χρόνο. Η διαφοροποίηση αυτή υπάρχει διότι δημιουργείται ένα βραχύβιο ραδιενεργό νουκλίδιο μέσω δέσμευσης νετρονίων, (n,p) , (n,a) , $(n,2n)$ και άλλων αντιδράσεων. Στην περίπτωση αυτή, τα παράγωγα της αντίδρασης μένουν στην κατάσταση εξόδου και έπειτα επανέρχονται στην αρχική κατάσταση με την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων γάμμα. Ανάλογα με τον χρόνο ημιζωής το ραδιενεργό νουκλίδιο, είναι πιθανό να διασπαστεί σε χρονικό διάστημα από δευτερόλεπτα έως και ημέρες. Αποτέλεσμα

αυτών είναι να παρατηρείται η εκπομπή γάμμα σε φθίνουσα ένταση των αντίστοιχων χαρακτηριστικών γραμμών ακτίνων γάμμα (Litvak et al., 2017).

Όσον αφορά τις επιφανειακές λειτουργίες, τόσο παθητικά όσο και ενεργητικά τα φασματόμετρα ακτίνων γάμμα και των δύο τύπων, δηλαδή είτε παθητικά είτε ενεργητικά μπορούν να βοηθήσουν σε αποστολές προσγείωσης. Για τα ενεργά όργανα, μεγάλη εφαρμογή βρίσκει η γεννήτρια παλμικών νετρονίων, καθώς είναι σε θέση να αντικαταστήσει τα GCRs ως εξωτερική πηγή ακτινοβολίας. Η συγκεκριμένη γεννήτρια είναι σε θέση να παράγει σύντομους παλμούς νετρονίων ιδιαίτερα υψηλής ενέργειας της τάξης των 14 MeV. Η υψηλή ένταση είναι σημαντική καθώς βοηθάει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων φασματοσκοπίας νετρονίων και γάμμα. Τα ενεργά φασματόμετρα βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλες εφαρμογές όπως τις εφαρμογές ασφάλειας και την ιατρική. Τα ίδια φασματόμετρα προτείνονται για διαστημικές αποστολές στους πλανήτες και τους δορυφόρους του ηλιακού συστήματος. Το πρώτο ενεργό φασματόμετρο είναι στο ρόβερ Curiosity (αποστολή Martian Science Laboratory) (Litvak et al., 2017).

Σε ορισμένες διαστημικές έρευνες, τα ενεργά όργανα είναι ο μόνος απομακρυσμένος τρόπος για να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τη χύδην υποεπιφανειακή σύνθεση στοιχείων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι in situ μετρήσεις στην επιφάνειά της Αφροδίτης. Ο συγκεκριμένος πλανήτης παρέχει ένα αρκετά σκληρό περιβάλλον. Ο σημαντικότερος λόγος που τα GCR δεν μπορούν να διαπεράσουν την ατμόσφαιρά της, είναι το πάχος της ατμόσφαιρας. Έχοντας σαν αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να παράγουν δευτερογενείς εκπομπές νετρονίων στο υπέδαφος.

Αυτή η κατάσταση καθιστά τις μεθόδους ενεργοποίησης νετρονίων μια μοναδική επιλογή για τη μέτρηση της σύνθεσης του υπόγειου όγκου κατά τη διάρκεια εργασιών επιφάνειας. Παρόλο που έχουν γίνει προτάσεις για παρόμοια όργανα παλιότερα, τώρα είναι σε θέση η τεχνολογία να παρέχει αξιόπιστα όργανα για τέτοιες αποστολές.

Τα όργανα που αναπτύχθηκαν για χρήση στην επιφάνεια της Αφροδίτης πρέπει να ενσωματωθούν σε ένα δοχείο πίεσης Lander για να τα προστατεύσουν από συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Ο συγκεκριμένος τύπος έχει την δυνατότητα να μετρήσει τη μέση χύδην σύνθεση του ρεγολίθου της Αφροδίτης απευθείας στο σημείο προσγείωσης, χωρίς να χρειαστεί επαφή. Το PNG είναι αναγκαίο για την πρόκληση δευτερογενών εκπομπών νετρονίων από το υπέδαφος. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αδυναμίας των σωματιδίων GCR να διεισδύσουν στην ατμόσφαιρα της.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στις δοκιμές εδάφους προσπαθούν να προσομοιώσουν την διακριτική ικανότητα ενεργοποίησης νετρονίων και να αξιολογηθούν οι χαρακτηριστικές γραμμές γάμμα που εκπέμπονται από βραχύβια και μακρόβια ραδιονουκλεΐδια που παράγονται από κύρια συστατικά του εδάφους.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών εδάφους δόθηκε πρωταρχική προσοχή στις επαγόμενες γραμμές ακτίνων γάμμα, αλλά η ακολουθία δοκιμών περιλάμβανε επίσης αρκετές συμπληρωματικές μετρήσεις πριν από την ενεργοποίηση της μονάδας PNG. Οι πρώτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για να εκτιμηθεί το φυσικό υπόβαθρο και να προσδιοριστούν οι κορυφές ακτίνων γάμμα που ανήκουν στα φυσικά στοιχεία ραδιενέργειας όπως K, Th και U. Αυτή η δοκιμή διήρκεσε περίπου 1 ώρα και τα ληφθέντα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του ρυθμού καταμέτρησης (Litvak et al., 2017).

Η δεύτερη δοκιμή διεξήχθη επίσης σε παθητική λειτουργία χωρίς χρήση PNG, αλλά στη διαμόρφωση όπου τεχνητές πηγές ακτίνων γάμμα ^{137}Cs και ^{60}Co , με ισχυρές κορυφές ακτίνων γάμμα σε ενέργειες 0,66 MeV, 1,17 MeV και 1,33 MeV, τοποθετήθηκαν κοντά στον αισθητήρα GRS. Χρησιμοποιώντας δεδομένα που αποκτήθηκαν σε αυτήν τη δοκιμή και συνδυάζοντάς τα με άλλες μετρήσεις υποβάθρου και ενεργών μετρήσεων με PNG, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση φασματικών καναλιών GRS έναντι ενέργειας και αξιολογήθηκε η ενεργειακά εξαρτώμενη διακριτική ικανότητα του $CeBr_3$. Ο κύριος στόχος των δοκιμών εδάφους με PNG ήταν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις του φάσματος ακτίνων γάμμα που προκαλείται από νετρόνια από τον προσομοιωτή πλανητικού υλικού γνωστής σύνθεσης, να εντοπιστούν οι ισχυρότερες κορυφές ακτίνων γάμμα που αντιστοιχούν στα κύρια στοιχεία σχηματισμού βράχου, να αξιολογηθούν οι περιοχές κορυφής τους (επειδή είναι ανάλογες στις αφθονίες των στοιχείων) και να ορίζουν στατιστικές αβεβαιότητες των μετρήσεων κορυφής.

Οι δοκιμές εδάφους που περιγράφονται στην εργασία των Litvak et al., διεξήχθησαν ειδικά για την αξιολόγηση της ιδέας ενός ενεργού φασματομέτρου ακτίνων γάμμα (σε ένα μοντέλο προσομοιωτή πλανητικού υλικού) που βασίζεται σε μια γεννήτρια παλμικών νετρονίων (που χρησιμοποιείται ήδη σε πλανητικές αποστολές) και μια νέα γενιά κρυστάλλων σπινθηρισμού $CeBr_3$ (προτείνεται για ορισμένες διαστημικές επιστημονικές αποστολές). Εξετάστηκε επίσης η δυνατότητα εφαρμογής του για μελλοντικές αποστολές προσεδάφησης στην Αφροδίτη, όπου θα μπορούσαν να απαιτηθούν μετρήσεις της χύδην σύνθεσης του εδάφους.

Ωστόσο, τα ήδη επιτευχθέντα εργαστηριακά πειράματα επιτρέπουν την εκτίμηση της καλύτερης δυνατής ακρίβειας (στο διαστημικό πείραμα θα είναι χειρότερη λόγω πρόσθετου υποβάθρου) στην εκτίμηση της συγκέντρωσης των πρωτογενών στοιχείων σχηματισμού βράχου στο πλανητικό υπέδαφος (Litvak et al., 2017).

