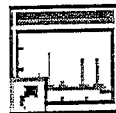


## Άσκηση 2

# Εικονικά Πειράματα Πυρηνικής Φασματοσκοπίας



Simulate.lnk



Spectr.pif

Πρόγραμμα 1 : *SIMULATE*

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΩΝ- $\gamma$

Πρόγραμμα 2 : *SPECTR*

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΩΝ- $\gamma$

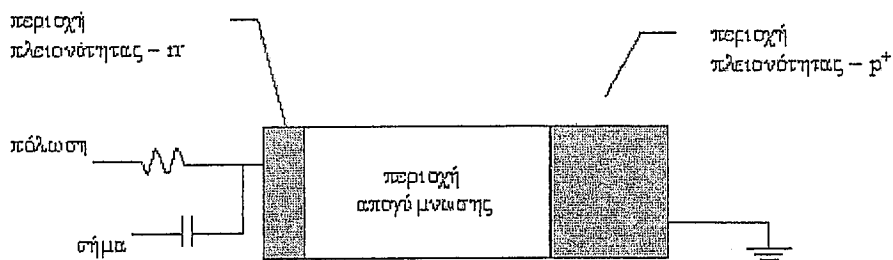
## 2.1 Σκοπός

Σκοπός των ασκήσεων αυτών είναι η μελέτη των ενεργειακών φασμάτων ακτίνων- $\gamma$  που λαμβάνονται από έναν ανιχνευτή Γερμανίου υψηλής καθαρότητας [ $Ge(HP)$ ] και η εξοικείωση με τις μεθόδους ανάλυσής τους χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ανάλυσης φασμάτων *SPECTR*. Επίσης η μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών των ανιχνευτών ακτίνων- $\gamma$  Ge και NaI καθώς και η σύγκριση μεταξύ τους. Οι ανιχνευτές Γερμανίου έχουν πολύ υψηλό κόστος (μερικές δεκάδες χιλιάδες ευρώ) και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι, ακατάλληλοι επομένως για εκπαιδευτικά εργαστήρια. Γι' αυτό και τα φάσματα που θα χρησιμοποιηθούν στην άσκηση δεν προέρχονται από πραγματικό πείραμα αλλά από προσομοίωση μέσω του προγράμματος *SIMULATE*.

## 2.2 Γενικά

### 2.2.1 Εισαγωγή

Οι ανιχνευτές Γερμανίου, Ge, αποτελούνται από μια επαφή  $p-i-n$ . Η επαφή αυτή κατασκευάζεται από έναν κρύσταλλο ημιαγωγού Ge υψηλής καθαρότητας (*High Purity*), ο οποίος εμπλουτίζεται ώστε να γίνει τύπου  $p^+$  (ή  $n^-$ ) από τη μία μεριά και τύπου  $n^-$  (ή  $p^+$ ) από την άλλη. Εφαρμόζοντας τάση στα άκρα του κρυστάλλου, δημιουργείται στο κεντρικό τμήμα μια εκτεταμένη περιοχή χωρίς ηλεκτρόνια ή οπές, η λεγόμενη *περιοχή απογύμνωσης*, ενώ ελαχιστοποιούνται οι περιοχές πλειονότητας στα άκρα του κρυστάλλου με μεγάλες συγκεντρώσεις  $p^+$  και  $n^-$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1.



