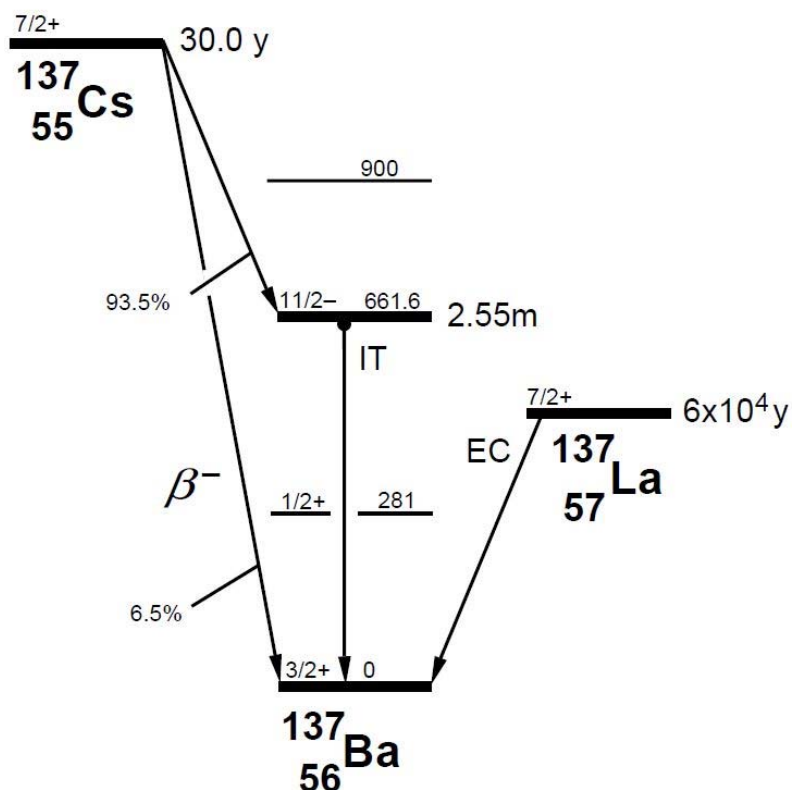


Μελέτες-Αναλύσεις

5 Σεπτεμβρίου 2014


[www.ArmsControl.gr](http://www.ArmsControl.gr)

## Φασματοσκοπία ακτίνων $\gamma$ & Ανιχνευτές σπινθηρισμών

του Δρ. Άγγελου Βορβολάκου  
 Φυσικού Υψηλών Ενέργειών  
 Ειδικού Επιστήμονα –Τομέα ΦΕ&Ε Σ.Σ.Ε.  
 Ερευνητή του ΕΚΕΟ

## Φασματοσκοπία ακτίνων γ & Ανιχνευτές σπινθηρισμών

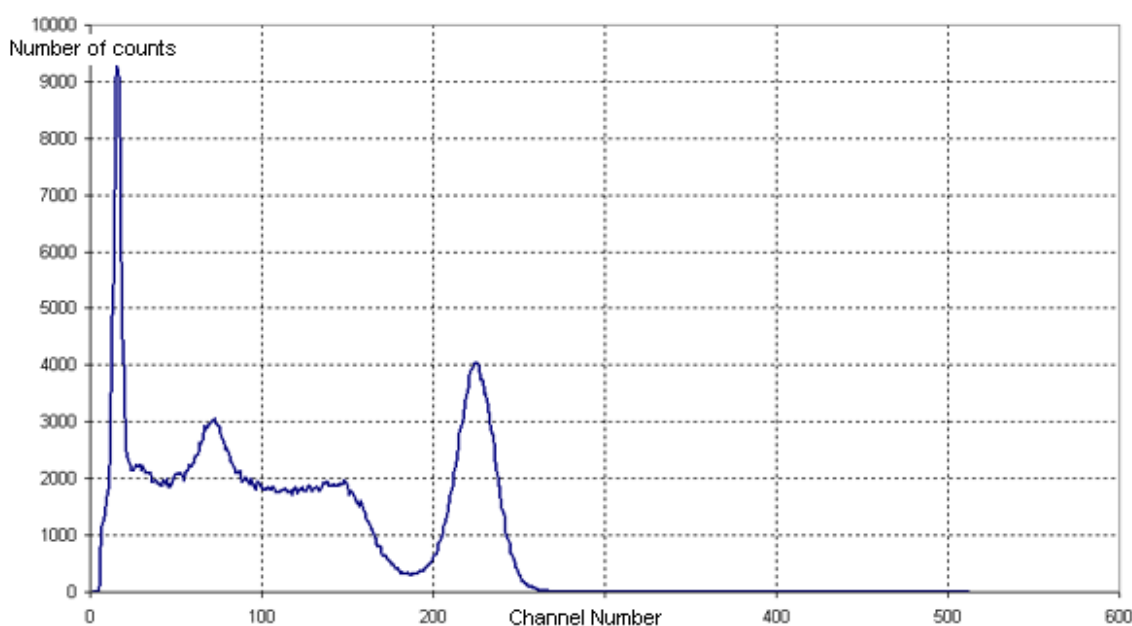
του Δρ. Άγγελου Βορβολάκου

Φυσικού Υψηλών Ενεργειών

Ειδικού Επιστήμονα στη Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων

Ερευνητή του ΕΚΕΟ

Φασματοσκοπία ακτίνων γ είναι η ποσοτική μελέτη των ενεργειακών φασμάτων πηγών ακτίνων γ. Οι περισσότερες ραδιενεργές πηγές παράγουν ακτίνες γ διαφορετικών ενεργειών και εντάσεων. Όταν αυτές οι ακτίνες συλλεχτούν και αναλυθούν από κάποιο σύστημα φασματοσκοπίας ακτίνων γ, μπορεί να δημιουργηθεί ένα φάσμα, όπως αυτό που απεικονίζεται παρακάτω:



**Εικόνα 1: Φάσμα ακτίνων γ από το ραδιονουκλίδιο  $^{137}\text{Cs}$ . Στο εικονιζόμενο φάσμα δεν έχει λάβει χώρα η ενεργειακή βαθμονόμηση, καθώς στον άξονα x απεικονίζεται απλά ο αριθμός καναλιού.**

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη μέτρηση της γ-ακτινοβολίας είναι η γ-φασματοσκοπία. Όλα σχεδόν τα υλικά περιέχουν έστω και ελάχιστες ποσότητες ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Το ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας είναι χαρακτηριστικό (αποτελεί ταυτότητα) του νουκλιδίου που την εκπέμπει. Από το χαρακτηριστικό φάσμα που εκπέμπει το ραδιενεργό ισότοπο μπορούμε να διαγνώσουμε την παρουσία ακόμα και ελαχίστων ποσοτήτων κάποιου στοιχείου σε υλικό. Αν πάλι το υλικό δεν περιέχει ραδιενεργό ισότοπο του υπόψη στοιχείου, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ενεργοποίησης (πχ με νετρόνια, δείγμα του υλικού βομβαρδίζεται με νετρόνια) οπότε παράγονται ραδιενεργά ισότοπα που συνήθως εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Από τα φάσματα των ακτινοβολιών αυτών προσδιορίζεται η παρουσία συγκεκριμένων στοιχείων στο υλικό. Συνήθως γίνεται λεπτομερής ανάλυση του φάσματος για να προσδιοριστεί η ταυτότητα και η ποσότητα των εκπομπών

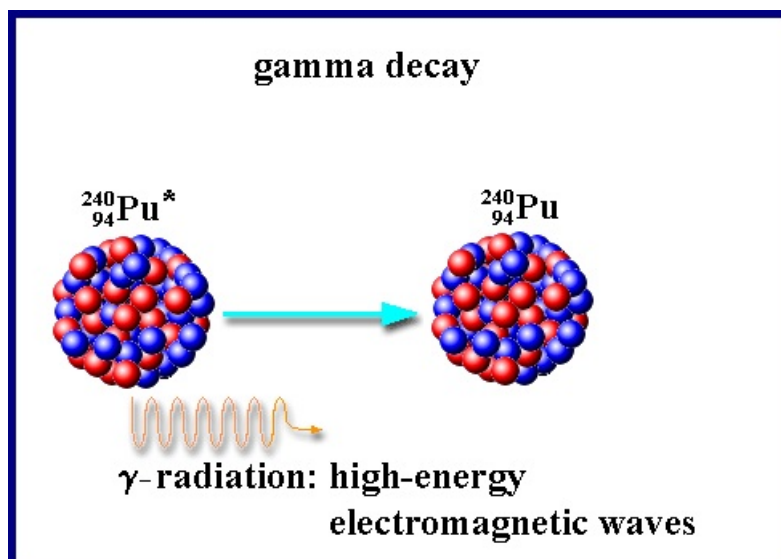
που βρίσκονται στην πηγή. Το φάσμα των ακτίνων  $\gamma$  είναι χαρακτηριστικό των νουκλιδίων που εκπέμπουν την ακτινοβολία, ακριβώς όπως στην οπτική φασματοσκοπία, όπου το οπτικό φάσμα είναι χαρακτηριστικό των ατόμων και μορίων που περιέχονται στο δείγμα.

Η  $\gamma$ -φασματοσκοπία λοιπόν εφαρμόζεται ευρύτατα ως ένα εργαλείο για την ανάλυση ενός ραδιενεργού δείγματος και συγκεκριμένα τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ισοτόπων που υπάρχουν σ' αυτό. Οι εφαρμογές της περιλαμβάνουν τομείς όπως: παρακολούθηση πυρηνικών εγκαταστάσεων, ακτινοφυσική, πυρηνική ιατρική, επιστήμη περιβάλλοντος, έρευνα υλικών, βιοεπιστήμες και βιομηχανικές εφαρμογές ραδιοϊσοτόπων.

Μία συντηρητική εκτίμηση δείχνει ότι περισσότερα από 200000 συστήματα  $\gamma$ -φασματομετρίας χρησιμοποιούνται σε ακαδημαϊκό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο παγκοσμίως. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 10 με 15 χρόνων έχουν κατασκευαστεί ανιχνευτές, ηλεκτρονικά και λογισμικό μεταφοράς και απεικόνισης δεδομένων για διατάξεις  $\gamma$ -φασματοσκοπίας που μπορούν με ευκολία να αναπτυχθούν σε εξωτερικούς χώρους. Τα φορητά αυτά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν σε ευρύτατη κλίμακα μετά το ατύχημα του Chernobyl αλλά και της Fukushima για τον επί τόπου ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιονουκλιδίων που ρύπαναν το περιβάλλον. Τα μεγέθη που μπορούν να προσδιοριστούν με τη μέθοδο της in-situ  $\gamma$ -φασματοσκοπίας είναι: η ταυτοποίηση και συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων και ο ρυθμός απορροφημένης δόσης.

Οι ακτίνες  $\gamma$  είναι η υψηλότερης ενέργειας μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (H/M). Είναι ίδιες με τις υπόλοιπες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες (ακτίνες X, ορατό φως, υπέρυθρες, ραδιοκύματα κτλ.), με την διαφορά ότι τα φωτόνια ακτίνων  $\gamma$  έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και συχνότητα, και μικρότερο μήκος κύματος. Ενώ οι ανιχνευτές Geiger μετρούν μόνο τον ρυθμό γεγονότων (δηλαδή το πλήθος των ακτίνων  $\gamma$  που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή σε ένα δευτερόλεπτο), ένα φασματόμετρο ακτίνων  $\gamma$  καθορίζει και τις ενέργειες των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή.