2.3.8 Εφαρμογή $CeBr_3$ σε Πυρηνικούς Σταθμούς

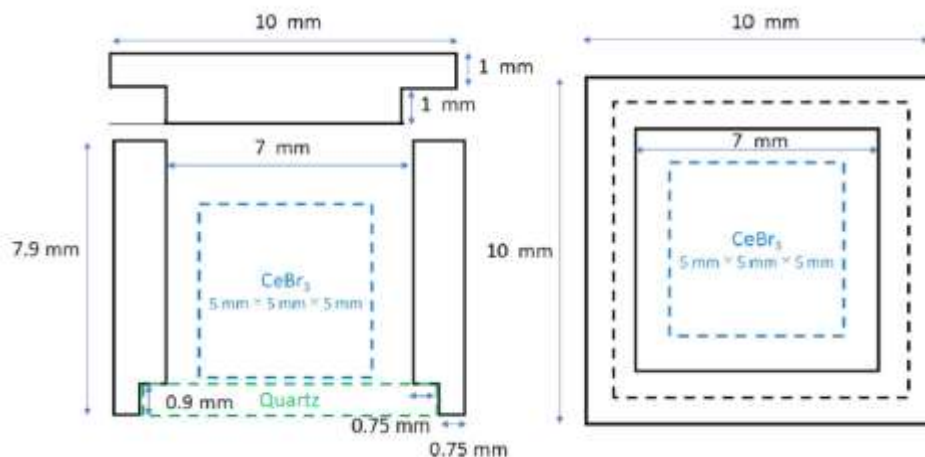
Σε ένα πυρηνικό σταθμό, η ανάκτηση των υπολειμμάτων πυρηνικού καυσίμου είναι ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία, καθώς αποτρέπει ενδεχόμενες δύσκολες καταστάσεις. Οι Masaaki Kaburagi et al. εστίασαν στην παθητική διακριτική ικανότητα ακτίνων γάμμα (PGA) που αφήνουν τα υπολείμματα πυρηνικού καυσίμου σύμφωνα με μετρήσεις ακτίνων γάμμα σε ενέργεια πάνω από 1 MeV. Έπειτα, δημιουργήθηκε ένα φασματομέτρο $CeBr_3$, του οποίου οι διαστάσεις ήταν 5 mm × 5

mm × 5 mm, το οποίο συζεύχθηκε με φωτοπολλαπλασιαστή Hamamatsu R7600U-200 (PMT). Αναλύθηκε η απόδοση της δόσης με εύρος 4,4 έως 750 mSv/h σε πεδίο ^{60}Co . Όσο αυξανόταν ο ρυθμός έκθεσης, τόσο αυξανόντουσαν τα φάσματα. Για αυτόν άλλωστε τον λόγο υπήρξε αύξηση 51% στους ρυθμούς δόσης από 4,4 έως 750 mSv/h. Οι τυχόν μετατοπίσεις έγιναν λόγω της αύξησης του κέρδους PMT στις μεγάλες ροές συνεχούς ρεύματος.

Ο σεισμός που σημειώθηκε στα ανατολικά της Ιαπωνίας το 2011 έπληξε τον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi (FDNPS). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα μέρος των υπολειμμάτων που αφήνουν τα πυρηνικής φύσεως καύσιμα να εξαπλωθούν στο κύριο δοχείο περιορισμού (PCV), ένα μέρος των υπολειμμάτων βρισκόταν ήδη στον πυθμένα του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα (RPV). Η ανάκτηση των υπολειμμάτων είναι ο μεγαλύτερος στόχος στην επιχείρηση παροπλισμού.

Παρόλο που η υψηλότερη τιμή του ρυθμού δόσης στο PCV ήταν μεγαλύτερη από 5000 Sv/h, η εταιρία Tokyo Electrical Power Company Holdings επισήμανε πως οι ρυθμοί δόσης στον πυθμένα του δοχείου πίεσης, οι οποίοι θα ήταν σε θέση να εξαπλωθούν τα υπολείμματα πυρηνικού καυσίμου, ήταν χαμηλότερες από 10 Sv/h.

Το υλικό ^{154}Eu είναι ένα υλικό σχάσης με μια εμφανή γραμμή ακτίνων γάμμα στα 1274 keV. Μια μελέτη για την διακριτική ικανότητα παθητικών ακτίνων γάμμα βασισμένη στη μέτρηση ^{154}Eu έδειξε ότι οι ακτίνες γάμμα υψηλής ενέργειας μπορούν να διαπεράσουν μεγαλύτερες ποσότητες θωράκισης. Επίσης, οι αυθόρμητες σχάσεις συμβαίνουν σε βαρέα νουκλεΐδια όπως: ^{244}Cm , ^{238}U , ^{240}Pu και ^{242}Pu , τα οποία οδηγούν σε εκπομπές ακτίνων γάμμα και νετρονίων υψηλής ενέργειας (~10 MeV).



Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση του περιβλήματος $CeBr_3$ που δείχνει τις διαστάσεις του και τις διαστάσεις του εξωτερικού χαλαζία (Kaburagi et al., 2020).

Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία της φασματομετρίας ακτίνων γάμμα, χρειάζεται ανιχνευτές ημιαγωγών. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το γερμάνιο υψηλής καθαρότητας. Το συγκεκριμένο υλικό είναι αναγκαίο λόγω της υψηλής ενεργειακής διακριτικής ικανότητας. Παράλληλα έχουν εφαρμογή στην ραδιομετρική διακριτική

ικανότητα δομικών υλικών. Σημαντικό στοιχείο στο γερμάνιο είναι το στενό ενεργειακό χάσμα, πράγμα που καθιστά απαραίτητες τις συσκευές ψύξης έτσι ώστε να είναι εφικτή η μείωση της θερμικής παραγωγής φορέων φορτίου σε θερμοκρασία δωματίου. Λόγω αυτών των απαιτήσεων, οι ανιχνευτές γερμανίου είναι γενικά μεγάλοι από θέμα μεγέθους. Από την άλλη μεριά ημιαγωγοί όπως οι CdTe, CZT και TiBr χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασία δωματίου και έχουν μεγάλες αποδόσεις ανίχνευσης λόγω των μεγάλων ενεργών ατομικών αριθμών και των πυκνοτήτων τους. Παρόλα αυτά η κινητικότητα που έχει το φορτίο τους είναι πιο χαμηλή σε σχέση με αυτή του γερμανίου, για αυτό άλλωστε έχουμε πιο υψηλά σήματα παλμού. Αυτή είναι η αιτία που τέτοιου είδους ημιαγωγοί δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φασματομετρία ακτίνων γάμμα σε υψηλούς ρυθμούς δόσης. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές έχουν υψηλό κόστος και παρουσιάζουν βλάβες νετρονίων.

Χαρακτηριστικό του $CeBr_3$ είναι η υψηλή απόδοση φωτός που έχει και η καλή αναλογικότητα, αυτή είναι υπεύθυνη για την ενεργειακή διακριτική ικανότητα που διαθέτει. Οι φωτοπολλαπλασιαστές έχουν την ίδια μέγιστη τιμή αιχμής μήκους κύματος, η οποία είναι 380 nm.

Οι τιμές 0.7 ns και 17 ns ανήκουν στον χρόνο ανόδου και χρόνο απόσβεσης αντίστοιχα. Ωστόσο, η παράταση του χρόνου απόσβεσης εμφανίζεται καθώς ο όγκος των κρυστάλλων αυξάνεται λόγω της επανεκπομπής του Ce^{3+} . Ο χρόνος απόσβεσης είναι μικρότερος από 20 ns σε κύβο διαστάσεων 5 mm × 5 mm × 5 mm, αλλά υπερβαίνει τα 22 ns σε κύλινδρο μισής ίντσας (12,7 mm). Ακόμη και ένας σπινθηριστής $CeBr_3$ μικρού μεγέθους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε παροπλισμό του FDNPS. Ήδη χρησιμοποιείται κυλινδρικός σπινθηριστής $CeBr_3$ μικρού μεγέθους, ο οποίος τοποθετείται σε τηλεχειριζόμενο όχημα για να είναι εφικτός ο εντοπισμός υπολειμμάτων πυρηνικών καυσίμων.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας των Kaburagi et al., ήταν εφαρμογή φασματομετρίας ακτίνων γάμμα, η οποία θα έχει ρυθμό δόσης έκθεσης έως και 10 Sv/h. Σε αυτή την εργασία, αναπτύχθηκε ένα μικρότερο κυβικό φασματόμετρο $CeBr_3$ και μελετήθηκε η απόδοσή του σε δόσεις από 4,4 έως 750 mSv/h σε πεδίο ^{60}Co . Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγάλωνε ο ρυθμός δόσης έκθεσης, τόσο μεγαλύτερη ήταν η μετατόπιση προς υψηλότερες ενέργειες. Ποσοστιαία, η μετατόπιση ήταν 51%

Η τεχνολογία της μικρής κατασκευής σε κυβικά 5 mm σύμφωνα με τους συγγραφείς Kaburagi et al., αναμένεται να παρέχει καλή χωρική διακριτική ικανότητα για να βοηθήσει τον καθαρισμό να λειτουργεί με υψηλούς ρυθμούς δόσης.