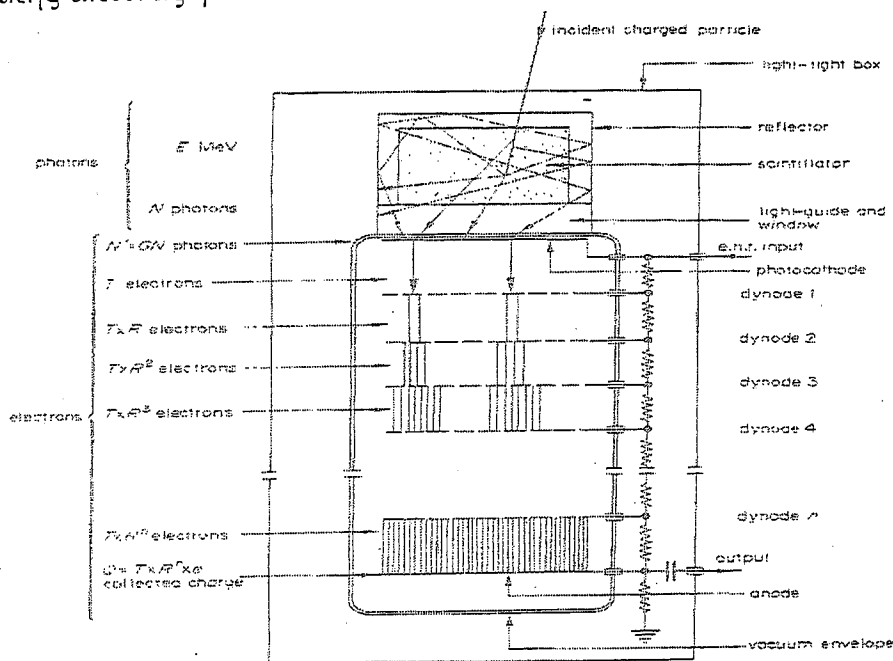
Σχήμα 2.1 : Επαφή  $p-i-n$

Η περιοχή απογύμνωσης αποτελεί και τον *ενεργό όγκο* (*active volume*) του ανιχνευτή, όπου η ιοντίζουσα ακτινοβολία δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τα οποία συλλέγονται από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στις επαφές  $p-n$ .

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, ο κρύσταλλος είναι απαραίτητο να διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία. Διαφορετικά δημιουργείται

ποσότητα ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο θόρυβος (λόγω των ελεύθερων φορέων). Έτσι, ο ανιχνευτής Ge διατηρείται μέσα σε δοχείο Dewar το οποίο περιέχει υγρό άζωτο (77 °K).

Οι ανιχνευτές NaI αποτελούνται από ένα κρύσταλλο σπινθηρισμού όπου οι ακτίνες-γ αλληλεπιδρούν (μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου, φαινομένου Compton και δίδυμης γένεσης) και παράγουν ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά διανύουν μια μικρή ακανόνιστη τροχιά στον κρύσταλλο, συγκρούονται με πολλά άτομα του κρυστάλλου και μετατρέπουν την ενέργειά τους σε ορατά φωτόνια (σπινθήρες). Όσο μεγαλύτερη ενέργεια έχει η ακτίνα-γ, τόσο περισσότερα φωτόνια παράγονται. Στη συνέχεια ο φωτοπολλαπλασιαστής (PMT), που είναι σε επαφή με τον κρύσταλλο σπινθηρισμών NaI, μετατρέπει κάθε φωτόνιο σε ένα στοιχειώδες ρεύμα. Τα φωτόνια φθάνουν στον φωτοπολλαπλασιαστή την ίδια περίπου χρονική στιγμή οπότε τα στοιχειώδη ρεύματα αθροίζονται και δίνουν έναν ηλεκτρικό παλμό που μετατρέπεται σε παλμό τάσης με μέγεθος ανάλογο προς την ενέργεια της αρχικής ακτίνας-γ.



**Σχήμα 2.2:** Σχηματική αναπαράσταση ανιχνευτή σπινθηρισμών NaI, όπου αναδεικνύονται τα διαφορετικά στάδια της διαδικασίας ανίχνευσης και ενίσχυσης του παλμού (από το βιβλίο του J.B.A.England: *Techniques in Nuclear Structure Physics*).

## 2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών

### Ανιχνευτική ικανότητα

Η ανιχνευτική ικανότητα είναι μέτρο της ικανότητας του ανιχνευτή να ανιχνεύει όσο το δυνατό μεγαλύτερο ποσοστό της εκπεμπόμενης από μια

πηγή ακτινοβολίας ανά μονάδα χρόνου σε μία συγκεκριμένη απόσταση. Για φωτόνια η ανιχνευτική ικανότητα εξαρτάται από την ενέργεια των ακτίνων  $\gamma$ , από τον τύπο του κρυστάλλου του ανιχνευτή και από τη γεωμετρία του συστήματος, δηλαδή το μέγεθος του κρυστάλλου, τις διαστάσεις της πηγής και τη σχετική θέση πηγής – κρυστάλλου.

### **Απόλυτη ή Ολική απόδοση κορυφής (Absolute ή total efficiency) $\epsilon_a$**

Είναι ο λόγος  $\frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}}$  του αριθμού των φωτονίων που συνεισφέρουν

στη δημιουργία της φωτοκορυφής (*photopeak*) μιας ακτίνας- $\gamma$  σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα προς τον αριθμό των συνολικών φωτονίων που εξέπεμψε η πηγή το ίδιο χρονικό διάστημα. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από τη γεωμετρία της πηγής και του ανιχνευτή.

### **Εσωτερική Απόδοση Κορυφής (Internal peak efficiency) $\epsilon_{es}$**

Είναι ο λόγος  $\frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εισερχόμενα}}}$  του αριθμού των φωτονίων που συνεισφέρουν

στη δημιουργία της φωτοκορυφής μιας ακτίνας- $\gamma$  σ' ένα ορισμένο χρονικό διάστημα προς τον αριθμό των φωτονίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή στο διάστημα αυτό.