Οι ραδιενεργοί πυρήνες (ραδιονουκλίδια) συνήθως εκπέμπουν ακτίνες  $\gamma$  μεταξύ μερικών keV και  $\sim 10$  MeV, που αντιστοιχεί στις συνηθισμένες ενέργειες πυρήνων με αρκετά μεγάλη ημιζωή. Τέτοιες πηγές συνήθως παράγουν γραμμικά φάσματα ακτίνων  $\gamma$  (δηλαδή πολλά φωτόνια εκπέμπονται σε διακριτές ενέργειες), ενώ πολύ υψηλότερες ενέργειες (άνω του 1 TeV) μπορούν να ανιχνευτούν στα συνεχή φάσματα που παρατηρούνται στην αστροφυσική και την φυσική στοιχειωδών σωματιδίων. Το όριο μεταξύ ακτίνων  $\gamma$  και ακτίνων X είναι σχετικά ασαφές, μιας και οι ακτίνες X συνήθως αναφέρονται σε υψηλής ενέργειας H/M ακτινοβολία ατόμων, η οποία μπορεί να ξεπερνάει και τα 100 keV, ενώ χαμηλότερες ενέργειες που εκπέμπονται από πυρήνες (μερικές φορές μικρότερες των 20 keV) ονομάζονται ακτίνες  $\gamma$ .



**Εικόνα 2: Η  $\gamma$  αποδιέγερση ως μια διαδικασία που προκύπτει από την μετάβαση ενός πυρηνικού συστήματος από διεγερμένη κατάσταση σε θεμελιώδη. Τυπικά ένας πυρήνας μπορεί να βρεθεί σε διεγερμένη κατάσταση μετά από αποδιέγερση  $\alpha$  ή  $\beta$  ή από ενεργοποίησή του από άλλον εξωτερικό παράγοντα (π.χ. νετρόνια και πρόκληση σχάσης)**

Η προέλευση των ακτίνων  $\gamma$  σχετίζεται με τις ενεργειακές στάθμες των πυρήνων των χημικών στοιχείων. Κατά τρόπο ανάλογο με τις ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων σε ένα άτομο, οι στάθμες ενέργειας σε έναν πυρήνα είναι επίσης διακριτές (απλά αριθμητικά πολύ υψηλότερες) και η κατάστασή του μπορεί να χαρακτηριστεί διεγερμένη ή θεμελιώδης. Η διαδικασία της ραδιενεργής διάσπασης ενός πυρήνα μέσω της εκπομπής ακτινοβολίας  $\alpha$  ή  $\beta$ , τις περισσότερες φορές (όχι όμως πάντα) καταλήγει σε έναν πυρήνα ο οποίος βρίσκεται σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είτε η ενέργεια διέγερσης δεν είναι αρκετά μεγάλη για να οδηγήσει σε μια περαιτέρω διάσπαση  $\alpha$  ή  $\beta$ , είτε η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ακτίνες  $\gamma$ ) απλά λαμβάνει χώρα σε χρόνο μικρότερο από κάποιο άλλο είδος αποδιέγερσης.

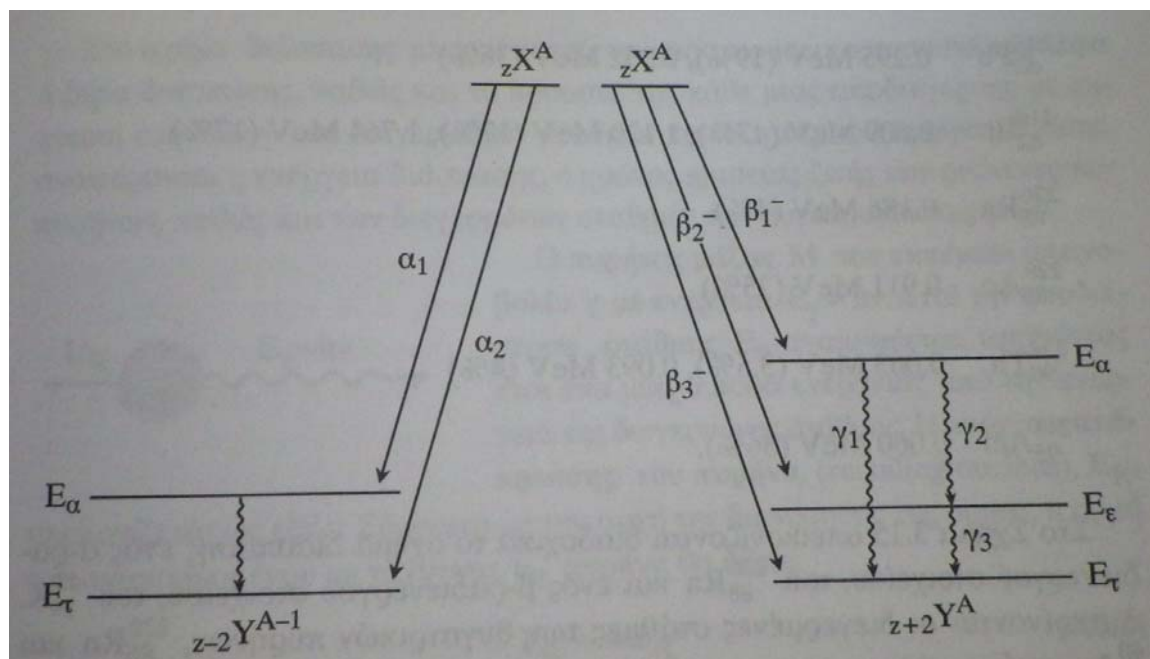
Κατά την αποδιέγερση αυτή, ο πυρήνας μεταβαίνει από μια υψηλότερη σε μια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση και η διαφορά της ενέργειας αποδίδεται ως την ενέργεια του σωματιδίου  $\gamma$ :

$$E_{\alpha\rchi} - E_{\tau\epsilon\lambda} = h\nu$$

(Σημειώνεται πως η εκπομπή ακτίνων  $\gamma$  δεν είναι ο μόνος τρόπος γρήγορης απώλειας ενέργειας ενός πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση καθώς υπάρχουν και άλλοι δύο σχετικοί μηχανισμοί: η εκπομπή ηλεκτρονίου εσωτερικής μετατροπής καθώς και η εκπομπή ζεύγους ηλεκτρονίου – ποσιτρονίου (δίδυμη γένεση) από εσωτερική μετατροπή).

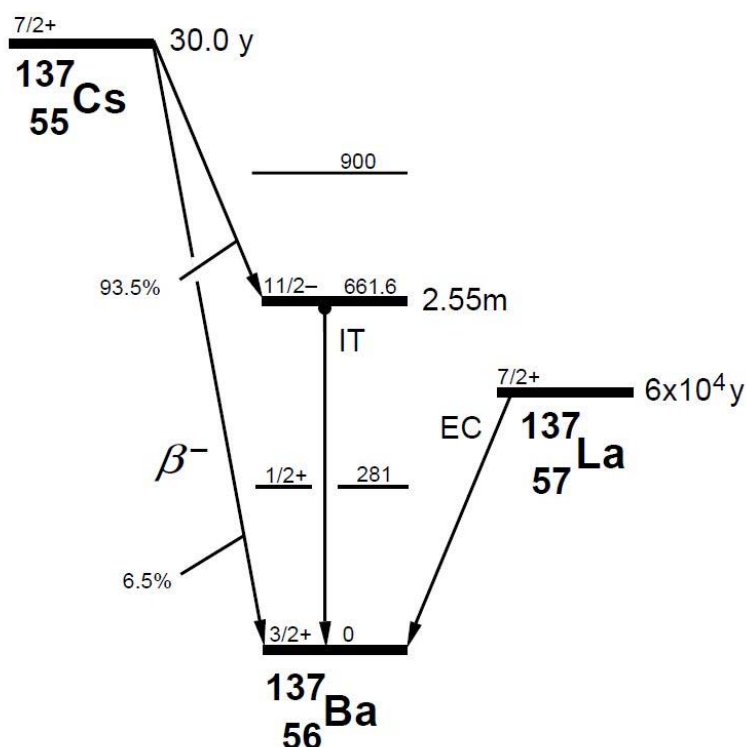
Εάν η τελική κατάσταση στην παραπάνω σχέση είναι και η ενεργειακή θεμελιώδης κατάσταση του πυρήνα, τότε δεν εκπέμπονται περαιτέρω ακτίνες  $\gamma$ . Είναι όμως δυνατόν να χρειαστούν παραπάνω από μία αποδιεγέρσεις  $\gamma$  σε ενδιάμεσες ενεργειακές στάθμες μέχρι την επίτευξη της θεμελιώδους ενεργειακής κατάστασης ενός πυρήνα.

Κατά την αποδιέγερση  $\gamma$  και σε αντίθεση με τις αποδιεγέρσεις  $\alpha$  και  $\beta$ , δεν μεταβάλλεται ο ατομικός και ο μαζικός αριθμός ενός πυρήνα. Ο τυπικός χρόνος ημίσειας ζωής των  $\gamma$  ραδιενεργών στοιχείων είναι (πολύ) μικρότερος σε σχέση με τα  $\alpha$  και  $\beta$  ραδιενεργά στοιχεία και αντιστοιχεί με το μέσο χρόνο ζωής της διεγερμένης στάθμης των πυρήνων.



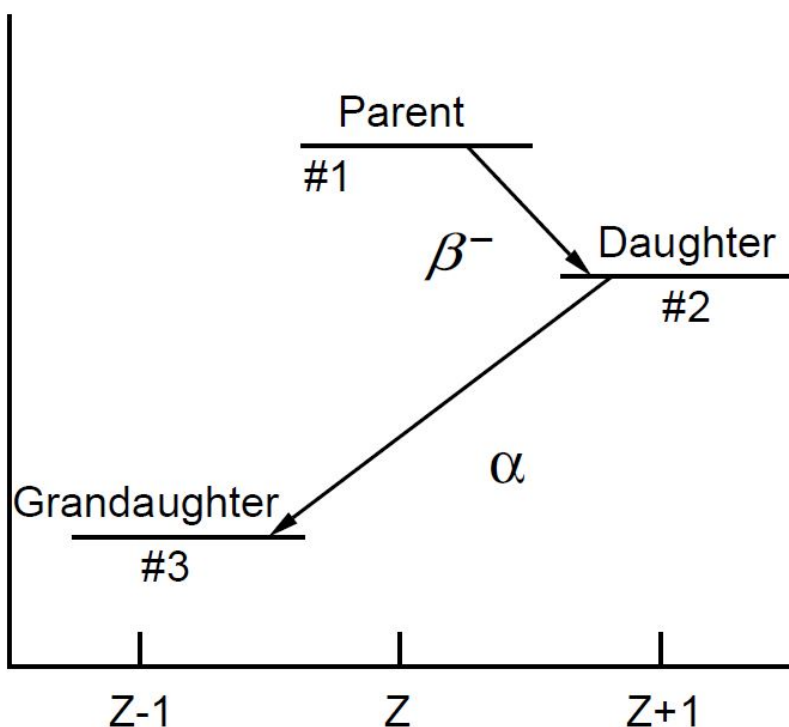
**Εικόνα 3:** Διαγραμματική απεικόνιση εκπομπής ακτίνων  $\gamma$  από διεγερμένους πυρήνες. Οι πυρήνες αυτοί προέρχονται από αποδιέγερση  $\alpha$  (η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πυρήνες σε διεγερμένη –  $\alpha_1$  – ή θεμελιώδη κατάσταση –  $\alpha_2$  –) ή από αποδιέγερση  $\beta$  (η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πυρήνες σε διεγερμένη –  $\beta_1$  – ή ενδιάμεση διεγερμένη –  $\beta_2$  – ή θεμελιώδη κατάσταση –  $\beta_3$  –).

