



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



ΔΠΜΣ ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Μελέτη του υγρού σπινθηριστή BC501A σε πεδίο υψηλοενεργειακών νετρονίων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Ελένης Μήτση

Επιβλέπων:
Μιχάλης Κόκκορης

Κάποιος είχε πολλούς πεθαμένους.
Έσκαβε τό χώμα, τούς έδαβε μόνος του.
Πέτρα τήν πέτρα, χώμα τό χώμα
έφτιαξε ένα λόφο.
Πάνου στο λόφο
έφτιαξε τήν προσηλιακή καλύβα του.

Ύστερα χάραξε δρομάκια
φύτεψε δέντρα
προσεχτικά, γεωμετρικά, συλλογισμένα.
Το μάτι του χαμογελούσε.
Το χέρι του δέν έτρεμε σχεδόν.
Ο λόφος.

Εκεί ανεβαίνουν τ' απογεύματα της Κυριακής
οι μητέρες σπρώχνοντας τά καρτσάκια των παιδιών τους
οι εργάτες της συνοικίας με πλυμένο πουκάμισο
να λιαστούν και ν' ανασάνουν λίγο αέρα.
Εκεί τά ζευγαράκια σεργιανάνε τό απόβραδο
μαθαίνουν νά διαβάζουν τ' αστέρια.
Κάτου απ' τά δέντρα ένα παιδί παίζει μιά φουσαρμόνικα.
Ο λεμοναδάς διαλαλεί τις γκαζόζες του.

Πάνου στο λόφο, όλοι το ξέρουν
πώς είναι πιό κοντά στόν ουρανό.

Όμως κανένας δεν ξέρει πώς έγινε ο λόφος,
κανένας δεν ξέρει πόσοι κοιμούνται στα σπλάχνα του λόφου.

Γ. Ρίτσος - Ο λόφος

(Για την αναπότρεπτη πορεία της γνώσης και της ανθρωπότητας προς τα μπρος)

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ενεργειακή κατανομή των νετρονίων που παράχθηκαν στον επιταχυντή Tandem Van der Graaff 5.5 MV του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος", μέσω της αντίδρασης ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ σε εύρος ενεργειών από 14.8 MeV έως 19.2 MeV. Ο διαχωρισμός των νετρονίων από τα φωτόνια και η καταγραφή τους επιτεύχθηκαν με τη χρήση του υγρού σπινθηριστή BC501A ακολουθούμενου από κατάλληλο κύκλωμα που στηρίχθηκε στην ανάλυση της μορφής των παλμών που λαμβάνονται από το σπινθηριστή. Διεξήχθησαν παράλληλα κατάλληλοι έλεγχοι αναφορικά με τα χαρακτηριστικά και τις ανοχές της διάταξης αυτής. Η αποσυνέλιξη των ληφθέντων φαμάτων έγινε με χρήση του κώδικα Difbas. Η δέσμη των νετρονίων προκύπτει πρακτικά καθαρή για τις χαμηλές ενέργειες της δέσμης των δευτερίων, και εμφανίζονται παρασιτικές αντιδράσεις και καταγραφόμενες σκεδάσεις για υψηλότερες ενέργειες.

Abstract

In the current thesis the characterization of the neutron beam between 14.8-19.2 MeV, produced at the 5.5 MeV Tandem Van der Graaff Accelerator of NCSR "Demokritos" by means of the ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ reaction is studied. Neutron gamma discrimination and neutron monitoring were accomplished utilizing a BC501A liquid scintillator followed by a pulse shape discrimination-capable circuit. Tests were conducted in order to determine the characteristics and limitations of the employed experimental setup. The deconvolution of the acquired spectra was performed using the Difbas computer code. The neutron beam proved to be practically monoenergetic for the low energy deuteron beam, while for higher deuteron beam energies, parasitic and scattered neutrons were revealed.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν σε αυτή. Δεν θα μπορούσα να ευχηθώ για καλύτερους συνεργάτες. Κατ'αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Δρ. Μιχάλη Κόκκορη που έκανε τη διπλωματική μου εργασία μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα εμπειρία. Τον ευχαριστώ για την συνεχή υποστήριξη και βοήθεια, αλλά και για την αμεσότητα και την ειλικρίνειά του καθώς και για τον ενθουσιασμό και την αγάπη του για τη δουλεία του που είναι πάντα έμπνευση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Δρ. Ρόζα Ζαννή-Βλαστού για τη σχολαστικότητα της, το ενδιαφέρον και τη βοήθεια που μου παρείχε τόσο σε θέματα οργάνωσης και διατύπωσης όσο και για τις εξαιρετικές παρατηρήσεις της στη φυσική, που με παρακινούσαν να κατανοώ καλύτερα αλλά έδιναν πάντα και μια νέα διάσταση στη συλλογιστική μου.

Δεν μπορώ να μην εκφράσω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Θεόδωρο Μερτζιμέκη για τη συνεχή του βοήθεια όλα αυτά τα χρόνια και για το ότι είναι πάντα δίπλα μου και πρόθυμος να με στηρίξει σε ό,τι χρειαστώ τόσο με τις γνώσεις του και την εμπειρία του σε θέματα φυσικής αλλά και με τη στάση του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ερευνητή του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» Δρ. Αναστάσιο Λαγογιάννη, που είχα τη χαρά να γνωρίσω για πρώτη φορά στα πλαίσια αυτής της εργασίας, για το χρόνο, τις γνώσεις και την εμπειρία του στα πειράματα που μοιράστηκε μαζί μου, αλλά και για τις ενστάσεις του.

Οφείλω επιπλέον ευχαριστίες στον ερευνητή του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» Δρ. Μιχάλη Αξιώτη για την μεγάλη βοήθεια και την αστείρευτη όρεξή του να βοηθήσει και να απαντήσει σε οποιαδήποτε απορία, τόσο σε θέματα πειραματικής φυσικής όσο και υπολογιστών. Τόσο τον Δρ. Λαγογιάννη και τον Δρ. Αξιώτη, όσο και όλο το ερευνητικό προσωπικό του Ινστιτούτου, που ήταν πάντα εγκάρδιοι και πρόθυμοι να εξυπηρετήσουν σε οτιδήποτε προέκυπτε, τους ευχαριστώ πάρα πολύ.

Δεν μπορώ να παραλείψω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε ολόκληρη την ομάδα της πυρηνικής φυσικής της ΣΕΜΦΕ, για την υπέροχη συνεργασία, τις συζη-

τήσεις και τη διάθεση να βοηθήσουν και να συζητήσουμε κάθε φορά που το χρειαζόμουν. Τον καδένα ξεχωριστά θέλω να τον ευχαριστήσω για τις υπέροχες ιδέες και τα πράγματα που έμαθα απ' αυτούς. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στη Βεατρίκη, στην Αντιγόνη, στο Θάνο, και στο Σωτήρη που κάναμε μαζί το πείραμά της παρούσας εργασίας και με βοήθούσαν σε κάθε βήμα με την υπομονή, τις γνώσεις και την υπέροχη διάθεσή τους, δημιουργώντας ένα εξαιρετικό κλίμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κων/νο Κάλφα, για το χρόνο του και τις γνώσεις του που μοιράστηκε μαζί μου, αλλά και για την ετοιμότητά του να βοηθήσει σε ό,τι θέμα προκύπτει.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	14
2	Πειραματική Διαδικασία	19
1	Χαρακτηριστικά Κυκλώματος διαχωρισμού n-γ και έλεγχός του με πηγές	19
1.1	Κύκλωμα Διαχωρισμού νετρονίων από φωτόνια - Ανάλυση Μορφής Παλμών (Pulse Shape Analysis)	19
1.2	Έλεγχος χαρακτηριστικών και παραμέτρων του υλοποιημένου κυκλώματος	25
2	Υγρός σπινθηριστής BC501A με δέσμη	32
2.1	Παρουσίαση του μηχανισμού σπινθηρισμού και της απόκρισης του BC501A	32
2.2	Πειραματική διάταξη και λήψη μετρήσεων	39
3	Αποσυνέλιξη και ανάλυση αποτελεσμάτων	48
1	Η διαδικασία αποσυνέλιξης - Ο κώδικας DIFBAS	48
1.1	Η αποσυνέλιξη στον κώδικα DIFBAS	48
1.2	DIFBAS	53

2	Ανάλυση Πειραματικών Φασμάτων	62
2.1	Κριτήρια παραμέτρων αποσυνέλιξης	65
4	Συμπεράσματα	70

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	<i>Μέθοδοι ανίχνευσης νετρονίων και το εύρος λειτουργίας τους</i>	17
2.1	<i>Απεικόνιση του διαφορετικού χρόνου πτώσης του σήματος για παλμούς από ακτίνες-γ, νετρόνια και άλφα σωματίδια όπως προκύπτει από το φωτοπολλαπλασιαστή.</i>	20
2.2	<i>Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας ενός TAC</i>	20
2.3	<i>Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος για το διαχωρισμό νετρονίων από φωτόνια.</i>	21
2.4	<i>Αρχή λειτουργίας ενός Constant Fraction Discriminator</i>	22
2.5	<i>Αρχή λειτουργίας του delay line amplifier</i>	23
2.6	<i>Βασικές Λειτουργίες ενός SCA</i>	24
2.7	<i>Χρονική διαφορά start-stop σημάτων</i>	24
2.8	<i>Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος μαζί με τα σήματα από τον παλμογράφο.</i>	26
2.9	<i>Χρονικά φάσματα (α) μεικτού πεδίου και (β) μόνο νετρονίων</i>	26
2.10	<i>Φάσματα βαθμονόμησης με πηγές</i>	27
2.11	<i>Βαθμονόμηση</i>	28
2.12	<i>Βαθμονομημένο φάσμα πηγών ακτίνων γ</i>	29

2.13	Φάσματα ^{54}Mn και ^{60}Co με και χωρίς σύμπτωση	29
2.14	Φάσματα (a) Μεικτού πεδίου ($\text{AmBe-}^{60}\text{Co}$), (b) Μόνο νετρονίων, (c) Αντιπαραβολή μεικτού πεδίου με νετρόνια	30
2.15	Χρονικός διαχωρισμός για αυξανόμενη συχνότητα του εισερχόμενου σήματος (a)500 Hz, (b)1000 Hz, (c)1500 Hz, (d)2000 Hz, (e)2500 Hz	31
2.16	Χρονικός διαχωρισμός για μειούμενο κατώφλι καταγραφόμενης ενέργειας .	32
2.17	Ηλεκτρονιακή δομή π οργανικού μορίου	34
2.18	Ενεργειακή κατανομή ανακρουόμενων πρωτονίων παραγόμενων από μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων	35
2.19	(a)Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής σκέδασης νετρονίου από πυρήνα. (b) Κλάσματα της μέγιστης μεταφερόμενης ενέργειας κατά την ελαστική σκέδαση του νετρονίου	36
2.20	Απεικόνιση της μορφής απόκρισης του ανιχνευτή λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα συναρτήσει της ενέργειας	36
2.21	Απεικόνιση της μορφής απόκρισης του ανιχνευτή λαμβάνοντας υπόψη τις σκεδάσεις από τον άνθρακα	37
2.22	Απεικόνιση της μορφής απόκρισης του ανιχνευτή λαμβάνοντας υπόψη τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή	37
2.23	(a) Διαφορετικά τμήματα της συνάρτησης απόκρισης ενός υγρού σπινθηριστή: a- απλή σκέδαση από πυρήνα υδρογόνου συμπεριλαμβανομένης της μη γραμμικότητας του ανιχνευτή, b- Διπλή σκέδαση από πυρήνες υδρογόνου, c- Συνδιασμός μονής και διπλής σκέδασης από πυρήνες υδρογόνου, d- Ανακρουόμενα πρωτόνια από νετρόνια που έχουν σκεδαστεί προηγουμένως από πυρήνες άνθρακα, e- Σύνθετο φάσμα που προκύπτει από το άθροισμα των φασμάτων c και d (b) Τυπικό πειραματικό φάσμα απόκρισης ανιχνευτή σε μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων	38
2.24	Η πειραματική διάταξη με το στόχο τριτίου, το δοχείο με τους ανιχνευτές Micromegas και ο σπινθηριστής	40

2.25	(a)Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 1.75 MeV (b) Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 2.3MeV	41
2.26	(a)Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 2.8 MeV (b) Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 3.6 MeV	41
2.27	Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 4.5 MeV	42
2.28	Εύρεση ενέργειας νετρονίων από την προσομοίωση μέσω του κώδικα Neutdesc και προσδιορισμός της με προσαρμογή συναρτήσεων από το πρόγραμμα origin (a) $E_d = 1.75MeV$ και συνάρτηση προσαρμογής GCAS, (b) $E_d = 2.3MeV$ και συνάρτηση προσαρμογής Asym2Sig, (c) $E_d = 2.8MeV$ και συνάρτηση προσαρμογής GCAS,(d) $E_d = 3.6MeV$ και συνάρτηση προσαρμογής Bigaussian, (e) $E_d = 4.5MeV$ και συνάρτηση προσαρμογής Bigaussian .	43
2.29	Αντιστοίχιση ενέργειας με το κανάλι του μέσου της πτώσης του φάσματος (a) $E_d = 1.75MeV$, (b) $E_d = 2.3MeV$, (c) $E_d = 2.8MeV$,(d) $E_d = 3.6MeV$, (e) $E_d = 4.5MeV$	44
2.30	Βαθμονόμηση	45
2.31	Χρονικό φάσμα νετρονίων με άνθρακα	46
3.1	Δομή του αρχείου neut.asc	55
3.3	Ενέργεια νετρονίων συναρτήσει της απόκρισης φωτός	55
3.2	(a) Αναπαράσταση σε τρεις διαστάσεις του αρχείου neut.asc σε λογαριθμική κλίμακα, (b) Ενδεικτικά φάσματα απόκρισης φωτός για δυο ενέργειες. . .	56
3.4	Απεικόνιση της διαφόρισης όλων των ενεργειακών φασμάτων με την αντιστοιχία τους σε lu (light units)	57
3.5	Βαθμονόμηση του γραμμικού και μη γραμμικού τμήματος της σύνδεσης της ενέργειας των νετρονίων με την απόκριση φωτός	57
3.6	Το αρχείο sphcdat.txt	58
3.7	Δομή του αρχείου nameNN.TXT	59

3.8	<i>Αναπαράσταση εξαγόμενων φασμάτων από το πρόγραμμα spheric.out σε κανάλια ανά μονάδα απόκρισης φωτός</i>	60
3.9	<i>Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα</i>	64
3.10	<i>Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα με a priori προηγούμενο αποσυνελιγμένο φάσμα</i>	66
3.11	<i>Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα με εισαγωγή διαφορετικού βάρους ανά ενεργειακό εύρος</i>	67
3.12	<i>Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα με a priori τα αποτελέσματα του MCNP</i>	68
3.13	<i>Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα με μεγάλο στατιστικό βάρος στην περιοχή των παρασιτικών νετρονίων</i>	69
4.1	<i>Αποτελέσματα χαρακτηρισμού δέσμης νετρονίων με τη μέθοδο ToF</i>	71

Κεφάλαιο I

Εισαγωγή

Η μελέτη της φυσικής των αντιδράσεων που προκαλούνται από νετρόνια έχει σημαντικό ενδιαφέρον τόσο στην έρευνα της πυρηνικής φυσικής και αστροφυσικής, όσο και στην αξιοποίηση και μέτρηση αυτών των αντιδράσεων σε εφαρμογές που αφορούν στη βιομηχανία, στην τεχνολογία αλλά και στην ιατρική. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα που διεξάγονται στη γραμμή των νετρονίων του 5.5 MV του επιταχυντή Tandem του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, κα αφορούν τόσο σε δεμελιώδη έρευνα, όσο και σε εφαρμογές της, η παραγωγή δέσμης νετρονίων επιτυγχάνεται μέσω αντιδράσεων, συνηθέστερα ${}^2\text{H}(d, n)$ και ${}^3\text{H}(d, n)$. Μέσω της φυσικής των αντιδράσεων της προσπίπτουσας φορτισμένης δέσμης με το στόχο είναι γνωστή η ενέργεια της κύριας δέσμης νετρονίων που παράγεται. Ωστόσο υπάρχουν παρασιτικές αντιδράσεις που συνεισφέρουν στην παραγόμενη ροή που σχετίζονται κυρίως με τρεις παραμέτρους:

1. Το υπόβαθρο της δέσμης, δηλαδή αντιδράσεις της φορτισμένης δέσμης με τα υλικά της γραμμής. Οι αντιδράσεις αυτές εμφανίζονται πριν την αλληλεπίδραση με το στόχο και συνεισφέρουν στην καταγραφόμενη ενεργειακή ροή, χωρίς να είναι ντετερμινιστικά ορισμένη μια τέτοια συνεισφορά.
2. Τις προσμίξεις του στόχου
3. Τις σκεδάσεις των νετρονίων με τον ίδιο τον πειραματικό χώρο και τα υλικά του

Η μελέτη και πρόβλεψη των παραπάνω παραμέτρων μέσω προσομοίωσης είναι ανέφικτη τόσο για λόγους υπολογιστικού χρόνου, όσο και λόγω των πολλών παραμέτρων που μεταβάλλονται σε κάθε πείραμα. Τα παραπάνω απαιτούν απευθείας πειρα-

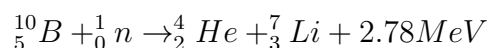
ματικό προσδιορισμό της εκάστοτε ροής τόσο των νετρονίων της κύριας δέσμης, και πολύ περισσότερο της συνεισφοράς των παρασιτικών νετρονίων.

Η δυσκολία στη μελέτη αυτών των αντιδράσεων σχετίζεται κυρίως με το μηδενικό ολικό φορτίο που έχουν τα νετρόνια. Σε αντιδιαστολή με τις φορτισμένες δέσμες σωματιδίων δεν είναι άμεσα ανιχνεύσιμη η ενεργειακή τους απώλεια κατά τη διέλευσή τους από την ύλη, ενώ ούτε η καθοδήγηση δέσμης νετρονίων είναι εύκολη. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών δέσμης νετρονίων απαιτείται έμμεση μέτρηση μέσω της παραγωγής φορτισμένων σωματιδίων. Η ανίχνευση των νετρονίων γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλων ανιχνευτών που ανιχνεύουν ιοντίζουσα ακτινοβολία μέσω γνωστών αντιδράσεων των νετρονίων με το υλικό τους. Οι αντιδράσεις που αξιοποιούνται σχετίζονται είτε με την απορρόφηση ((n,α),(n,p),(n,γ),(n,f) κ.α.), είτε με τη σκέδαση. Η κύρια διαδικασία σκέδασης που αξιοποιείται είναι η σκέδαση n-p με υδρογόνο, που ονομάζεται μέθοδος ανακρουόμενου πρωτονίου.

Με εξαίρεση τη μέθοδο ανακρουόμενου πρωτονίου, που χρησιμοποιείται κυρίως για ταχεία νετρόνια, οι υπόλοιπες αξιοποιούνται για νετρόνια όλων των ενεργειών και η επιλογή τους γίνεται με βάση το σκοπό του πειράματος (εάν απαιτείται μέτρηση της ενέργειας των νετρονίων, του αριθμού τους, ή και των δυο), αλλά και τους φυσικούς περιορισμούς του εκάστοτε πειράματος. Ενδεικτικοί ανιχνευτές, με βάση τον τρόπο ανίχνευσης των νετρονίων, είναι: [1]

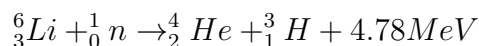
► Ανίχνευση μέσω της αντίδρασης (n,φορτισμένο σωματίδιο)

1. Ανιχνευτής BF_3 : Είναι απαριθμητής με μεγάλη ενεργό διατομή στα θερμικά νετρόνια που στηρίζεται στην αντίδραση



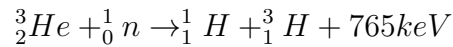
2. Boron-lined: Είναι αντίστοιχα αναλογικός απαριθμητής που αξιοποιεί την παραπάνω αντίδραση, αλλά το B βρίσκεται επίστρωση και στο εσωτερικό χρησιμοποιείται καταλληλότερο αέριο από το BF_3 . Επιπλέον η ευαισθησία στην ακτινοβολία γάμμα είναι μικρότερη.

3. Ανιχνευτές 6Li : Οι ανιχνευτές αυτοί στηρίζονται στην αντίδραση



Υπάρχουν φασματόμετρα 6Li ανάμεσα σε δυο ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού (surface barrier silicon detector). Επιπλέον διατίθενται με τη μορφή $LiI(Eu)$ ή ως Li_2O με πρόσμιξη Ce.

4. Ανιχνευτές ${}^3\text{He}$: Είναι ένα θερμιδόμετρο νετρονίων που στηρίζεται στην αντίδραση



Η αντίδραση αυτή έχει μεγάλη ενεργό διατομή στα θερμικά νετρόνια και οι ανιχνευτές αυτοί αξιοποιούνται ευρέως σε πειράματα Time of Flight.