Οι δυο αποδόσεις, για ισοτροπική πηγή, συνδέονται με την απλή σχέση

$$\epsilon_{es} = \epsilon_a 4\pi/\Omega \quad (2.1)$$

όπου  $\Omega$  είναι η στερεά γωνία μεταξύ πηγής και ανιχνευτή.

### **Λόγος Κορυφής ως προς το Σύνολο (Peak - to - Total ratio)**

Είναι ο λόγος  $\frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{ανιχνευόμενα}}}$  του αριθμού των φωτονίων που συνεισφέρουν

στη δημιουργία της κορυφής (*photopeak*) του φάσματος, σ' ένα χρονικό διάστημα, προς τον αριθμό των φωτονίων που γενικά ανιχνεύονται στο διάστημα αυτό. Αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ της χρήσιμης φωτοκορυφής και του υποβάθρου στο φάσμα.

### **Ανιχνευτική ικανότητα Ge σε σχέση με σπινθηριστή NaI**

Επειδή η  $\epsilon_a$  ενός ανιχνευτή, όπως αναφέραμε πιο πάνω, εξαρτάται από τη γεωμετρία του συστήματος, δεν έχει απόλυτο χαρακτήρα και δεν χαρακτηρίζει ένα ανιχνευτή. Έτσι, συχνά χρησιμοποιείται η έννοια της σχετικής ανιχνευτικής ικανότητας ενός ανιχνευτή Ge σε σχέση με την ανιχνευτική ικανότητα ενός κρυστάλλου NaI διαστάσεων 3"×3" τοποθετημένου σε απόσταση 25 cm από μια πηγή  $^{60}\text{Co}$  και για την φωτοκορυφή 1332.5keV ακτίνας- $\gamma$  του  $^{60}\text{Co}$ , ώστε να έχουμε μια απλή και σαφή εικόνα της απόδοσης του ανιχνευτή Ge. Ο ανιχνευτής

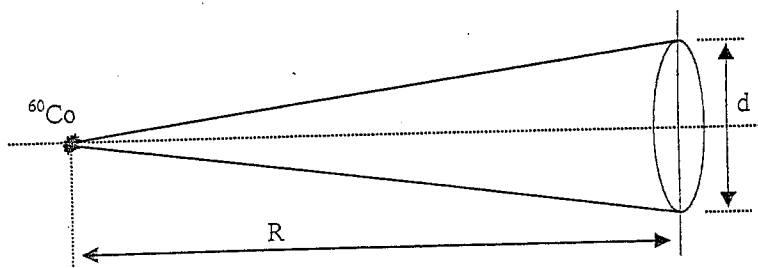
ημιαγωγού τοποθετείται και αυτός στην ίδια απόσταση από την πηγή, οπότε μπορεί να υπολογισθούν πειραματικά τα μεγέθη  $\varepsilon_a$  του  $Ge$  και  $\varepsilon_a$  του ανιχνευτή  $NaI$ . Με τη βοήθεια αυτών των ποσοτήτων ορίζεται η σχετική ανιχνευτική ικανότητα (*relative efficiency*)  $\varepsilon_{σχ}$  του  $Ge$ , σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_{σχ} = \frac{\varepsilon_a(Ge)}{\varepsilon_a(NaI)} = \frac{N_{\text{κορυφής}}(Ge)}{N_{\text{κορυφής}}(NaI)} \quad (2.2)$$

όπου η συγκεκριμένη κορυφή είναι η 1332.5keV του  $^{60}Co$ .

Η  $\varepsilon_{εσ}$  ενός κρυστάλλου  $NaI$  διαστάσεων 3"×3" (7.62 cm × 7.62 cm), όταν τοποθετηθεί σε απόσταση 25 cm από ραδιενεργό πηγή  $^{60}Co$ , είναι «σταθερά» του ανιχνευτή και έχει την τιμή 0.21, ενώ η στερεά γωνία  $\Omega$  (σε στερακτίνια) που σχηματίζουν τα εισερχόμενα φωτόνια, για μικρές γωνίες, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{\pi d^2}{4R^2}$$



Σχήμα 2.3 : Γεωμετρία ραδιενεργού σημειακής πηγής και ανιχνευτή με επιφάνεια  $S$  σε απόσταση  $R$ , ορίζοντας στερεά γωνία  $\Omega = S/R^2$