Τυπικά ένας πυρήνας που εκπέμπει ακτινοβολία  $\gamma$  κατά την ενεργειακή του αποδιέγερση, ανακρούεται, απάγοντας ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας της διεγερμένης στάθμης. Τυπικές τιμές της ενέργειας ανάκρουσης είναι της τάξης των μερικών δεκάδων eV, ποσό αμελητέο σε σχέση με τις τυπικές ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων  $\gamma$  που είναι της τάξης των εκατοντάδων keV ή και MeV.



Εικόνα 4: Το διάγραμμα αποδιέγερσης  $\beta^-$  του ραδιοϊσοτόπου  $^{137}\text{Cs}$ , το οποίο μπορεί να καταλήξει στη θεμελιώδη (6.5% των αποδιεγέρσεων) ή διεγερμένη (93.5%) κατάσταση του ισοτόπου  $^{137}\text{Ba}$ . Στη δεύτερη περίπτωση, η μετάβαση από τη διεγερμένη κατάσταση στη θεμελιώδη συνοδεύεται και από την εκπομπή ενός φωτονίου  $\gamma$  με ενέργεια 661.6 keV. Η συγκεκριμένη αποδιέγερση χρησιμοποιείται συχνά στη διαδικασία βαθμονόμησης στα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης ακτινοβολίας. Για πληρότητα αναπαρίσταται και η διαδικασία σύλληψης ηλεκτρονίου (Electron Capture) που μπορεί επίσης να οδηγήσει στον πυρήνα  $^{137}\text{Ba}$  από το Λανθάνιο 137.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, καθώς η ακτινοβολία  $\gamma$  εκπέμπεται ως συνεπακόλουθο άλλων ειδών αποδιέγερσης οι οποίες καταλήγουν σε πυρήνες σε διεγερμένες ενεργειακά καταστάσεις, αποτελεί μέρος της όλης διαδικασίας των αποδιεγέρσεων ραδιενεργών πυρήνων. Οι αρχικοί αυτοί ραδιενεργοί πυρήνες μπορεί μέσω της διαδικασίας αποδιέγερσής τους να μορφοποιούν θυγατρικούς πυρήνες οι οποίοι να είναι επίσης ασταθείς. Σε δεύτερη χρονική φάση οι θυγατρικοί αυτοί ραδιενεργοί πυρήνες αποδιεγείρονται, μορφοποιώντας άλλους πυρήνες οι οποίοι μπορεί να είναι ραδιενεργά σταθεροί ή όχι. Η όλη αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την τελική μορφοποίηση ραδιενεργά σταθερών πυρήνων. Σε διάφορα στάδια αυτής της αλυσίδας είναι δυνατόν να παραχθούν ακτίνες  $\gamma$  ανάλογα με την περίπτωση. Τυπικά ένα μέρος της αλυσίδας  $\alpha$  και  $\beta$  αποδιεγέρσεων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε  $\gamma$  αποδιεγέρσεις απεικονίζεται ως:



Εικόνα 5: Τυπική εναλλαγή αποδιεγέρσεων σε μια ραδιενεργή σειρά. Στο διάγραμμα απεικονίζεται μια αλληλουχία  $\beta^-$  και  $\alpha$  αποδιέγερσης αν και η σειρά θα μπορούσε να είναι διαφορετική. Σε διάφορα στάδια της αλληλουχίας των αποδιεγέρσεων σε μια ραδιενεργή σειρά μπορεί να λάβει χώρα και η εκπομπή ακτίνων  $\gamma$ .

Οι ραδιενεργές σειρές που απαντώνται στη φύση είναι τρεις, η σειρά του Θορίου, του Ουρανίου (ή Ραδίου) και του Ακτινίου. Σε κάθε περίπτωση ο τελικός σταθερός πυρήνας κάθε σειράς είναι ισότοπο του Μολύβδου (με μαζικό αριθμό 208 ή 207). Μετά την έλευση της τεχνητής ραδιενέργειας έχει ταυτοποιηθεί μια ακόμα ραδιενεργή σειρά, η σειρά του Νεπτουνίου (ή Ποσειδωνίου) η οποία έχει ως

τελικό αποτέλεσμα τη μορφοποίηση σταθερού Θαλίου(205). Κανένας από τους ραδιενεργούς πυρήνες που συμμετέχουν στη σειρά αυτή δεν έχει αρκετά μεγάλο χρόνο ημιζωής για να έχει επιβιώσει χρονικά την περίοδο ύπαρξης της Γης και γι αυτό η σειρά αυτή έχει παρατηρηθεί μόνο μέσω των προϊόντων τεχνητής ραδιενέργειας.

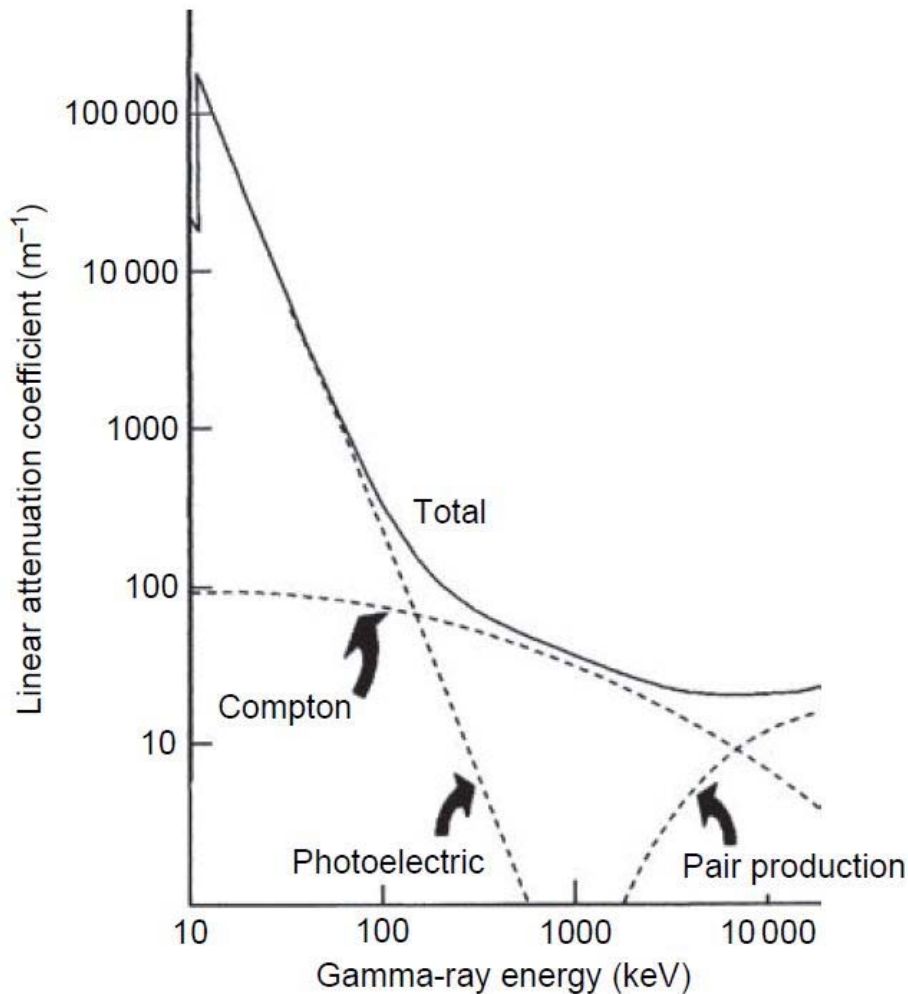
## Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας – $\gamma$ με την ύλη

Τρεις είναι οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη:

1. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
2. Η σκέδαση Compton
3. Η δίδυμη γένεση

Και οι τρεις αυτές διαδικασίες οδηγούν στην ολική ή μερική μετατροπή της ενέργειας του φωτονίου σε ενέργεια ηλεκτρονίου, καταλήγοντας στην εξαφάνιση ή στη σκέδαση μέσω μιας μεγάλης μέσης γωνίας του αρχικού φωτονίου. Στις χαμηλές ενέργειες, μέχρι 500 keV, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αυτό που κυριαρχεί ενώ στις ενέργειες πάνω από 5MeV επικρατεί η δίδυμη γένεση. Ανάμεσα σ' αυτές τις τιμές η σκέδαση Compton είναι η πιο πιθανή εξέλιξη. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και ο ατομικός αριθμός του υλικού με το οποίο συμβαίνει η αλληλεπίδραση, ασκώντας ισχυρή επιρροή στις σχετικές πιθανότητες μεταξύ των τριών φαινομένων.

Οι ανιχνευτές στην  $\gamma$ -φασματοσκοπία είναι παθητικά υλικά τα οποία περιμένουν να συμβεί αλληλεπίδραση γάμμα στον όγκο του ανιχνευτή. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι προτιμητέο, επειδή απορροφάται όλη η ενέργεια της προσπίπτουσας ακτίνας  $\gamma$ . Πλήρης απορρόφηση ενέργειας είναι εφικτή και με μία σειρά από αυτούς τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης στον όγκο του ανιχνευτή. Όταν το  $\gamma$ -φωτόνιο αλληλεπιδρά με Compton ή δίδυμη γένεση, και μέρος της ενέργειας δραπετεύει από τον όγκο του ανιχνευτή χωρίς να απορροφηθεί, το υπόβαθρο του φάσματος αυξάνει κατά ένα γεγονός. Αυτό το γεγονός θα εμφανιστεί σε χαμηλότερο κανάλι από αυτό που αντιστοιχεί στην πλήρη ενέργεια του  $\gamma$ -φωτονίου. Ανιχνευτές με μεγαλύτερο όγκο μειώνουν αυτό το φαινόμενο.



**Εικόνα 6: Οι επιμέρους συντελεστές καθώς και ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης φωτονίων γ στην ύλη ως συνάρτηση της ενέργειας του φωτονίου για ένα τυπικό υλικό.**

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην γ-φασματοσκοπία περιλαμβάνει ενεργειακά-ευαίσθητο ανιχνευτή, ηλεκτρονικά για την συλλογή και επεξεργασία του σήματος από τον ανιχνευτή, όπως αναλυτή παλμών (πχ αναλυτή πολλών καναλιών), και τους σχετικούς ενισχυτές και συσκευές παραγωγής, εμφάνισης, και αποθήκευσης του φάσματος. Μπορούν να συμπεριληφθούν και άλλα μέρη, όπως μετρητές ρυθμού και σταθεροποιητές θέσης κορυφής. Οι πιο κοινοί ανιχνευτές περιλαμβάνουν σπινθηριστές ιωδιούχου νατρίου (NaI) και υψηλής καθαρότητας ανιχνευτές γερμανίου.