- ▶ Θάλαμοι σκέδασης (Fission Chambers): Είναι ανιχνευτές αερίων που ανιχνεύουν τα θραύσματα της σχάσης με το υλικό της επίστρωσής τους που είναι συνήθως ${}^{235}\text{U}$ ή ${}^{238}\text{U}$ και ανάλογα με το υλικό της επίστρωσης ανιχνεύουν τόσο θερμικά όσο και ταχέα νετρόνια. Ωστόσο μετρούν αριθμό και όχι ενέργεια νετρονίων.
- ▶ Ενεργοποίηση στόχου (foil activation): Είναι μέθοδος μέτρησης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που προκύπτει από την αποδιέγερση ενός ραδιενεργού ισότοπου το οποίο έχει δημιουργηθεί μέσω της σύλληψης νετρονίων. Τοποθετώντας κατάλληλους στόχους, μπορούν να ενεργοποιηθούν πάνω από μια γνωστή ενέργεια (αντιδράσεις κατωφλίου) και να αποκτηθούν πληροφορίες για ορισμένα ενεργειακά χαρακτηριστικά των νετρονίων που προκάλεσαν την ενεργοποίηση.
- ▶ Κρυσταλλικό Φασματομέτρο : Στηρίζεται στο νόμο του Bragg για την περιήλαση και αξιοποιεί την περιήλαση των νετρονίων στο κρυσταλλικό πλέγμα. Χρησιμοποιείται συνηθέστερα για την ανάλυση πολυενεργειακής δέσμης νετρονίων και για τη δημιουργία μονοενεργειακών δεσμών.
- ▶ Μέτρηση νετρονίων μέσω της μεθόδου ανακρουόμενου πρωτονίου.
 1. Αναλογικοί απαριθμητές αποτελούμενοι από μεθάνιο ή υδρογόνο, ανάλογα με το ενεργειακό εύρος που επιθυμείται να μετρηθεί.
 2. Οργανικοί υγροί σπινθηριστές: Είναι οι κυριότερα αξιοποιούμενοι ανιχνευτές για φασματοσκοπία νετρονίων στο εύρος των MeV (έως περίπου 200 MeV). Είναι διαδεδομένοι λόγω της υψηλής τους απόδοσης, της χαμηλής ευαισθησίας στην ακτινοβολία γ , εξαιρετική ικανότητα διαχωρισμού νετρονίων από ακτίνες- γ και καλή ενεργειακή απόκριση.
- ▶ Time of Flight νετρονίων: Είναι η μέθοδος ανίχνευσης νετρονίων με τη βέλτιστη διακριτική ικανότητα. Βασική αρχή αυτής της μεθόδου είναι η εξής: Μια παλμική δέσμη νετρονίων κατευθύνεται κατά μήκος μιας διαδρομής γνωστού μήκους L και μετράται η χρονική διαφορά ανάμεσα στη χρονική στιγμή εκπομπής των νετρονίων και τη χρονική στιγμή ανίχνευσής τους. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται η ταχύτητά τους από τη σχέση $u = \frac{L}{t}$ και στη συνέχεια

η ενέργεια: $E = Mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{c^2 t^2}}} - 1 \right)$ (για σχετικιστικές ταχύτητες) και $E_{NR} = \frac{1}{2} M \frac{L^2}{t^2}$ για μη σχετικιστικές.

Παρακάτω (εικόνα 1.1) παρουσιάζονται συνοπτικά τα παραπάνω ανάλογα με το αν μετράνε αριθμό ή ενέργεια νετρονίων, αλλά και σύμφωνα με το ενεργειακό εύρος για το οποίο ενδείκνυται η κάθε τεχνική.

Ανιχνευτές Νετρονίων & εύρος λειτουργίας τους		
Ενέργεια Νετρονίων	Μέτρηση αριθμού νετρονίων	Μέτρηση ενέργειας νετρονίων
0 < E < 1 keV	BF ₃ , Ανιχνευτές B, Li, He, Ενεργοποίηση, Ανιχνευτές διαδρομής θραυσμάτων σχάσης	Κρυσταλλικό φασματόμετρο, ToF
1 keV < E < 2 MeV	BF ₃ , Li (με χαμηλή απόδοση), ενεργοποίηση, Σφαίρες Bonner	Μέθοδος ανακρουόμενου πρωτονίου, ToF, Ενεργοποίηση
E > 1 MeV	Ενεργοποίηση	Οργανικοί σπινθηριστές Ενεργοποίηση ToF

Εικόνα 1.1: Μέθοδοι ανίχνευσης νετρονίων και το εύρος λειτουργίας τους

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι για τη μέτρηση των επιθυμητών ενεργειών νετρονίων απαιτείται είτε η χρήση οργανικών σπινθηριστών, είτε της μεθόδου ToF, είτε η ενεργοποίηση. Η τελευταία έχει περιορισμούς που σχετίζονται με το κατώφλι της ενέργειας στην οποία ενεργοποιείται κάθε υλικό και την ενεργό διατομή του ανά ενέργεια, οπότε είναι δύσκολη η μέτρηση μεγάλου συνεχούς εύρους ενεργειών και ο σαφής προσδιορισμός της ροής ανά ενέργεια, κυρίως κάτω από τα 9 MeV περίπου. Ιδανικός χαρακτηρισμός δέσμης θα μπορούσε να επιτευχθεί με ToF, ωστόσο η μέθοδος αυτή υπερβαίνει τις δυνατότητες της υπάρχουσας υποδομής του εργαστηρίου του επιταχυντή Tandem. Ελλείπει αυτού, μελετήθηκε η αμέσως επόμενη καλύτερη λύση, που αναφέρεται στους υγρούς σπινθηριστές. Μια επιπλέον

δυνατότητα που παρέχουν οι υγροί σπινθηριστές είναι αυτή της καταγραφής κατά τη διάρκεια του πειράματος των μεταβολών της ροής των νετρονίων τόσο συνολικά, όσο και της κύριας δέσμης.

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε ο υγρός σπινθηριστής BC501A σε πεδίο ενέργειας νετρονίων έως περίπου 20 MeV. Έγινε διαχωρισμός των νετρονίων από τα φωτόνια μέσω της μεθόδου ανάλυσης μορφής παλμών (pulse shape discrimination) με κατάλληλο κύκλωμα κι έγιναν έλεγχοι για τις ανοχές του κυκλώματος σε διάφορες παραμέτρους. Στη συνέχεια λήφθηκαν μετρήσεις για τέσσερις ενέργειες κύριας δέσμης νετρονίων: 14.8 MeV, 16.3 MeV, 17.8 MeV και 19.2 MeV. Στα πειραματικά φάσματα έγινε αποσυνέλιξη για να εξαχθεί η ενεργειακή ροή των καταγεγραμμένων νετρονίων.

Έπειτα παρουσιάζεται αρχικά η πειραματική διάταξη, παρουσιάζοντας το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί διαχωρισμός φωτονίων και νετρονίων και καταγραφή μόνο των νετρονίων, καθώς και οι έλεγχοι που έγιναν. Ακολουθεί μια περιγραφή του υγρού σπινθηριστή BC501A και των παραμέτρων που διαμορφώνουν το ληφθέν φάσμα και παρουσιάζονται τα πειραματικά φάσματα. Ακολουθεί η ανάλυση των φασμάτων αυτών μέσω του κώδικα Difbas. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της αποσυνέλιξης, που στηρίζεται στη διαδοχική εφαρμογή του θεωρήματος του Bayes, ο τρόπος εφαρμογής του Difbas και ως αποτέλεσμα αυτών η καταγραφόμενη ροή από τα ληφθέντα πειραματικά φάσματα. Είναι η πρώτη φορά που η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για τον πειραματικό έλεγχο της ενεργειακής κατανομής των νετρονίων υψηλών ενεργειών που προέρχονται από την αντίδραση ${}^3\text{H}(d, n)$ στο ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος".

Κεφάλαιο 2

Πειραματική Διαδικασία

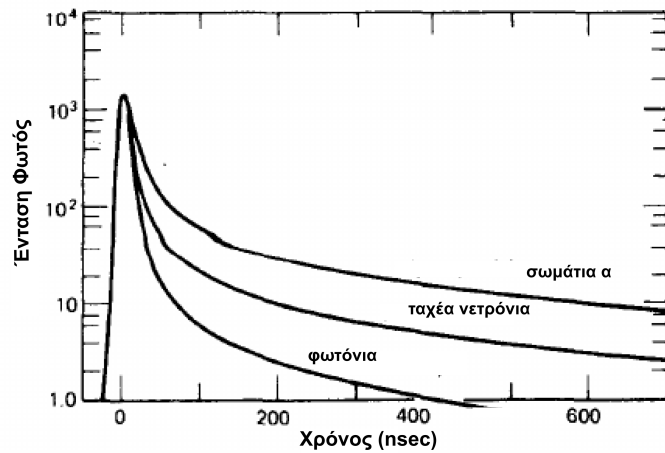
1 Χαρακτηριστικά Κυκλώματος διαχωρισμού n- γ και έλεγχός του με πηγές

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί συνοπτικά το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για το διαχωρισμό νετρονίων από φωτόνια, καθώς και ο έλεγχος παραμέτρων του με τη χρήση τόσο πηγών ακτινοβολίας $n-\gamma$, όσο και μεικτών πεδίων νετρονίων-φωτονίων από πηγές (AmBe).

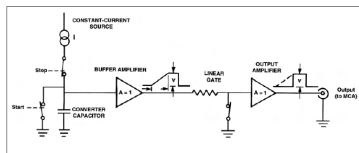
1.1 Κύκλωμα Διαχωρισμού νετρονίων από φωτόνια - Ανάλυση Μορφής Παλμών (Pulse Shape Analysis)

Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στηρίζεται στο διαφορετικό χρόνο πτώσης των παλμών που προκύπτουν από την έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή και είναι μικρότερος για τα φωτόνια και μεγαλύτερος για τα νετρόνια (Εικόνα [2.1](#) [2]).

Αυτή η χρονική διαφορά ενισχύεται από κατάλληλο κύκλωμα και μετράται από έναν TAC (Time To Amplitude Converter), η λειτουργία του οποίου είναι να μετατρέπει τη χρονική διαφορά σε ύψος ενός αναλογικού παλμού. Ο TAC που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου start-stop και μια απλοποιημένη του αναπαράσταση παρουσιάζεται στην εικόνα [2.2](#).



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση του διαφορετικού χρόνου πτώσης του σήματος για παλμούς από ακτίνες- γ , νετρόνια και άλφα σωματίδια όπως προκύπτει από το φωτοπολλαπλασιαστή.

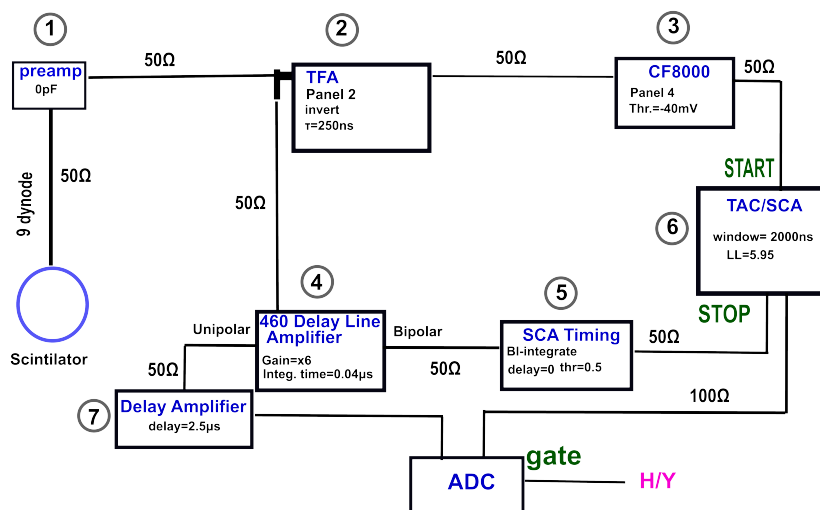


Εικόνα 2.2: Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας ενός TAC

Αρχικά όλοι οι διακόπτες είναι κλειστοί. Με την άφιξη του σήματος "έναρξης" (start) ο αντίστοιχος διακόπτης ανοίγει και ξεκινάει η φόρτιση του πυκνωτή, ενώ η άφιξη του σήματος "τερματισμού" (stop) ανοίγει και τον άλλο διακόπτη, σταματώντας τη φόρτιση του πυκνωτή. Επειδή το ρεύμα που

φορτίζει τον πυκνωτή είναι σταθερό, η τάση που αναπτύσσεται στον πυκνωτή είναι ανάλογη του χρόνου σύμφωνα με τη σχέση $V = \frac{It}{C}$. Αυτό το σήμα μεταφέρεται ως έξοδος του TAC και μετά από μερικά μικροδευτερόλεπτα οι διακόπτες ξανακλείνουν για να αρχίσει η επόμενη μέτρηση. Ο TAC που χρησιμοποιήθηκε είναι ο 567 της Ortec που είναι ταυτόχρονα SCA (μονοδιαυλικός αναλυτής). Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα του κυκλώματος που πραγματοποιήθηκε, με τις ξεχωριστές μονάδες που το απαρτίζουν αριθμημένες, για ευκολότερη αντιστοίχιση και ακολουθεί η αναλυτικότερη παρουσίασή τους (Εικόνα 2.3).

Από το φωτοπολλαπλασιαστή επιλέχθηκε να πάρουμε σήμα για επεξεργασία μόνο από την ένατη δύνοδο και όχι από την άνοδο. Το σήμα αυτό οδηγήθηκε στον προενισχυτή 113 της Ortec κατάλληλο για χρήση με φωτοπολλαπλασιαστές, με δυνατότητα επιλογής χωρητικότητας στην είσοδο ①. Ρόλος ενός προενισχυτή είναι γενικά η μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο, ιδανικά χωρίς περαιτέρω διαμόρφωση του σήματος. Η έξοδος του είναι ένας παλμός με μικρό χρόνο ανόδου



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος για το διαχωρισμό νετρονίων από φωτόνια.

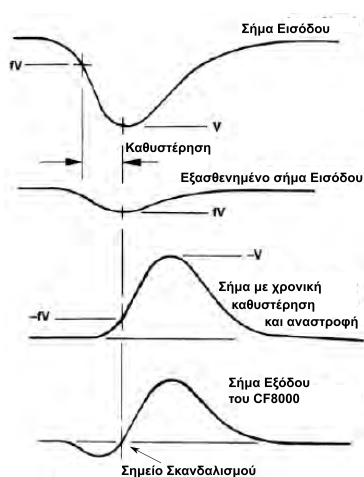
(ανάλογο του χρόνου συλλογής φορτίου του ανιχνευτή) και μεγάλη ουρά προκειμένου να συλλεχθεί όλο το παρεχόμενο φορτίο. Επειδή ο ανιχνευτής, ως σπινθηριστής, συνοδεύεται από φωτοπολλαπλασιαστή, το σήμα που παρέχεται είναι σχετικά υψηλό και μπορεί να οδηγηθεί στο κύκλωμα απευθείας. Ο προενισχυτής επιλέγεται για να αποφευχθούν οι μεταβολές σήματος που οφείλονται στο μήκος του καλωδίου, στην εμπέδηση εισόδου και άλλες παραμέτρους.

1.1.1 Επεξεργασία Σήματος Έναρξης (start)

Μετά τον προενισχυτή, το θετικό σήμα οδηγείται σε έναν διαιρέτη (splitter) που χωρίζει το σήμα ακριβώς στη μέση. Το ένα μισό οδηγείται στον **Timing Filter Amplifier 863** της Ortec (2). Ανήκει στην κατηγορία των ενισχυτών με την ονομασία **Fast Timing Amplifiers**, που ενδείκνυνται για εφαρμογές όπου απαιτείται απόκριση σε όσο μεγαλύτερη συχνότητα εισερχόμενων παλμών, αλλά και διατήρηση του μικρού χρόνου ανόδου, μαζί με την ενίσχυση του παλμού. Η ιδιαιτερότητα αυτού του ενισχυτή είναι ο πολύ μικρότερος χρόνος διαφόρισης και ολοκλήρωσης του σήματος σε σχέση με τους άλλους ενισχυτές. Συγκεκριμένα οι χρόνοι αυτοί ρυθμίζονται μέσω του κυκλώματος της συσκευής να είναι 200 ns η διαφόριση του σήματος (CR κύκλωμα) και 50 ns η ολοκλήρωση (RC κύκλωμα). Επιπλέον ενισχύθηκε λίγο ο

παλμός μέσω δυνατότητας που υπάρχει στη μπροστινή πλευρά της συσκευής μέσω ροοστάτη ακριβείας λεπτής ρύθμισης (fine gain), καθώς ο παλμός είναι ικανοποιητικού πλάτους για να εισαχθεί στο υπόλοιπο κύκλωμα και δε χρειάζεται επιπλέον ενίσχυση - coarse gain ($\times 1$), και τέλος αντιστράφηκε προκειμένου να εισαχθεί στην επόμενη μονάδα που δέχεται μόνο αρνητικούς παλμούς. (Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στους αναφορές [2], [3], και [4]).

Η μονάδα που έπεται είναι ένας διευκρινιστής, ο **CF8000 Constant Fraction Discriminator** της Ortec ⁽³⁾ που ανήκει στην κατηγορία των Fast Timing Discriminators. Η αξιοποίησή του ενδείκνυται για δυο εφαρμογές: τη μέτρηση στενών παλμών με μεγάλη συχνότητα μέτρησης και τον ακριβή προσδιορισμό του χρόνου άφιξης των παραπάνω παλμών. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ύπαρξη ενός βέλτιστου επιπέδου σκανδαλισμού το οποίο είναι κλάσμα του παλμού εισόδου στη μονάδα. Η αξιοποίηση αυτού του κλάσματος μειώνει πολύ την εξάρτηση της απόκρισης από το πλάτος του παλμού, σχεδόν μηδενίζει το βηματισμό χρόνου (walk) και εξαρτάται μόνο από το χρόνο ανόδου του παλμού. Στην εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε, όπου τα εισερχόμενα σήματα έχουν ίδιους χρόνους ανόδου, η μονάδα αυτή ενδείκνυται. Η αρχή λειτουργίας της παρουσιάζεται στην εικόνα 2.4.



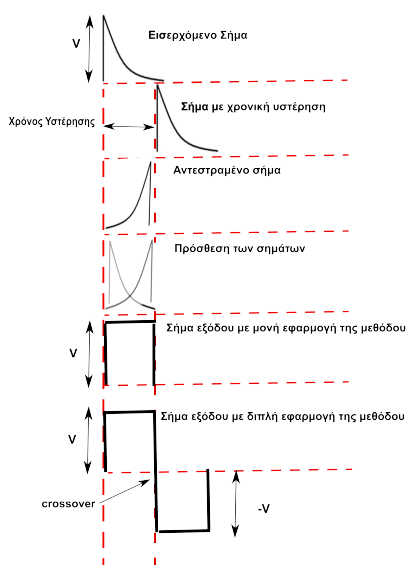
Εικόνα 2.4: Αρχή λειτουργίας ενός Constant Fraction Discriminator

αποτελεί το start αυτού ([5], [6]).

Το εισερχόμενο σήμα χωρίζεται σε δυο τμήματα. Το ένα τμήμα μειώνεται κατά ένα κλάσμα 0,4 του πλάτους του αρχικού παλμού (f) και το άλλο αναστρέφεται και υφίσταται μια χρονική καθυστέρηση. Αυτά τα δυο σήματα προστίθενται στη συνέχεια για να δώσουν ένα διπολικό παλμό. Τέλος, ως έξοδος δίνεται ένας στενός λογικός παλμός πλάτους $-1V$ όταν ο διπολικός παλμός διέρχεται από το επίπεδο μηδέν, δηλαδή όταν το κλάσμα του αρχικού πλάτους στο οποίο ρυθμίστηκε διέρχεται από το μηδέν. Το κλάσμα αυτό δίνει τον καλύτερο δυνατό χρονισμό. Ο λογικός παλμός που είναι έξοδος αυτής της μονάδας τροφοδοτεί τον TAC και

1.1.2 Επεξεργασία Σήματος Λήξης (stop)

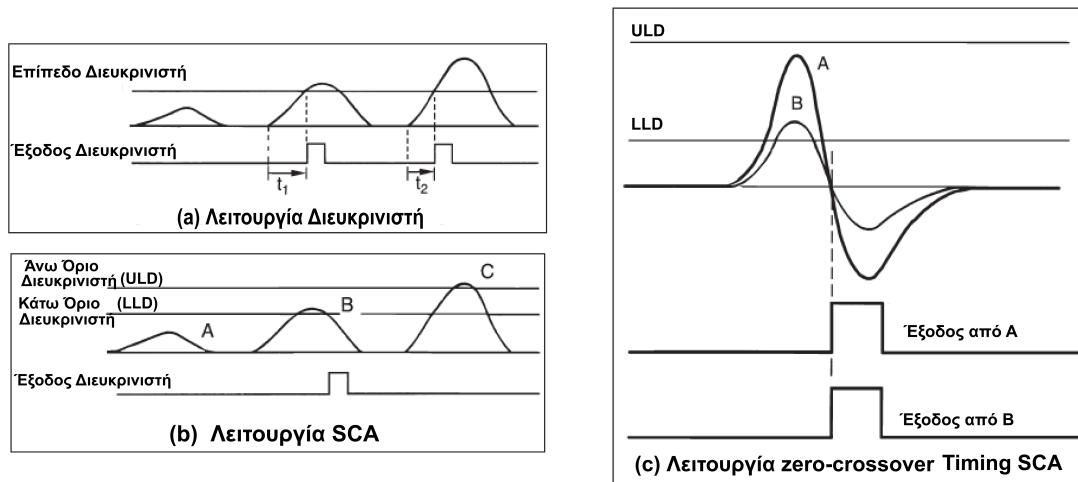
Παράλληλα με την παραπάνω διεργασία, το άλλο τμήμα του σήματος που χωρίστηκε πριν τον TFA, υφίσταται μια διαφορετική επεξεργασία, από μια αλληλουχία μονάδων, η οποία έχει ως στόχο να αξιοποιήσει το διαφορετικό χρόνο πτώσης των σημάτων από τα φωτόνια και τα νετρόνια και να μετατρέψει σε μετρήσιμο σήμα αυτή τη διαφορά, ενισχύοντάς την, μάλιστα. Το πρώτο τμήμα αυτού του κλάδου είναι ο Delay Line Amplifier 460 της Ortec ([2],[3],[7]).



Εικόνα 2.5: Αρχή λειτουργίας του delay line amplifier

Είναι ένας ενισχυτής που διαμορφώνει το σήμα μέσω ενός RC-CR-RC κυκλώματος σε μορφή τύπου Gauss και εφαρμόζει τεχνική delay line στις δυο εξόδους του, μια μονοπολική και μια διπολική. Στην τεχνική αυτή ο εισερχόμενος παλμός καθυστερεί χρονικά, αναστρέφεται και προστίθεται στο αρχικό σήμα (Εικόνα 2.5). Η διπλή εφαρμογή αυτής της μεθόδου επιτυγχάνει την έξοδο ενός σήματος με δυο λοβούς ίσου πλάτους. Αυτό επιτυγχάνει μικρή χρονική αβεβαιότητα (timing jitter), γρήγορο χρόνο ανόδου και πτώσης και κυρίως μπορεί να αξιοποιηθεί για χρονισμό με την τεχνική crossover timing (μέσω χρήσης δηλαδή του χρονικού σημείου μηδενισμού του πλάτους του παλμού).