Η τεχνολογία 3D είναι απαραίτητη καθώς μέρος των υπολειμμάτων πυρηνικής φύσεως δεν είναι εφικτό να εντοπιστούν, πράγμα το οποίο καθιστά αναγκαία την τεχνολογία της 3D ανακατασκευής, έτσι ώστε να είναι εφικτός ο εντοπισμός τους (Kaburagi et al., 2020).

2.3.9 Εφαρμογή $CeBr_3$ σε μετρήσεις φάσματος

Οι Munehiko Kowatari et al. στην συγκεκριμένη εργασία πραγματοποίησαν μέτρηση του φάσματος ύψους παλμού (PHS) που λαμβάνεται από το φασματόμετρο σπινθηρισμού $CeBr_3$ που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση ακτινοβολίας

έκτακτης ανάγκης. Όταν υπάρχει έκτακτη ραδιολογική κατάσταση, είναι απαραίτητη η μέτρηση και αξιολόγηση ακτινολογικών δεδομένων, ενδεικτικά αναφέρεται:

- ❖ Πυκνότητα επιφανειακής μόλυνσης στο έδαφος
- ❖ Ποσοστό ισοδύναμου δόσης στις πληγείσες περιοχές.

Οι προηγούμενες μετρήσεις των συστατικών υποβάθρου (BG) πριν από μια έκτακτη ανάγκη είναι σημαντικές για να εκτιμηθεί σωστά πόσο εμπλέκονται τα τεχνητά ραδιονουκλίδια σε μια τεχνητή αύξηση του ρυθμού ισοδύναμου δόσης. Ωστόσο, η μέτρηση BG δεν εφαρμόζεται πριν από μια ακτινολογική έκτακτη ανάγκη. Πιο σημαντικό θα ήταν οι BG που συλλέγονται από το φασματόμετρο σπινθηρισμού, το οποίο είναι αναγκαίο για την παρακολούθηση της ακτινοβολίας έκτακτης ανάγκης μπορούσαν να αξιολογηθούν χωρίς να είναι απαραίτητη κάποια προηγούμενη μέτρηση.

Λόγω των ραδιονουκλεϊδίων, χρειάστηκε να αναδημιουργηθεί το PHS του φασματόμετρου σπινθηρισμού $CeBr_3$. Αυτό ήταν εφικτό μέσω των υπολογισμών Monte Carlo (MC). Πραγματοποιήθηκε μια in situ φασματομετρία ακτίνων γάμμα στο πεδίο της Ιαπωνικής Υπηρεσίας Ατομικής Ενέργειας (JAEA), για την εκτίμηση των πυκνοτήτων επιφανειακής μόλυνσης στο έδαφος ^{134}Cs και ^{137}Cs . Για να αξιολογηθούν ξανά τα καθαρά PHS, ήταν αναγκαία η αφαίρεση του background-BG από το «μεικτό» PHS το οποίο είχε προηγουμένως συλλεχθεί από την in situ φασματομετρία ακτίνων γάμμα. Στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι προκύπτουσες πυκνότητες επιφανειακής μόλυνσης στο έδαφος των ^{134}Cs και ^{137}Cs τόσο από το «ακαθάριστο» όσο και από το «καθαρό» PHS εάν η αφαίρεση του υπολογισμένου συστατικού BG παρεμποδίζει τον σωστό προσδιορισμό της πυκνότητας επιφανειακής μόλυνσης στο έδαφος.

Ο κρύσταλλος $CeBr_3$ χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία λόγω της πολύ καλής του ενεργειακής διακριτικής ικανότητας του. Αντί του ανιχνευτή $LaBr_3:Ce$, στην εργασία των Kowatari et al., επιλέχτηκε φασματόμετρο σπινθηρισμού $CeBr_3$ για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης δραστηριότητας στο θαλασσινό νερό. Αυτό συμβαίνει επειδή έχουν παρόμοια ενεργειακή διακριτική ικανότητα, σε σύγκριση με έναν ανιχνευτή σπινθηρισμού $LaBr_3:Ce$ (Kowatari et al., 2020).

2.3.10 Εφαρμογή σε μορφή λεπτών μεμβρανών

Στην εργασία των Matson et al., παρήχθησαν δείγματα λεπτής μεμβράνης $CeCl_3$, $CeBr_3$ και συνδυαστικών συνθέσεων της ένωσης $CeCl_3-CeBr_3$ χρησιμοποιώντας θερμική εξάτμιση, η οποία αξιολογείται ως μέθοδος ταχείας διαλογής υλικών σπινθηριστή.

Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν μια συνεχή διακύμανση στα συνδυαστικά δείγματα όσον αφορά τις συνθέσεις, τις κρυσταλλικές δομές και τα χαρακτηριστικά φωταύγειας.

Η ανάπτυξη συνθέσεων κατάλληλων για χρήση σε εφαρμογές σπινθηριστή έχει περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό είτε από το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για την ανάπτυξη μονοκρυστάλλων των συνθέσεων που προτείνονται με βάση θεωρητικές προβλέψεις είτε από τη χρήση συνδυαστικών μεθόδων που

χρησιμοποιούν σύνθεση σκόνης. Οι πρόσφατες προσπάθειες για την προβολή μιας μεγάλης ποικιλίας πιθανών συνθέσεων σπινθηριστή και φωταύγειας μέσω της χρήσης συνδυαστικής σύνθεσης λεπτής μεμβράνης ήταν ενθαρρυντικές (Matson et al., 2010).

2.3.11 Εφαρμογή $CeBr_3$ για μέτρηση φασμάτων

Υπάρχουν αναφορές ότι οι ανιχνευτές που προέρχονται από υλικό αλογονιδίου λανθανίου-δημητρίου, για παράδειγμα, $LaBr_3:Ce$ και $CeBr_3$ παρουσιάζουν μεγαλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα για ανίχνευση ακτινοβολίας γ σε σύγκριση με την διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών ιωδιούχου νατρίου.

Επιπλέον, οι κρύσταλλοι $LaBr_3:Ce$ και $CeBr_3$ επηρεάζονται σύμφωνα με μελέτες από την β - μόλυνση σε περιοχές που είναι χαμηλής ενέργειας και αντίστοιχα σε α – μόλυνση σε περιοχές με υψηλή. Η εργασία των Yuan et al., έγινε για να παρουσιαστεί η υπολογιστική προσέγγιση που έχει να κάνει με την ελάττωση της μόλυνσης για ανιχνευτές όπως $LaBr_3:Ce$ και $CeBr_3$ οι οποίοι χρησιμοποιούν έναν επιπλέον ανιχνευτή αναφοράς $NaI(Tl)$. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσον αυτόματης βαθμονόμησης για ανιχνευτές ακτινοβολίας γ από κρυστάλλους $LaBr_3:Ce$ και $CeBr_3$ (Yuan et al., 2011).

Από όταν ανακαλύφθηκαν τα αλογονίδια λανθανίου-δημητρίου (από την αρχή του 2000) και μετά, υπήρχε ο στόχος της δημιουργίας νέων ανόργανων υλικών σπινθηρισμού, οι οποίοι θα ήταν σε θέση να δημιουργήσουν ανιχνευτές με διακριτική ικανότητα υψηλής ενέργειας.

Η βελτιωμένη ενεργειακή διακριτική ικανότητα θα επέτρεπε τον διαχωρισμό ενεργειακών κορυφών με μεγαλύτερη απόσταση στα φάσματα γάμμα. Έχοντας αυτό κατά νου, η ομάδα των Yuan et al., στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης (RSL) του Υπουργείου Ενέργειας είχε συμμετάσχει προληπτικά στη συστηματική αξιολόγηση του φυσικού δυναμικού και της δυνατότητας εφαρμογής μιας επιλεγμένης συλλογής αλογονιδίων του λανθανίου, συμπεριλαμβανομένων των $LaCl_3:Ce$, $LaBr_3:Ce$ και πιο πρόσφατα $CeBr_3$.