Εφόσον  $R = 25$  cm και  $d = 7.62$  cm, βρίσκουμε ότι  $\Omega = 72.8 \times 10^{-3}$  sr, οπότε για τον ανιχνευτή  $NaI$ , από τη σχέση (2.1) προκύπτει ότι :

$$\varepsilon_a(NaI) \approx 1.2 \times 10^{-3}$$

Για να βρεί κανείς λοιπόν, από τη σχέση (2.2), τη σχετική ανιχνευτική ικανότητα ενός ανιχνευτή  $Ge$  ως προς αυτήν ενός κρυστάλλου  $NaI$ , διαιρεί την απόλυτη ανιχνευτική του ικανότητα (που βρίσκεται με παρόμοιο τρόπο πειραματικά) με την τιμή  $1.2 \times 10^{-3}$ , και την εκφράζει σε ποσοστό επί τοις εκατό. Η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10-120%, μικρότερη δηλαδή ή συγκρίσιμη με αυτήν ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών.

## Ενεργειακή Διακριτική ή Διαχωριστική ικανότητα (Resolution)

Είναι η ικανότητα του ανιχνευτή να «βλέπει» την ενεργειακή διαφορά δύο φωτονίων, των οποίων οι ενέργειες διαφέρουν ελάχιστα. Μέτρο της διακριτικής ικανότητας ενός ανιχνευτή είναι το *FWHM* (*Full Width Half Maximum*), δηλαδή το εύρος  $\Delta E$  μιας κορυφής του φάσματος στο μέσον του ύψους της. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα  $R$  ορίζεται σαν ο λόγος του *FWHM* που παρουσιάζει μια οποιαδήποτε κορυφή του φάσματος μιας ραδιενεργού πηγής προς την τιμή της ενέργειας  $E$  στην οποία αντιστοιχεί η κορυφή αυτή. Έτσι έχουμε:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \quad (2.3)$$

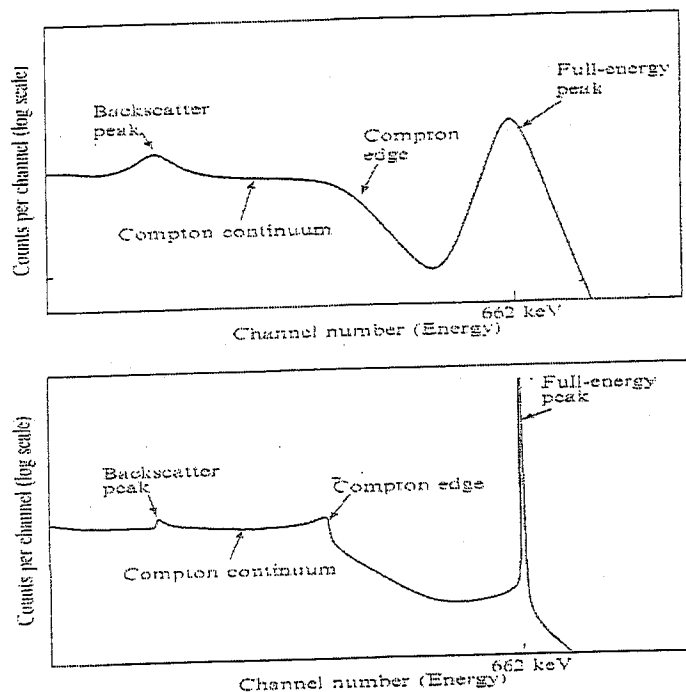
Οι παλμοί εξόδου σ' ένα ανιχνευτικό σύστημα μονοχρωματικής ακτινοβολίας δεν έχουν όλοι το ίδιο ύψος παρόλο που προέρχονται από σωματίδια της ίδιας ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται, η αντίστοιχη φωτοκορυφή στο φάσμα να έχει ένα ενεργειακό εύρος  $\Delta E$ , το οποίο εξαρτάται από την ενεργειακή διασπορά και την ελλιπή συλλογή φορτίου μέσα στον ανιχνευτή, το «θόρυβο» των ηλεκτρονικών συσκευών μέσα στο ανιχνευτικό σύστημα και το φυσικό εύρος  $\Gamma$  της στάθμης που αποδιεγείρεται ( $\Gamma \Delta t \sim \hbar$ ). Η ενεργειακή διασπορά μέσα στον ανιχνευτή, είναι ανάλογη της διασποράς  $\Delta N$  των φορτισμένων φορέων που δημιουργούνται στον ανιχνευτή και αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα στη διαμόρφωση της τελικής διακριτικής ικανότητας  $R$  του ανιχνευτικού συστήματος.