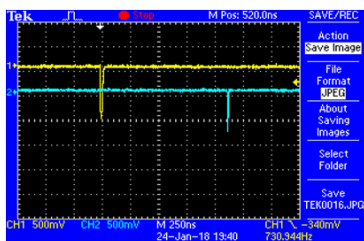
Για την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, η επόμενη μονάδα που χρησιμοποιείται είναι ένας **Timing Single-Channel Analyzer (SCA)**, ο 420A της Ortec. Η βασική απαίτηση λειτουργίας αυτής της μονάδας είναι η ακριβής καταγραφή του χρόνου άφιξης ενός παλμού, ανεξάρτητα από το πλάτος του. Η συγκεκριμένη μονάδα μπορεί να εφαρμόσει όλες τις τεχνικές που επιτυγχάνουν την έξοδο λογικών παλμών μέσω ενός SCA ([8]), αλλά, λόγω της προηγούμενης επεξεργασίας του παλμού, επιλέγουμε τη συμβατική τεχνική zero crossing, δηλαδή να δίνεται σήμα όταν ο παλμός διέρχεται από το μηδέν, αλλά με την ύπαρξη "φιλτραρίσματος" στα άνω και κάτω όρια του εισερχόμενου σήματος. Η επιλογή του zero crossing έχει το πλεονέκτημα ότι μετά την έξοδο από τον double delay-line amplifier, έχοντας μικρό χρόνο επεξεργασίας, ο παλμός εξέρχεται σχεδόν ορθογώνιος και διέρχεται από



Εικόνα 2.6: Βασικές Λειτουργίες ενός SCA

το μηδέν με μεγάλη κλίση, οπότε δίνει σήμα ακόμα και για εισερχόμενους παλμούς μικρού πλάτους. Επιπλέον, το διπολικό σήμα που δημιουργήθηκε με ενίσχυση double delay-line διέρχεται από το μηδέν για καθορισμένο χρόνο συλλογής του φορτίου από τον ανιχνευτή, συνήθως στο 50%, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται χρονισμός σε συγκεκριμένο κλάσμα του πλάτους του παλμού. Τέλος, με αυτό τον τρόπο αξιοποιείται η χρονική καθυστέρηση από την προηγούμενη μονάδα, αλλά και επιτυγχάνεται διευκόλυνση στην καλύτερη ρύθμιση του χρονικού βηματισμού (walk) που απαιτείται.

Στην εικόνα 2.6 δίνεται μια συνοπτική εικόνα κάποιων βασικών λειτουργιών των SCA, ενώ εκτενέστερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στις αναφορές [2], [9].



Εικόνα 2.7: Χρονική διαφορά start-stop σημάτων

που βρίσκεται στην πρόσοψη της συσκευής ρυθμίζεται η αντιστοίχιση του πλάτους

Η έξοδος αυτής της συσκευής είναι ένας αρνητικός λογικός παλμός πλάτους 1 Volt και οδηγείται ως stop στον TAC. Τα δυο σήματα start και stop παρουσιάζονται στην εικόνα 2.7 και παρατηρείται ότι η χρονική διαφορά ανάμεσά τους είναι 1250 ns. Αυτή η χρονική διαφορά δίνεται ως ένας σχεδόν ορθογώνιος παλμός από την έξοδο του TAC. Το εύρος του παλμού εξόδου είναι από 0 έως 10 Volt. Μέσω ενός διακόπτη

του παλμού με το εύρος του χρόνου. Στο πείραμά μας το μέγιστο χρονικό εύρος ρυθμίστηκε στα 2000 ns, οπότε κάθε Volt πλάτους αντιστοιχεί περίπου σε 200 ns, και με δεδομένη τη χρονική διαφορά που προαναφέρθηκε, ο εξαγόμενος παλμός είχε πλάτος περίπου 6 V. Η αναμενόμενη μικρή διακύμανση στο πλάτος, οφείλεται στο διαφορετικό είδος σωματιδίων, που στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως θα φανεί παρακάτω ήταν της τάξης των mV με παλμούς μικρότερου πλάτους για φωτόνια (μικρότερη μετρούμενη χρονική διαφορά μεταξύ start και stop) και μεγαλύτερου για νετρόνια. Η μονάδα (6) έχει ένα SCA ενσωματωμένο και ρυθμίζοντας το κατώτερο επίπεδο του να απορρίπτει τους παλμούς με μικρό πλάτος (παλμούς φωτονίων - LL=5.95% του εύρους της κλίμακας), δίνει ως έξοδο λογικούς θετικούς παλμούς πλάτους 5 V μόνο για σήματα από νετρόνια.

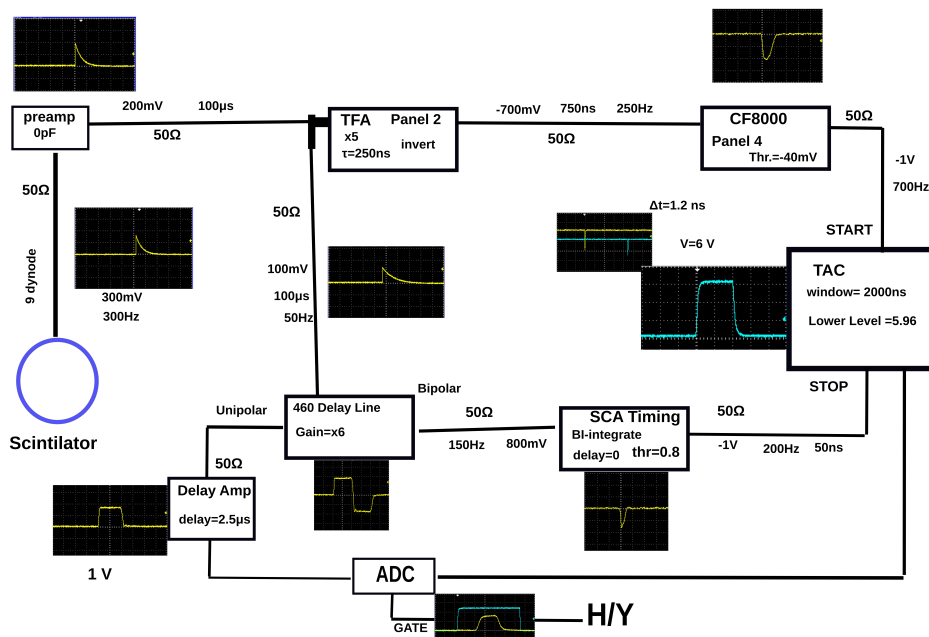
1.1.3 Ενεργειακό Φάσμα Νετρονίων

Από τον delay line amplifier (4) παίρνουμε μια ακόμα έξοδο, τη μονοπολική, η οποία μας δίνει το καταγραφόμενο ενεργειακό φάσμα (από το μεικτό πεδίο). Επειδή δεν έχει υποστεί τη χρονική υστέρηση της διπολικής εξόδου, καθώς και την μετέπειτα επεξεργασία της, οδηγείται σε έναν delay amplifier, τον **427A Delay Amplifier** της Ortec (7), ο οποίος απλά προσθέτει την επιθυμητή χρονική καθυστέρηση στον παλμό εισόδου του, μέσω επιλογών από την πρόσοψη της μονάδας. Η χρονική καθυστέρηση που επιλέχθηκε ήταν 2.5 μs. Σκοπός αυτής της υστέρησης είναι να συμπίπτει χρονικά η έξοδος αυτής της μονάδας με την έξοδο του SCA του TAC. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται μια λογική σύζευξη (gate) μεταξύ των δυο παλμών και καταγράφεται ενεργειακό φάσμα μόνο αν ο προς καταγραφή παλμός συμπίπτει χρονικά με την έξοδο του SCA του TAC, δηλαδή μόνο αν αντιστοιχεί σε νετρόνια. Ολόκληρη η παραπάνω διεργασία, μαζί με τα σήματα εξόδου από κάθε μονάδα, παρουσιάζονται στην εικόνα 2.8.

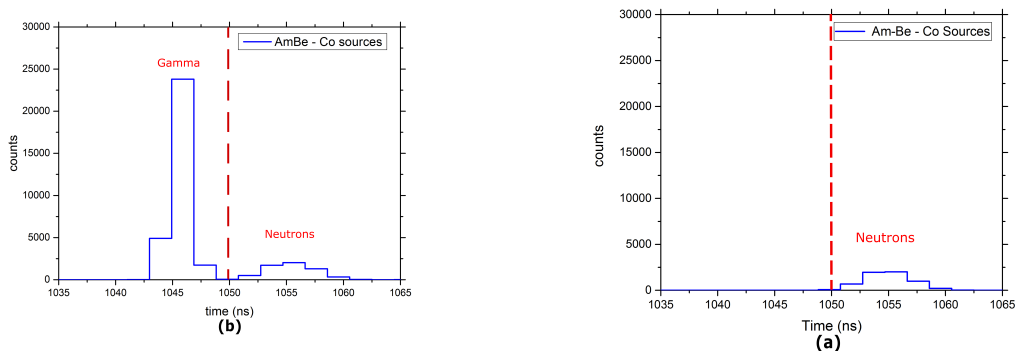
Τέλος, τα ληφθέντα χρονικά φάσματα με και χωρίς απόρριψη των φωτονίων, παρουσιάζονται στην εικόνα 2.9

1.2 Έλεγχος χαρακτηριστικών και παραμέτρων του υλοποιημένου κυκλώματος

Στην παραπάνω διάταξη δόθηκε πολύ μεγάλη σημασία στο τμήμα του χρονικού διαχωρισμού καθώς είναι ο μόνος τρόπος να ληφθούν μετρήσεις μόνο για τα νετρόνια. Ωστόσο η αξιοποιήσιμη πληροφορία είναι η καταγραφόμενη ενέργεια που λαμβάνεται από τη μονοπολική έξοδο του Delay Line Amplifier. Για το λόγο αυτό χρειάστηκε



Εικόνα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος μαζί με τα σήματα από τον παλμογράφο.



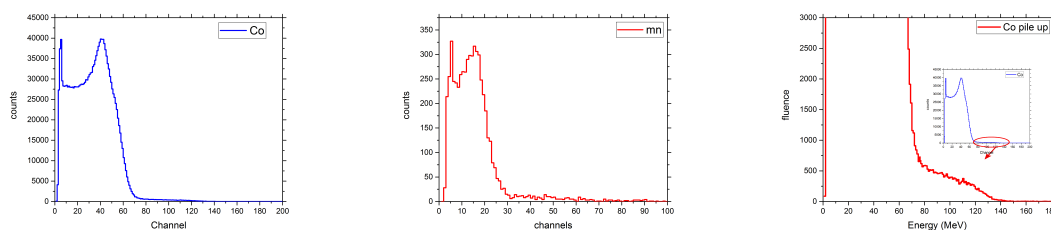
Εικόνα 2.9: Χρονικά φάσματα (α) μεικτού πεδίου και (β) μόνο νετρονίων

να γίνουν έλεγχοι για να βαθμονομηθεί ο ADC, αλλά και έλεγχοι στις ανοχές του κυκλώματος κατά τις μεταβολές διαφόρων παραμέτρων.

1.2.1 Βαθμονόμηση Φασμάτων από πηγές

Η βαθμονόμηση των ληφθέντων από πηγές φασμάτων αποσκοπεί στο να υπάρξει μια πρώτη εικόνα για το κατώφλι των καταγραφόμενων ενεργειών, καθώς και για το ποιες ενέργειες χαμηλοενεργειακών νετρονίων ουσιαστικά απορρίπτονται. Υπάρχει αδυναμία καταγραφής ολόκληρου του εύρους ενεργειών, αρχικά λόγω του κατωφλίου σήματος στις διάφορες μονάδες για την αποκοπή δορύβου, αλλά και αδυναμία απόλυτης αντιστοίχισης της ενέργειας των φωτονίων με τις ενέργειες των καταγραφόμενων νετρονίων (αναλύεται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο, αλλά και στην αναφορά [2] σελ 227), ώστε να είναι επακριβώς γνωστή η ελάχιστη ενέργεια καταγραφόμενων νετρονίων εκ των προτέρων. Για τη βαθμονόμηση δοκιμάστηκαν διάφορες πηγές, αλλά τελικά χρησιμοποιήθηκαν δύο πηγές ακτίνων-γ, στις ενέργειες Compton αυτών, καθώς αυτή είναι η μόνη αλληλεπίδραση που καταγράφει ο υγρός σπινθηριστής, που παρουσιάζονται στην εικόνα 2.10 και στον πίνακα. Οι ενέργειες Compton υπολογίστηκαν από τη σχέση: $E_{Compton} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{mc^2}{2E_\gamma}}$. Το ^{60}Co αναμένεται να

δίνει δυο διαδοχικές αιχμές Compton, ωστόσο δεν είναι εμφανείς στο ληφθέν φάσμα λόγω της κακής ενεργειακής διακριτικής ικανότητας του σπινθηριστή και γι' αυτό στη βαθμονόμηση χρησιμοποιείται η μέση τιμή αυτών. Για λόγους βελτίωσης της στατιστικής κατά τη βαθμονόμηση, αλλά και λόγω της μη γραμμικής αντιστοιχίας μεταξύ της καταγραφόμενης ενέργειας φωτονίων και νετρονίων, χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν πηγές ακτίνων-γ που δίνουν αιχμές Compton σε όσο μεγαλύτερες ενέργειες γίνεται, αλλά και οι αιχμές αυτές να είναι εμφανείς και ξεκάθαρες στο ληφθέν φάσμα. Ελλείπει τέτοιων πηγών, κατά τον έλεγχο του κυκλώματος, χρησιμοποιήσαμε το φαινόμενο της πραγματικής άδροισης γεγονότων (true coincidence summing) για την πηγή του ^{60}Co , για βαθμονόμηση.

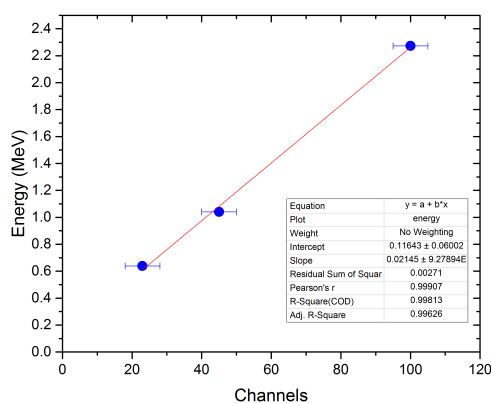


Εικόνα 2.10: Φάσματα βαθμονόμησης με πηγές

Πηγή	E (MeV)	$E_{Compton}$ (MeV)	Κανάλι
^{54}Mn	0.835	0.639	23 ± 5
^{60}Co	1.173	0.964	
	1.333	1.118	
^{60}Co (M.O.)		1.040	45 ± 5
^{60}Co (pile up)	2.505	2.273	100 ± 5

Πίνακας Βαθμονόμησης

Ο παραπάνω πίνακας έχει συγκεντρωμένα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να βαθμονομηθεί ο ADC και τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στην εικόνα 2.30.

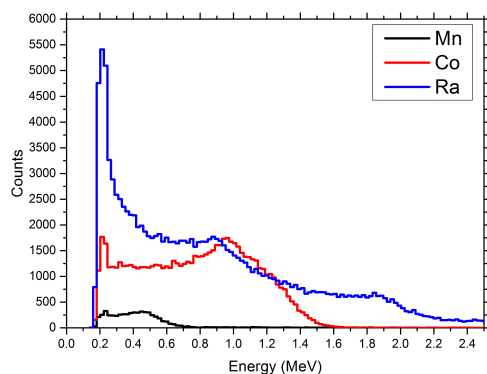


Εικόνα 2.11: Βαθμονόμηση

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα από διάφορες πηγές βαθμονομημένα

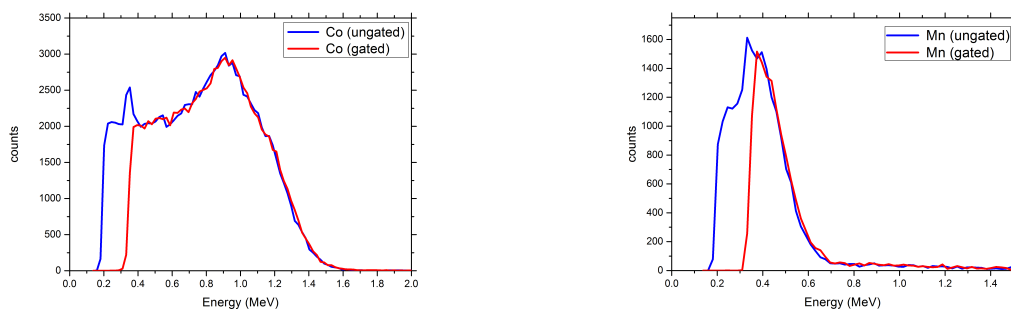
1.2.2 Ενεργειακός έλεγχος των βαθμονομημένων φασμάτων με πηγές γ και νετρονίων

Έχοντας βαθμονομήσει πλέον τον ADC, βάζοντας τη συνθήκη της χρονικής σύμπτωσης του ενεργειακού φάσματος με τη χρονική έξοδο των φωτονίων (gate), είναι εφικτό να ποσοτικοποιηθεί το καταγραφόμενο κατώφλι ενέργειας. Η ύπαρξη κατώτερης ενέργειας οφείλεται στην απόρριψη χαμηλών σημάτων από τις διάφορες μονάδες του τμήματος της χρονικής επεξεργασίας του κυκλώματος, και κυρίως από την



Εικόνα 2.12: Βαθμονομημένο φάσμα πηγών ακτίνων γ

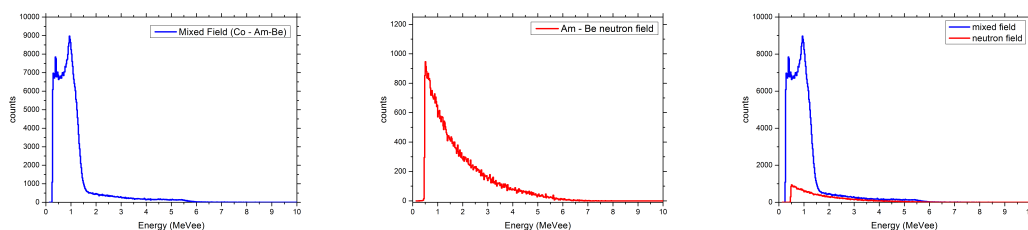
ύπαρξη κατώτερου επιπέδου αποδεκτού σήματος (threshold) στον Timing Single-Channel Analyzer (5). Το κατώφλι επιλέγεται έναντι της ελάχιστης καταγραφόμενης ενέργειας, ώστε να είναι εφικτός ο ευκρινής και ακριβής χρονικός διαχωρισμός και να λαμβάνουμε με βεβαιότητα μόνο το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων. Η ενέργεια που φαίνεται να αποκόπτεται για τα φωτόνια είναι περίπου 0.4 MeV, οπότε η αντίστοιχη ενέργεια νετρονίων αναμένεται να είναι 1.2-2 MeV ([2]). Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα φάσματα της πηγής του ^{54}Mn και του ^{60}Co με και χωρίς gate (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13: Φάσματα ^{54}Mn και ^{60}Co με και χωρίς σύμπτωση

Στη συνέχεια τοποθετείται μαζί με την πηγή ^{60}Co και μια πηγή νετρονίων, ώστε να επιβεβαιωθεί η ικανότητα καταγραφής μόνο νετρονίων σε ένα μεικτό πεδίο. Η πηγή αυτή είναι μια πηγή Am-Be (AmBe) και το μεικτό φάσμα της παρουσιάζεται στην εικόνα 2.14-α. Στη συνέχεια, βάζοντας το χρονικό παράθυρο (gate) να καταγράφει μόνο νετρόνια λαμβάνουμε το ενεργειακό φάσμα μόνο των νετρονίων (εικόνα

2.14-b) και τα δυο παραπάνω σε αντιπαράβολή (εικόνα 2.14-c).