Υπάρχει η δυνατότητα μείωσης της ραδιενέργειας μέσα στον κρύσταλλο, αφού πρώτα γίνουν οι απαραίτητες της διαδικασίας κρυστάλλωσης. Το λανθάνιο έχει φυσικά δύο κύρια ισότοπα: Το ^{139}La και ^{138}La . Το ^{138}La διασπάται με σύλληψη ηλεκτρονίων σε ^{138}Ba με συντελεστή διακλάδωσης 65,6%. Οι διασπάσεις είναι υπεύθυνες για δύο ενεργειακές γραμμές στα 789 και 1436 keV (Yuan et al., 2011).

Με βάση την παραπάνω συζήτηση, η επιτυχής προσαρμογή του $LaBr_3:Ce$ για ανίχνευση γάμμα θα χρειαζόταν καλύτερες τεχνολογίες για τη μείωση της αυτοδραστηριότητας. Μια άμεση επιλογή είναι η φυσική αφαίρεση του ισότοπου ^{138}La και άλλων προσμίξεων ενισχύοντας τη διαδικασία παραγωγής. Ένας ανιχνευτής πιο καλός θα μπορούσε να δώσει πιο καλές εκτιμήσεις για φάσματα αυτοδραστηριότητας $LaBr_3$ και $CeBr_3$, ωστόσο η διαδικασία βαθμονόμησης είναι η ίδια.

Στην εργασία των Yuan et al., παρουσιάστηκε μια υπολογιστική διαδικασία για τον διαχωρισμό της αυτο-δραστηριότητας από τα φάσματα γάμμα που λαμβάνονται από τους ανιχνευτές $LaBr_3:Ce$ και $CeBr_3$.

Με αυτήν την προσέγγιση, είναι δυνατή η ανάπτυξη μιας νέας γενιάς ανιχνευτών $LaBr_3:Ce$ και $CeBr_3$ ικανών να παράγουν φάσματα τόσο καθαρά όσο αυτά που λαμβάνονται από τους συμβατικούς ανιχνευτές $NaI:Tl$, αλλά με πολύ βελτιωμένη ενεργειακή διακριτική ικανότητα.

Τα φάσματα αυτο-δραστηριότητας που υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποδειχθούν ότι είναι συνεπή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλά χρόνια, αν και μπορεί να είναι επιθυμητό να υπολογιστούν εκ νέου τα φάσματα αυτο-δραστηριότητας για ορισμένες εφαρμογές (Yuan et al., 2011).

2.3.12 Μελλοντικές Εφαρμογές

Το 1971 ο Damadian θεώρησε ότι οι χρόνοι χαλάρωσης MR πρέπει να χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση καρκινικών κυττάρων. Το 1980 άρχισαν να γίνονται οι πρώτες αναφορές στην Ακτινολογία, οι οποίες ήταν σχετικές με την απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (MR), ωστόσο ο αμερικανικής καταγωγής χημικός Paul Lauterbur ήταν αυτός ο οποίος πρωτοστάτησε στις πρώτες εικόνες MR. Οι εικόνες MR έχουν δει μεγάλη εξέλιξη, η οποία μπορεί να ταξινομηθεί κατά προσέγγιση σε υλικό (π.χ. μαγνήτες, πηνία ραδιοσυχνοτήτων RF, πομπός και δέκτης RF, συσκευές βιοψίας συμβατές με απεικόνιση MR) και τεχνικές απεικόνισης (π.χ. ακολουθίες παλμών, παράλληλη απεικόνιση κ.λπ.). Η βέλτιστη εικόνα επιτυγχάνεται με συνδυασμένη χρήση συστημάτων RF, πηνία σταδιακής συστοιχία και μαγνήτες υψηλής έντασης.

Ωστόσο πλέον υπάρχουν και τα υβριδικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν δύο μηχανήματα σε ένα. Πιο συγκεκριμένα τα μηχανήματα MR/ποζιτρονίων (PET), συνδυάζουν τις ανατομικές και λειτουργικές απεικονιστικές δυνατότητες της απεικόνισης MR με την τεχνολογία του PET να επιδεικνύουν τον μεταβολισμό των ιστών. Όπως είναι φυσικό με την πάροδο των χρόνων έχει υπάρξει μεγάλη πρόοδος στον σχεδιασμό ακολουθιών παλμών και στις τεχνικές ανακατασκευής εικόνας, η οποία έχει βοηθήσει στην ταχύτητα απεικόνισης και την ικανότητα μελέτης της λειτουργίας των ιστών.

Το υπερηχογράφημα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1940 από τον George Ludwig. Αντίθετα ο σαρωτής τύπου CT αρχικά σχεδιάστηκε το 1967 αλλά η εφαρμογή σε ασθενή έγινε το 1971.

Το 1980 ο αμερικανικής καταγωγής καθηγητής ραδιολογίας Ronald Evens, MD, ανέφερε ότι η απεικόνιση πυρηνικής μαγνητικής τομογραφίας αντιμετώπισε πολλά εμπόδια. Παράλληλα ανέφερε ότι η εν λόγω τεχνολογία θα έπρεπε να χρησιμοποιείται στον ιατρικό τομέα και συγκεκριμένα για διαγνωστικούς σκοπούς. Την ίδια χρονιά έγινε εισαγωγή του πρώτου εμπορικού συστήματος απεικόνισης μαγνητικών τομογράφων, βασισμένο στην πυρηνική τεχνική μαγνητικής

τομογραφίας τον ιατρό αρμενικής καταγωγής Damadian. Την ίδια χρονιά άρχισαν να γίνονται δημοσιεύσεις που αφορούσαν τον εγκέφαλο, τη σπονδυλική στήλη, το στήθος, το στήθος, την κοιλιά και τη λεκάνη.

Στα επόμενα χρόνια υπήρξαν πάρα πολλές εργασίες βασισμένες σε αυτήν την τεχνολογία. Μόνο το 2013, υπήρχαν 240 δημοσιεύσεις με τίτλο «MR imaging». Η αύξηση των ετήσιων δημοσιεύσεων είναι σε συνάρτηση με την διαγνωστική χρήση. Ενώ υπήρχε μόνο ένας μικρός αριθμός εικόνων χαμηλής και μέσης δύναμης που χρησιμοποιήθηκαν για να πραγματοποιήσουν έναν μικρό αριθμό εξετάσεων τη δεκαετία του 1980, μέχρι το 2010 χρησιμοποιήθηκαν δεκάδες χιλιάδες μηχανήματα απεικόνισης μαγνητικής τομογραφίας παγκοσμίως.

Η απεικόνιση MR είναι ανώτερη σε σύγκριση με άλλους τρόπους απεικόνισης καθώς συνδυάζει την ανατομική απεικόνιση με την ποσοτική αξιολόγηση της λειτουργίας των ιστών σε πολλαπλές κλίμακες (μακροσκοπική, μικροσκοπική και μοριακή).

Πλέον, η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει βρει αρκετές εφαρμογές, όπως: Φασματοσκοπία, απεικόνιση διάχυσης, επισήμανση μυοκαρδίου, αντίθεση εξαρτώμενη από το οξυγόνο στο αίμα (Rischpler and Woodard, 2019).

Την ίδια εξέλιξη έχει ακολουθήσει στο κλινικό κομμάτι η τεχνολογία απεικόνισης MR. Χωρίς την τεχνολογία απεικόνισης δεν είναι εφικτή η απεικόνιση MR εγκεφάλου. Από την άλλη μεριά χωρίς την καταλυτική βοήθεια από τις κλινικές εφαρμογές που γίνονται στα ίδια τα νοσοκομεία, σχεδόν καμία από τις τεχνολογικές ανακαλύψεις δεν θα ήταν εφικτή (Edelman, 2014).

Η ιατρική απεικόνιση έχει βελτιωθεί πάρα πολύ από τότε που λήφθηκαν οι πρώτες ακτινογραφίες πριν από 120 χρόνια. Μετά από τις τεχνολογικές ανακαλύψεις που έχουν γίνει με το πέρασμα των χρόνων, τα ποσοστά της διερευνητικής χειρουργικής έχουν μειωθεί πάρα πολύ, αυτό γίνεται καθώς τα αποτελέσματα από την ιατρική απεικόνισης έχουν πολύ μεγάλη ακρίβεια. Αυτό έχει ως σκοπό να οδηγήσει σε έγκαιρη διάγνωση και καλύτερες επιλογές θεραπείας για πολλούς ασθενείς (Bradley, 2008).