Κάθε μία από τις αντιδράσεις φωτονίου ορισμένης ενέργειας με συγκεκριμένο υλικό, χαρακτηρίζεται από αντίστοιχη μικροσκοπική διατομή  $\sigma$  μέτρο της πιθανότητας να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Προκειμένου για φωτόνια, αντί για τον όρο «μακροσκοπική διατομή» τη αντίδρασης, χρησιμοποιείται όρος γραμμικός συντελεστής απορρόφησης  $\mu$  των φωτονίων στο συγκεκριμένο υλικό. Ο όρος «συντελεστής απορρόφησης» είναι ατυχής διότι στην περίπτωση του φαινομένου Compton δεν έχουμε εξαφάνιση του φωτονίου αλλά μείωση της ενέργειάς του. Πιο σωστός είναι ο όρος συντελεστής εξασθένησης (attenuation coefficient).

Ο συντελεστής  $\mu$ , όπως και κάθε μακροσκοπική διατομή αντιδράσεων έχει φυσικές διαστάσεις (μήκος)<sup>-1</sup>.

Ανεξάρτητα από το είδος της φυσικής αλληλεπίδρασης η οποία λαμβάνει χώρα μεταξύ των φωτονίων και της ύλης, η εξασθένηση σε ένταση μια δέσμης φωτονίων η οποία διαπερνά ένα στρώμα υλικού με

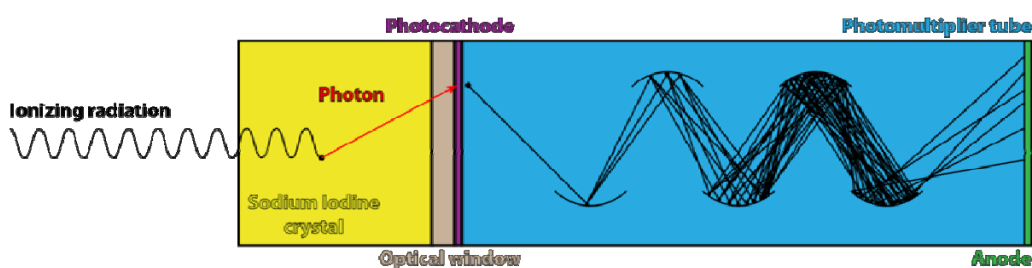
πάχος  $\Delta x$ , θα ισούται με:  $\Delta I = -I \mu \Delta x$ . Λαμβάνοντας το όριο για στρώμα απειροελάχιστου πάχους και ολοκληρώνοντας τη διαφορική έκφραση που προκύπτει λαμβάνεται το αποτέλεσμα:

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

όπου η εξάρτηση της αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη από την ενέργειά τους ποσοτικοποιείται μέσω της τιμής της παραμέτρου  $\mu(E)$ . Η τιμή της παραμέτρου αυτής είναι συνάρτηση της ενέργειας μέσω της τιμής της οποίας καθορίζεται και ποια από τις πιθανές αλληλεπιδράσεις διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο για τη δεδομένη περίπτωση.

## Ανιχνευτές σπινθηρισμών

Οι ανιχνευτές σπινθηρισμών αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα είδη ανιχνευτών σωματιδίων και ιονίζουσας ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται σήμερα. Βασίζονται στο φυσικό φαινόμενο του σπινθηρισμού, της εκπομπής δηλαδή φωτός όταν περάσει μέσα από το ενεργό τους υλικό κάποιο σωματίδιο ή ακτινοβολία. Το ενεργό υλικό ενός ανιχνευτή σπινθηρισμού αποτελούν κρύσταλλοι με συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες, οι οποίοι εκπέμπουν φως όταν μια ακτίνα  $\gamma$  αλληλεπιδράσει με τα άτομα του κρυστάλλου. Η ένταση του φωτός που παράγεται είναι ανάλογη της ενέργειας που αποτίθεται στον κρύσταλλο από το φωτόνιο  $\gamma$ . Στις αρχές του εικοστού αιώνα ανάλογοι ανιχνευτές είχαν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ραδιενέργειας μέσω οπτικής παρατήρησης γεγονός που τους καθιστούσε ιδιαίτερα δύσχρηστους. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1940 – 1950, οι ανιχνευτές σπινθηρισμών χρησιμοποιούνται παράλληλα με φωτοπολλαπλασιαστή ο οποίος μετατρέπει το φως σε ηλεκτρόνια και στην συνέχεια ενισχύει το ηλεκτρικό αυτό σήμα των ηλεκτρονίων. Ο συνδυασμός αυτός, οδήγησε στην σύγχρονη ανιχνευτική διάταξη σπινθηρισμών η οποία χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα με μεγάλη επιτυχία.



**Εικόνα 7: Διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών. Η ιονίζουσα ακτινοβολία προσπίπτει στον κρύσταλλο Ιωδιούχου Νατρίου (σε αυτή την περίπτωση) και προκαλεί την εκπομπή μια μικρής ποσότητας φωτός. Το φως αυτό μετατρέπεται σε έναν μετρήσιμο ηλεκτρικό παλμό μέσω της λειτουργίας ενός φωτοπολλαπλασιαστή ο οποίος βρίσκεται σε οπτική σύζευξη με τον κρύσταλλο**

Δημοφιλείς επιλογές κρυστάλλων σπινθηρισμού είναι οι κρύσταλλοι ιωδιούχου νατρίου με προσμίξεις Θαλίου ( $\text{NaI}(\text{Th})$ ) και οι γερμανίου-βισμούθιου ( $\text{BGO}$ ). Υπάρχουν και άλλα είδη κρυστάλλων από οργανικές χημικές ενώσεις καθώς και ανιχνευτές σπινθηρισμών που δεν χρησιμοποιούν ενεργό υλικό σε στερεά κατάσταση. Στην παρούσα παρουσίαση όμως θα επικεντρωθούμε στον κρύσταλλο ιωδιούχου νατρίου καθώς αυτός αντιστοιχεί με τον εξοπλισμό στο εργαστήριο πυρηνικής

μικροανάλυσης της Σ.Σ.Ε. Επειδή οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι ευαίσθητοι και στο φως του περιβάλλοντος, οι ανιχνευτές περιβάλλονται από αδιαφανές κάλυμμα. Οι ανιχνευτές σπινθηρισμών μπορούν επίσης να ανιχνεύσουν ακτινοβολίες άλφα και βήτα.

Οι βασικές φυσικές ιδιότητες που είναι θεμιτό να χαρακτηρίζουν το ενεργό υλικό σε έναν ανιχνευτή σπινθηρισμών είναι οι παρακάτω:

- Θα πρέπει να μετατρέπει την κινητική ενέργεια των φορτισμένων σωματιδίων που προσπίπτουν σε αυτό (ή ισοδύναμα την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) σε ανιχνεύσιμο φως με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης. Διακρίνεται κάποια ενέργεια κατωφλίου κάτω από την οποία δεν παρατηρείται το φαινόμενο.
- Η μετατροπή αυτή θα πρέπει να είναι γραμμική – η ένταση του φωτός θα πρέπει να είναι ανάλογη με την ενέργεια που εναποτίθεται στο υλικό όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κλίμακα ενέργειας
- Το υλικό θα πρέπει να είναι διαφανές για τα μήκη κύματος που εκπέμπει, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή συλλογή φωτός
- Ο μέσος χρόνος ζωής του επαγόμενου σπινθηρισμού θα πρέπει να είναι αρκετά μικρός έτσι ώστε να συντελεί στη ταχεία δημιουργία ηλεκτρικών παλμών για καταγραφή
- Το υλικό θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή οπτική ποιότητα και να επιτρέπει την βιομηχανική του επεξεργασία σε μεγέθη και σχήματα κατάλληλα για χρήση σε ανιχνευτικά συστήματα.
- Ο δείκτης διάθλασης του υλικού θα πρέπει να βρίσκεται αριθμητικά κοντά σε αυτόν του γυαλιού ( $n \approx 1.5$ ) για να επιτρέπει ικανοποιητική οπτική σύζευξη με φωτοπολλαπλασιαστές ή άλλους αισθητήρες φωτός.

Δεν υπάρχει κάποιο υλικό το οποίο να πληρεί όλες τις παραπάνω προδιαγραφές σε μεγάλο βαθμό ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό, η επιλογή του ενεργού υλικού για έναν ανιχνευτή σπινθηρισμών αποτελεί έναν συμβιβασμό των παραπάνω κριτηρίων αλλά και συχνά και της τιμής και της διαθεσιμότητας συγκεκριμένων υλικών, ως συνάρτηση και του είδους ακτινοβολίας ή σωματιδίων προς ανίχνευση.

Μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούνται έξι κατηγορίες υλικών ως σπινθηριστές σε συστήματα ανίχνευσης σωματιδίων και ακτινοβολίας:

1. Οργανικοί κρύσταλλοι
2. Οργανικά υγρά
3. Πλαστικά (φωτοπλαστικά)
4. Ανόργανοι Κρύσταλλοι
5. Αέρια σε κατάλληλα δοχεία
6. Γυαλιά με κατάλληλες προσμίξεις

Κάθε κατηγορία από τις παραπάνω χαρακτηρίζεται από θεμιτές και αθέμιτες φυσικές ιδιότητες, από ιδιαιτερότητες μηχανικής επεξεργασίας και από την καταλληλότητα ανίχνευσης για το είδος της ακτινοβολίας προς μέτρηση. Σε γενικές γραμμές για την ανίχνευση και φασματοσκοπία ακτίνων γ, είναι προτιμητέοι οι ανόργανοι κρύσταλλοι όπως αυτοί του Ιωδιούχου Νατρίου.

Στα ενεργά υλικά των ανιχνευτών σπινθηρισμού η παραγωγή φωτός οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από διάφορα εξωτερικά αίτια όπως η ακτινοβολία, η θερμότητα, το φως, τα φορτισμένα σωματίδια κλπ. Η ενέργεια αυτή επαν-εκπέμπεται από το υλικό ως αποτέλεσμα της αποδιέγερσης ορισμένων ενεργειακών σταθμών του. Αν η αποδιέγερση αυτή λάβει χώρα σε χρόνους της τάξης των  $10^{-8}$  δευτερολέπτων μετά τη διέγερση τους, το φαινόμενο ονομάζεται φθορισμός και αποτελεί την

πλέον θεμιτή φυσική διεργασία για την καλή λειτουργία του ανιχνευτή. Αν η διεγερμένη κατάσταση του υλικού όμως είναι μετασταθής, ο χρόνος μεταξύ της διέγερσης και της αποδιέγερσης του μπορεί να κυμαίνεται από δευτερόλεπτα μέχρι και μερικές ώρες ανάλογα με το υλικό. Στην περίπτωση αυτή το φαινόμενο ονομάζεται φωσφορισμός.