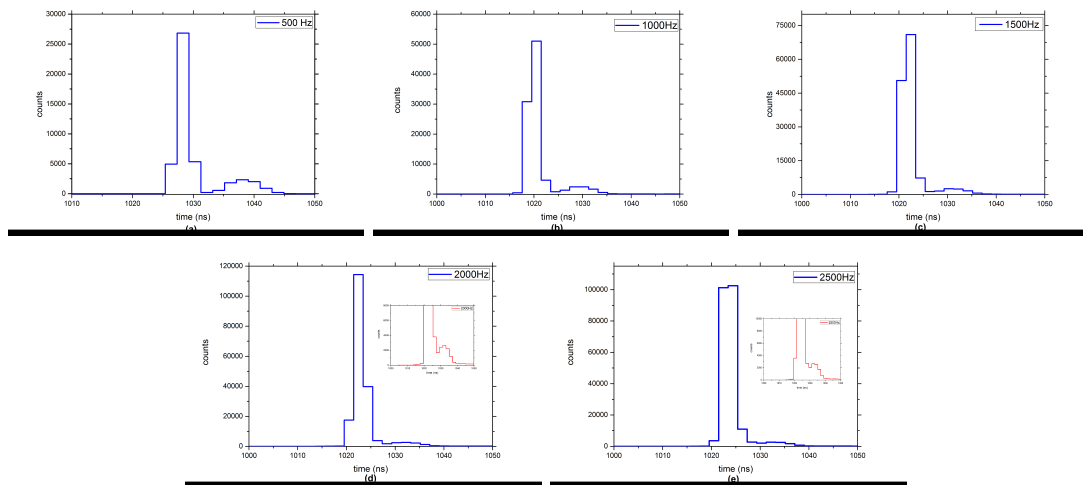
Εικόνα 2.14: Φάσματα (a) Μεικτού πεδίου ($AmBe-^{60}Co$), (b) Μόνο νετρονίων, (c) Αντιπαράβολή μεικτού πεδίου με νετρόνια

Στο ενεργειακό φάσμα των νετρονίων παρατηρείται αναμενόμενα μια συνεχής μορφή, που αντιστοιχεί σε φάσμα "λευκής" πηγής. Αυτό οφείλεται στο ότι όλες οι πηγές νετρονίων που βασίζονται σε αντιδράσεις (α, n_x) και παρά την αρχική εκπομπή χαρακτηριστικών ενεργειών των σωματιδίων- α από τους ραδιενεργούς πυρήνες (π.χ. ^{241}Am), είναι εκ κατασκευής αναμεμειγμένες με κάποιο υλικό μικρού Z σε μορφή σκόνης, στην συγκεκριμένη περίπτωση 9Be . Η απώλεια ενέργειας (stopping power) των εκπεμπομένων σωματιδίων- α μέσα στο υλικό της πηγής οδηγεί σε πραγματοποίηση των αντιδράσεων (α, n_x) με παραγωγή νετρονίων διαφορετικών ενεργειών στο κανάλι εξόδου και με χαρακτηριστικά μάλιστα διαφορετικές ενεργές διατομές ανά ενέργεια. Συνεπώς το φάσμα νετρονίων που προκύπτει από τέτοιες πηγές είναι πολυενεργειακό και ανομοιόμορφο. Εκτενείς σχετικές αναλύσεις μπορούν να αναζητηθούν στις αναφορές [10], [11], και [12].

1.2.3 Έλεγχος ανοχής κυκλώματος σε μεγάλες συχνότητες καταγραφόμενων σημάτων

Έχοντας επιβεβαιώσει την ικανότητα του συστήματος να διαχωρίζει ικανοποιητικά τα νετρόνια από την ακτινοβολία- γ , και έχοντας μια ποσοτική εικόνα της καταγραφόμενης ενέργειας (σε MeVee), χρειάζεται να ελεγχθούν οι ανοχές του κυκλώματος κατά τη διάρκεια ενός πειράματος με δέσμη. Η πρώτη παράμετρος που ελέγχθηκε ήταν η ικανότητα διαχωρισμού αυξανόμενης της συχνότητας των εισερχόμενων σημάτων. Για το λόγο αυτό μεταβλήθηκε η συχνότητα των παλμών μεταβάλλοντας την απόσταση των πηγών από τον ανιχνευτή και προσθέτοντας κι άλλες πηγές. Οι συχνότητες και τα αποτελέσματα του χρονικού διαχωρισμού παρουσιάζονται στην εικόνα 2.15.

Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι το κύκλωμα έχει μεγάλη ανοχή στην αύξηση της

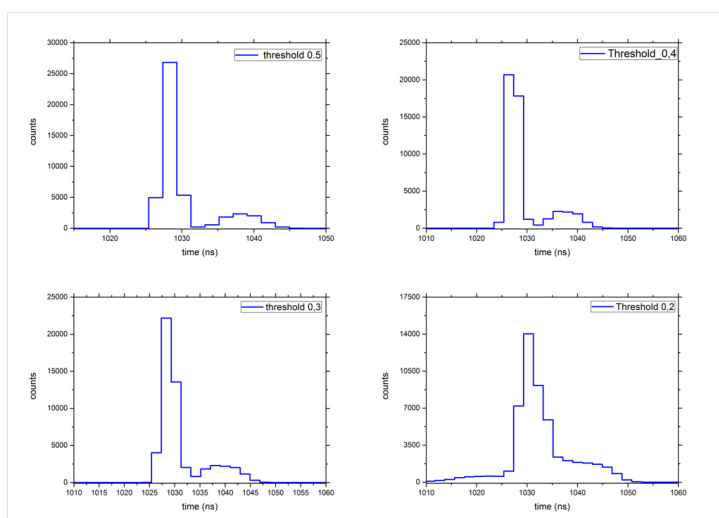


Εικόνα 2.15: Χρονικός διαχωρισμός για αυξανόμενη συχνότητα του εισερχόμενου σήματος (a)500 Hz, (b)1000 Hz, (c)1500 Hz, (d)2000 Hz, (e)2500 Hz

συχνότητας πριν αρχίσει να υπάρχει επικάλυψη στην ικανότητα χρονικού διαχωρισμού, η οποία αρχίζει να γίνεται σημαντική για καταγραφόμενους ρυθμούς γεγονότων μεγαλύτερους από 2 kHz.

1.2.4 Έλεγχος ανοχής κυκλώματος στη μείωση της ελάχιστης καταγραφόμενης ενέργειας

Ο τελευταίος έλεγχος που έγινε αφορά στην ικανότητα μείωσης της ελάχιστης καταγραφόμενης ενέργειας μέσω της μείωσης του κατώτερου επιπέδου (LL) του Timing Single-Channel Analyzer (SCA), ⁽⁵⁾. Η μείωση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς πρακτικά το πλάτος των ληφθέντων σημάτων δεν είναι εντελώς ανεξάρτητο της ενέργειας του εισερχόμενου σωματιδίου, με αποτέλεσμα το υψηλό κατώφλι να απορρίπτει τα χαμηλοενεργειακά νετρόνια. Η αρχική ρύθμιση που παρουσιάστηκε παραπάνω ήταν στο 5% του μέγιστου εύρους (threshold=0.5). Μειώνοντας το κατώφλι στο 4%, 3% και 2% η ικανότητα διαχωρισμού μειώνεται ραγδαία, αποτρέποντας την περαιτέρω μείωση της ελάχιστης καταγραφόμενης ενέργειας. Τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου παρουσιάζονται στην εικόνα 2.16



Εικόνα 2.16: Χρονικός διαχωρισμός για μειούμενο κατώφλι καταγραφόμενης ενέργειας

2 Υγρός σπινθηριστής BC501A με δέσμη

Η επιλογή της προαναφερθείσας διάταξης και τα χαρακτηριστικά της σχετίζονται άμεσα με τον τρόπο αλληλεπίδρασης του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία (φωτόνια και νετρόνια). Για το λόγο αυτό στην ενότητα αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά στη φυσική του ανιχνευτή BC501A και θα ακολουθήσει η παρουσίαση ολόκληρης της πειραματικής διάταξης και των ληφθέντων φασμάτων υψηλοενεργειακών νετρονίων.

2.1 Παρουσίαση του μηχανισμού σπινθηρισμού και της απόκρισης του BC501A

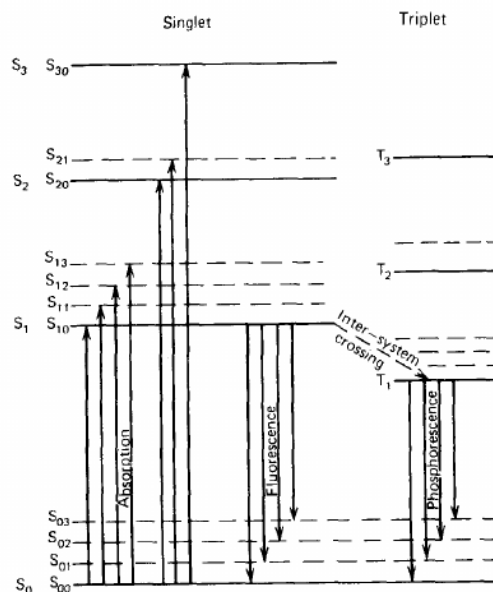
Σκοπός της παρούσας ενότητας δεν είναι να καλύψει πλήρως τη φυσική στην οποία βασίζεται η λειτουργία των υγρών οργανικών σπινθηριστών, όπως ο BC501A, αλλά να κάνει μια σύντομη αναφορά σε αυτήν. Υπάρχουν παράμετροι στην απόκριση και την επιλογή των σπινθηριστών αυτών που δεν λαμβάνονται υπόψη παρακάτω, παρουσιάζουν, όμως, ενδιαφέρον και είναι απαραίτητες για την βαθύτερη κατανόησή τους. Εκτενέστερες και πλήρεις αναφορές μπορούν να βρεθούν αρχικά στην αναφορά [13], αλλά και στις [1] (κεφάλαιο 14), [14] (κεφάλαιο 9), [15], [16] και [17].

2.1.1 Μηχανισμός σπινθηρισμού ενός οργανικού σπινθηριστή BC501A [2], [14]

Η παραγωγή ορατής ακτινοβολίας (σπινθηρισμός) στους οργανικούς σπινθηριστές είναι αποτέλεσμα μοριακών μεταβάσεων. Κατά την διέλευσή τους τα φορτισμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν με το υλικό του σπινθηριστή αποδέτοντας όλη την κινητική τους ενέργεια σε αυτό, με αποτέλεσμα τα μόρια του υλικού να μεταβαίνουν σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες και στην συνέχεια να αποδιεγείρονται με εκπομπή (συνηθέστερα) ορατής ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει με τρεις τρόπους, με βασικό τρόπο την άμεση εκπομπή ορατής ακτινοβολίας που ονομάζεται φθορισμός (fluorescence). Υπάρχει όμως η περίπτωση το μόριο να αποδιεγερθεί μέσω μιας ενδιάμεσης ενεργειακής στάθμης, οπότε έχουμε το φαινόμενο του φωσφορισμού (phosphorescence) και η εκπομπή ορατής ακτινοβολίας έχει πλέον μεγαλύτερο χαρακτηριστικό χρόνο εκπομπής και μεγαλύτερο μήκος κύματος. Τέλος, ενώ το μόριο βρίσκεται στην ενδιάμεση ενεργειακή στάθμη, υπάρχει πιθανότητα να διεγερθεί θερμικά και να μεταβεί στην αρχική του διεγερμένη κατάσταση με αποτέλεσμα στην συνέχεια να αποδιεγερθεί μέσω φθορισμού, ο οποίος ονομάζεται καθυστερημένος φθορισμός (delayed fluorescence), με χρόνο εκπομπής επίσης πολύ μεγαλύτερο. Πιο αναλυτικά, μια μεγάλη κατηγορία οργανικών σπινθηριστών βασίζεται σε μόρια που έχουν μια συγκεκριμένη ηλεκτρονιακή δομή, η οποία ονομάζεται ηλεκτρονιακή δομή π και απεικονίζεται στην εικόνα 2.17. Η διέγερση του μορίου με την απορρόφηση ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στη μετάβαση σε οποιαδήποτε από τις μονήρεις καταστάσεις S_0 , S_1 , S_3 , S_3 ή τις στάθμες της τριπλέτας T_1 , T_2 , T_3 .

Στη θερμοκρασία δωματίου όλα τα μόρια βρίσκονται στην κατάσταση S_{00} και κατά την απορρόφηση ενέργειας μεταβαίνουν στις υψηλότερες στάθμες. Η υψηλότερη δυνατή στάθμη στην οποία μπορούν να μεταβούν είναι η S_3 από την οποία αποδιεγείρονται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, της τάξης των ps, στην στάθμη S_1 και στη συνέχεια στη θεμελιώδη στάθμη S_0 . Από την διαδικασία αυτή προκύπτει η ακτινοβολία άμεσου φθορισμού. Ο χρόνος ζωής (τ) της στάθμης S_{10} είναι της τάξης των μερικών nanosecond για τους περισσότερους σπινθηριστές και επομένως η συνιστώσα του άμεσου φθορισμού είναι σχετικά γρήγορη.

Ο χρόνος ζωής της κατάστασης T_1 είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της S_1 . Μέσω μιας μετάβασης που ονομάζεται διασυστηματική διασταύρωση (intersystem crossing), μερικές μονήρεις καταστάσεις μπορεί να μεταβούν σε καταστάσεις τριπλέτας και στην συνέχεια να αποδιεγερθούν στην κατάσταση S_0 . Ο χρόνος ζωής της κατάστασης T_1 μπορεί να είναι της τάξης των 10^{-3} δευτερολέπτων και επομένως η ακτινοβολία που παράγεται από την αποδιέγερση είναι μεγαλύτερης διάρκειας και ονομάζεται φωσφορισμός. Επειδή η στάθμη T_1 βρίσκεται πιο χαμηλά ενεργειακά



Εικόνα 2.17: Ηλεκτρονική δομή π οργανικού μορίου

από την S_1 το μήκος κύματος του φάσματος φωσφορισμού θα είναι μεγαλύτερο από αυτό του φθορισμού. Τέλος, όσο το μόριο βρίσκεται στην κατάσταση T_1 , υπάρχει πιθανότητα να διεγερθεί θερμικά και πάλι στην κατάσταση S_1 και εν συνεχεία να αποδιεγερθεί μέσω φθορισμού. Η διαδικασία αυτή περιγράφει το φαινόμενο του καθυστερημένου φθορισμού.

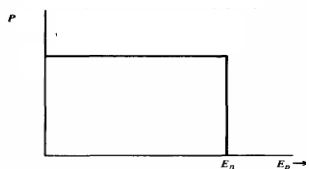
Όπως αναφέραμε αναλυτικά προηγουμένως, στους οργανικούς σπινθηριστές η ορατή ακτινοβολία που παρατηρείται οφείλεται εκτός από τον άμεσο φθορισμό και σε δύο μακροβιότερες συνιστώσες, τον φωσφορισμό και τον καθυστερημένο φθορισμό. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω συνιστωσών μπορεί να αναπαρασταθεί από το άθροισμα δύο εκθετικών πτώσεων που αντιστοιχούν στη γρήγορη και στην αργή συνιστώσα του σπινθηρισμού: $I = I_0(e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}})$, όπου τ_1 είναι σταθερά χρόνου κατάληψης των οπτικών σταθμών και είναι της τάξης του μισού ns. Η αργή συνιστώσα έχει ένα χαρακτηριστικό χρόνο πτώσης μερικών εκατοντάδων nanoseconds και ο χρόνος αυτός μαζί με το ποσοστό του φωτός που αντιστοιχεί σε αυτή τη συνιστώσα εξαρτώνται από το είδος του σωματιδίου, επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την ιδιότητα για να διαχωρίσουμε διαφορετικά είδη σωματιδίων που προσπίπτουν στο σπινθηριστή (Pulse Shape Discrimination), σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

2.1.2 Ανίχνευση νετρονίων από τον οργανικό σπινθηριστή BC501A

Η ανίχνευση των νετρονίων, που είναι και η ακτινοβολία που τελικά καταγράφεται, βασίζεται στην ελαστική σκέδαση του νετρονίου από ελαφρείς πυρήνες και συγκεκριμένα κυρίως από τα πρωτόνια, και τελικά την ανίχνευση των ανακρουόμενων πρωτονίων με το μηχανισμό που αναφέρθηκε παραπάνω. Η κινητική ενέργεια E_R που μεταβιβάζεται στον πυρήνα ατομικού αριθμού A μετά από μια κρούση με ένα νετρόνιο ενέργειας E_n , στο σύστημα του εργαστηρίου, δίνεται από τη σχέση:

$$E_R = \frac{4A}{(1+A)^2} \cos^2 \theta E_n,$$

όπου θ η γωνία σκέδασης του ανακρουόμενου πυρήνα.



Εικόνα 2.18: *Ενεργειακή κατανομή ανακρουόμενων πρωτονίων παραγόμενων από μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων*

Η παραπάνω διεργασία και ένας πίνακας με τις τιμές της μέγιστης ενέργειας που μεταβιβάζεται στους διάφορους πυρήνες ανάλογα με τον ατομικό τους αριθμό, παρουσιάζεται στην εικόνα 2.19. Είναι εμφανές ότι το πρωτόνιο μπορεί να σκεδαστεί με οποιαδήποτε ενέργεια μεταξύ του μηδενός και της ενέργειας του προσπίπτοντος νετρονίου, ιστροπικά για όλες τις γωνίες, μέχρι τα 14 MeV [1]. Η αναμενόμενη κατανομή της

ενέργειας των ανακρουόμενων πρωτονίων παρουσιάζεται στην εικόνα 2.18

Ωστόσο, η συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή δεν έχει την αναμενόμενη ορθογώνια μορφή της εικόνας 2.18 για λόγους που συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω:

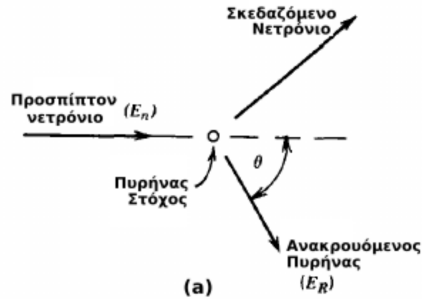
1. Μη γραμμική απόδοση φωτός συναρτήσει της ενέργειας:

Οι περισσότεροι οργανικοί σπινθηριστές έχουν διαφορετική απόκριση για διαφορετικά είδη σωματιδίων, το οποίο δεν επηρεάζει την ορθογώνια μορφή της συνάρτησης ([1], [2]). Επηρεάζεται την εικόνα, όμως, από την απόκριση στις διαφορετικές ενέργειες των προσπιπτόντων σωματιδίων. Για ενέργειες μέχρι περίπου τα 5 MeV η απόδοση είναι ανάλογη του $E^{3/2}$ κι έπειτα αποκτά γραμμική συμπεριφορά (Εικόνα 2.20)

2. Διαφυγή πρωτονίων από τις εξωτερικές επιφάνειες:

Σε περίπτωση που οι διαστάσεις του σπινθηριστή είναι συγκρίσιμες με το μήκος της τροχιάς των ανακρουόμενων πρωτονίων μέσα σε αυτόν, ορισμένα

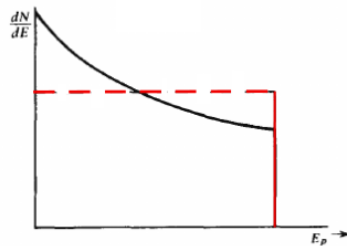
Σύστημα Εργαστηρίου



Target Nucleus	A	$\frac{E_R}{E_n}^{\max} = \frac{4A}{(1+A)^2}$
^1_1H	1	1
^2_1H	2	$8/9 = 0.889$
^3_2He	3	$3/4 = 0.750$
^4_2He	4	$16/25 = 0.640$
$^{12}_6\text{C}$	12	$48/169 = 0.284$
$^{16}_8\text{O}$	16	$64/289 = 0.221$

(b)

Εικόνα 2.19: (a) Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής σκέδασης νετρονίου από πυρήνα. (b) Κλάσματα της μέγιστης μεταφερόμενης ενέργειας κατά την ελαστική σκέδαση του νετρονίου



Εικόνα 2.20: Απεικόνιση της μορφής απόκρισης του ανιχνευτή λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα συναρτήσει της ενέργειας

πρωτόνια μπορεί να διαφύγουν από τις εξωτερικές επιφάνειες του ανιχνευτή, εναποθέτοντας ένα μέρος μόνο της ενέργειας τους. Το φαινόμενο αυτό μετατοπίζει ένα γεγονός κρούσης σε χαμηλότερες ενέργειες, αυξάνοντας την κλίση της μορφής της συνάρτησης απόκρισης στην αρχή του φάσματος.

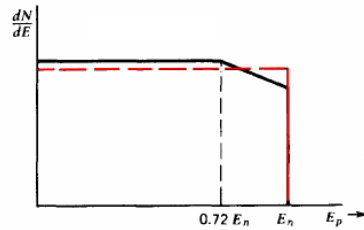
3. Πολλαπλές σκεδάσεις από το H_2 :

Το προσπίπτον νετρόνιο έχει πιθανότητα να σκεδαστεί πολλαπλά από τα πρωτόνια σε χρόνο μικρότερο από το χρόνο διαμόρφωσης του παλμού. Σε αυτή την περίπτωση το παραγόμενο φως αδρούζεται και το γεγονός καταγράφεται σε υψηλές ενέργειες εις βάρος των χαμηλών.