Κεφάλαιο 3

3.1 Πειραματική Διαδικασία

Η δυνατότητα εφαρμογής του κρυστάλλου CeBr₃ ως σπινθηριστή κατά την λήψη ακτινογραφίας με ακτίνες-Χ προσδιορίστηκε με υπολογισμό μιας σειράς ιδιοτήτων ανίχνευσης ακτίνων-Χ, παράλληλα συγκρίνοντας με δημοσιευμένα δεδομένα (Kandarakis, 2016; Valais et al., 2006). Χρησιμοποιήθηκε ένας μονοκρύσταλλος, κυβικού σχήματος, μεγέθους 10 mm, με γυαλισμένες επιφάνειες από την Advatech (Advatech UK, 2022). Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε σύγκριση των παραμέτρων QDE και ΕΑΕ με προηγούμενα δημοσιευμένα δεδομένα για κρυστάλλους CaF₂:Eu και Lu₃Al₅O₁₂:Ce (Michail et al., 2020). Στο υπολογιστικό κομμάτι ελήφθησαν υπόψη προσομοιωμένα πολυενεργειακά φάσματα ακτίνων-Χ (Boone and Seibert, 1997; Sotiropoulou et al., 2015).

3.1.1 Κβαντική Ανιχνευτική Αποδοτικότητα (QDE)

Για την ανάλυση των ιδιοτήτων ανίχνευσης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η ανιχνευτική κβαντική αποδοτικότητα (Koukou et al., 2015). Επιπλέον, το QDE είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στον χαρακτηρισμό των ανιχνευτών μέτρησης φωτονίων (Linardatos et al., 2020). Την συγκεκριμένη παράμετρο την χαρακτηρίζει ο συντελεστής εξασθένησης των φωτονίων, ο οποίος αντιστοιχεί στα προσπίπτοντα φωτόνια και τις αλληλεπιδράσεις τους εντός της μάζας του σπινθηριστή (Linardatos et al., 2020). Για να υπολογιστούν οι συντελεστές εξασθένησης και απορρόφησης ενέργειας των σπινθηριστών CeBr₃ χρειάστηκαν δεδομένα από πίνακα απορρόφησης ενέργειας και συντελεστών εξασθένησης. Αυτό έγινε με την βοήθεια του λογισμικού XmuDat (Okunade, 2007; Storm and Israel, 1970). Η κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα ακτίνων-Χ για πολύενεργητικές ακτίνες-Χ υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$QDE(E) = \frac{\int_0^{E_0} \Phi_0(E) (1 - e^{-(\mu_{att}(E)/\rho)W}) dE}{\int_0^{E_0} \Phi_0(E) dE} \quad (2)$$

Όπου Φ_0 η ροή φωτονίων ακτίνων-Χ (φωτόνια ανά μονάδα επιφάνειας) που προσπίπτει στον σπινθηριστή, μ_{att} είναι ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης ακτίνων-Χ του σπινθηριστή και ο οποίος, υποδηλώνει το πάχος του κρυστάλλου W (g/cm²) (Dobbins, 2000; Linardatos et al., 2022).

3.1.2 Απόδοση Ενεργειακής Απορρόφησης (EAE)

Το EAE είναι το βέλτιστο μέγεθος για τον προσδιορισμό ανιχνευτών, οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή στην απεικόνιση με ενεργειακή ολοκλήρωση. Επιπλέον, αποτελεί μια ένδειξη σχετικά με το ποιο κλάσμα των προσπιπτόντων φωτονίων ακτίνων-Χ καθορίζει τον σχηματισμό του σήματος εξόδου και εκφράζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$EAE(E) = \frac{\int_0^{E_0} \Phi_0(E) E \left(\frac{\mu_{en}(E)/\rho}{\mu_{att}(E)/\rho} \right) (1 - e^{-(\mu_{att}(E)/\rho)W}) dE}{\int_0^{E_0} \Phi_0(E) E dE} \quad (3)$$

Ο μαζικός συντελεστής ενεργειακής απορρόφησης (μ_{en}), αντιπροσωπεύει την ενέργεια που μεταφέρεται από τα φωτόνια στα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια, η οποία απορροφάται τοπικά, δηλαδή πολύ κοντά στο σημείο αλληλεπίδρασης (Linardatos et al., 2022).

3.1.3 Παράγοντας Φασματικής Συμβατότητας (SMF)

Η παράμετρος SMF μεταβάλλεται από τη φασματική απόκριση του αισθητήρα, αυτή με την σειρά της περιγράφεται από τον παράγοντα φασματικής συμβατότητας (Michail et al., 2020):

$$SMF = \frac{\int S_p(\lambda) S_D(\lambda) d\lambda}{\int S_p(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

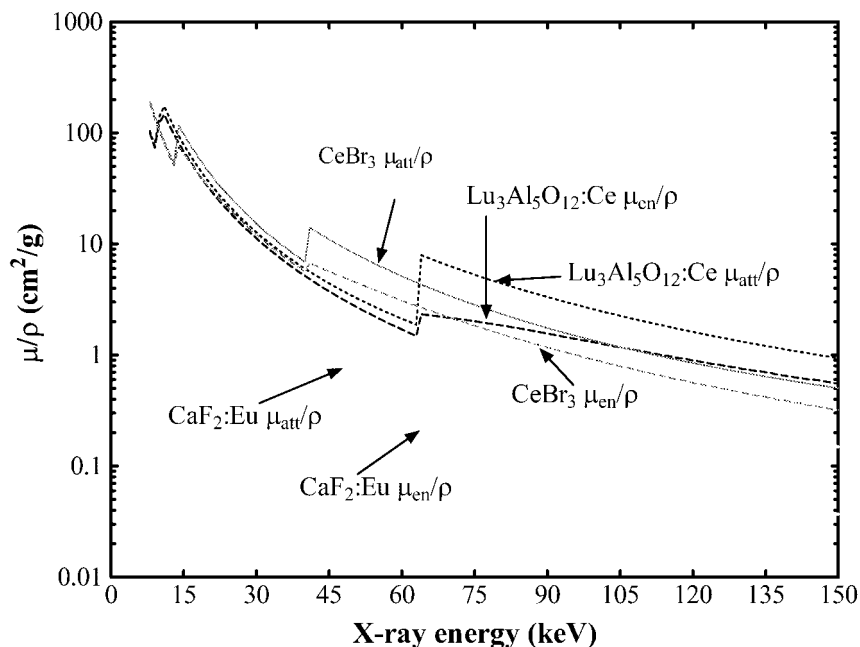
Η μεταβλητή S_p αντιστοιχεί στο φάσμα του φωτός το οποίο εκπέμπεται από τον σπινθηριστή, η μεταβλητή S_D αντιστοιχεί στην φασματική ευαισθησία του οπτικού ανιχνευτή φωτονίων και το λ είναι το μήκος κύματος των φωτονίων.

Για να μετρηθεί το φάσμα εκπομπής χρειάστηκε το οπτικό φασματόμετρο Ocean Optics Inc., HR2000, το οποίο μέτρησε την ακτινοβολία που παρήχθη μετά από διέγερση του κρυστάλλου με ακτινοβολία UV. Αξιολογήθηκαν οπτικοί ανιχνευτές, των οποίων τα φασματικά δεδομένα εξήχθησαν από τα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστριών εταιριών (Linardatos et al., 2022; Magnan, 2003; C. Michail et al., 2018).

Κεφάλαιο 4

4.1 Αποτελέσματα και συζήτηση

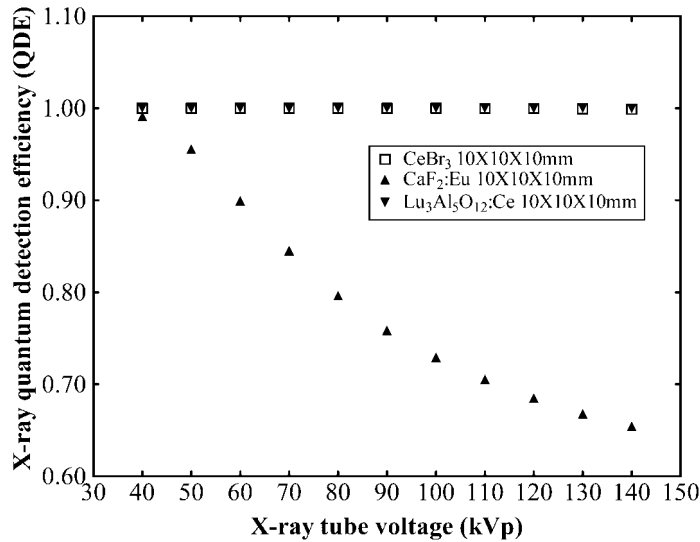
Η εικόνα 4 δείχνει τους υπολογισμένους συντελεστές εξασθένησης για όλα τα εξεταζόμενα υλικά, που υπολογίζονται σύμφωνα με την μεθοδολογία που έχει αναφερθεί. Αυτά τα δευτερεύοντα φωτόνια μπορεί να αλληλεπιδρούν περισσότερο από το αρχικό σημείο αλληλεπίδρασης, επομένως δεν είναι χρήσιμα για προβολική απεικόνιση. Με την αύξηση της ενέργειας των ακτίνων-Χ, οι συντελεστές εξασθένησης μειώνονται, εκτός από τις χαρακτηριστικές ενέργειες κάθε υλικού (αιχμή Κ, αιχμή L, κ.λπ.) όπου η πιθανότητα φωτοηλεκτρικής αλληλεπίδρασης δείχνει ένα τοπικό μέγιστο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4. Συντελεστές εξασθένησης των κρυστάλλων CeBr_3 , $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ και $\text{CaF}_2:\text{Eu}$.