$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Οι ανιχνευτές ημιαγωγού (*Ge*) δημιουργούν φορτισμένους φορείς (ηλεκτρόνια-οπές) ενέργειας  $\varepsilon=2-3\text{eV}$ , ενώ οι ανιχνευτές σπινθηρισμών (*NaI*) δημιουργούν  $e^-$  λόγω ιονισμού, ενέργειας  $\varepsilon=20-30\text{keV}$ . Επομένως για φωτόνια ενέργειας  $E_\gamma$  οι ανιχνευτές *Ge* δημιουργούν περισσότερους φορείς  $N=E_\gamma/\varepsilon$  απ' ό,τι οι ανιχνευτές *NaI* και η ενεργειακή διακριτική τους ικανότητα  $R$  είναι πολύ μικρότερη, καλύτερη δηλ. από αυτήν των ανιχνευτών *NaI* (βλέπε Σχήμα 2.4).

Στους ανιχνευτές σπινθηρισμών, το *FWHM* μιας κορυφής είναι ανάλογο της ενέργειας στην οποία αντιστοιχεί η κορυφή. Έτσι ο λόγος που ορίστηκε προηγουμένα - η διακριτική ικανότητα - παραμένει σταθερός για ένα συγκεκριμένο ανιχνευτή.

Αντίθετα από ό,τι συμβαίνει με τους ανιχνευτές σπινθηρισμών, για τους ανιχνευτές *Ge* το *FWHM* μιας κορυφής δεν είναι ανάλογο της ενέργειας της κορυφής. Γι' αυτό ορίζεται η διακριτική ικανότητα ενός *Ge* σαν το *FWHM* της κορυφής  $1332.5\text{keV}$  της πηγής του  $^{60}\text{Co}$ .



Σχήμα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση φάσματος της ακτίνας- $\gamma$  662 keV του ραδιενεργού ισότοπου  $^{137}\text{Cs}$  από ανιχνευτή NaI (άνω) και Ge (κάτω) (Από το βιβλίο του John Lilley : *Nuclear Physics-Principles and Applications*).

## 2.3 Μέθοδος

### 2.3.1 Περιγραφή του προγράμματος *Simulate*

Το *Simulate* είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης του φάσματος ακτίνων  $\gamma$  μιας ραδιενεργού πηγής που συλλέγει ένας ανιχνευτής.

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να παράγει φάσματα από πέντε, το πολύ, πηγές ταυτόχρονα, τις οποίες μπορεί να επιλέξει από 56 διαφορετικά ισότοπα. Επίσης, μπορεί να επιλέξει και τον ανιχνευτή με τον οποίο θα συλλεχθεί το φάσμα.

Η εκκίνηση του προγράμματος γίνεται από το *Start > Programs > Simulate*. Φυσικά, η εκκίνηση του προγράμματος μπορεί να γίνει και από το αντίστοιχο εικονίδιο. Αναλυτικά το πρόγραμμα δουλεύει με τα εξής *dialog boxes*:

- *Ανιχνευτής (Detector)*:

Στο *Type of Detector* ορίζεται ο ανιχνευτής, που μπορεί να είναι κρύσταλλος σπινθηριστού (NaI ή BaF) ή κρύσταλλος Ge. Ταυτόχρονα με την επιλογή του ανιχνευτή ορίζονται από το πρόγραμμα και οι αρχικές τιμές των παραμέτρων *Peak/Total Relative Ratio* και *Detector Resolution*. Ωστόσο, οι τιμές αυτές μπορούν να αλλάξουν από το χρήστη.

Η παράμετρος *Peak/Total Ratio* έχει σχέση με το πόσο μεγάλο ποσοστό των φωτονίων που ανιχνεύονται είναι αυτά της φωτοκορυφής. Η παράμετρος που παίρνει το πρόγραμμα είναι τροποποιημένη για τις ανάγκες του προγράμματος και μπορεί να πάρει τιμές από 0.2 έως 5. Για τις ανάγκες της άσκησης, συνιστάται η τιμή 1.

Η παράμετρος *Detector Resolution* είναι δεδομένη (default) για τον κάθε ανιχνευτή (% για τους σπινθηριστές, σε keV για τον κρύσταλλο *Ge*), αλλά μπορεί να αλλάξει παίρνοντας οποιαδήποτε τιμή επιθυμεί ο χρήστης.