4. Σκεδάσεις από άτομα C:

Στους οργανικούς σπινθηριστές, υπάρχει πιθανότητα πριν από τη σκέδαση

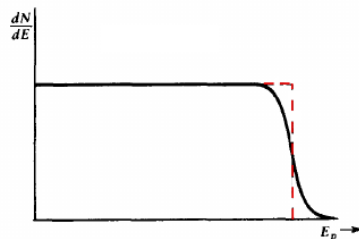
με τα πρωτόνια, ένα νετρόνιο να σκεδαστεί πολλαπλά από πυρήνες άνθρακα, χάνοντας μέχρι και το 30% της συνολικής ενέργειας του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των γεγονότων στις υψηλές ενέργειες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.21



Εικόνα 2.21: Απεικόνιση της μορφής απόκρισης του ανιχνευτή λαμβάνοντας υπόψη τις σκεδάσεις από τον άνθρακα

5. Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή:

Στη μορφή του φάσματος επιδρά και η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, που αλλοιώνει την αυστηρά ορθογώνια μορφή της συνάρτησης, καμπυλώνοντάς την. Πηγές της διασποράς αυτής είναι η ανομοιομορφη συλλογή φωτός, η στατιστική των φωτοηλεκτρονίων και άλλες πηγές θορύβου. (Εικόνα 2.22)

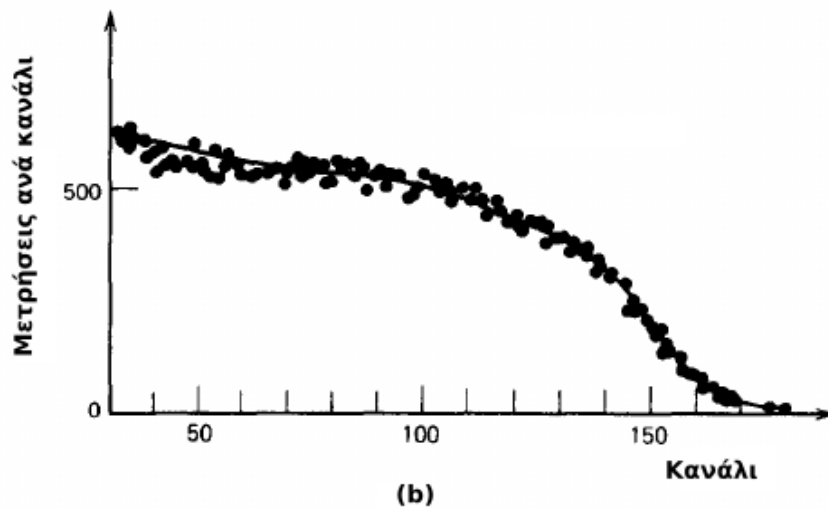
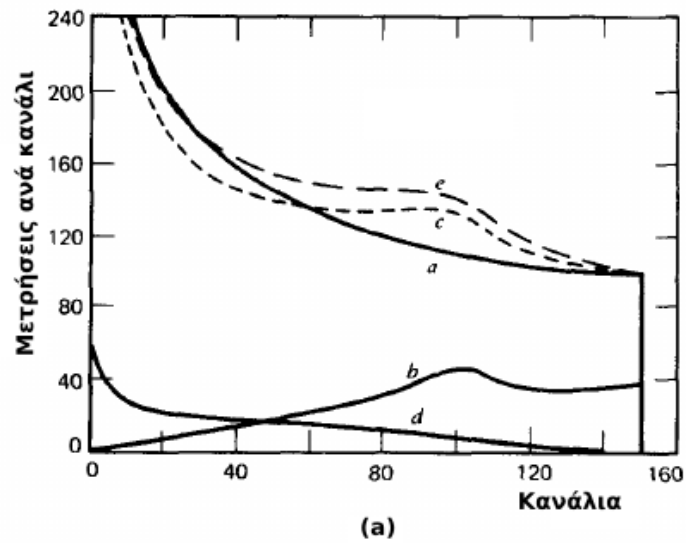


Εικόνα 2.22: Απεικόνιση της μορφής απόκρισης του ανιχνευτή λαμβάνοντας υπόψη τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή

Τα παραπάνω, για μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων, απεικονίζονται στην εικόνα 2.23

6. Πολυενεργειακή δέσμη νετρονίων:

Όλα τα παραπάνω αναφέρονται σε μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων. Σε περίπτωση που εμφανίζονται περισσότερες ενέργειες νετρονίων, ισχύουν όλα τα παραπάνω αθροιστικά, αλλά με διαφορετικές ενέργειες αναφορικά με το τέλος



Εικόνα 2.23: (a) Διαφορετικά τμήματα της συνάρτησης απόκρισης ενός υγρού σπινθηριστή: a- απλή σκέδαση από πυρήνα υδρογόνου συμπεριλαμβανομένης της μη γραμμικότητας του ανιχνευτή, b- Διπλή σκέδαση από πυρήνες υδρογόνου, c- Συνδιασμός μονής και διπλής σκέδασης από πυρήνες υδρογόνου, d- Ανακρουόμενα πρωτόνια από νετρόνια που έχουν σκεδαστεί προηγουμένως από πυρήνες άνθρακα, e- Σύνθετο φάσμα που προκύπτει από το άθροισμα των φασμάτων c και d (b) Τυπικό πειραματικό φάσμα απόκρισης ανιχνευτή σε μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων.

του φάσματος, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια εικόνα με διαδοχικά "σκαλοπάτια" που αναφέρονται σε διαφορετικές ενεργειακά οικογένειες νετρονίων.

7. Ανταγωνιστικές αντιδράσεις για υψηλές ενέργειες νετρονίων:

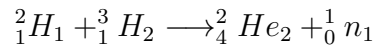
Τέλος, για ενέργειες νετρονίων μεγαλύτερες των 8-9 MeV, ανοίγουν νέες αντιδράσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυξανομένης της ενέργειας των νετρονίων, η απόδοση του ανιχνευτή λόγω της μονής σκέδασης από το υδρογόνο μειώνεται, αλλά λόγω αυτών των αντιδράσεων, η τελική απόδοση του ανιχνευτή δεν παρουσιάζει την ίδια φθίνουσα συμπεριφορά. Οι αντιδράσεις αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Αντίδραση	Κατώφλι ενέργειας νετρονίων
$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$	6.17 MeV
$^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$	7.98 MeV
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}$	4.44 MeV

Ανταγωνιστικές αντιδράσεις για υψηλές ενέργειες νετρονίων

2.2 Πειραματική διάταξη και λήψη μετρήσεων

Ο οργανικός σπινθηριστής BC501A, ο μηχανισμός του οποίου παρουσιάστηκε παραπάνω, τοποθετήθηκε ως τμήμα της πειραματικής διάταξης που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.24. Η διάταξη τοποθετήθηκε στην πειραματική γραμμή νετρονίων του ηλεκτρο-στατικού επιταχυντή Tandem 5.5 MV στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Η αντίδραση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η $^3_1\text{H}_2(d, n)^4_2\text{He}_2$ (D-T). Κατά την αντίδραση D-T, ένας πυρήνας δευτερίου ($^2_1\text{H}_1$) αλληλεπιδρά με έναν πυρήνα τριτίου ($^3_1\text{H}_2$) και παράγεται ένας πυρήνας ηλίου ($^4_2\text{He}_2$) και ένα νετρόνιο (1_0n_1). Δηλαδή ισχύει :



Η τιμή Q της αντίδρασης είναι +17.59 MeV γεγονός που υποδηλώνει μια ισχυρά εξώθερμη αντίδραση. Αυτά τα 17.59 MeV, διατίθενται ως κινητική ενέργεια των προϊόντων της αντίδρασης κι έτσι, με βλήματα μικρής ενέργειας, μπορούν να παραχθούν νετρόνια μεγάλης ενέργειας. Επιπλέον, οι αντιδράσεις διάσπασης του δευτερίου και του τριτίου αρχίζουν να γίνονται σημαντικές μόνο για βλήματα ενέργειας μεγαλύτερης των 3.71 MeV, οπότε αναμένεται μια σχετικά “καθαρή” ενεργειακή κατανομή στα νετρόνια κάτω από το ενεργειακό αυτό όριο. Μόνη θεωρητική παράμετρος που επηρεάζεται εδώ είναι η εμφάνιση αντιδράσεων διάλυσης των 2 στο πεδίο Coulomb ορισμένων βαρέων πυρήνων που υπάρχουν στη γραμμή. Στην περίπτωση αυτή η ελάχιστη κινητική ενέργεια διάσπασης πλησιάζει πολύ την ενέργεια σύνδεσης του δευτερίου.

Για την παραγωγή νετρονίων χρησιμοποιείται στόχος CuTiT. Ο στόχος αποτελείται από ένα φύλλο χαλκού (Cu), διαμέτρου 28.5 mm και πάχους 1 mm, πάνω στο



Εικόνα 2.24: Η πειραματική διάταξη με το στόχο τριτίου, το δοχείο με τους ανιχνευτές Micromegas και ο σπινθηριστής

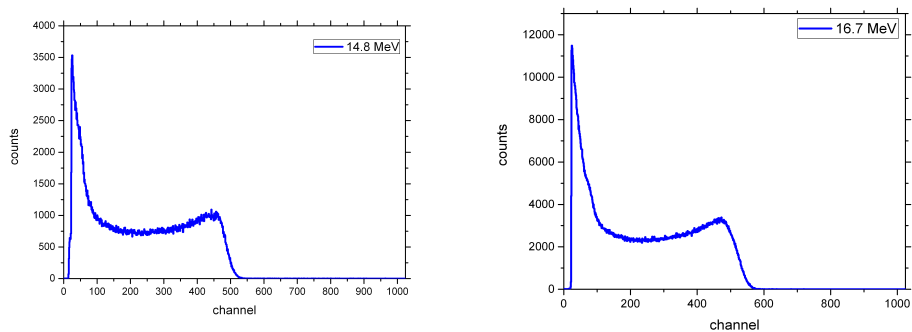
οποίο έχει εναποτεθεί ένα λεπτό στρώμα τιτανίου (Ti), διαμέτρου 25.4 mm. Μέσα στο τιτάνιο βρίσκεται προσαρτημένο το τρίτιο με αναλογία πυρήνων τριτίου/ τιτανίου ίση με 1.543. Πριν από το στόχο, υπάρχουν δυο διαδοχικά φύλλα μολυβδενίου πάχους 10μm συνολικά. Η τοποθέτησή τους εξυπηρετεί την αύξηση της ενεργού διατομής της αντίδρασης d-t, καθώς αυτή αυξάνεται με τη μείωση της ενέργειας των δευτερίων, χωρίς να μειώνεται η ένταση της δέσμης που μπορεί να δώσει η μηχανή, λόγω ακριβώς της χρήσης μεγαλύτερων αρχικών ενεργειών της προσπίπτουσας δέσμης δευτερίων.

2.2.1 Ληφθέντα φάσματα

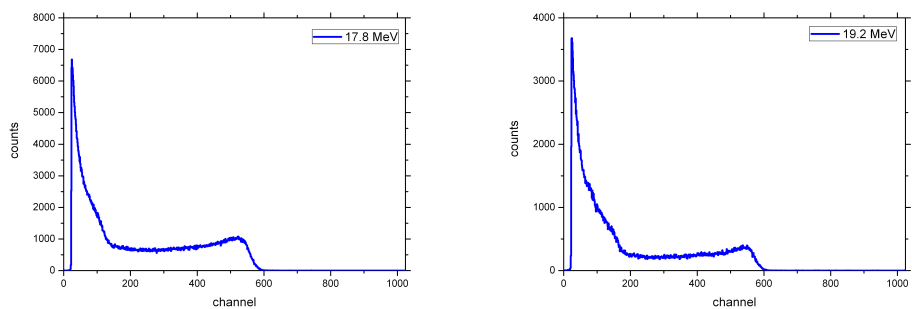
Οι ενέργειες των νετρονίων που καταγράφηκαν, καθώς και οι αντίστοιχες των δευτερίων από τις οποίες προέκυψαν, παρουσιάζονται τον πίνακα 2.2.1. Από αυτές τις μετρήσεις δε λήφθηκε καθόλου υπόψη η τελευταία, εκτός από τη διαδικασία της βαθμονόμησης, καθώς δεν μας είναι γνωστή η ακριβής απόκριση του ανιχνευτή γι' αυτή την ενέργεια νετρονίων (Κεφάλαιο 4). Ακολουθούν τα ληφθέντα φάσματα (Εικόνες 2.25, 2.26 και 2.27). Στα φάσματα που παρουσιάζονται, είναι εμφανείς οι διαφο- ρετικές οικογένειες νετρονίων, καθώς και όλα τα χαρακτηριστικά του φάσματος που αναφέρθηκαν παραπάνω αναφορικά με τη μορφή του.

Ενέργεια δευτερίων	Ρεύμα στο στόχο/ Κλίμακα	Μέση ενέργεια νετρονίων
1.75 MeV	350 nA /600 nA	14.85 MeV
2.30 MeV	500 nA /600 nA	16.60 MeV
2.80 MeV	650 nA /2μA	17.80 MeV
3.60 MeV	650 nA /2 μA	19.20 MeV
4.50 MeV	150 nA /600 nA	20.45 MeV

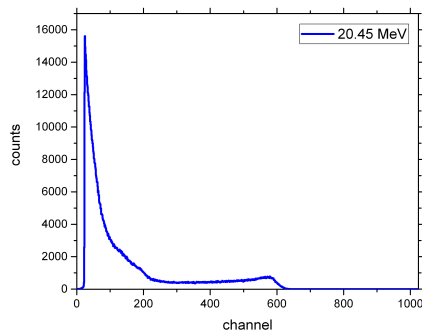
Στοιχεία ενεργειών δευτερίων και νετρονίων καθώς και της κλίμακας ρεύματος για τις πειραματικές μετρήσεις



Εικόνα 2.25: (a)Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 1.75 MeV (b) Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 2.3MeV



Εικόνα 2.26: (a)Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 2.8 MeV (b) Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 3.6 MeV

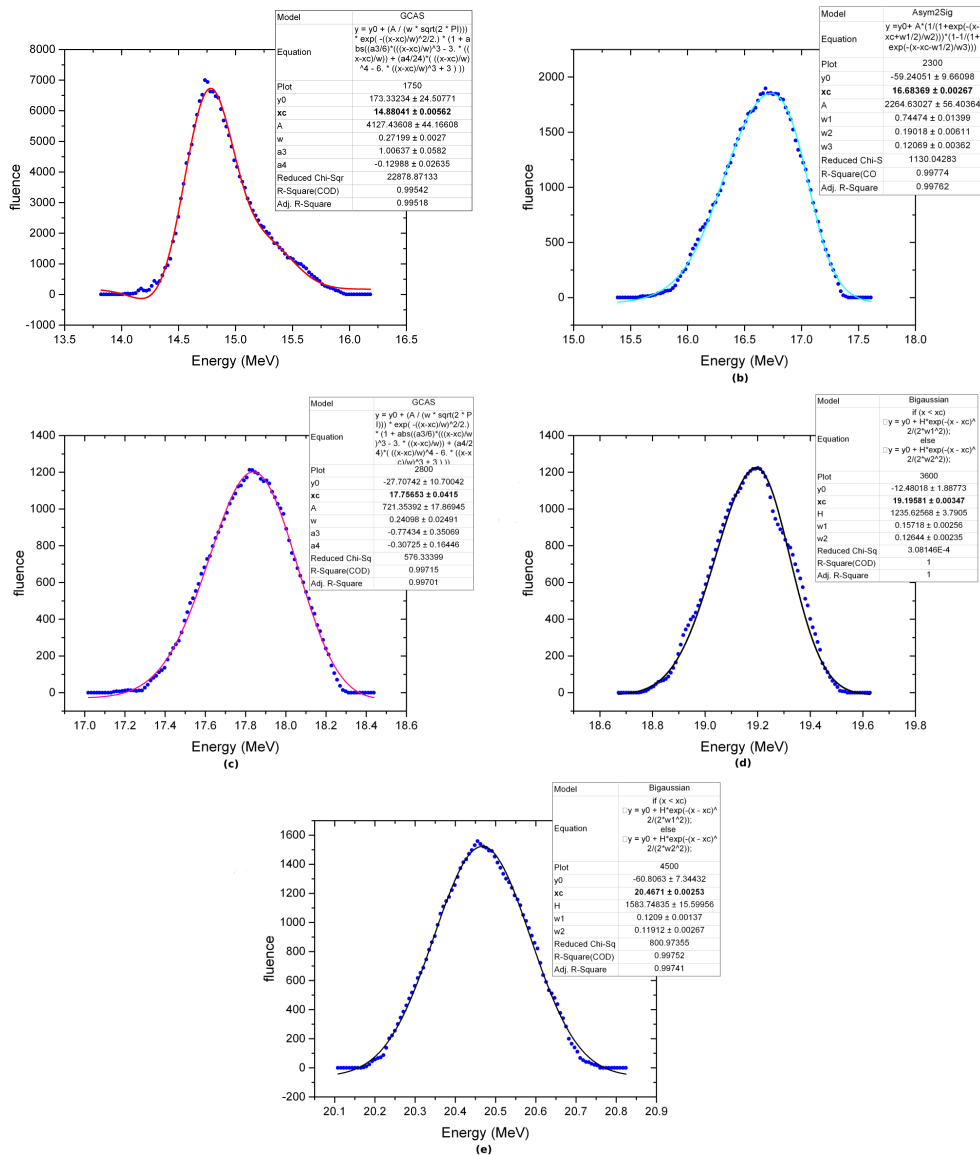


Εικόνα 2.27: Ενεργειακό φάσμα νετρονίων για ενέργεια δευτερίων 4.5 MeV

2.2.2 Βαθμονόμηση

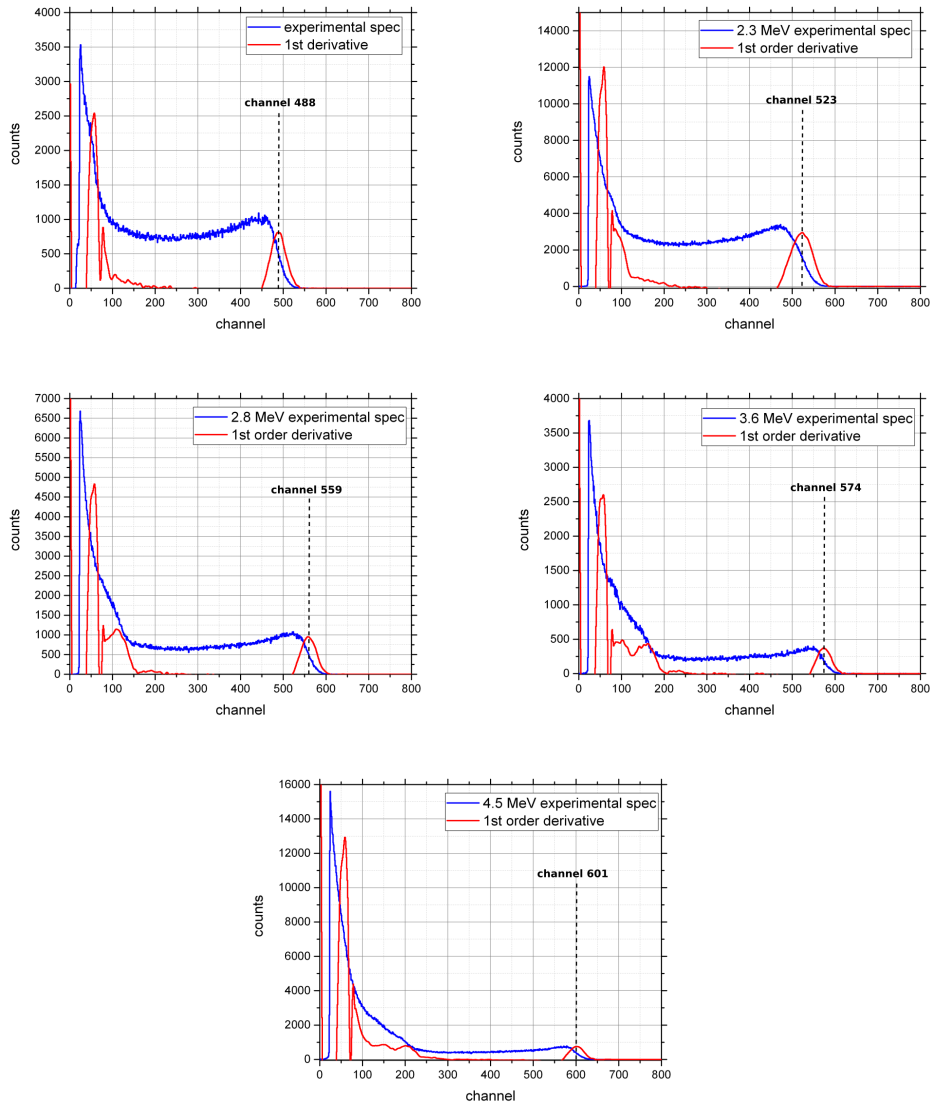
Τα φάσματα ελήφθησαν έχοντας γνωστή την ενέργεια της δέσμης των δευτερίων. Για να βρεθεί η αντίστοιχη ενέργεια των νετρονίων μετά τη διέλευσή τους από τα δύο φύλλα μολυβδενίου και την αντίδραση με το στόχο, έγινε προσομοίωση μέσω του προγράμματος Neusdesc που έδωσε αποτελέσματα για την αναμενόμενη ενεργειακή κατανομή της κύριας δέσμης. Για να προσδιοριστεί το κεντροειδές αυτής της κατανομής έγιναν προσαρμογές μέσω του προγράμματος Origin με τις δοσμένες συναρτήσεις προσαρμογής του προγράμματος και βρέθηκαν οι αντίστοιχες ενέργειες των νετρονίων (εικόνα 2.28). Τέλος, με βάση και τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για την επίδραση της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή στη μορφή του φάσματος, αντιστοιχίστηκαν τα κανάλια του μέσου της πτώσης του φάσματος με τις αντίστοιχες ενέργειες (εικόνα 2.29).

Τέλος, η αναπαράσταση των παραπάνω αποτελεσμάτων, δίνει τις παραμέτρους της βαθμονόμησης για τα φάσματα. Η βαθμονόμηση αυτή δίνεται στην εικόνα 2.30. Παρατηρείται ότι, αν εξαιρεθεί η ενέργεια δευτερίων 2.8 MeV, η συμπεριφορά όλων των υπόλοιπων σημείων είναι γραμμική. Όπως διαπιστώθηκε και από την επεξεργασία των μετρήσεων που ακολουθεί, το σημείο αυτό μπορεί να εξαιρεθεί της βαθμονόμησης, καθώς έχει υποστεί μετατόπιση ενδεχομένως λόγω της δέγμανσης της διάταξης. Το τελευταίο φαινόμενο οδηγεί σε μια συμπεριφορά ισοδύναμη μιας ενίσχυσης του σήματος (gain), άρα μετατοπίζει ολόκληρο το φάσμα. Ωστόσο, όπως θα φανεί στην επόμενη ενότητα, αυτή η μετατόπιση δεν εμποδίζει την ανάλυση του φάσματος αυτής της ενέργειας, απλά δεν λαμβάνεται υπόψη για την ενεργειακή βαθμονόμηση.