Απόδοση Κβαντικής Ανιχνευτικότητας (QDE)

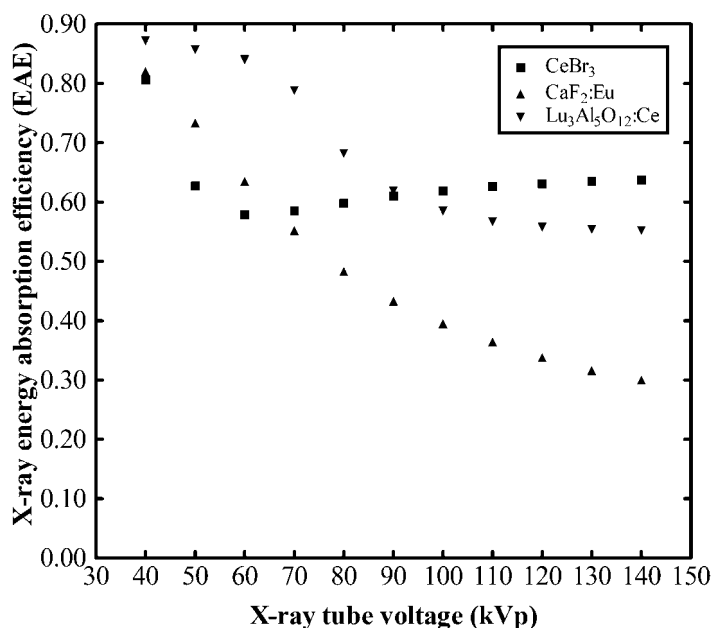
Η εικόνα 5 δείχνει τις υπολογισμένες τιμές QDE για τον κρύσταλλο CeBr_3 και τα αντίστοιχα δεδομένα για τους κρυστάλλους $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ και $\text{CaF}_2:\text{Eu}$. Οι τιμές QDE του CeBr_3 ήταν συνεχώς ίσες με 1, έως 140 kVp και ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$. Οι τιμές QDE του $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ μειώθηκαν, ξεκινώντας από 40 kVp (QDE=0,991) έως 140 kVp (QDE=0,655).



Εικόνα 5. Κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα των κρυστάλλων CeBr_3 , $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ και $\text{CaF}_2:\text{Eu}$.

Απόδοση Ενεργειακής Απορρόφησης (ΕΑΕ)

Η εικόνα 6 δείχνει τις τιμές απορρόφησης ενέργειας για το CeBr_3 και τους συγκριθέντες κρυστάλλους έναντι της τάσης της λυχνίας των ακτίνων-Χ. Η ΕΑΕ εξαρτάται από τη συμπεριφορά των συντελεστών που φαίνονται στην εικόνα 4. Το CeBr_3 (πυκνότητα $5,1 \text{ g/cm}^3$) αρχικά έδειξε χαμηλότερες τιμές ΕΑΕ από το $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (πυκνότητα $6,73 \text{ g/cm}^3$). Ωστόσο, όταν η ενέργεια αυξάνεται περισσότερο από 100 kVp, η απορρόφηση ενέργειας του CeBr_3 είναι ισχυρότερη από τους συγκριθέντες κρυστάλλους, λόγω των συνδυασμένων επιπτώσεων της πυκνότητας και της αύξησης της απορρόφησης που αποδίδεται στην Κ αιχμή. Η χαμηλή πυκνότητα του $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ ($3,18 \text{ g/cm}^3$) δεν επαρκεί για τη διατήρηση υψηλής απορρόφησης, ειδικά όταν η ενέργεια των ακτίνων-Χ αυξάνεται περισσότερο από 60 kVp, σε σύγκριση με τους άλλους κρυστάλλους. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 2 και 3, οι τιμές κβαντικής ανιχνευτικής αποδοτικότητας είναι υψηλότερες από την απορρόφηση ενέργειας, αφού η QDE λαμβάνει υπόψη όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις, ενώ η ΕΑΕ δεν λαμβάνει υπόψη τα σκεδαζόμενα φωτόνια, την ακτινοβολία bremsstrahlung και τη χαρακτηριστική ακτινοβολία K, L.



Εικόνα 7. Αποδοτικότητα απορρόφησης ενέργειας των κρυστάλλων CeBr₃, Lu₃Al₅O₁₂:Ce και CaF₂:Eu.

Παράγοντες φασματικής συμβατότητας (SMF)

| Οπτικοί αισθητήρες | CeBr ₃ | Οπτικοί αισθητήρες | CeBr ₃ |
|--|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| CCD broadband AR coating | 0,76 | GaAsP phosphor photocathode | 0,35 |
| CCD infrared (IR) anti-reflection (AR) coating | 0,42 | Extended photocathode (E-S20) | 0,95 |
| CMOS hybrid blue anti-reflection (AR) coating | 0,51 | Si PM MicroFC-30035-SMT | 0,86 |
| Hybrid CMOS blue | 0,63 | Si PM MicroFB-30035-SMT | 0,78 |
| CMOS (monolithic 0.25μm) | 0,32 | Si PM MicroFM-10035 | 0,34 |
| a-Si:H passivated | 0,55 | Si PM S10985-050C | 0,86 |
| a-Si:H non-passivated | 0,84 | Si PM S10362-11-025U | 0,86 |
| CCD indium tin oxide (ITO) gates, microlenses | 0,58 | Si PM S10362-11-050U | 0,82 |
| CCD with indium tin oxide (ITO) gates | 0,39 | Si PM S10362-11-100U | 0,88 |
| CCD with polygates | 0,03 | Flat panel PS-PMT H8500C-03 | 0,99 |
| CCD no poly-gates LoD | 0,19 | Flat panel PS-PMT H8500D-03 | 0,95 |
| CCD with traditional poly gates | 0,20 | Flat panel PS-PMT H10966A | 0,96 |
| CMOS (photogate array 0.5) | 0,14 | Flat panel PS-PMT H8500C | 0,97 |
| CMOS RadEye HR | 0,05 | Bialkali Photocathode | 0,95 |
| GaAs Photocathode | 0,94 | Multialkali Photocathode | 0,97 |

Πίνακας 2. Συντελεστές φασματικής συμβατότητας του CeBr₃ με εμπορικά διαθέσιμους αισθητήρες.

Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τον συντελεστή φασματικής συμβατότητας με διάφορους ανιχνευτές και δείχνει ξεκάθαρα ότι η βέλτιστη συμβατότητα επιτυγχάνεται κυρίως με φωτοπολλαπλασιαστές ευαισθησίας θέσης (PS-PMT). Για παράδειγμα, με το

Πειραματική μελέτη του Κρυσταλλικού Σπινθηριστή CeBr_3 για ιατρικές εφαρμογές

H8500C-03 (99%) και το PS-PMT H8500C (97%). Η συμβατότητα είναι επίσης υψηλή με πολυαλκαλικές (97%) και διααλκαλικές φωτοκαθόδους (95%). Η φωτοκάθοδος αρσενιδίου του γαλλίου (GaAs) παρέχει SMF 94%, ενώ η εκτεταμένη φωτοκάθοδος E-S20 95%. Το φως του CeBr_3 δεν μπορεί να ταυτιστεί με ψηφιακούς αισθητήρες, όπου οι τιμές SMF είναι από 3% έως 76%.