- **Παράμετροι βαθμονόμησης (*Calibration Parameters*):**

Στο *Calibration Parameters* ορίζονται οι τιμές των  $a$ ,  $b$  και  $c$  της εξίσωσης  $y = a + bx + cx^2$ , όπου με  $y$  δηλώνεται η τιμή της ενέργειας και με  $x$  το κανάλι του φάσματος που αυτή αντιστοιχεί. Η εξίσωση αυτή είναι συνήθως γραμμική (δηλαδή  $c = 0$ ), αλλά πολλές φορές ο ανιχνευτής *Ge* εμφανίζει μια μη γραμμική συμπεριφορά στις υψηλές ενέργειες φωτονίων η οποία μπορεί να προσεγγιστεί από την παραπάνω εξίσωση επιλέγοντας μικρές τιμές του  $c$ . Οι τιμές των  $a$ ,  $b$  και  $c$  μπορούν να πληκτρολογηθούν σε κατάλληλο παράθυρο επιλέγοντας το *Enter Manually* ή να διαβαστούν από κάποιο υπάρχον αρχείο φάσματος (*.spe*) το οποίο επιλέγεται μέσω του *Browse*. Αν το αρχείο αυτό δεν έχει προβλέψει τιμή για την παράμετρο  $c$  τότε αυτή είναι 0.

- **Δείγμα (*Sample*):**

Στο *Sample* ορίζονται τα ισότοπα των οποίων τα φωτόνια ανιχνεύουμε και το ποσοστό συμμετοχής του καθενός στο φάσμα. Τα ισότοπα επιλέγονται στη στήλη του *Detected Isotope(s)*, ενώ τα ποσοστά γράφονται στην αντίστοιχη διπλανή θέση της στήλης *Contribution Percentage*. Για παράδειγμα, μπορούμε να επιλέξουμε το ισότοπο  $^{152}\text{Eu}$  με ποσοστό 93 (%) και το ισότοπο  $^{154}\text{Eu}$  με ποσοστό 7 (%), που είναι και η συνήθης σύσταση μιας πηγής *Eu*. Στο φάσμα θα μπορούμε να δούμε τις φωτοκορυφές και των δύο ισωτόπων, όπου όμως αυτές του  $^{154}\text{Eu}$  θα έχουν πολύ μικρότερο αριθμό φωτονίων.

Στη θέση *Detected photons* επιλέγουμε τον αριθμό των φωτονίων που καταγράφονται στο φάσμα. Ο αριθμός αυτός έχει την ενδεικτική τιμή των 2 000 000 γεγονότων, αλλά φυσικά μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.

- **Αρχείο εξόδου (*Output Filename*):**

Στη θέση αυτή ορίζεται το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτεί το φάσμα. Ενδεικτικά έχει δοθεί το όνομα *Outfile.sth*, αλλά συστήνεται στο χρήστη να αλλάζει το όνομα του αρχείου αυτού κάθε φορά που τρέχει το πρόγραμμα, ανάλογα με το ποια πηγή (ή πηγές) χρησιμοποιεί.

Η παραγωγή του φάσματος γίνεται σε ένα παράθυρο του *DOS* που εμφανίζεται μόλις ο χρήστης επιλέξει *Ok*. Εκεί, μπορεί κανείς να παρακολουθήσει τη διαδικασία της δημιουργίας του φάσματος όπως την



αναγνώριση όλων ισοτόπων και των φωτοκορυφών τους που θα εμφανίζονται στο φάσμα.

Όταν το πρόγραμμα τελειώσει, έχει δημιουργηθεί το αρχείο του φάσματος με το όνομα που έχει επιλέξει ο χρήστης και έχει αποθηκευθεί στο *directory* *C:\program-files\SIMULATE\SPECTRA*. Μπορεί κανείς να δει το φάσμα αυτό χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα *SPECTR*, το οποίο ενεργοποιείται αυτόματα για το συγκεκριμένο αρχείο. Φυσικά, μπορεί κανείς να ενεργοποιήσει αυτόνομα το πρόγραμμα *SPECTR* για να μελετήσει τα υπάρχοντα φάσματα, με τη διαφορά ότι δεν συνδέεται αυτόματα με το *directory* στο οποίο έχουν αποθηκευθεί τα φάσματα.

### 2.3.2 Σύντομη περιγραφή του προγράμματος *SPECTR*

Το *SPECTR* είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την ανάλυση φασμάτων ακτίνων- $\gamma$  ή ακτίνων- $X$  μιας ραδιενεργού πηγής που συλλέγει ένας ανιχνευτής. Ο χρήστης επιλέγει το όνομα του φάσματος που πρόκειται να αναλύσει (*ENTER FILENAME*) από τη διεύθυνση που το έχει αποθηκεύσει (*LIST DIRECTORY*) και ξεκινά την ανάλυση (*START ANALYSIS*).