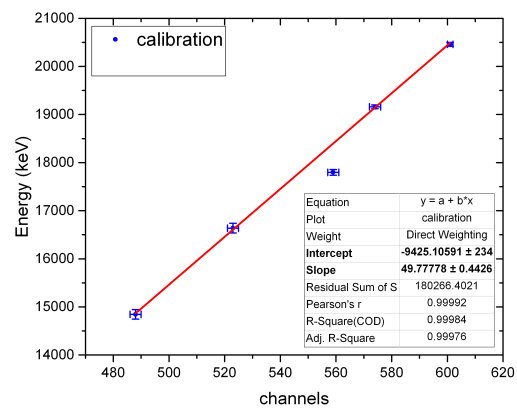


Εικόνα 2.28: Εύρεση ενέργειας νετρονίων από την προσομοίωση μέσω του κώδικα Neut-desc και προσδιορισμός της με προσαρμογή συναρτήσεων από το πρόγραμμα origin (a) $E_d = 1.75\text{MeV}$ και συνάρτηση προσαρμογής GCAS, (b) $E_d = 2.3\text{MeV}$ και συνάρτηση προσαρμογής Asym2Sig, (c) $E_d = 2.8\text{MeV}$ και συνάρτηση προσαρμογής GCAS, (d) $E_d = 3.6\text{MeV}$ και συνάρτηση προσαρμογής Bigaussian, (e) $E_d = 4.5\text{MeV}$ και συνάρτηση προσαρμογής Bigaussian

Ενέργεια δευτερίων	Κανάλι
1.75 MeV	488
2.30 MeV	523
2.80 MeV	559
3.60 MeV	574
4.50 MeV	601



Εικόνα 2.29: Αντιστοίχιση ενέργειας με το κανάλι του μέσου της πτώσης του φάσματος (a) $E_d = 1.75 \text{ MeV}$, (b) $E_d = 2.3 \text{ MeV}$, (c) $E_d = 2.8 \text{ MeV}$,(d) $E_d = 3.6 \text{ MeV}$, (e) $E_d = 4.5 \text{ MeV}$

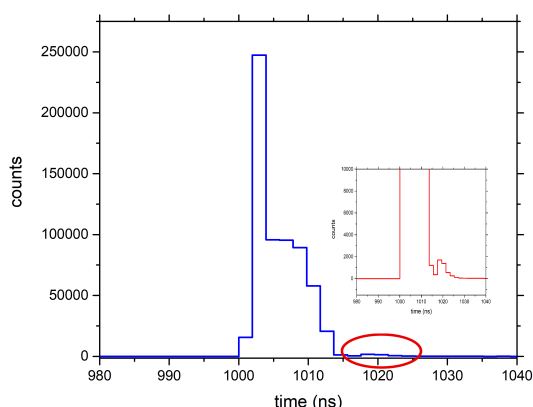


Εικόνα 2.30: Βαθμονόμηση

2.2.3 Χρονικά φάσματα με δέσμη νετρονίων

Παράλληλα με τα ενεργειακά φάσματα στον ADC καταγράφονται και τα χρονικά φάσματα διαχωρισμού των φωτονίων και των νετρονίων. Η συχνότητα των ληφθέντων μετρήσεων κυμαινόταν μεταξύ 300 – 800 Hz, δηλαδή, σύμφωνα με τα παραπάνω, μεταξύ των ορίων που ο διαχωρισμός είναι καλός.

Για όλες τις ενέργειες δευτερίων με εξαίρεση τη χαμηλότερη (αυτή των 1.75 MeV) παρατηρείται μετά την κορυφή του χρόνου μέτρησης των νετρονίων μια μικρότερη και διαχωρισμένη κορυφή. Λόγω της επαναληψιμότητας της εικόνας αυτής, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι ενδεχομένως η κορυφή αυτή να είναι προϊόν της ελαστικής σκέδασης του προσπίπτοντος νετρονίου με τον άνθρακα του σπινθηριστή. Καθώς ο ανιχνευτής, σύμφωνα με τα παραπάνω, έχει διαφορετική απόκριση ανάλογα με το είδος του σωματιδίου που ιονίζει το υλικό του, και λόγω της σύστασης του σπινθηριστή, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι οι σκεδάσεις από τον άνθρακα είναι ανιχνεύσιμες και μπορούν να αποτυπωθούν με τη μορφή μιας ακόμα καμπύλης μετά από αυτή των νετρονίων. Στην εικόνα 2.31 παρουσιάζεται ένα χρονικό φάσμα μόνο των νετρονίων ακολουθούμενα από την επιπλέον καμπύλη.



Εικόνα 2.31: Χρονικό φάσμα νετρονίων με άνθρακα

Οι παραπάνω έλεγχοι επιβεβαιώνουν τη φυσική ικανότητα του ανιχνευτή να διαχωρίζει νετρόνια με φωτόνια. Οι επικαλύψεις που δημιουργούν περιορισμό στο κατώφλι των καταγραφόμενων νετρονίων σχετίζονται με τις χρησιμοποιούμενες ηλεκτρονικές μονάδες, οι οποίες όντας αναλογικές δημιούργησαν προβλήματα στη μείωση του. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, όμως, οι περιορισμοί που τίθενται είναι μετρήσιμοι και δεν αναιρούν τόσο το ρόλο του υγρού σπινθηριστή ως οργάνου χαρακτηρισμού της δέσμης, και πολύ περισσότερο ως μόνιτορ, όπου δεν έχει ιδιαίτερη

σημασία αυτό το ενεργειακό κατώφλι.

Κεφάλαιο 3

Αποσυνέλιξη και ανάλυση αποτελεσμάτων

Έχοντας λάβει τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα χρειάζεται να εξαχθεί η πληροφορία για τη ροή των νετρονίων σε κάθε ενέργεια στην οποία αυτά προκύπτουν και έχουν μετρηθεί. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τη βοήθεια του κώδικα DIFBAS στο παρόν πείραμα. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η λογική αυτού του κώδικα και η επεξεργασία που αυτός εκτελεί στις ληφθείσες μετρήσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας, καθώς και ορισμένοι έλεγχοι πάνω σε αυτά.

1 Η διαδικασία αποσυνέλιξης - Ο κώδικας DIFBAS

1.1 Η αποσυνέλιξη στον κώδικα DIFBAS

1.1.1 Μαθηματική Εισαγωγή

Τα αποτελέσματα της αποσυνέλιξης προκύπτουν από τον κώδικα DIFBAS στη βάση της εφαρμογής του θεωρήματος Bayes, που χρησιμοποιείται για την ανανέωση της πιθανότητας μιας υπόθεσης καθώς ολοένα και περισσότερα δεδομένα αναφορικά με την υπόθεση γίνονται γνωστά. Η παρεμβολή μέσω Bayes, εξάγει την "εκ των υστέρων" πιθανότητα (a posteriori), στηριζόμενη σε δυο υποθέσεις: την "εκ των

προτέρων” πιθανότητα (a priori) και μια συνάρτηση πιθανοφάνειας, η οποία εξάγεται από ένα στατιστικό μοντέλο πάνω στα παρατηρούμενα δεδομένα. Ο τρόπος υπολογισμού, δίνεται από τη σχέση:

$$P(H|E) = \frac{P(E|H) \cdot P(H)}{P(E)},$$

όπου

- ▶ H: Είναι οποιαδήποτε υπόθεση, η πιθανότητα της οποίας επηρεάζεται από τα μετρούμενα δεδομένα.
- ▶ P(H): Είναι η εκ των προτέρων πιθανότητα, η εκτίμηση της πιθανότητας της υπόθεσης H, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι μετρούμενες ποσότητες.
- ▶ E: Είναι τα νέα, μετρούμενα, δεδομένα, που δεν χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της εκ των προτέρων πιθανότητας.
- ▶ P(H|E): Είναι η εκ των υστέρων πιθανότητα, δηλαδή η πιθανότητα να μετρηθεί το H με δοσμένη την ποσότητα E. Αυτή είναι η ζητούμενη πιθανότητα.
- ▶ P(E|H): Είναι η πιθανότητα μέτρησης του E, με δοσμένο το H, και αντιστοιχεί στη συνάρτηση πιθανοφάνειας.

Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου εξαγωγής αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια πιο αναλυτική αναφορά στην αναγκαιότητα χρήσης του παραπάνω θεωρήματος και της ”φιλοσοφίας” του. Η μέτρηση μιας ποσότητας περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση μιας διάταξης με το περιβάλλον καθώς και μια σειρά από συστηματικά, ή τυχαία σφάλματα. Η πιο γενική έκφραση μιας μετρούμενης ποσότητας είναι η ακόλουθη:

$$D = R(\Theta) + \nu,$$

όπου D είναι η ληφθείσα μέτρηση, R η συνάρτηση απόκρισης του εκάστοτε οργάνου ως συνάρτηση παραμέτρων Θ που τίθεντε κατά τη μέτρηση και τέλος, ν είναι η εισαχθείσα αβεβαιότητα ή θόρυβος. Η στατιστική ανάλυση δεδομένων περιλαμβάνει την επεξεργασία των μετρούμενων ποσοτήτων με σκοπό την εξαγωγή των επιθυμητών παραμέτρων.

Η συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή, συνήθως είναι τόσο πολύπλοκη ώστε, ακόμα και χωρίς τον υπολογισμό του θορύβου, είναι ανέφικτη η αντιστροφή της παραπάνω συνάρτησης κι αυτό οδηγεί στην ανάγκη εισαγωγής μιας μεθόδου προσέγγισης για την επίτευξη μιας ”ψευδοαντιστροφής”. Η ”αντιστροφή” που μπορεί

να γίνει δεν είναι μοναδική, υπάρχουν πολλές "ψευδο-αντιστροφές" που επιλύουν το πρόβλημα. Το γεγονός αυτό καθιστά το πρόβλημα αυτό κακώς τεθημένο (ill-determined) και απαιτείται συστηματικός τρόπος επιλογής του σωστού τρόπου αντιστροφής. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό ενός μοντέλου γι' αυτή τη διαδικασία, τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου καθώς και τον προσδιορισμό της ακρίβειας στην εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου.

Η επιλογή του καλύτερου μοντέλου για την παραπάνω αντιστροφή απαιτεί μια εξισορρόπηση ανάμεσα στην ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους, συνηδέστερα, αλλά και στην περίπτωσή μας την ελαχιστοποίηση του χ^2 , και στην ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης εφαρμογής συνοριακών συνθηκών, συνήθως την εντροπία $\sum_i p_i \log p_i$.

Η σωστή ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις δυο απαιτήσεις εξάγεται από το θεώρημα Bayes ([18], [19], [20]), που παρουσιάστηκε παραπάνω και για την περίπτωση του πειράματος που μελετάμε παίρνει τη μορφή:

$$P(\Phi|z, R) = \frac{L(z|\Phi, R) \cdot P(\Phi|R)}{P(z|R)}$$

, Συγκεκριμένα:¹

- ▶ $P(\Phi|z, R)$: Είναι η ενεργειακή κατανομή των νετρονίων (Φ) που αναζητάμε, η πιθανότητα να μετρηθεί το Φ , με δοσμένα το z και το R , αφού μετρηθεί το z .
- ▶ $P(\Phi|R)$: Είναι η "εκτίμηση", ή η γνώση του πειραματιστή πριν την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης, η λεγόμενη a priori πιθανότητα.
- ▶ L είναι η συνάρτηση πιθανοφάνειας και περιλαμβάνει όλες τις ποσότητες που επιθυμούμε να εξάγουμε και προκύπτει από ένα στατιστικό μοντέλο πάνω στα μετρούμενα μεγέθη. Στην επεξεργασία μας θεωρούμε ότι η $L=P(z|\Phi,R)$ και η κατανομή αυτής της πιθανότητας είναι κανονική, καθώς από μια πιο ευρεία οπτική, αναπαριστά την υπο συνθήκες κατανομή πιθανότητας της ενεργότητας, εάν αντιστοιχιστεί η συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή με την ενεργό διατομή, και η ενεργότητα θεωρείται ότι κατανέμεται κανονικά.
- ▶ Η πιθανότητα του παρονομαστή θεωρείται σταθερή.

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η σχέση που μας ενδιαφέρει είναι η σχέση αναλογίας μεταξύ του αριστερού όρου και του αριθμητή του δεξιού όρου της

¹Υπενθυμίζεται ότι z είναι η μετρούμενη ποσότητα, το φάσμα δηλαδή των νετρονίων που λάβαμε και παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, R η συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή που είναι γνωστή και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια πιο αναλυτικά και Φ η ροή των νετρονίων.

εξίσωσης του Θεωρήματος Bayes: $P(\Phi|R, z) \propto P(z|\Phi, R) \times P(\Phi, R)$, πάνω στο οποίο στηρίζεται και η λειτουργία του κώδικα DIFBAS.

Από την αρχική διατύπωση του ευθέως προβλήματος, η αναδιατύπωση των όρων σε μορφή πίνακα οδηγεί στη σχέση: $z=R \cdot \Phi$. Θεωρώντας μια αρχική μέτρηση \vec{z}_0 , καθώς και τον αντίστοιχο πίνακα συσχέτισης ($S_{z_0}^{-1}$) γνωστά, καθώς και τον αριθμό των καναλιών του ληφθέντος φάσματος μεγαλύτερο από το πλήθος των οικογενειών των νετρονίων ², το ζητούμενο Φ και ο αντίστοιχος πίνακας συσχέτισης υπολογίζονται από την ελαχιστοποίηση της ποσότητας:

$$\chi^2 = (z_0 - R\Phi)^T \cdot S_{z_0}^{-1} \cdot (z_0 - R\Phi)$$

(μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων)

Τέλος βασικό συστατικό στον υπολογισμό της ροής από την αποσυνέλιξη είναι η χρήση πινάκων συνδιακύμανσης, καθώς και η εξαγωγή του πίνακα αυτού για το πειραματικό φάσμα. Η συνδιακύμανση δείχνει πώς σχετίζονται μεταξύ τους δυο μεταβλητές. Η σχέση για τον υπολογισμό της συσχέτισης ενός δείγματος δεδομένων δίνεται ως:

$$con(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} ,$$

όπου

- ▶ x η ανεξάρτητη μεταβλητή
- ▶ y η εξαρτημένη μεταβλητή
- ▶ \bar{x} η μέση τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής
- ▶ \bar{y} η μέση τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής
- ▶ n ο αριθμός των σημείων του δείγματος

Η παραπάνω σχέση σε μορφή πίνακα, που είναι τετραγωνικός, δίνεται ως εξής:

$$C = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})^T$$

²Αυτό χρειάζεται για λόγους που σχετίζονται με τις μαθηματικές παραδοχές και απαιτήσεις που οδηγούν στην επιλογή αυτής της μεθόδου και αναφορικά με τη μοναδικότητα των λύσεων

Η αναλυτική επίλυση των παραπάνω σχέσεων, καθώς και οι παραδοχές που απαιτούνται για την εξαγωγή τους μπορούν να αναζητηθούν στις αναφορές [20],[21], [22], αλλά δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον και αποτελεί τη βασική διαφορά του DIFBAS σε σχέση με άλλους αντίστοιχους κώδικες αποσυνέλιξης είναι ο τρόπος που κάνει ελαχιστοποίηση της σχέσης για τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και τον υπολογισμό του πίνακα συσχέτισης.

Για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου, σε αντιδιαστολή με την αντιστροφή μεγάλων πινάκων που γίνεται σε αντίστοιχα προγράμματα αποσυνέλιξης, προτιμάται μια διαδικασία που ονομάζεται φίλτρο συσχέτισης (covariance filter) και η καινοτομία του αφορά στη δημιουργία και επεξεργασία πινάκων που δε χρειάζονται αντιστροφή (παράγοντες Cholesky και L-D). Η μαθηματική περιγραφή του φίλτρου συσχέτισης είναι αντικείμενο της αναφοράς [20] κι επικουρικά σε αυτό στις αναφορές [23] και [24], κι εδώ θα γίνει μια περιγραφική αναφορά στη διαδικασία.

Αρχικά, πρέπει να κατανοηθεί ο ρόλος της συνάρτησης απόκρισης R , που αναφέρθηκε παραπάνω. Η συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή είναι προϊόν προσομοίωσης για το συγκεκριμένο ανιχνευτή και δίνει την αναμενόμενη μορφή του φάσματος νετρονίων (συνδέοντας την ενέργεια με την απόκριση του φωτός) για μονοενεργειακές δέσμες νετρονίων. Η συνάρτηση αυτή δίνεται σε πίνακα, η δομή του οποίου θα επεξηγηθεί στη συνέχεια. Θεωρητικά, όλα τα ληφθέντα φάσματα μέχρι τα 20 MeV, που είναι το όριο της συνάρτησης απόκρισης, θα έπρεπε να είναι υπέρθεση των φασμάτων που δίνονται στην R .

Με γνωστά την R και μια αρχική ροή Φ_0 (a priori), δηλαδή ένα αρχικό φάσμα z_0 κι έναν αρχικό πίνακα συσχέτισης S_{z_0} , γίνεται ένας υπολογισμός της απόκλισης αυτού από το πειραματικά μετρούμενο φάσμα, σύμφωνα και με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται κάνοντας προσπέλαση κανάλι κανάλι. Διατηρώντας τα βέλτιστα αποτελέσματα αναφορικά με την απόκλιση και τον πίνακα συσχέτισης που προκύπτει, γίνεται μια αντιστοίχιση με τις κατανομές ενεργειών από τις οποίες αυτά προέκυψαν (Φ_1) και κατασκευάζεται ένα νέο φάσμα $z_1 = R\Phi_1$ και ένας πίνακας συσχέτισης S_{z_1} . Το νέο αυτό φάσμα θεωρείται είσοδος (a priori) για να ξαναγίνει μια προσπέλαση για τον εκ νέου υπολογισμό της απόκλισης του πειραματικού φάσματος από το νέο αυτό φάσμα με την ίδια διαδικασία κι εξάγεται ένα νέο φάσμα z_2 κι ένας νέος πίνακας συσχέτισης S_{z_2} , βελτιωμένα ως προς την απόκλιση σε σχέση με το προηγούμενο. Το φάσμα αυτό χρησιμοποιείται ως είσοδος για επανεφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας. Αυτό επαναλαμβάνεται N φορές μέχρι την ελαχιστοποίηση της απόκλισης του πειραματικού φάσματος από αυτό που η διαδικασία αυτή δημιουργεί, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του χ^2 . Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα φάσμα νετρονίων z , το οποίο έχει (στατιστικά) γνωστές τις

ενέργειες νετρονίων Φ που το απαρτίζουν και τον πίνακα συσχέτισής τους.

1.2 DIFBAS

Ο κώδικας DIFBAS, αναπτύχθηκε σε Fortran 77, αλλά ξαναγράφηκε σε Fortran 90, ώστε να είναι συμβατός με τους σύγχρονους μεταγλωττιστές [25]. Κατά την εκτέλεσή του απαιτείται να υπάρχουν στον ίδιο φάκελο τα παρακάτω αρχεία:

1. **\$name.SPE**: Είναι το αρχείο που περιέχει τις πειραματικές μετρήσεις του ενεργειακού φάσματος όπως λήφθηκαν από το σπινθριστή. Πρέπει να έχουν μεταφερθεί σε μορφή `maestro.spe` ώστε να διαβαστούν. Μπορούν να αντιγραφούν στο πρότυπο αρχείο που υπάρχει μαζί με τον κώδικα.
2. **neut.daf**: Είναι η μήτρα απόκρισης του ανιχνευτή, για την οποία θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω. Είναι σε `direct access` μορφή και προκύπτει από την εφαρμογή του βοηθητικού κώδικα `Transmat` δίνοντας ως είσοδο το αρχείο `neut.asc`, που είναι η ίδια πληροφορία σε `ascii` μορφή, ώστε να είναι κατανοητή στο χρήστη.
3. **neutdaf.txt**: Είναι ένα μονόστηλο αρχείο που έχει προκύψει από το `neut.asc` κι έχει διατηρήσει μόνο τις τιμές απόκρισης φωτός.
4. **DIFBAS.exe / DIFBAS.out**: Είναι ο κύριος κώδικας σε μορφή εκτελέσιμη είτε από `windows`, είτε από `linux` συστήματα³.
5. **difbasinp.txt**: Είναι το αρχείο εισόδου του κυρίως προγράμματος, το οποίο επίσης θα επεξηγηθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.
6. **sphc.exe / sphc.out**: Είναι βοηθητικός και απαραίτητος κώδικας που μετατρέπει το πειραματικό φάσμα `$name.SPE` σε αντίστοιχη μορφή με το `neut.asc`, δηλαδή τη μήτρα απόκρισης του ανιχνευτή, ώστε να μπορεί να γίνει η αντιπαραβολή σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.
7. **sphcdat.txt**: Είναι αρχείο εισόδου στο `sphc.exe / sphc.out`, που περιέχει τις παραμέτρους βαθμονόμησης και συνδιακύμανσης του πειραματικού φάσματος ώστε να γίνει η αντιστοιχία με την μήτρα απόκρισης.

³Στην παρούσα εργασία όλες οι ρουτίνες εκτελέστηκαν σε περιβάλλον `linux (fedora 29)` για καλύτερο έλεγχο και διευκόλυνση της συγγραφέως στην τροποποίηση όπου αυτή κρίθηκε απαραίτητη, αλλά κυρίως για διευκόλυνση αυτοματοποίησης ορισμένων διαδικασιών.

Παρακάτω αναλύονται λίγο περισσότερο τα παραπάνω αρχεία. Εκτενείς αναφορές σε αυτά μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [26], που είναι και το ολοκληρωμένο εγχειρίδιο του κώδικα.

1.2.1 Η μήτρα απόκρισης neut.daf/neut.asc

Η σύνδεση της φυσικής λειτουργίας του υγρού σπινθηριστή BC501A με τον κώδικα DIFBAS γίνεται μέσω της μήτρας απόκρισης του ανιχνευτή, αυτή που προηγουμένως αναφέρθηκε ως συνάρτηση απόκρισης και αποτελεί προϊόν προσομοίωσης για το συγκεκριμένο ανιχνευτή (όσον αφορά τις συγκεκριμένες διαστάσεις και το υλικό του). Συνδέει την ενέργεια των νετρονίων με την απόκριση φωτός του ανιχνευτή (με βάση και τα όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο), καθώς το φως, με τη μορφή φθορισμού είναι η πρωτόλεια απόκριση του ανιχνευτή στην προσπίπτουσα ακτινοβολία. Στη συνέχεια, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στον ADC αντιστοιχίζεται σε κανάλια κι έπειτα, με τη διαδικασία της βαθμονόμησης, τα κανάλια σε ενέργεια. Στην περίπτωση της μήτρας απόκρισης, αυτή η αντιστοιχία γίνεται αντί για κανάλια σε μονάδες απόκρισης φωτός (light units/lu) και πρέπει να γίνει αντίστοιχη βαθμονόμηση, για να μεταφραστεί σε ενέργεια.