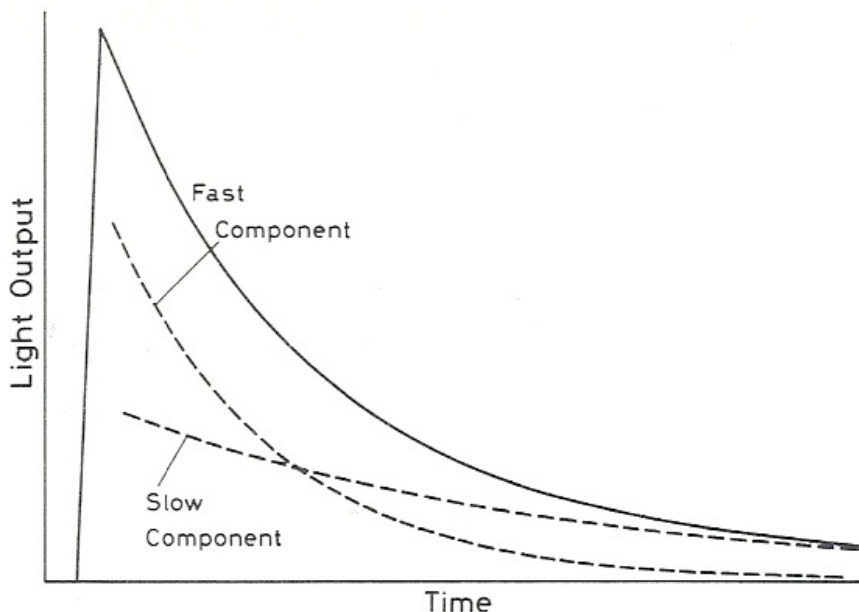
Λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικών διεργασιών που οδηγούν στην παραγωγή φωτός από το σπινθηρισμό του ενεργού υλικού του ανιχνευτή σπινθηρισμών, η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας αυτής περιγράφεται μέσω μιας εκθετικής πτώσης δύο συντελεστών της γενικότερης μορφής:

$$N = \frac{N_0}{\tau_f} e^{\frac{-t}{\tau_f}} + \frac{N_0}{\tau_s} e^{\frac{-t}{\tau_s}} = A e^{\frac{-t}{\tau_f}} + B e^{\frac{-t}{\tau_s}}$$

όπου:

- $N$  είναι ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται σε χρόνο  $t$
- $N_0$  είναι ο συνολικός χρόνος φωτονίων που εκπέμπονται
- $\tau_s, \tau_f$  είναι δύο σταθερές χρόνων αποδιέγερσης

Για τα περισσότερα ενεργά υλικά σπινθηριστή, ο ένας συντελεστής παρουσιάζει κατά κανόνα πολύ ταχύτερη συμπεριφορά από τον άλλο και γι αυτό έχει επικρατήσει και ο χαρακτηρισμός τους στη γενική βιβλιογραφία ως fast component ( $\tau_f$ ) και slow component ( $\tau_s$ ). Οι σχετικές τους εντάσεις  $A$  &  $B$ , διαφέρουν από υλικό σε υλικό, κατά κανόνα όμως επικρατεί ο ταχύς συντελεστής. Η ύπαρξη και των δύο αυτών συντελεστών στην απόκριση ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών αποτελεί τη βάση για την τεχνική ταυτοποίησης μέσω της μορφής παλμού. Πρόκειται για μια από τις πιο προχωρημένες τεχνικές ανάλυσης σήματος σε ανάλογες ανιχνευτικές διατάξεις η οποία δεν θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης επί του παρόντος.



**Εικόνα 8:** Διαγραμματική αναπαράσταση της ποιοτικής συμπεριφοράς της χρονικής εξέλιξης της εκπομπής φωτός από το ενεργό υλικό ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών. Απεικονίζονται ξεχωριστά οι δύο συντελεστές εκθετικής πτώσης καθώς και το συνολικό αποτέλεσμα. Ο χρόνος διέγερσης και

επίτευξης της μέγιστης έντασης εκπομπής φωτός είναι κατά πολύ βραχύτερος από το χρόνο αποδιέγερσης στα περισσότερα υλικά και για αυτό έχει ληφθεί ουσιαστικά ως μηδενικός στην απεικόνιση.

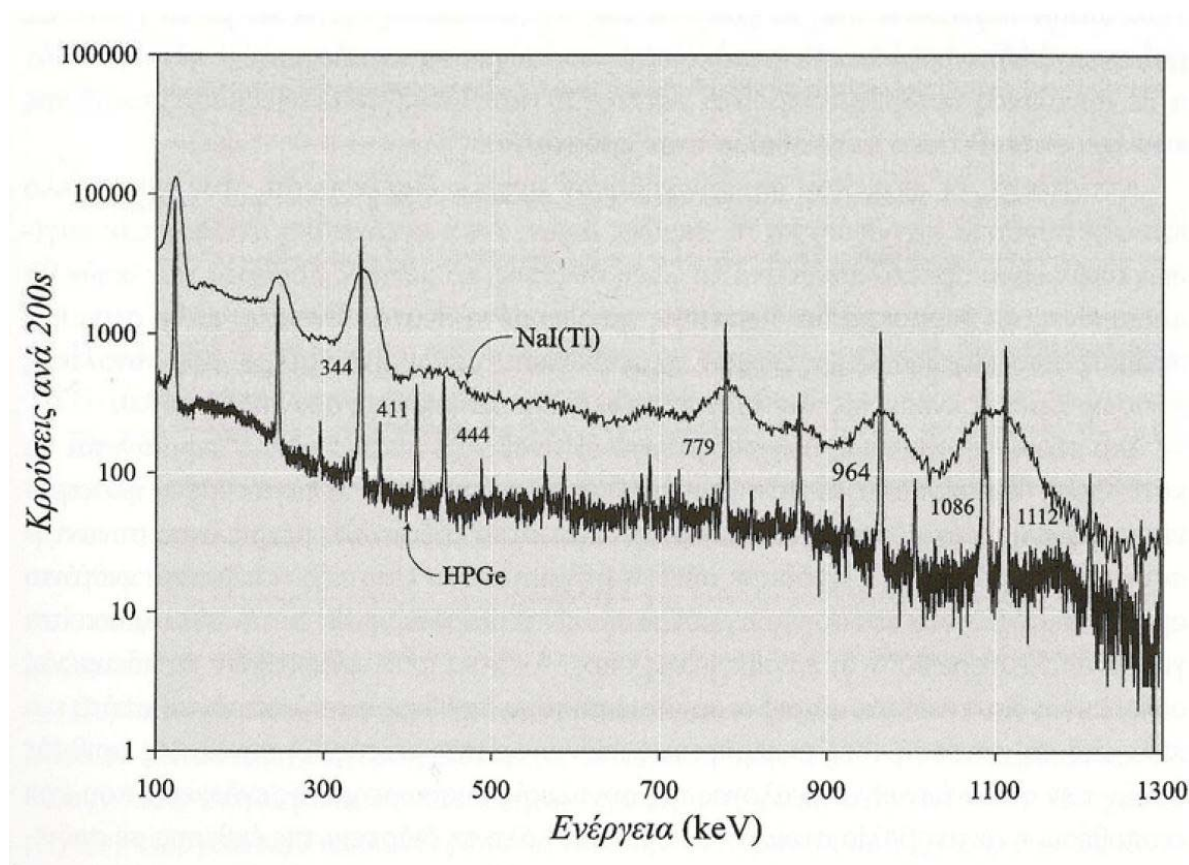
## Χαρακτηριστικά Ανιχνευτικής Διάταξης

Το είδος του συνολικού συστήματος φασματοσκοπίας επιλέγεται με βάση τα εκάστοτε απαραίτητα χαρακτηριστικά. Δύο από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά είναι η ανάλυση και η απόδοση του ανιχνευτικού συστήματος.

### **Ανάλυση ανιχνευτή**

Οι ακτίνες-γ που ανιχνεύονται με φασματοσκοπικά συστήματα παράγουν φωτοκορυφές στο φάσμα. Αυτές οι κορυφές αποκαλούνται και *γραμμές* σε αναλογία με την οπτική φασματοσκοπία. Το πλάτος των φωτοκορυφών καθορίζει την ανάλυση του ανιχνευτή, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του των ανιχνευτών γ-φασματοσκοπίας, και η υψηλή ανάλυση επιτρέπει στον φασματοσκόπο τον διαχωρισμό 2 γ-γραμμών που βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη. Άλλα φασματοσκοπικά συστήματα σχεδιάζονται και ρυθμίζονται να παράγουν συμμετρικές φωτοκορυφές της καλύτερης δυνατής ανάλυσης. Το σχήμα της φωτοκορυφής συνήθως είναι γκαουσιανή κατανομή. Στα περισσότερα φάσματα η οριζόντια θέση της φωτοκορυφής καθορίζεται από την ενέργεια της ακτίνας-γ, και η επιφάνεια της φωτοκορυφής καθορίζεται από την ένταση της δέσμης των ακτίνων γ και την απόδοση του ανιχνευτή.

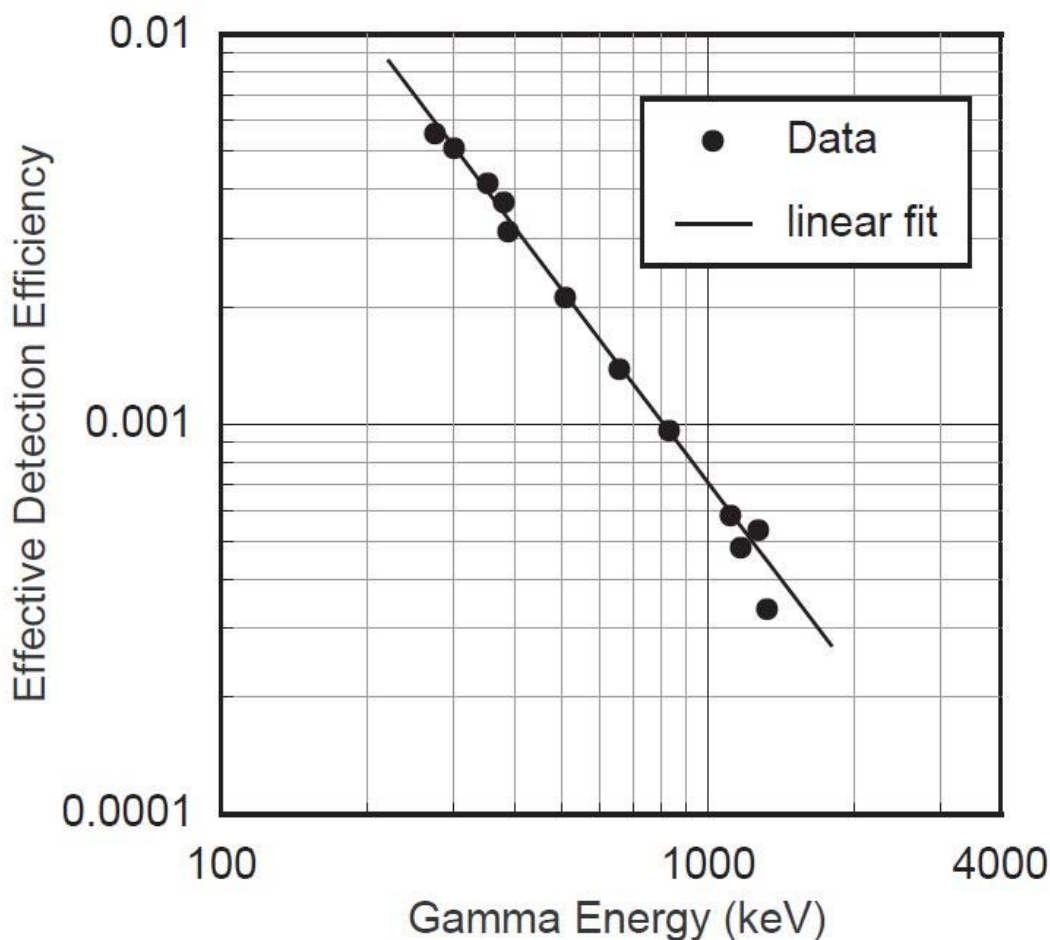
Ο πιο κοινός τρόπος έκφρασης της ανάλυσης είναι πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο (full width at half maximum, FWHM), δηλαδή το πλάτος της φωτοκορυφής στο μισό του μέγιστου ύψους της. Οι τιμές ανάλυσης δίνονται μαζί με την συγκεκριμένη ενέργεια των γ. Η ανάλυση μπορεί να εκφραστεί είτε με απόλυτους είτε με σχετικούς όρους. Για παράδειγμα, ένας ανιχνευτής ιωδιούχου νατρίου μπορεί να έχει FWHM 9,15 keV στα 122 keV, και FWHM 82,75 keV στα 662 keV. Αυτές οι τιμές εκφράζονται σε απόλυτους όρους. Για να εκφραστεί σε σχετικούς όρους, η FWHM σε eV ή MeV διαιρείται με την ενέργεια των ακτίνων γ και πολλαπλασιάζεται με 100. Χρησιμοποιώντας το προηγούμενο παράδειγμα, η ανάλυση του ανιχνευτή είναι 7,5% στα 122 keV, και 12,5% στα 662 keV. Ένας ανιχνευτής γερμανίου μπορεί να δώσει ανάλυση 560 eV στα 122 keV, δηλαδή 0,46% στα 122 keV.