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης φασμάτων στην οθόνη (*DiSplay*), επιλογής και μεγέθυνσης περιοχής του φάσματος (*EXPanD*) και επιστροφής στο αρχικό φάσμα (*REFresh*), μετακίνησης του φάσματος δεξιά-αριστερά με τα αντίστοιχα βέλη " $\rightarrow$ ", ταυτόχρονης απεικόνισης μέχρι και 6 φασμάτων σε ανεξάρτητα πλαίσια (*ADD*) ή σε κοινό πλαίσιο (*OVerLay*), απομάκρυνσης ενός φάσματος από την οθόνη (*ReMoVe*), εκτύπωσης του φάσματος (*COPY*), μεταβολής του κατακόρυφου άξονα (*YSCale*), αφαίρεσης υποβάθρου (*BackGRound*), ολοκλήρωσης του εμβαδού και εύρεση του κεντροειδούς μιας φωτοκορυφής (*Integrate Peak*) ή προσαρμογή και ανάλυση σύνθετων φωτοκορυφών με συναρτήσεις Gauss (*FIT*). Για όλες αυτές τις ενέργειες δίνονται αναλυτικές οδηγίες στην οθόνη κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εντολής. Το πρόγραμμα παρέχει και πολλές άλλες δυνατότητες που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης από το *MENU*, ζητώντας τις ανάλογες πληροφορίες και οδηγίες στην οθόνη με τη βοήθεια της εντολής " $?$ ". Το πρόγραμμα επιτρέπει επίσης την ταυτοποίηση φωτοκορυφών ακτίνων- $X$  με ταυτόχρονη απεικόνιση όλων των σχετικών γραμμών εκπομπής ( $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$ ,  $L_{\alpha}$ , κλπ) του αντίστοιχου χημικού στοιχείου, καθώς και ακτίνων- $\gamma$  που προέρχονται από οποιοδήποτε ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής (του ίδιου ή του μητρικού του) που επιτρέπει την ανίχνευσή του.

## 2.4 Εκτέλεση και επεξεργασία των μετρήσεων

### 2.4.1 Μελέτη της απόδοσης ανιχνευτή *Ge(HP)*

Υποθέστε ότι το εργαστήριο διαθέτει ένα ανιχνευτή *Ge(HP)* διαμέτρου 7cm, διακριτικής ικανότητας 2.2 keV (μετρούμενη στα 1332.5keV) και *Peak/Total ratio* ίσο με τη μονάδα (σχετικά με το θεωρητικά προβλεπόμενο).

1. Με τη βοήθεια του προγράμματος *SIMULATE* δημιουργείτε ένα φάσμα ακτίνων  $\gamma$  που εκπέμπει μια ραδιενεργός πηγή αποτελούμενη από τα ισότοπα  $^{152}\text{Eu}$  και  $^{154}\text{Eu}$  με αναλογία 93% και 7% αντίστοιχα, τοποθετημένη σε απόσταση 25cm από τον ανιχνευτή. Το φάσμα θα πρέπει να περιέχει 3 εκατομμύρια γεγονότα, ώστε να έχει αρκετή στατιστική. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους χρησιμοποιείτε τις δεδομένες (default) τιμές. Η βαθμονόμηση του φάσματος (αν δεν είναι ήδη βαθμονομημένο) να γίνει με τις δεδομένες τιμές μέσω της εντολής *Enter Manually*. Καταγράψτε το φάσμα που δημιουργήσατε με το όνομα "*Eu152.sth*".
2. Σας δίδεται ο πίνακας των 10 πλέον ισχυρών φασματικών γραμμών του  $^{152}\text{Eu}$  με τις αντίστοιχες εντάσεις τους. Συμβουλευτείτε το διάγραμμα αποδιέγερσης του  $^{152}\text{Eu}$  για τον έλεγχο αυτών των ακτίνων- $\gamma$ . Με τη βοήθεια του προγράμματος *SPECTR* (το οποίο ενεργοποιείται αυτόματα) αναλύστε τις 10 φωτοκορυφές στο φάσμα που δημιουργήσατε (εύρεση εμβαδών με την εντολή *Integrate Peak*) και κατόπιν διαιρέστε τα εμβαδά με τις σχετικές εντάσεις του πίνακα και κανονικοποιείτε τις τιμές ώστε στην ενέργεια 121.78keV να αντιστοιχεί στη μονάδα (κανονικοποίηση εντάσεων). Κατόπιν σχεδιάστε την κανονικοποιημένη ένταση ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων σε κλίμακα λογαριθμική-λογαριθμική (log-log). Η καμπύλη αυτή αναπαριστά τη μεταβολή της απόλυτης απόδοσης  $\epsilon_a$  του ανιχνευτή σας σε σχέση με την ενέργεια των ανιχνευομένων φωτονίων.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΧΕΤ. ΕΝΤΑΣΗ (ανά 100 διασπάσεις)	ΘΥΓΑΤΡΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ
121.78	28.4	$^{152}\text{Sm}$
244.69	7.51	$^{152}\text{Sm}$
344.28	26.6	$^{152}\text{Gd}$
443.98	2.8	$^{152}\text{Sm}$
778.90	12.98	$^{152}\text{Gd}$
867.39	4.21	$^{152}\text{Sm}$
964.13	14.5	$^{152}\text{Sm}$
1085.91	9.94	$^{152}\text{Sm}$
1112.12	13.6	$^{152}\text{Sm}$
1408.01	20.8	$^{152}\text{Sm}$