Η δομή αυτού του αρχείου έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1 και η οπτικοποίηση αυτών των πληροφοριών σε λογαριθμική κλίμακα δίνεται στην εικόνα 3.2-a. Στην πραγματικότητα δίνονται για 183 τιμές ενεργειών νετρονίων, με εύρος 0.5 - 20 MeV, οι αναμενόμενες μορφές των φασμάτων για μονοενεργειακή δέσμη. Η διάταξη του αρχείου είναι πεντάστηλη και περιέχει 258 τιμές της απόκρισης του φωτός με εύρος 0-12.96 lu, 183 τιμές ενέργειας νετρονίων, με το προαναφερθέν εύρος και 258 ομάδες (μια ομάδα για κάθε τιμή απόκρισης φωτός) που η κάθε μια έχει 183 τιμές (στο ενεργειακό φάσμα, οι ομάδες αυτές απεικονίζουν τα counts σε κάθε κανάλι για τις διάφορες ενέργειες). Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά το φάσμα της πρώτης και της τελευταίας ενέργειας (μια τομή δύο φασμάτων που απεικονίζονται στην εικόνα 3.2-b).

```

RESPONSE MATRIX NEUT.DAF
NO. ROWS, NO.OF COLUMNS, RECL IN NO. OF VAR.:
 258,   183,   190
LIGHT OUTPUT SCALE:
0.0000000E+00 0.19469984E-03 0.77879935E-03 0.17522986E-02
0.31151974E-02
0.48674964E-02 0.70091942E-02 0.95402924E-02 0.12460790E-01
0.15770687E-01
0.19469986E-01 0.23558680E-01 0.28036777E-01 0.32904275E-01
0.38161170E-01
:
0.11214710E+02 0.11308360E+02 0.11402402E+02 0.11496831E+02
0.11591650E+02
0.11696857E+02 0.11782454E+02 0.11878443E+02 0.11974819E+02
0.12071585E+02
0.12168740E+02 0.12266234E+02 0.12364218E+02 0.12462543E+02
0.12561255E+02
0.12660357E+02 0.12759849E+02 0.12859729E+02 0.12959999E+02
NEUTRON ENERGY SCALE:
0.5000000E+00 0.56450003E+00 0.62900001E+00 0.69449997E+00
0.76100004E+00
0.82900000E+00 0.89749998E+00 0.96600002E+00 0.10360000E+01
0.11064999E+01
0.11770000E+01 0.12490000E+01 0.13215001E+01 0.13940001E+01
0.14680001E+01
0.15425000E+01 0.16174999E+01 0.16930000E+01 0.17685001E+01
0.18450000E+01
:
0.18249500E+02 0.18383999E+02 0.18519999E+02 0.18657000E+02
0.18792500E+02
0.18929499E+02 0.19066500E+02 0.19204000E+02 0.19341000E+02
0.19480000E+02
0.19617500E+02 0.19756500E+02 0.19895500E+02 0.20034500E+02
RESPONSE MATRIX BY ROWS:
1-TH ROW
0.23277996E+04 0.22346990E+04 0.21395881E+04 0.20056979E+04
0.19245585E+04
0.18588735E+04 0.17561779E+04 0.16728873E+04 0.16362711E+04
0.15793148E+04
:
0.75162463E+03 0.74852100E+03 0.75293463E+03 0.76403217E+03
0.75976721E+03
0.76874634E+03 0.79201605E+03 0.79549622E+03
2-TH ROW
0.18942999E+04 0.18318785E+04 0.17288247E+04 0.16154131E+04
0.15533601E+04
0.14713323E+04 0.14113640E+04 0.13401902E+04 0.12868938E+04
:
258-TH ROW
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
0.00000000E+00
:
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.20633501E-04
END OF FILE

```

Light Output Scale: 0 - 12.96 L.U (258 τιμές)

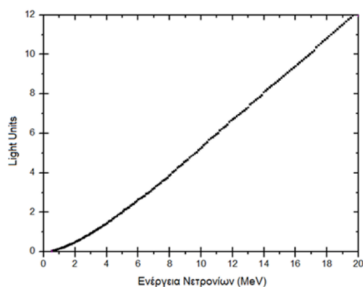
Neutron Energy Scale: 0.5 - 20 MeV (183 τιμές)

1η γραμμή (183 τιμές)

2η γραμμή (183 τιμές)

258η γραμμή (183 τιμές)

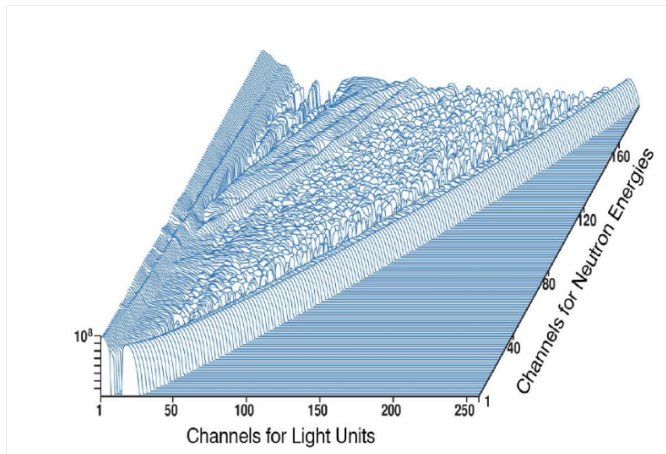
Εικόνα 3.1: Δομή του αρχείου neut.asc



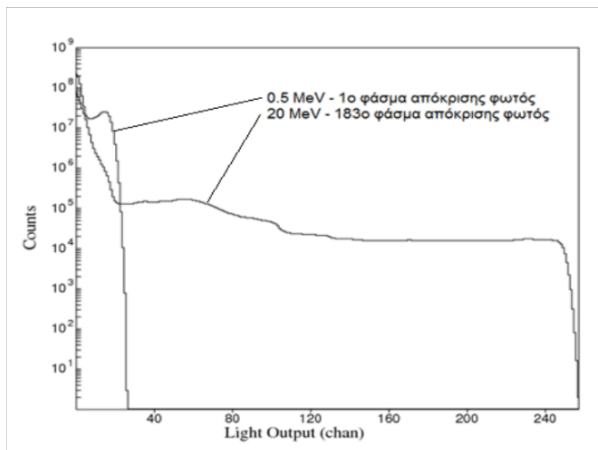
Εικόνα 3.3: Ενέργεια νετρονίων συναρτήσει της απόκρισης φωτός

των 5.5 MeV περίπου. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ανάγκη προσαρμογής δυο διαφορετικών συναρτήσεων ανά ενεργειακό εύρος, όπως απεικονίζονται στην εικόνα

Η διαδικασία βαθμονόμησης, δηλαδή η αντιστοιχία του μέσου της πτώσης σε lu (light units) για κάθε ενέργεια, γίνεται με τον ίδιο τρόπο που έγινε παραπάνω για τα κανάλια για κάθε μια από τις 183 τιμές ενεργειών και παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4 ([25]). Το αποτέλεσμα αυτής της βαθμονόμησης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3 ([25]) κι επιβεβαιώνει τη θεωρητικά αναμενόμενη μη γραμμική μορφή που έχει η απόκριση του ανιχνευτή για ενέργειες μικρότερες



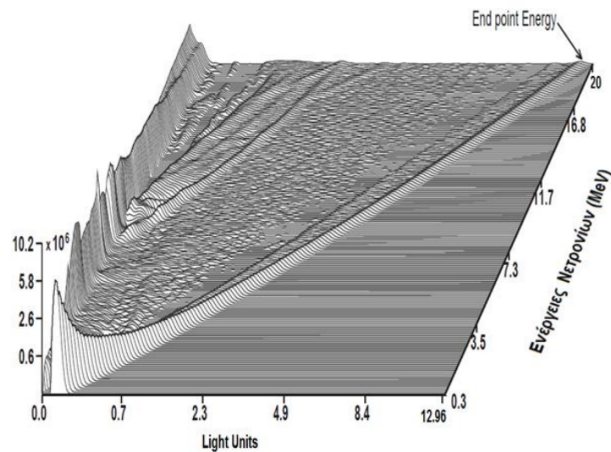
(a)



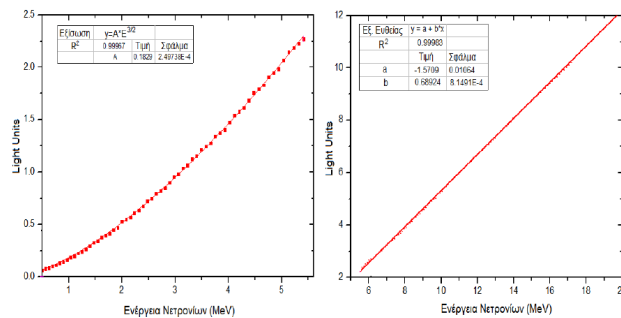
(b)

Εικόνα 3.2: (a) Αναπαράσταση σε τρεις διαστάσεις του αρχείου *neut.asc* σε λογαριθμική κλίμακα, (b) Ενδεικτικά φάσματα απόκρισης φωτός για δυο ενέργειες.

3.5, για εύρος 0-5.5 MeV, τη συνάρτηση $H = A \cdot E^{3/2}$ και για το υπόλοιπο φάσμα έγινε γραμμική προσαρμογή. Για χρήση μέσα στον κώδικα, ωστόσο, επειδή απαιτείται ενιαία θεώρηση, εφαρμόζονται παντού οι παράμετροι που προκύπτουν από τη γραμμική θεώρηση.



Εικόνα 3.4: Απεικόνιση της διαφοράς όλων των ενεργειακών φασμάτων με την αντιστοιχία τους σε lu (light units)



Εικόνα 3.5: Βαθμονόμηση του γραμμικού και μη γραμμικού τμήματος της σύνδεσης της ενέργειας των νετρονίων με την απόκριση φωτός

1.2.2 Sphc.exe/sphc.out - Μετατροπή του ληφθέντος φάσματος σε μορφή κατάλληλη για επεξεργασία από το DIFBAS

Απαραίτητο τμήμα της διαδικασίας αποσυνέλιξης με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω είναι η μετατροπή του αρχείου όπως λαμβάνεται από τον ανιχνευτή σε μορφή κατάλληλη για είσοδο στο DIFBAS. Τη διαδικασία αυτή την εκτελεί ο κώδικας sphc.exe/sphc.out, ο οποίος "βαθμονομεί" κατάλληλα το πειραματικό φάσμα και κάνει rebinning ώστε να αντιπαραβάλλεται με το neut.asc. Η είσοδος που δέχεται είναι τα παρακάτω αρχεία:

1. \$name.SPE

2. neutdaf.txt

3. sphcdat.txt

Το τελευταίο αρχείο περιέχει κατά κύριο λόγο τις παραμέτρους για τη βαθμονόμηση του ληφθέντος φάσματος σε μορφή αντίστοιχη με αυτή της μήτρας απόκρισης και για τον υπολογισμό του πίνακα συνδιακύμανσης. Οι παράμετροι αυτές προκύπτουν από τη σχέση

$$channels = G \cdot lu + Z,$$

για την εξαγωγή της οποίας απαιτείται η εξής διαδικασία:

Η βαθμονόμηση (συσχέτιση της ενέργειας νετρονίων σε MeV με τα κανάλια) δίνεται από τη σχέση $E = a \cdot channel + b$ όπου με αντικατάσταση των παραμέτρων όπως υπολογίστηκαν από τη βαθμονόμηση, γίνεται $E = 0.0498 \cdot channels - 9.425$. Ανάλογα, η συσχέτιση light units (lu) με την ενέργεια (σε MeV) δίνεται από τη σχέση: $lu = a \cdot E + b$ και με εφαρμογή των παραμέτρων που απεικονίζονται στην εικόνα 3.5 γίνεται $lu = 0.689E - 1.571$. Τέλος, κάνοντας αντικατάσταση της πρώτης σχέσης στη δεύτερη, γίνεται: $lu = 0.03431 \cdot channels - 8.065$ και λύνοντας ως προς τα κανάλια προκύπτει η επιθυμητή σχέση:

$$channels = 29 \cdot lu + 233$$

.

Το Z, πέρα από τον συντελεστή μετατόπισης της συνάρτησης προσαρμογής, αντιστοιχεί και στα κανάλια του ληφθέντος φάσματος που δεν περιέχουν αξιοποιήσιμη πληροφορία, δηλαδή τα μηδενικά και αυτά που λόγω αστοχίας στη βαθμονόμησης αντιστοιχούν σε αρνητική ροή. Ωστόσο, υπάρχει και ξεχωριστή απαίτηση στο αρχείο sphcdat.txt να οριστεί το αρχικό κανάλι του ADC που ξεκινάει η αξιοποιήσιμη πληροφορία. Αναλυτικά, η δομή του sphcdat.txt δίνεται παρακάτω για ενδεικτικές τιμές (εικόνα 3.6 [25]):

141.0 , 1.0	→	Gain σε κανάλια/ L.U. και η αβεβαιότητα του επί τοις %
1 , 0.5	→	Zero Shift σε κανάλια και η αβεβαιότητα του επί τοις %
2	→	Κατώφλι - το πρώτο έγκυρο κανάλι του PH φάσματος
0 , 0	→	Συντελεστής κανονικοποίησης και η αβεβαιότητα του επί τοις %
PROTONSP.TXT	→	Όνομα αρχείου εξόδου

Εικόνα 3.6: Το αρχείο sphcdat.txt

Η έξοδος του προγράμματος sphc.exe/sphc.out είναι:

1. Ένα αρχείο nameNN.TXT⁴, που έχει τη μορφή της εικόνας 3.7, δηλαδή όμοια με του neut.asc.
2. Ένα αρχείο nameNNW.FTD, που περιέχει την ίδια πληροφορία με το παραπάνω, αλλά σε δίστηλη διάταξη κατάλληλη για απεικόνιση. Η απεικόνιση όλων των πειραματικών φασμάτων σε αυτή τη μορφή δίνεται στην εικόνα 3.8.

```

TEST EH SPECTRUM AND COVARIANCES
NO. OF BINS, START. BIN
178 32 → (m τιμες, αρχικό bin)
ENERGY SCALE
0.18710655E+00 0.19937263E+00 0.21202812E+00 0.22507302E+00
0.23050730E+00 0.25233039E+00 0.26654404E+00 0.28114656E+00 0.29613847E+00
0.31151977E+00 0.32723042E+00 0.34345052E+00 0.36000001E+00 0.37693888E+00
0.39426717E+00 0.41139489E+00 0.43009192E+00 0.44850843E+00 0.46747434E+00
0.48674956E+00
⋮
0.74789095E+01 0.75561061E+01 0.76330123E+01 0.77103091E+01
0.77879930E+01 0.78660688E+01 0.79445324E+01 0.80233860E+01 0.81026287E+01
0.81822260E+01 0.82622814E+01 0.83426943E+01 0.84234943E+01 0.85046835E+01
EH SPECTRUM
0.52284890E+07 0.50417230E+07 0.48071540E+07 0.46024085E+07
0.44543960E+07 0.43892485E+07 0.41893250E+07 0.38938333E+07 0.38474115E+07
0.36413668E+07 0.34874750E+07 0.32967008E+07 0.31616415E+07 0.30039680E+07
0.28511515E+07
⋮
0.51546574E+05 0.42024250E+05 0.31331846E+05 0.16974332E+05
0.74877764E+04
0.29222957E+04 0.87008923E+03 0.42549649E+03
EH SPECTRUM COVARIANCE
0.33774272E+09 0.11024614E+09 0.56947476E+08 0.22339587E+09
0.90104712E+08 0.15716666E+09 -0.24629662E+09 0.16608426E+09 0.44631964E+08 -
0.57964308E+08 0.40402748E+08 0.31212798E+08 -0.10729906E+09 -
0.31089904E+08 0.35652288E+08 0.22765714E+08 0.12833706E+09 -0.15956869E+09 0.85907280E+08 -
0.67922704E+08
⋮
-0.15031453E+05 0.27370492E+08 0.25553324E+08 0.63892555E+07
0.48479980E+07 -0.11766875E+05 0.24108036E+08 0.60108755E+07 0.45590910E+07 -
0.11065651E+05 0.15364188E+07 0.11406334E+07 -0.27675977E+04 0.87545981E+06 -
0.19681199E+04 0.48877156E+04
RESP. MATRIX FILENAME neut.dat → Αρχείο μήτρας απόκρισης του υγρού σπινθηριστή
EH SPECTRUM COMMENT 14 MeV total → Σχόλια
test of SPHC+DIFBAS Jan. 93

```

Απόκριση του φωτός
0.18-8.5 L.U.

$m+1$ τιμές

Γεγονότα του φάσματος για
κάθε τιμή Light Unit

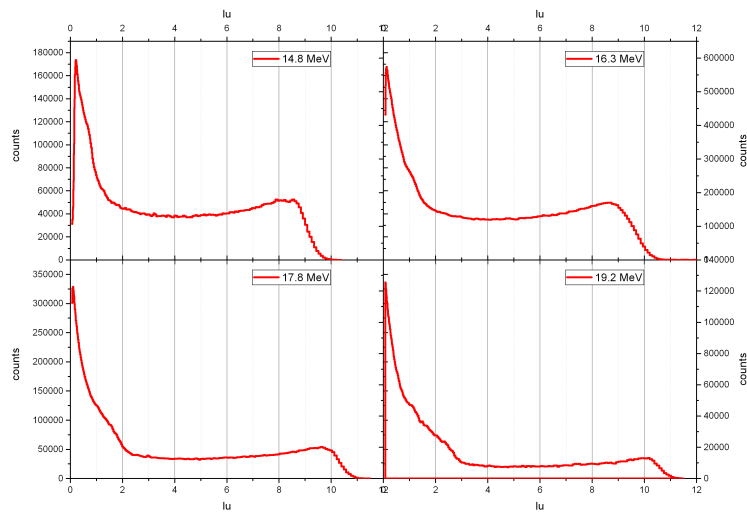
m τιμές

Τιμές συνδιακύμανσης των
γεγονότων του φάσματος

$\frac{m*(m+1)}{2}$ τιμές

Εικόνα 3.7: Δομή του αρχείου nameNN.TXT

⁴NN: Αναφέρεται στον αριθμό που δόθηκε στην τρίτη γραμμή του sphcdat.txt, δηλαδή το πρώτο κανάλι που περιέχει αξιοποιήσιμη πληροφορία



Εικόνα 3.8: Αναπαράσταση εξαγόμενων φασμάτων από το πρόγραμμα sphc.out σε κανάλια ανά μονάδα απόκρισης φωτός

1.2.3 DIFBAS

Η αποσυνέλιξη γίνεται από το εκτελέσιμο αρχείο DIFBAS.exe/DIFBAS.out, στη βάση της λογικής που περιγράφηκε παραπάνω (ενότητα 3.1.1). Η είσοδος σε αυτό το πρόγραμμα είναι τα αρχεία:

1. nameNN.TXT, που εξάχθηκε από το sphc.exe/sphc.out
2. neut.daf, που είναι η μήτρα απόκρισης του ανιχνευτή
3. difbasinp.txt, ένα αρχείο που περιέχει παραμέτρους για την αποσυνέλιξη του φάσματος.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμη η παραπάνω επεξήγηση του τελευταίου αρχείου εισόδου, του difbasinp.txt. Είναι ένα .txt αρχείο που ανά γραμμή περιέχει τα ακόλουθα δεδομένα:

1. rht14.dic: Είναι το αρχείο που περιέχει τις αρχικές τιμές συνδιακύμανσης, πριν την επεξεργασία.

2. pht14doc.txt: Είναι το αρχείο με τις τελικές τιμές συνδιακύμανσης.
3. pht14.dwl1: Είναι βοηθητικό αρχείο που αποθηκεύονται υπολογισμοί παραμέτρων κατά τη διάρκεια του προγράμματος
4. pht14.dwl2: Είναι βοηθητικό αρχείο που αποθηκεύονται υπολογισμοί παραμέτρων κατά τη διάρκεια του προγράμματος
5. Y/N: Στη γραμμή αυτή δίνεται η επιλογή για κανονικοποίηση του a priori φάσματος. Το όρισμα που δέχεται είναι Y(es) για κανονικοποίηση και N(o) για να μην γίνει κανονικοποίηση.
6. $E_{min} - E_{max}$: Εδώ τοποθετούνται τα ενεργειακά όρια του a priori φάσματος
7. δ : Όταν το πρόγραμμα διαβάσει από το αρχείο εισόδου τις τιμές της συνδιακύμανσης, τοποθετεί τις τιμές αυτές σε έναν πίνακα, τον οποίο επεξεργάζεται ανάλογα με την τιμή του δ . Εάν το δ είναι αρνητικό, ο πίνακας συνδιακύμανσης λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς όπως διαβάστηκε, εάν το δ είναι μηδέν, λαμβάνεται υπόψη μόνο η διαγώνιος του πίνακα και αν το δ είναι θετικό οι τιμές της συνδιακύμανσης δε λαμβάνονται υπόψη και το πρόγραμμα δημιουργεί gaussian συσχετίσεις.
8. Συντελεστές Μεταβλητότητας (%): Πρόκειται για τυπικές αποκλίσεις του a priori φάσματος και μπορούν να δοθούν σε βήματα, με μέγιστο αριθμό βημάτων τα 20. Σε κάθε βήμα περιέχονται δυο αριθμοί: ο πρώτος είναι η αρχική ενέργεια του συγκεκριμένου βήματος (κι αυτόματα η τελική του προηγούμενου) και ο δεύτερος είναι η τυπική απόκλιση του συγκεκριμένου βήματος.
9. Συντελεστής συσχέτισης: Είναι δυο αριθμοί, η διάταξη των οποίων είναι όμοια με αυτήν που αναφέρθηκε παραπάνω, και σχετίζονται με το fwhm και τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή.
10. Συντελεστές απόδοσης: Είναι τρεις τιμές που σχετίζονται με το fwhm σύμφωνα με τη σχέση $FWHM(L_i) = (a^2 + \frac{\beta^2}{L_i} + \frac{\gamma^2}{L_i})^{\frac{1}{2}} \cdot L_i$, όπου L_i η τιμή του φάσματος εισόδου για κάθε i bin. Οι συντελεστές αυτοί αξιοποιούνται στον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης.