Εικόνα 9: Διάγραμμα σύγκρισης της ανάλυσης μεταξύ ανιχνευτικών συστοιχιών σπινθηρισμού που βασίζονται σε κρύσταλλο Ιωδιούχου Νατρίου ή Γερμάνιο. Η υπεροχή του συστήματος του Γερμανίου είναι εμφανής. Παρόλα αυτά το σημαντικά μεγαλύτερο κόστος υλοποίησης (καθώς και ορισμένα ακόμα φυσικά χαρακτηριστικά) λειτουργούν αποτρεπτικά για τη χρήση σπινθηριστών Γερμανίου σε κάθε περίπτωση.

#### Απόδοση ανιχνευτή

Δεν ανιχνεύονται όλες οι ακτίνες  $\gamma$  που παράγονται από την πηγή και περνούν από τον ανιχνευτή. Η πιθανότητα ενός εκπεμπόμενου φωτονίου  $\gamma$  να αλληλεπιδράσει με τον ανιχνευτή και να καταχωρηθεί ως γεγονός είναι η απόδοση του ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές υψηλής απόδοσης παράγουν φάσματα σε μικρότερο χρόνο από τους χαμηλής απόδοσης. Γενικά, μεγάλοι ανιχνευτές έχουν μεγαλύτερη απόδοση από μικρότερους ανιχνευτές αν και ιδιότητες θωράκισης των υλικών του ανιχνευτή είναι επίσης σημαντικός παράγοντας. Ο καθορισμός της απόδοσης ανιχνευτή γίνεται συγκρίνοντας το φάσμα πηγής γνωστής ενεργότητας (τον ρυθμό σε κάθε φωτοκορυφή) με το φάσμα πηγής άγνωστης ενεργότητας (τον ρυθμό των δικών της φωτοκορυφών).



**Εικόνα 10: Λογαριθμικό διάγραμμα της απόδοσης ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών Ιωδιούχου Νατρίου σε σχέση με την μετρούμενη ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γ. Η απόδοση στο διάγραμμα αναφέρεται στο πλήρες ανιχνευτικό σύστημα.**

Η απόδοση, όπως και η ανάλυση, μπορεί να εκφραστεί σε απόλυτους ή σχετικούς όρους. Χρησιμοποιούνται οι ίδιες μονάδες (πχ. ποσοστά). Επομένως ο φασματοσκόπος πρέπει να καθορίσει προσεκτικά ποιο είδος απόδοσης δίνεται για τον ανιχνευτή. Απόλυτες τιμές απόδοσης εκφράζουν την πιθανότητα ένα φωτόνιο γ συγκεκριμένης ενέργειας που διέρχεται από τον ανιχνευτή να αλληλεπιδράσει και να ανιχνευτεί. Τιμές σχετικής απόδοσης συνήθως δίνονται για ανιχνευτές γερμανίου, και συγκρίνουν την απόδοση του ανιχνευτή στα 1332keV με την απόδοση ανιχνευτή NaI διαστάσεων 3 ίντσες × 3 ίντσες (δηλαδή,  $1,2 \times 10^{-3}$  cps/Bq στα 25 cm). Τιμές σχετικής απόδοσης μεγαλύτερες του 1% συναντώνται επομένως σε πολύ μεγάλους ανιχνευτές γερμανίου. Η ενέργεια των ακτίνων γ που ανιχνεύεται είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην απόδοση του ανιχνευτή. Καμπύλη απόδοσης μπορεί να προκύψει κάνοντας γραφική παράσταση της απόδοσης για διάφορες ενέργειες. Αυτή η καμπύλη τότε μπορεί να καθορίσει την απόδοση του ανιχνευτή για ενέργειες διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της καμπύλης. Οι ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας συνήθως έχουν υψηλότερη ευαισθησία.

### Γραμμικότητα απόκρισης ως προς την Ενέργεια

Η παραγωγή φωτός σε σχέση την ενέργεια που την προκαλεί, σε έναν ανιχνευτή σπινθηρισμών αποτελεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του, με το οποίο σχετίζονται και η ανάλυση και η απόδοσή του γενικότερα. Γενικά είναι δυνατόν να οριστεί (και να προσδιοριστεί πειραματικά) η

ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για τη δημιουργία ενός φωτονίου σε διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται ως σπινθηριστές. Η ενέργεια αυτή είναι συνάρτηση του είδους του προσπίπτοντος σωματιδίου ή ακτινοβολίας στον ανιχνευτή. Για παράδειγμα, για κρύσταλλο Ιωδιούχου Νατρίου, όταν προκαλείται διέγερση από ηλεκτρόνια χρειάζεται ενέργεια 25 eV για τη δημιουργία κάθε φωτονίου. Τυπικά, στην όλη περιγραφή της λειτουργίας ενός σπινθηριστή, προϋποτίθεται η γραμμική σχέση μεταξύ της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας  $L$  από φθορισμό (του γρήγορου δηλαδή συντελεστή) και της προσπίπτουσας ενέργειας που διεγείρει το υλικό. Ποσοτικά:  $L \propto E$

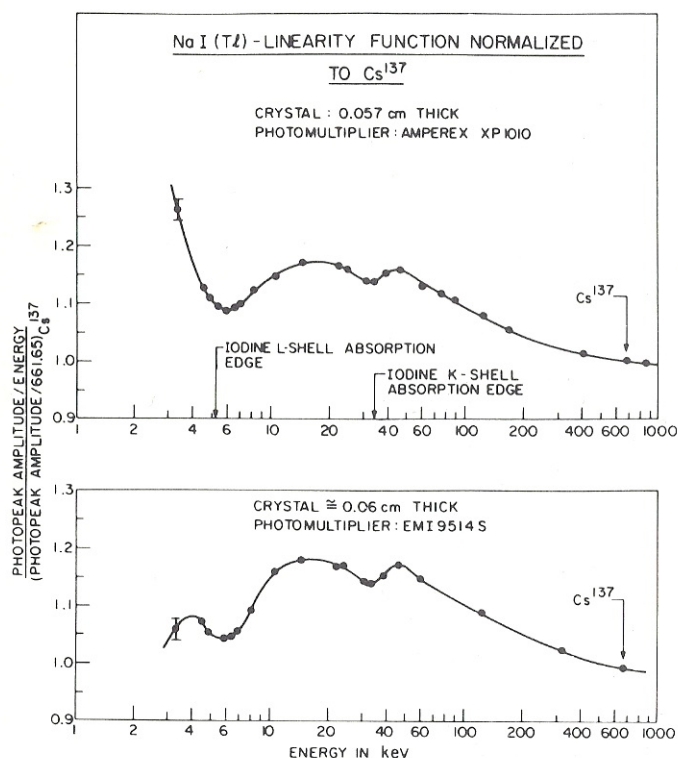
Η σχέση αυτή αποτελεί μια καλή προσέγγιση για αρκετές εφαρμογές και εμπλεκόμενες ενέργειες αλλά ουσιαστικά δεν είναι σωστή. Στην πραγματικότητα, η αντίδραση ενός σπινθηριστή στην προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι μια περίπλοκη συνάρτηση της ενέργειάς της καθώς και του είδους της και του ιονισμού που προκαλείται. Ιδιαίτερα σε χαμηλές σχετικά ενέργειες και για την περίπτωση βαρύτερων σωματιδίων, οι παρεκκλίσεις από τη γραμμική συμπεριφορά είναι εκτενείς.

Το πλέον διαδεδομένο ημι-εμπειρικό μοντέλο που συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά δεδομένα είναι αυτό του Birks αν και έχουν προταθεί και άλλες προσεγγίσεις.

Σύμφωνα με το μοντέλο του Birks αν συμβολιστεί η παραγωγή φωτός ανά μονάδα μήκους ως  $dL/dx$  και η απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα μήκους ως  $dE/dx$  ισχύει:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + kb \frac{dE}{dx}} \xrightarrow{\frac{dE}{dx} \rightarrow 0} \frac{dL}{dx} = A \frac{dE}{dx}$$

όπου ως  $A$  συμβολίζεται η απόλυτη απόδοση σπινθηρισμού και ως  $kb$  η πυκνότητα κέντρων ιονισμού στο υλικό (σχετίζεται με την πυκνότητα ατόμων που μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια άρα και με τον λόγο  $dE/dx$ ). Όπως επισημαίνεται, για μικρές τιμές της απορρόφησης ενέργειας ανά μονάδα μήκους, η σχέση είναι προσεγγιστικά γραμμική. Για μεγάλες τιμές απορρόφησης ενέργειας ανά μονάδα μήκους η θεωρία του Birks καταλήγει σε πρόβλεψη κορεσμού στην απορρόφηση ενέργειας. Πρακτικά οι παράμετροι της προσέγγισης προσδιορίζονται από πειραματικές μετρήσεις.