3. Για τον προσδιορισμό της απόλυτης απόδοσης του ανιχνευτή σας, απαιτείται μια απόλυτα βαθμονομημένη πηγή. Θεωρήστε λοιπόν ότι

έχετε μια πηγή  $^{60}\text{Co}$  με ενεργότητα  $1.3\mu\text{C}$  ( $1\text{C} = 3.7 \times 10^{10}$  διασπάσεις ανά sec) και από το φάσμα που λαμβάνετε με έναν πραγματικό ανιχνευτή Γερμανίου για χρόνο  $5000\text{sec}$ , κάτω από τις ίδιες ακριβώς συνθήκες με το φάσμα *Eu152.sth*, προκύπτουν  $123.080 \pm 350$  κρούσεις για την κορυφή  $1332.5\text{keV}$  του  $^{60}\text{Co}$ . Ποια είναι η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή σας.

4. Προσδιορίστε τη σχετική ανιχνευτική ικανότητα του ανιχνευτή Γερμανίου που χρησιμοποιήσατε για το φάσμα προσομοίωσης, σε σχέση με την ανιχνευτική ικανότητα ενός κρυστάλλου  $\text{NaI}$  διαστάσεων  $3'' \times 3''$  σε απόσταση  $25\text{cm}$  από πηγή  $^{60}\text{Co}$ , σε ποσοστό %.

#### 2.4.2 Σύγκριση φασμάτων ακτίνων- $\gamma$ από ανιχνευτές Ge και NaI

Υποθέστε ότι το εργαστήριο διαθέτει έναν ανιχνευτή Ge διακριτικής ικανότητας  $1.9\text{keV}$  (μετρούμενη στα  $1332.5\text{keV}$ ) και έναν ανιχνευτή  $\text{NaI}$  διακριτικής ικανότητας  $7\%$  (μετρούμενη στα  $661\text{keV}$ ). Θεωρείστε ότι για όλους τους ανιχνευτές το *Peak/Total Ratio* είναι ίσο με τη μονάδα (σχετικά με το θεωρητικά προβλεπόμενο).

1. Με τη βοήθεια του προγράμματος *SIMULATE* δημιουργήστε φάσματα ακτίνων- $\gamma$  που εκπέμπει μία ραδιενεργός πηγή αποτελούμενη από τα ισότοπα  $^{207}\text{Bi}$  ( $60\%$ ) και  $^{22}\text{Na}$  ( $40\%$ ) – ένα για κάθε ανιχνευτή. Το  $^{207}\text{Bi}$  εκπέμπει δυο ισχυρές ακτίνες- $\gamma$  στα  $569.7$  και  $1063.7\text{keV}$ , ενώ το  $^{22}\text{Na}$  στα  $511.0$  και  $1274.5\text{keV}$ . Οι συντελεστές βαθμονόμησης των φασμάτων είναι  $a = 0.0$ ,  $b = 0.45$  και  $c = 0.0$ , ενώ το κάθε φάσμα περιέχει  $4\,000\,000$  γεγονότα. Απεικονίστε τα δυο φάσματα σε κοινό πλαίσιο στην οθόνη σας (εντολή *OverLay* ή εντολή *ADD*) και εκτυπώστε τα.

2. Συγκρίνετε ποιοτικά τα δυο φάσματα και καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας.

3. Αναλύστε και στα δυο φάσματα τις φωτοκορυφές μέσω προσαρμογής με συνάρτηση Gauss (εντολή *FIT*) για να βρείτε το εύρος τους  $\Delta E_\gamma$  (*FWHM*) για κάθε ενέργεια  $E_\gamma$  των φωτοκορυφών. Υπολογίστε τη διακριτική ικανότητα των δυο ανιχνευτών Ge και  $\text{NaI}$  για τις ενέργειες  $E_\gamma$  και καταγράψτε τις τιμές σε πίνακα. Σχεδιάστε τις τιμές της διακριτικής ικανότητας των δυο ανιχνευτών ως συνάρτηση της ενέργειας των ακτίνων- $\gamma$  και σχολιάστε τα αποτελέσματα.