Συμπεράσματα

Οι ιδιότητες ανίχνευσης ακτίνων-Χ και φασματικής συμβατότητας ενός κρυστάλλου CeBr_3 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ εξετάστηκαν για ενέργειες έως 140 kVp για εφαρμογές απεικόνισης ακτίνων-Χ. Προσδιορίστηκε η συμβατότητα του εκπεμπόμενου φωτός του CeBr_3 με οπτοηλεκτρονικούς αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συχνά στην ιατρική απεικόνιση. Για να μπορέσει να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα ανίχνευσης και απορρόφησης, το υλικό έπρεπε να συγκριθεί με δεδομένα που συλλέχθηκαν για κρυστάλλους $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ και $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$. Παρατηρήθηκε ότι οι τιμές ΕΑΕ του CeBr_3 ήταν πιο ψηλές από το $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ και από το $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ όταν η ενέργεια αυξήθηκε περισσότερο από 100 kVp, ενώ οι τιμές QDE ήταν συνεχώς ίσες με 1, έως και 140 kVp. Παρατηρήθηκε ότι τα εκπεμπόμενα οπτικά φωτόνια του CeBr_3 ανιχνεύονταν καλύτερα από φωτοκαθόδους και φωτοπολλαπλασιαστές ευαισθησίας θέσης. Αυτές οι ιδιότητες, μαζί με την υψηλή απόδοση φωτός που αναφέρεται στη βιβλιογραφία, υποστηρίζουν τη χρήση του CeBr_3 σε εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης (Linardatos et al., 2022).

Βιβλιογραφία

- Advatech UK, 2022. CeBr₃ Available online: <https://www.advatech-uk.co.uk/cebr3.html> (accessed on 14 June 2021).
- Androulakaki, E.G., Tsabaris, C., Maragkos, F., Patiris, D.L., Pappa, F.K., Eleftheriou, G., Alexakis, S., Kokkoris, M., Vlastou, R., 2020. Calibration of a CeBr₃ based γ -spectrometer for onsite and laboratory radioactivity measurements in sediment samples. *Applied Radiation and Isotopes* 160, 109124. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109124>
- Asefa, T., Dubovoy, V., 2017. 9.09 - Ordered Mesoporous/Nanoporous Inorganic Materials via Self-Assembly, in: Atwood, J.L. (Ed.), *Comprehensive Supramolecular Chemistry II*. Elsevier, Oxford, pp. 157–192. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.12649-6>
- Bayard, S., Fasano, G., Chen, Y., Davis, M., Drotman, M., Bensenhaver, J., Swistel, A., Simmons, R., Marti, J., Newman, L., 2021. Screening mammography mitigates breast cancer disparities through early detection of triple negative breast cancer. *Clinical Imaging* 80, 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2021.08.013>
- Boncher, W.L., Lin, T.C., Cordes, N.L., Hehlen, M.P., 2015. Sequestration of cerium(III) bromide into mesoporous silica. *Microporous and Mesoporous Materials* 211, 158–161. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.03.007>
- Boone, J.M., Seibert, J.A., 1997. An accurate method for computer-generating tungsten anode x-ray spectra from 30 to 140 kV. *Medical Physics* 24, 1661–1670. <https://doi.org/10.1118/1.597953>
- Bradley, W.G., 2008. History of Medical Imaging. *Proceedings of the American Philosophical Society* 152, 349–361.
- CDC, 2021. Radiation in Healthcare: Nuclear Medicine | Radiation | NCEH | CDC [WWW Document]. URL https://www.cdc.gov/nceh/radiation/nuclear_medicine.htm (accessed 3.24.22).
- Chytas, D., Salmas, M., Paraskevas, G., Demesticha, T., Skandalakis, G.P., Lazaridis, N., Katsourakis, A., Noussios, G., 2021. Evaluation of the use of cadaveric computed tomography in anatomy education: An overview. *Morphologie S1286-0115(21)00194–6*. <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2021.08.002>
- Cierniak, R., 2011. Some Words About the History of Computed Tomography, in: Cierniak, Robert (Ed.), *X-Ray Computed Tomography in Biomedical Engineering*. Springer, London, pp. 7–19. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-027-4_2
- Cunha, J., Shiel, W., 2020. X-Rays: Uses, Dangers, Definition & Pregnancy Safety [WWW Document]. *MedicineNet*. URL <https://www.medicinenet.com/x-rays/article.htm> (accessed 3.24.22).
- Dobbins, J.T., 2000. Image Quality Metrics for Digital Systems 161–223. <https://doi.org/10.1117/3.832716.ch3>
- D'Olympia, N., Lakshmi, S., Chowdhury, P., Jackson, E.G., Glodo, J., Shah, K., 2013. Sub-nanosecond nuclear half-life and time-of-flight measurements with CeBr₃. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 728, 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.06.084>
- Edelman, R.R., 2014. The History of MR Imaging as Seen through the Pages of Radiology. *Radiology* 273, S181–S200. <https://doi.org/10.1148/radiol.14140706>
- Fieberg, J.E., Smith, G.D., 2021. Dry Laboratory Forgery Investigation of a Purported Giorgio de Chirico Painting for a “Chemistry in Art” Course, in: *Contextualizing Chemistry in Art and Archaeology: Inspiration for Instructors*, ACS Symposium Series. American Chemical Society, pp. 315–356. <https://doi.org/10.1021/bk-2021-1386.ch013>
- Guss, P., Reed, M., Yuan, D., Reed, A., Mukhopadhyay, S., 2009. CeBr₃ as a room-temperature, high-resolution gamma-ray detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics*

- Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 608, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.06.096>
- Kaburagi, M., Shimazoe, K., Otaka, Y., Uenomachi, M., Kamada, K., Kim, K.J., Yoshino, M., Shoji, Y., Yoshikawa, A., Takahashi, H., Torii, T., 2020. A cubic CeBr_3 gamma-ray spectrometer suitable for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 971, 164118. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164118>
- Kandarakis, I.S., 2016. Luminescence in medical image science. Journal of Luminescence, The 17th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'14) 169, 553–558. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.11.009>
- Kobayashi, T., Hirotsuki, N., 2011. Residual stress effect on luminescence of CeBr_3 and its application as a pressure-memory material. Optical Materials 33, 1800–1802. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2011.06.016>
- Koukou, V., Martini, N., Fountos, G., Michail, C., Sotiropoulou, P., Bakas, A., Kalyvas, N., Kandarakis, I., Speller, R., Nikiforidis, G., 2017. Dual energy subtraction method for breast calcification imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 848, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.12.034>
- Koukou, V., Martini, N., Michail, C., Sotiropoulou, P., Fountzoula, C., Kalyvas, N., Kandarakis, I., Nikiforidis, G., Fountos, G., 2015. Dual Energy Method for Breast Imaging: A Simulation Study. Computational and Mathematical Methods in Medicine 2015, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2015/574238>
- Kowatari, M., Tanimura, Y., Kessler, P., Röttger, A., 2020. Attempt to estimate the background pulse height spectrum of the CeBr_3 scintillation spectrometer due to terrestrial gamma ray components: Application in environmental radiation monitoring. Radiation Measurements 138, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2020.106431>
- Kromek, 2022. Sensitive but lightweight gamma radioisotope detectors and neutron detectors perfect for use on drones [WWW Document]. Kromek. URL <https://www.kromek.com/nuclear/detectors-on-drones/> (accessed 3.24.22).
- Linardatos, D., Konstantinidis, A., Valais, I., Ninos, K., Kalyvas, N., Bakas, A., Kandarakis, I., Fountos, G., Michail, C., 2020. On the Optical Response of Tellurium Activated Zinc Selenide ZnSe:Te Single Crystal. Crystals 10, 961. <https://doi.org/10.3390/cryst10110961>
- Linardatos, D., Velissarakos, K., Valais, I., Fountos, G., Kalyvas, N., Michail, C., 2022. Cerium Bromide Single-Crystal X-Ray Detection and Spectral Compatibility Assessment with Various Optical Sensors. Material Design & Processing Communications 2022, 7008940. <https://doi.org/10.1155/2022/7008940>
- Litvak, M.L., Sanin, A.B., Golovin, D.V., Jun, I., Mitrofanov, I.G., Shvetsov, V.N., Timoshenko, G.N., Vostrukhin, A.A., 2017. Ground tests with prototype of CeBr_3 active gamma ray spectrometer proposed for future venus surface missions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 848, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.12.047>
- Liu, Y., Xu, Z., Yang, Z., Zhang, Y., Cui, J., He, Y., Ye, H., Zhao, K., Sun, H., Lu, R., Liu, M., Kanatzidis, M.G., Liu, S. (Frank), 2020. Inch-Size OD-Structured Lead-Free Perovskite Single Crystals for Highly Sensitive Stable X-Ray Imaging. Matter 3, 180–196. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.04.017>
- Lutter, G., Hult, M., Billnert, R., Oberstedt, A., Oberstedt, S., Andreotti, E., Marissens, G., Rosengård, U., Tzika, F., 2013. Radiopurity of a CeBr_3 crystal used as scintillation

- detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 703, 158–162. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.11.174>
- Magnan, P., 2003. Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Photodetection 504, 199–212. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00792-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00792-7)
- Markovskiy, A., Bartosiewicz, K., Chewpraditkul, W., Kim, K.J., Witkiewicz-Lukaszek, S., Zorenko, T., Chewpraditkul, W., Yoshikawa, A., Zorenko, Yu., 2021. Development of novel scintillation and photo-conversion materials based on Gd₃(Sc,Al,Ga)₅O₁₂:Ce single crystals grown by micro-pulling-down method. Materials Science and Engineering: B 273, 115395. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115395>
- Martini, N., Koukou, V., Fountos, G., Michail, C., Bakas, A., Kandarakis, I., Speller, R., Nikiforidis, G., 2017. Characterization of breast calcification types using dual energy x-ray method. Phys. Med. Biol. 62, 7741–7764. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa8445>
- Martini, N., Koukou, V., Michail, C., Fountos, G., 2020. Dual Energy X-ray Methods for the Characterization, Quantification and Imaging of Calcification Minerals and Masses in Breast. Crystals 10, 198. <https://doi.org/10.3390/cryst10030198>
- Matson, D.W., Graff, G.L., Male, J.L., Johnson, B.R., Nie, Z., Joly, A.G., Olsen, L.C., 2010. Synthesis and screening of thin films in the CeCl₃–CeBr₃ system for scintillator applications. Thin Solid Films 518, 3194–3198. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.09.015>
- Michail, C., Kalyvas, N., Bakas, A., Ninos, K., Sianoudis, I., Fountos, G., Kandarakis, I., Panayiotakis, G., Valais, I., 2019. Absolute Luminescence Efficiency of Europium-Doped Calcium Fluoride (CaF₂:Eu) Single Crystals under X-ray Excitation. Crystals 9, 234. <https://doi.org/10.3390/cryst9050234>
- Michail, Christos, Karpetas, G., Kalyvas, N., Valais, I., Kandarakis, I., Agavanakis, K., Panayiotakis, G., Fountos, G., 2018. Information Capacity of Positron Emission Tomography Scanners. Crystals 8. <https://doi.org/10.3390/cryst8120459>
- Michail, C., Koukou, V., Martini, N., Saatsakis, G., Kalyvas, N., Bakas, A., Kandarakis, I., Fountos, G., Panayiotakis, G., Valais, I., 2020. Luminescence Efficiency of Cadmium Tungstate (CdWO₄) Single Crystal for Medical Imaging Applications. Crystals 10, 429. <https://doi.org/10.3390/cryst10060429>
- Michail, C., Valais, I., Fountos, G., Bakas, A., Fountzoula, C., Kalyvas, N., Karabotsos, A., Sianoudis, I., Kandarakis, I., 2018. Luminescence efficiency of calcium tungstate (CaWO₄) under X-ray radiation: Comparison with Gd₂O₂S:Tb. Measurement 120, 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.027>
- Mould, R.F., 1995. The early history of X-ray diagnosis with emphasis on the contributions of physics 1895-1915. Phys. Med. Biol. 40, 1741. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/40/11/001>
- Nuclear Power, 2022. Detection of X-Rays - Detector of X-Rays | nuclear-power.com [WWW Document]. Nuclear Power. URL <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/detectors-of-ionization-radiation/detection-of-x-rays-detector-of-x-rays/> (accessed 3.24.22).
- Nüsslin, F., 2020. Wilhelm Conrad Röntgen: The scientist and his discovery. Physica Medica, 125 Years of X-Rays 79, 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.10.010>
- Okunade, A.A., 2007. Parameters and computer software for the evaluation of mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for body tissues and substitutes. J Med Phys 32, 124–132. <https://doi.org/10.4103/0971-6203.35725>

- Ozsahin, I., Uzun, B., Isa, N.A., Mok, G.S.P., Ozsahin, D.U., 2018. Comparative Analysis of the Common Scintillation Crystals Used in Nuclear Medicine Imaging Devices, in: 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC). Presented at the 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2018.8824485>
- Pal Mudaranthakam, D., Park, M., Thompson, J., Alsup, A.M., Krebill, R., Chollet Hinton, L., Hu, J., Gajewski, B., Godwin, A., Mayo, M.S., Wick, J., Harlan-Williams, L., He, J., Gurley-Calvez, T., 2021. A framework for personalized mammogram screening. *Preventive Medicine Reports* 23, 101446. <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2021.101446>
- Panda, D.K., Banerjee, D., Goyal, S.K., Patel, A.R., Shukla, A.D., 2017. Development of a Cerium bromide gamma ray spectrometer for space applications. *Advances in Space Research* 60, 1307–1314. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.016>
- Pashazadeh, A., Boese, A., Friebe, M., 2019. Radiation therapy techniques in the treatment of skin cancer: an overview of the current status and outlook. *Journal of Cutaneous Medicine and Surgery* 30, 831–839. <https://doi.org/10.1080/09546634.2019.1573310>
- Peyres, V., Crespo, T., Mejuto, M., García-Toraño, E., 2017. Measurement of NORM samples with CeBr₃ detectors. *Applied Radiation and Isotopes, Proceedings of the 7th International Conference on Radionuclide Metrology – Low-Level Radioactivity Measurement Techniques* 126, 307–310. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.02.012>
- Picado, E., Carmona-Gallardo, M., Cal-González, J., Fraile, L.M., Mach, H., Udías, J.M., Vedia, V., 2017. Efficiency measurement and Monte Carlo simulations of a CeBr₃ scintillator. *Applied Radiation and Isotopes* 120, 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.11.017>
- Quarati, F.G.A., Alekhin, M.S., Krämer, K.W., Dorenbos, P., 2014. Co-doping of CeBr₃ scintillator detectors for energy resolution enhancement. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 735, 655–658. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.10.004>
- Rischpler, C., Woodard, P.K., 2019. PET/MR Imaging in Cardiovascular Imaging. *PET Clinics* 14, 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.cpet.2018.12.005>
- Schöder, H., Erdi, Y.E., Larson, S.M., Yeung, H.W.D., 2003. PET/CT: a new imaging technology in nuclear medicine. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 30, 1419–1437. <https://doi.org/10.1007/s00259-003-1299-6>
- Sotiropoulou, P.I., Fountos, G.P., Martini, N.D., Koukou, V.N., Michail, C.M., Valais, I.G., Kandarakis, I.S., Nikiforidis, G.C., 2015. X-ray dual energy spectral parameter optimization for bone Calcium/Phosphorus mass ratio estimation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 637, 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/637/1/012025>
- Storm, L., Israel, H.I., 1970. Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 7, 565–681. [https://doi.org/10.1016/S0092-640X\(70\)80017-1](https://doi.org/10.1016/S0092-640X(70)80017-1)
- Sunnybrook, R.I., 2022. X-ray Imaging Research Group - History of X-ray Imaging - Sunnybrook Research Institute [WWW Document]. URL <https://sunnybrook.ca/research/content/?page=sri-groups-xray-info-3> (accessed 3.24.22).
- Tian, M., Zhan, J., Lin, W., 2022. Single fluorescent probes enabling simultaneous visualization of duple organelles: Design principles, mechanisms, and applications. *Coordination Chemistry Reviews* 451, 214266. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214266>
- Valais, I.G., Kandarakis, I.S., Konstantinidis, A., Nikolopoulos, D.N., Sianoudis, I., Cavouras, D.A., Dimitropoulos, N., Nomicos, C.D., Panayiotakis, G.S., 2006. Evaluation of the light emission efficiency of LYSO:Ce scintillator under X-ray excitation for possible

- applications in medical imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Proceedings of the 3rd International Conference on Imaging Technologies in Biomedical Sciences 569, 201–204. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.08.018>
- Ye, M., Gong, P., Wu, S., Li, Y., Zhou, C., Zhu, X., Tang, X., 2021. Lightweight SiPM-based CeBr_3 gamma-ray spectrometer for radiation-monitoring systems of small unmanned aerial vehicles. Applied Radiation and Isotopes 176, 109848. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109848>
- Yuan, D., Guss, P., Mukhopadhyay, S., 2011. Computational removal of lanthanum–cerium bromide self-activity. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 644, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.04.004>