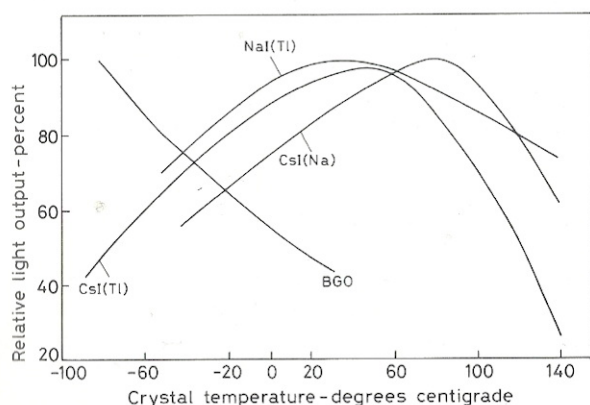


**Εικόνα 11:** Πειραματικά δεδομένα για την απόκλιση από το γραμμικό συσχετισμό προσπίπτουσας ενέργειας – εκπεμπόμενου φωτός σε κρύσταλλο Ιωδιούχου Νατρίου. Στην κάτω εικόνα διακρίνεται η απόκριση του φωτοπολλαπλασιαστή σε σχέση με την ενέργεια.

Για την περίπτωση των κρυστάλλων Ιωδιούχου Νατρίου, η γραμμικότητα του συσχετισμού φωτός – ενέργειας είναι αρκετά καλή μέχρι τα 400 keV. Στο σημείο αυτό όμως παρουσιάζεται μια αισθητή απόκλιση καθώς και σε χαμηλότερες ενέργειες. Για ανάλυση δεδομένων όπου απαιτείται ακρίβεια, η συμπεριφορά αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη. Σε γενικές γραμμές, παρόλο που η προσέγγιση του Birks αναφέρεται σε οργανικούς σπινθηριστές, η συμπεριφορά των κρυστάλλων Ιωδιούχου Νατρίου περιγράφεται σε ικανοποιητικό βαθμό επίσης.

### Εξάρτηση από τη θερμοκρασία

Η φωτεινή απόδοση των περισσότερων υλικών σπινθηρισμού είναι επιπρόσθετα συνάρτηση της θερμοκρασίας. Για τις περισσότερες περιπτώσεις σε θερμοκρασία δωματίου η εξάρτηση αυτή δεν μεταβάλλεται σημαντικά, αλλά όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες παρουσιάζουν μεγάλες αυξομειώσεις, πρέπει να ληφθεί υπόψη.



**Εικόνα 12:** Εξάρτηση της φωτεινής απόδοσης ενός κρυστάλλου σπινθηριστή με τη θερμοκρασία του

## Ανιχνευτές NaI

Ο σπινθηριστής NaI(Tl) έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα:

1. Μπορεί να παραχτεί σε μεγάλους κρυστάλλους, προσφέροντας καλή απόδοση και
2. παράγει ισχυρές λάμπες φωτός σε σχέση με άλλους σπινθηριστές.

Επίσης είναι βολικός στην χρήση, κάνοντάς τον δημοφιλή για εφαρμογές όπως ο προσδιορισμός αγνώστων υλικών από σώματα ασφαλείας.

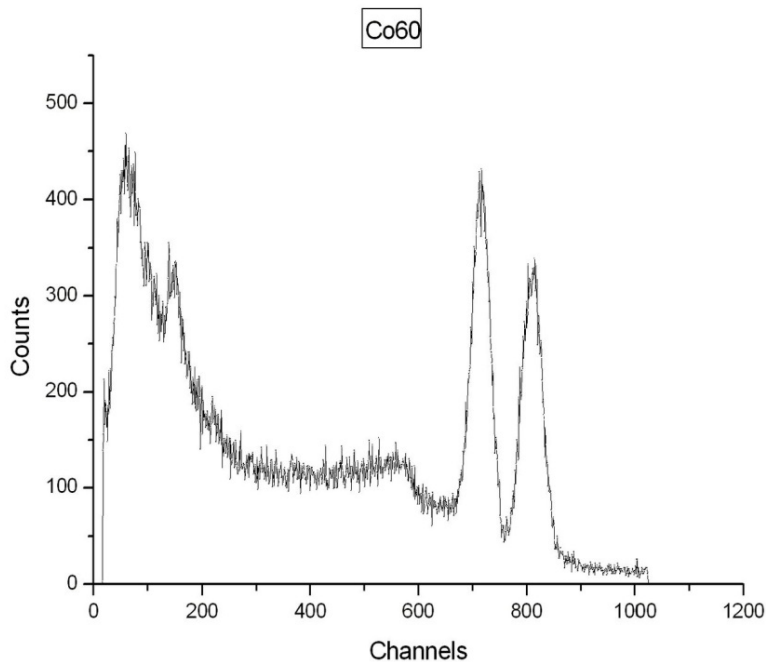
Ένα παράδειγμα φάσματος που λήφθηκε με σπινθηριστή NaI είναι το φάσμα του καϊσίου-137 (βλέπε εικόνα 1). Το  $^{137}\text{Cs}$  εκπέμπει μόνο μία γραμμή  $\gamma$ , στα 662keV. Αξίζει να σημειωθεί ότι η γραμμή των 662keV που παρατηρείται είναι στην πραγματικότητα γραμμή του  $^{137}\text{Ba}$ , το προϊόν διάσπασης του  $^{137}\text{Cs}$ .

Το φάσμα της εικόνας 1 μετρήθηκε με την χρήση σπινθηριστή NaI, φωτοπολλαπλασιαστή, ενισχυτή και αναλυτή πολλών καναλιών (MCA). Η εικόνα δείχνει το πλήθος των γεγονότων (για την διάρκεια μέτρησης) συναρτήσει των καναλιών. Στο φάσμα υπάρχουν οι εξής φωτοκορυφές (από αριστερά προς δεξιά):

1. χαμηλής ενέργειας X (λόγω εσωτερικών μετατροπών των ακτίνων  $\gamma$ ),
2. οπισθοσκέδασης στις χαμηλές ενέργειες του φαινομένου Compton, και
3. φωτοκορυφή (πλήρης ενέργειας) στα 662keV

Η κατανομή Compton είναι συνεχής και βρίσκεται στο κανάλι 150 της εικόνας 1. Η κατανομή εμφανίζεται λόγω σκέδασης Compton των αρχικών φωτονίων  $\gamma$  μέσα στον κρύσταλλο. Ανάλογα με την γωνία σκέδασης, τα ηλεκτρόνια Compton έχουν διαφορετικές ενέργειες και επομένως παράγουν διαφορετικούς παλμούς που αντιστοιχούν σε διαφορετικά κανάλια.

Αν πολλές διαφορετικές ακτίνες  $\gamma$  είναι παρούσες στο φάσμα, η κατανομή Compton μπορεί να δυσκολέψει την ανάλυση. Για να μειωθούν οι ακτίνες  $\gamma$  υποβάθρου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί θωράκιση. Η μείωση των ακτίνων  $\gamma$  είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μικρούς σε μέγεθος ανιχνευτές σπινθηρισμού.



**Εικόνα 13: Φάσμα ακτίνων γ από το ραδιονουκλίδιο  $^{60}\text{Co}$ . Το φάσμα έχει ληφθεί μέσω της χρήσης ανιχνευτή σπινθηρισμών με κρύσταλλο  $\text{NaI(Tl)}$ .**

Το γ-φάσμα της εικόνας 18 οφείλεται στο ισότοπο του κοβαλτίου  $^{60}\text{Co}$ , με δύο ακτίνες γ των 1,17 MeV και 1,33 MeV αντίστοιχα. Οι δύο ακτίνες γ διακρίνονται εύκολα. Η κορυφή αριστερά του καναλιού 200 πιθανότατα οφείλονται σε ισχυρή πηγή υποβάθρου που δεν αφαιρέθηκε. Η κορυφή οπισθοσκέδασης φαίνεται στο κανάλι 150, παρόμοια με την εικόνα 1.

Τα συστήματα  $\text{NaI}$ , όπως και όλα τα συστήματα σπινθηρισμών, είναι ευαίσθητα στις αλλαγές θερμοκρασίας. Αλλαγές στην θερμοκρασία λειτουργίας που οφείλονται στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος μετατοπίζουν το φάσμα στον οριζόντιο άξονα. Οι φωτοκορυφές μπορούν να μετακινηθούν δεκάδες κανάλια ή και περισσότερα. Τέτοιες αλλαγές μπορούν να αποτραπούν με την χρήση σταθεροποιητών φάσματος.

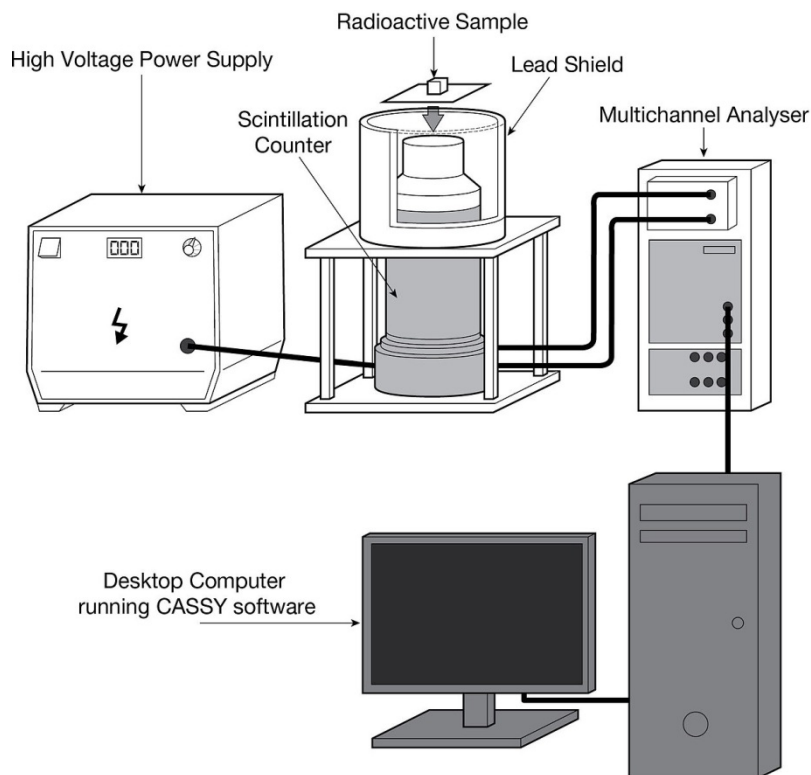
Λόγω της μικρής ανάλυσης των ανιχνευτών  $\text{NaI}$ , είναι ακατάλληλοι για την ταυτοποίηση πολύπλοκων μιγμάτων υλικών που παράγουν ακτίνες γ.

### Βαθμονόμηση

Αν ένα γ-φασματομέτρο χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση δείγματος άγνωστης σύστασης, η κλίμακα της ενέργειάς του πρέπει πρώτα να βαθμονομηθεί. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με την χρήση φωτοκορυφών γνωστής πηγής όπως  $^{137}\text{Cs}$  ή  $^{60}\text{Co}$ . Λόγω του ότι ο αριθμός του καναλιού προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος της ενέργειας, η κλίμακα καναλιού μπορεί να μετατραπεί σε κλίμακα ενέργειας. Αν το μέγεθος του κρυστάλλου του ανιχνευτή είναι γνωστό τότε μπορεί να γίνει και βαθμονόμηση της έντασης, ώστε όχι μόνο οι ενέργειες αλλά και οι εντάσεις άγνωστης πηγής (ή η ποσότητα συγκεκριμένου ισотоπού στην πηγή) μπορεί να καθοριστεί.

Επειδή ραδιενέργεια υπάρχει παντού, το φάσμα πρέπει να αναλυθεί όταν δεν υπάρχει πηγή κοντά. Η ακτινοβολία υποβάθρου τότε υπολογίζεται, και αφαιρείται από τις κανονικές μετρήσεις.

Απορροφητές μολύβδου μπορούν να τοποθετηθούν γύρω από το σύστημα μέτρησης για να μειώσουν την ακτινοβολία υποβάθρου.



Εικόνα 14: Διαγραμματική απεικόνιση ενός πλήρους ανιχνευτικού συστήματος σπινθηριστή, όπως αυτό που λειτουργεί στο εργαστήριο πυρηνικής μικροανάλυσης της Σ.Σ.Ε.

Μετρήσεις, μέσω της χρήσης πηγών ακτινοβολίας  $\gamma$  με γνωστή ενέργεια, μπορούν να καταχωρηθούν σε έναν πίνακα μετρήσεων όπως ο παρακάτω και μέσω της χρήσης λογισμικού πακέτου (όπως για παράδειγμα το Excel) να προσδιοριστεί η βέλτιστη γραμμική σχέση μεταξύ ενέργειας και αριθμό καναλιού για το συγκεκριμένο ανιχνευτικό σύστημα με τις συγκεκριμένες παραμέτρους λειτουργίας.

Δεδομένα συσχετισμού Ενέργειας - #Καναλιού για σπινθηριστή NaI (τυχαίες τιμές)

| Ενέργεια (keV) | Αριθμός Καναλιού |
|----------------|------------------|
| 662            | 230              |
| 900            | 315              |
| 1285           | 490              |

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στη βαθμονόμηση, καλό είναι να ληφθούν τρία ζεύγη τιμών και όχι μόνο δύο, τα οποία να καλύπτουν όσο ευρύτερη ενεργειακή κλίμακα είναι δυνατόν.

| Model RSS 8<br>8 Disk Gamma Source Set                                                 |                                                         |            |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------|
| Isotope                                                                                | Activity<br>( $\mu$ Ci)                                 | Half-life  | Peaks of Interest<br>Gamma (MeV)     |
| Barium-133                                                                             | 1                                                       | 10.8 years | 0.081, 0.276, 0.303,<br>0.356, 0.384 |
| Cadmium-109                                                                            | 1                                                       | 462 days   | 0.088                                |
| Cesium-137                                                                             | 1                                                       | 30.2 years | 0.662                                |
| Cobalt-57                                                                              | 1                                                       | 272 days   | 0.122, 0.136                         |
| Cobalt-60                                                                              | 1                                                       | 5.27 years | 1.173, 1.333                         |
| Manganese-54                                                                           | 1                                                       | 313 days   | 0.835                                |
| Sodium-22                                                                              | 1                                                       | 2.6 years  | 0.511, 1.275                         |
| Unknown                                                                                | For student identification, a mixture of Cs-137 & Zn-65 |            | 0.662                                |
| Cs-137                                                                                 | 0.5                                                     | 30.2 years | 0.511, 1.115                         |
| Zn-65                                                                                  | 1.0                                                     | 244 days   |                                      |
| USNRC and State License Exempt Quantities                                              |                                                         |            |                                      |
| <b>Spectrum Techniques Inc.</b>                                                        |                                                         |            |                                      |
| 105 Union Valley Rd                                                                    |                                                         |            |                                      |
| Oak Ridge, TN 37830 USA                                                                |                                                         |            |                                      |
| Web site: <a href="http://www.spectrumtechniques.com">www.spectrumtechniques.com</a>   |                                                         |            |                                      |
| E-mail: <a href="mailto:sales@spectrumtechniques.com">sales@spectrumtechniques.com</a> |                                                         |            |                                      |
| Phone: 865-482-9937 Fax: 865-483-0473                                                  |                                                         |            |                                      |

| Isotopes Available      |                    |                           |
|-------------------------|--------------------|---------------------------|
| Radioactive<br>Material | Isotope<br>Model # | Activities<br>( $\mu$ Ci) |
| Barium 133              | Ba-133             | 1 to 10                   |
| Carbon 14               | C-14               | 10                        |
| Cadmium 109             | Cd-109             | 1 to 10                   |
| Cesium 137              | Cs-137             | 0.1 to 10                 |
| Cobalt 57               | Co-57              | 1 to 100                  |
| Cobalt 60               | Co-60              | 1                         |
| Europium 152            | Eu-152             | 1                         |
| Iron 55                 | Fe-55              | 50 & 100                  |
| Iodine 129              | I-129              | 0.005                     |
| Manganese 54            | Mn-54              | 1 to 10                   |
| Sodium 22               | Na-22              | 1 to 10                   |
| Lead Nitrate            | Pb-210             | 0.1                       |
| Polonium 210            | Po-210             | 0.1                       |
| Strontium 90            | Sr-90              | 0.1                       |
| Thallium 204            | Tl-204             | 1 & 5                     |
| Zinc 65                 | Zn-65              | 1 to 10                   |

Εικόνα 15: Η εικονιζόμενη λίστα περιλαμβάνει τις διαθέσιμες ραδιενεργές πηγές (και στοιχεία για κάθε μία από αυτές) του εργαστηρίου πυρηνικής μικροανάλυσης της Σ.Σ.Ε. Η βαθμονόμηση του ανιχνευτή σπινθηρισμών επιτυγχάνεται με τη χρήση των πηγών αυτών.

### Βιβλιογραφία:

- [1] Θ. Λιόλιος: Όπλα εκφυλισμένου Ουρανίου και ατυχήματα Πυρηνικών Όπλων, εκδόσεις Παχούδη - Γιαπούλη, 2002
- [2] N. Tsoulfanidis: Measurement and Detection of Radiation, Taylor & Francis, 2005
- [3] Κ. Παπαστεφάνου: Φυσική ακτινοβολιών και εφαρμογές Ραδιοϊσοτόπων, εκδόσεις Ζήτη, 2001
- [4] Μ. Αντωνόπουλος – Ντόμης: Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία, εκδόσεις Ζήτη, 2005

# Σχετικά με την «Αθηνά»

Το Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων «Αθηνά» αποτελεί ένα ανεξάρτητο, μη κερδοσκοπικό Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου (Αστική μη Κερδοσκοπική Εταιρία), λειτουργεί ως κοινωφελές κέντρο επιστημονικών ερευνών σε θέματα ελέγχου Όπλων και Ακτινοβολίας, επιδιώκει κοινωφελείς επιστημονικούς και πολιτιστικούς σκοπούς και απονέμει υποτροφίες. Οι σκοποί του Ελληνικού Κέντρου Ελέγχου Όπλων (σύμφωνα με το καταστατικό ίδρυσης και λειτουργίας του που δημοσιεύθηκε στο Πρωτοδικείο Θεσσαλονίκης) είναι αυτοί που προβλέπονται από το θεσμικό πλαίσιο έρευνας και τεχνολογίας (Ν.3653/2008) περί ερευνητικών και τεχνολογικών φορέων (άρθρο 2 παρ.ιβ και παρ. ιγ.). Όλα τα έσοδα από τους διάφορους πόρους του διατίθενται για τις επιστημονικές-ερευνητικές του δραστηριότητες. Στα πλαίσια της κοινωφελούς της ερευνητικής της δραστηριότητας η «Αθηνά» διεξάγει μελέτες και μετρήσεις είτε αυτεπάγγελτα είτε μετά από πρόσκληση των συνδρομητών, δωρητών και ευεργετών του καθώς και μετά από πρόσκληση κάθε ιδιωτικού ή δημοσίου φορέα που μπορεί να καλύψει τα έξοδα της σχετικής επιστημονικής έρευνας. Η Διεύθυνση Ερευνών της «Αθηνάς» καταθέτει στον ενδιαφερόμενο φορέα επιστημονική έκθεση σχετικά με τα αποτελέσματα της επιστημονικής έρευνας που διεξήγαγε.

**Το Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων «Αθηνά» ως έγκυρος και ανεξάρτητος επιστημονικός φορέας σε θέματα οπλικής, στρατιωτικής και αντιτρομοκρατικής επιστήμης απευθύνεται:**

Σε κάθε Έλληνα που θεωρεί ότι η Ελλάδα πρέπει να αναπτύξει μια πανίσχυρη οπλική, αμυντική και αντιτρομοκρατική επιστήμη και τεχνολογία.

Σε κάθε Έλληνα που θέλει να μάθει με μαθηματική ακρίβεια τις επιπτώσεις και τον έλεγχο των πάσης φύσεως οπλικών, πολεμικών και τρομοκρατικών δραστηριοτήτων στην Ελλάδα και το Εξωτερικό

Στα στελέχη των Μέσων Μαζικής Ενημέρωσης που αναζητούν μια έγκυρη πηγή πληροφόρησης και ειδήσεων

Στα στελέχη των Ενόπλων Δυνάμεων και των Σωμάτων Ασφαλείας καθώς και τους αποστράτους αυτών.

Στις Υγειονομικές Υπηρεσίες και τις Υπηρεσίες Πολιτικής Προστασίας

Σε κάθε Δικαστική και Εισαγγελική Αρχή που αναζητεί έγκυρη και τεκμηριωμένη πραγματογνωμοσύνη

Στους Δικηγόρους που αναζητούν επιστημονικά στοιχεία και μια πλήρη βάση νομικών δεδομένων προκειμένου να τεκμηριώσουν την υπεράσπιση των πελατών τους

Στους Πολιτικούς που θα κληθούν να πάρουν αποφάσεις και να νομοθετήσουν σε θέματα Εθνικής και Διεθνούς Ασφάλειας

**Οι επιστημονικές εκθέσεις και μελέτες του Ελληνικού Κέντρου Ελέγχου Όπλων:**

Αποτελούν επιστημονικές μελέτες τις οποίες η Διεύθυνση Ερευνών της «Αθηνάς» θα υποστηρίξει ενώπιον κάθε δημοσίου ή ιδιωτικού φορέα καθώς και κάθε ανακριτικής, εισαγγελικής και δικαστικής αρχής.

Δεν αντικαθιστούν πιστοποιητικά και βεβαιώσεις που σύμφωνα με τη νομοθεσία παρέχουν αποκλειστικά οι κρατικοί φορείς.

Δεν αποτελούν ιατρικές βεβαιώσεις, διαγνώσεις ή συμβουλές. Στην περίπτωση που ο χρήστης των εκθέσεων αυτών θέλει να τις χρησιμοποιήσει για ιατρικούς σκοπούς η «Αθηνά» συνεργάζεται με εξειδικευμένους ιατρούς (ακτινολόγους, ογκολόγους κλπ) οι οποίοι είναι στη διάθεση των ενδιαφερομένων.

**Αποποίηση Ευθυνών:**

Οι απόψεις των ερευνητών και συνεργατών του ερευνητικού ιδρύματος «Αθηνά» δεν συμπίπτουν απαραίτητα με τις απόψεις της Διεύθυνσης του ιδρύματος.

Οι απόψεις του ιδρύματος δεν συμπίπτουν απαραίτητα με τις απόψεις του ΥΠΕΘΑ, των υπηρεσιών και των στρατιωτικών ή πολιτικών στελεχών του.

Ισχύουν όλα τα αναλυτικά στοιχεία περί αποποίησης ευθυνών που αναφέρονται στην ιστοσελίδα του ιδρύματος τα οποία καλούνται οι αναγνώστες να μελετήσουν.