Ένα ενδεικτικό αρχείο difbasinp.txt είναι το ακόλουθο:

1. pht14.dic
2. pht14doc.txt

```

3. pht14.dw1
4. pht14.dw2
5. Y
6. 0. 20.5
7. -1
8. VARIATION COEFFICIENTS [%]
   0 90.
9. STRENGTH OF CORRELATION:
   0 0.98
10. RESOLUTION FUNCTION & PARAMETERS:
    1. 12. 25
    END

```

Η εκτέλεση του προγράμματος DIFBAS.exe/DIFBAS.out δίνει ως έξοδο

1. Το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων σε διάφορες μορφές αρχείων αναφορικά με τον τρόπο αναπαράστασής του (.ftd, ps, spe)
2. Το difbplot.txt, το οποίο δίνει συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος και τα εξαγόμενα δεδομένα, καθώς και τον συντελεστή χ^2 που αναφέρεται στο βαθμό ελευθερίας της προσαρμογής.
3. Το αρχείο logbook.txt, το οποίο είναι ένα αρχείο ελέγχου κατά την εκτέλεση του DIFBAS και μπορεί να εμφανίζεται το περιεχόμενό του στην οθόνη κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης.

2 Ανάλυση Πειραματικών Φασμάτων

Η ανάλυση των ληφθέντων πειραματικών φασμάτων έγινε με εφαρμογή των αρχών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου εύρους που έγινε η γραμμική προσαρμογή για την ενεργειακή βαθμονόμηση (λήφθηκαν μετρήσεις με ενέργεια της κύριας δέσμης στο εύρος 14.8-19.2 MeV), οι συντελεστές που προκύπτουν δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστοι για εφαρμογή τους

σε ολόκληρο το ενεργειακό εύρος. Απτή απόδειξη αυτού είναι το πολύ μεγάλο αρνητικό zero shift που οδηγεί στην απόρριψη πολύ μεγάλου εύρους του ληφθέντος φάσματος καθώς αντιστοιχίζεται σε αρνητικές ενέργειες. Για το λόγο αυτό ακολουθήθηκε διαφορετική διαδικασία για την εύρεση των συντελεστών G και Z. Υπενθυμίζεται ότι οι συντελεστές προς εύρεση δίνονται από τη σχέση:

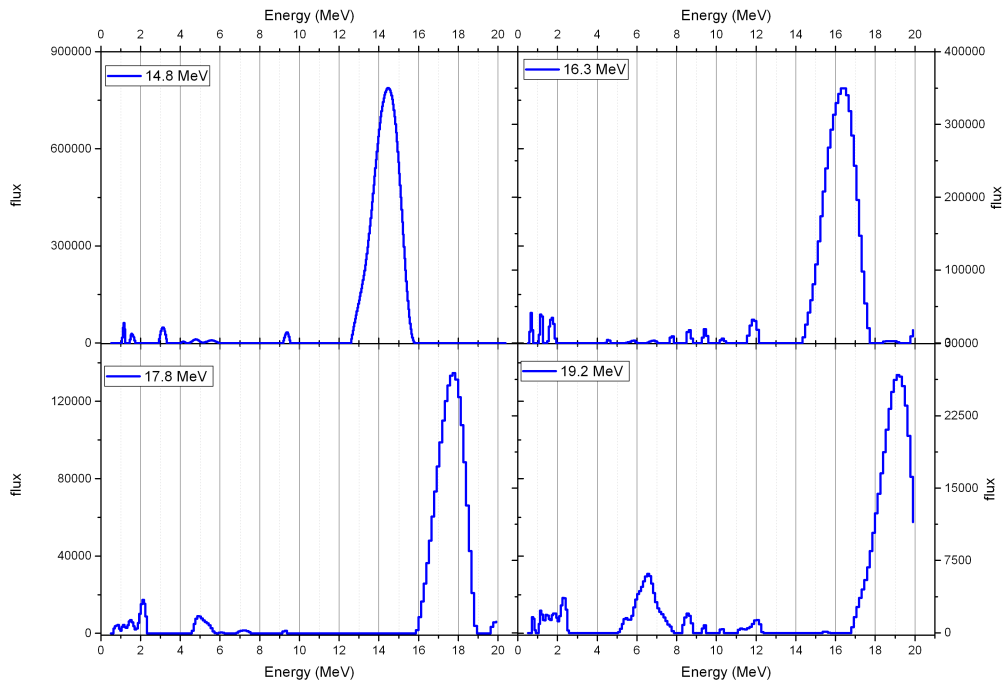
$$channel = G \cdot lu + Z$$

Από την πειραματική διαδικασία είναι γνωστή η ενέργεια της κύριας δέσμης. Με γνωστό αυτό, καθώς και το γεγονός ότι ο συντελεστής G λειτουργεί ως κλίση της γραμμικής συνάρτησης, δηλαδή ρυθμίζει το bin size κατά την αναπαράσταση των φασμάτων, χωρίς να αλλοιώνει τα ποιοτικά αποτελέσματα της αποσυνέλιξης αναφορικά με τη μορφή της εξαγόμενης ροής, γράφτηκε ένα script το οποίο τρέχει αυτόματα για 400 διαφορετικές τιμές του G τα προγράμματα sphc.out και DIFBAS.out, κάνοντας αποσυνέλιξη στα πειραματικά φάσματα. Η αντίστοιχη διαδικασία έγινε μεταβάλλοντας και το Z. Η τιμή του G που επιλέχθηκε από αυτή τη διαδικασία ήταν εκείνη για την οποία η κύρια δέσμη βρισκόταν στην αναμενόμενη ενέργεια. Η λύση βρέθηκε να είναι μοναδική για κάθε ενέργεια και για όλες τις ενέργειες οι τιμές του G είναι παραπλήσιες με στατιστικό σφάλμα μικρότερο του 0.1% και μέγιστη τυπική απόκλιση 7% μεταξύ των σημείων. Για τις σωστές τιμές του G, ο παράγοντας Z φαίνεται να μην επιδρά στις προκύπτουσες ροές. Ένα πλεονέκτημα αυτής διαδικασίας είναι το μικρό σφάλμα στις παραμέτρους, καθώς τα σφάλματα όταν τα G και Z υπολογίζονται μέσω της ενεργειακής βαθμονόμησης είναι σημαντικά μεγαλύτερα λόγω του περιορισμένου ενεργειακού εύρους που εξετάστηκε και του μικρού αριθμού πειραματικών σημείων, αυξάνοντας έτσι τη συνολική αβεβαιότητα. Τέλος, το κανάλι από το οποίο ξεκινά η αξιοποιήσιμη πληροφορία, ρυθμίστηκε ενιαία για όλα τα προς επεξεργασία φάσματα να είναι το εικοστό. Αναλυτικά, το αρχείο sphcdat.txt για κάθε ένα από τα πειραματικά φάσματα έχει την ακόλουθη μορφή:

	14.8 MeV	16.3 MeV	17.8 MeV	19.2 MeV
G, error (%)	57, 0.1	52, 0.1	51, 0.1	48, 0.1
Z, error (%)	2, 0.5	2, 0.5	2, 0.5	2, 0.5
(IS) Πρώτο έγκυρο κανάλι	20	20	20	20
Συντ. Κανονικοποίησης	0	0	0	0

Μετά την εκτέλεση του προγράμματος sphc, τοποθετήθηκαν οι παράμετροι στο αρχείο difbasinp.txt και εκτελέστηκε το κυρίως πρόγραμμα DIFBAS. Τα αποτελέσματα της αποσυνέλιξης για όλες τις ενέργειες παρουσιάζονται στην εικόνα [3.9](#)

Παρατηρούμε ότι για ενέργειες δευτερίων 1.75 MeV και 2.3 MeV η δέσμη είναι σχετικά καθαρή χωρίς μεγάλη συνεισφορά παρασιτικών νετρονίων, με εξαίρεση στις



Εικόνα 3.9: Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα

χαμηλές ενέργειες (μέχρι τα 2 MeV περίπου). Η συνεισφορά αυτή ενδεχομένως να προέρχεται από την αντίδραση $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ του δευτερίου με τον άνδρακα που βρίσκεται στα φύλλα μολυβδενίου αλλά και στο στόχο του τιτανίου και δίνει νετρόνια ενεργειών 1.6 MeV και 1.9 MeV αντίστοιχα περίπου. Αντίθετα, για ενέργειες δευτερίων δέσμης μεγαλύτερες από 2.8 MeV αρχίζουν να εμφανίζονται επιπλέον παρασιτικές αντιδράσεις, που ενδεχομένως συνδέονται με την αντίδραση $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ με δευτέρια που έχουν επικαθήσει στο στόχο, ή στο Μο που βρίσκεται πριν το στόχο. Τέλος, για ενέργεια 3.6 MeV δευτερίων ενδέχεται να συνεισφέρει και η αντίδραση $^{19}\text{F}(d, n)^{20}\text{Ne}$ που δίνει νετρόνια υψηλών ενεργειών στα 13 MeV, η $^{23}\text{Na}(d, n)^{24}\text{Mg}$ με αντίστοιχη συμπεριφορά, είτε η $^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$ που συνεισφέρει νετρόνια στα 9 περίπου MeV, με δεδομένο ότι νάτριο, φθόριο και άζωτο αποτελούν συνηθισμένες προσμείξεις ελαφρών στοιχείων στους υπό κατασκευή στόχους, είτε ακόμα και αντιδράσεις $\text{Ti}(d, n)$ σε όλα τα σταθερά ισότοπα του τιτανίου οι οποίες επίσης οδηγούν σε παραγωγή νετρονίων υψηλών ενεργειών. Σε κάθε περίπτωση όμως, η ενέργεια δευτερίων των 3.6 MeV βρίσκεται κοντά στο φράγμα δυναμικού Coulomb για πυρήνες με $Z < 22$ ή και υπερβαίνει αυτό για πιο ελαφρείς πυρήνες με $Z < 14$, γεγονός που ενισχύει την προαναφερθείσα εκτίμηση.

2.1 Κριτήρια παραμέτρων αποσυνέλιξης

Η διαδικασία της αποσυνέλιξης των φασμάτων θα πρέπει να εκτελείται έχοντας πάντα υπόψη τα αναμενόμενα φυσικά αποτελέσματα, στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό, και με βάση αυτά να απορρίπτονται, ή όχι οι μαθηματικές λύσεις που προκύπτουν. Το γεγονός αυτό υποδεικνύεται και από τα εγχειρίδια του προγράμματος, και για το λόγο αυτό υπάρχουν παράμετροι που μπορούν να επιδράσουν στην προσαρμογή που κάνει το DIFBAS στα πειραματικά φάσματα. Παρακάτω γίνεται μια διερεύνηση αυτών των παραμέτρων με σκοπό να αποδειχθεί ότι η επιλογή που έγινε ήταν η βέλτιστη δυνατή.

2.1.1 Χρήση των εξαγόμενων φασμάτων ως είσοδος στο DIFBAS

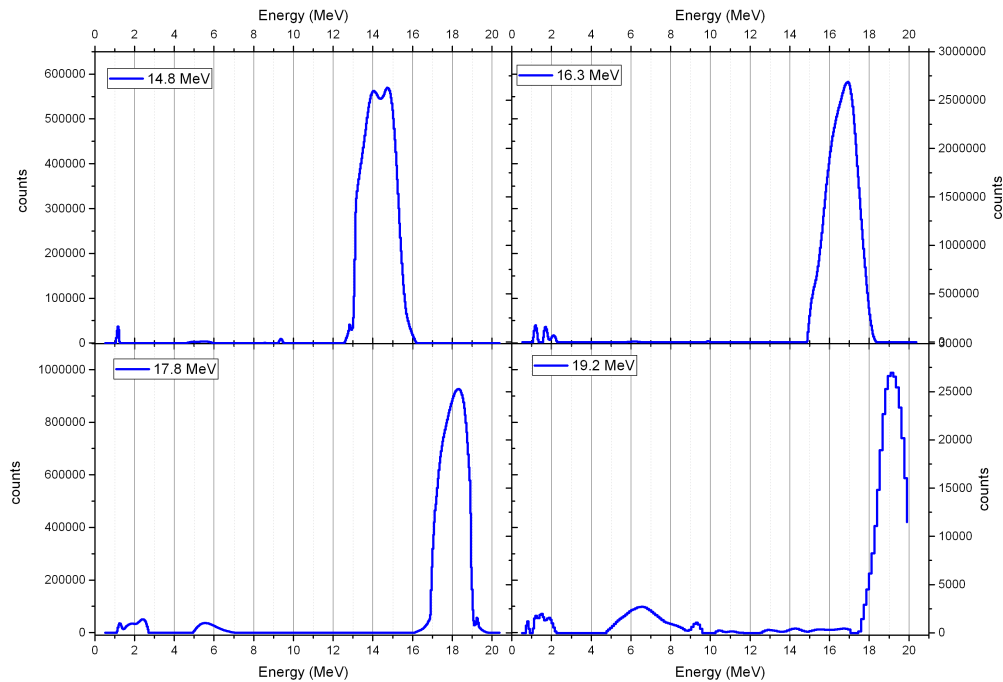
Το DIFBAS δίνει τη δυνατότητα αντί να λάβει ως είσοδο τις στατιστικές παραμέτρους του αρχείου difbasinp.txt, να χρησιμοποιήσει ως είσοδο ένα αναμενόμενο ή γνωστό φάσμα.⁵ Αρχικά δόθηκαν ως είσοδος τα αποτελέσματα της πρώτης αποσυνέλιξης (αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω) κι έγινε εκ νέου αποσυνέλιξη πάνω σε αυτά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 3.10

Παρατηρούμε ότι η μορφή τους προσεγγίζει πολύ τα αρχικά και η παρεχόμενη πληροφορία δεν διαφέρει αναφορικά με τη συνεισφορά των παρασιτικών νετρονίων.

Στη συνέχεια αλλάχθηκαν οι συντελεστές βαρύτητας ανά ενεργειακό εύρος. Με δεδομένο ότι στα αναμενόμενα αποτελέσματα γνωστή είναι μόνο η ενέργεια της κύριας δέσμης, δόθηκε βάρος της τάξης του 90% για όλες τις ενέργειες γύρω από την ενέργεια της κύριας δέσμης και 15% για όλο το υπόλοιπο φάσμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω (εικόνα 3.11) και δείχνουν ότι αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη, καθώς η κύρια δέσμη μετατοπίζεται ενεργειακά και επιπλέον δίνεται εκ των πραγμάτων μικρότερο στατιστικό βάρος στην κατανομή ενεργειών των παρασιτικών νετρονίων, η γνώση της οποίας είναι κρίσιμη για το χαρακτηρισμό της παραγόμενης δέσμης. Τέλος, για την ενέργεια των 19.2 MeV νετρονίων, λόγω του ότι αυτή βρίσκεται κοντά στο τέλος της συνάρτησης απόκρισης, φαίνεται να υπάρχει αδυναμία προσαρμογής του κώδικα.

Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος (a priori) φάσματα που προκύπτουν από προγράμματα προσομοίωσης, το Neusdesc και μέσω MCNP. Το Neusdesc, ωστόσο,

⁵Στην περίπτωση που δεν υπάρχει γνωστό (a priori) φάσμα εισάγεται η λέξη const και το ίδιο το πρόγραμμα θεωρεί είσοδο ένα "επίπεδο" φάσμα.

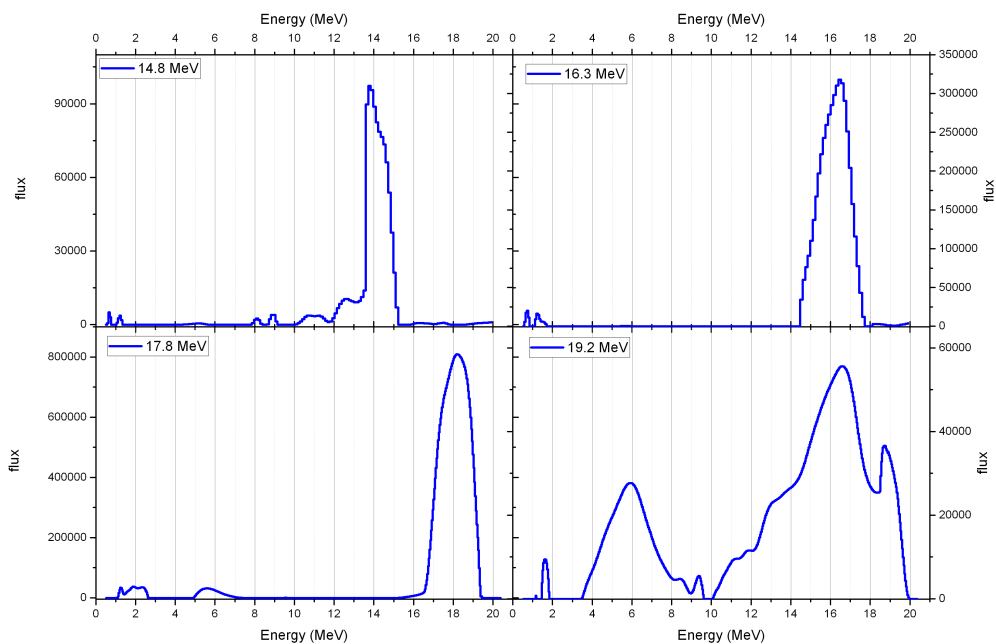


Εικόνα 3.10: Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα με *a priori* προηγούμενο αποσυνελιγμένο φάσμα

εξάγει μόνο ροή για την κύρια δέσμη, με αποτέλεσμα το DIFBAS να προσαρμόζει την αποσυνέλιξη στο φάσμα εισόδου χωρίς να παρέχει καθόλου πληροφορίες για τα παρασιτικά νετρόνια. Η προσομοίωση πάνω στα φάσματα του MCNP⁶, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.12 για τις τρεις πρώτες ενέργειες, καθώς δεν ήταν εφικτή η προσαρμογή στην ενέργεια των 19.2 MeV. Λόγω του τρόπου λειτουργίας του DIFBAS, η προσαρμογή πάνω στα αποτελέσματα του MCNP δίνει εύρος κύριας κορυφής αφύσικα μικρό, καθώς και πολλαπλές στενές κορυφές στην κύρια δέσμη, που απαιτούν ομαλοποίηση στην προσαρμογή. Το πρόβλημα αυτό σχετίζεται μάλλον με το μικρό binning των αποτελεσμάτων του MCNP.

Όλες οι παραπάνω δοκιμές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη επιλογή για την αποσυνέλιξη των φασμάτων η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια μαθηματική λύση χωρίς μεγάλες σχετικές μεταβολές είναι αυτή που επιτρέπει στο πρόγραμμα να επεξεργαστεί ολόκληρο το φάσμα με ίσα στατιστικά βάρη. Επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αναπαραγωγή της ροής επιτρέποντας στο πρόγραμμα να αξιοποιήσει πλήρως

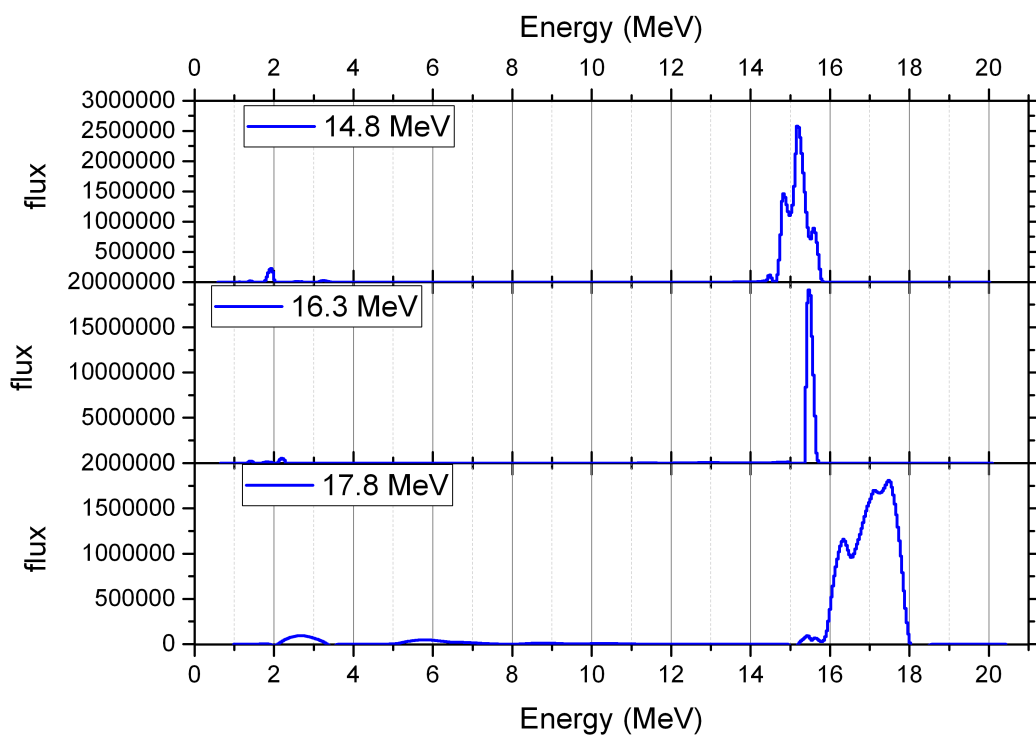
⁶Η προσομοίωση σε MCNP για την αναμενόμενη ροή έγινε από την δρ. Αντιγόνη Καλαμαρά



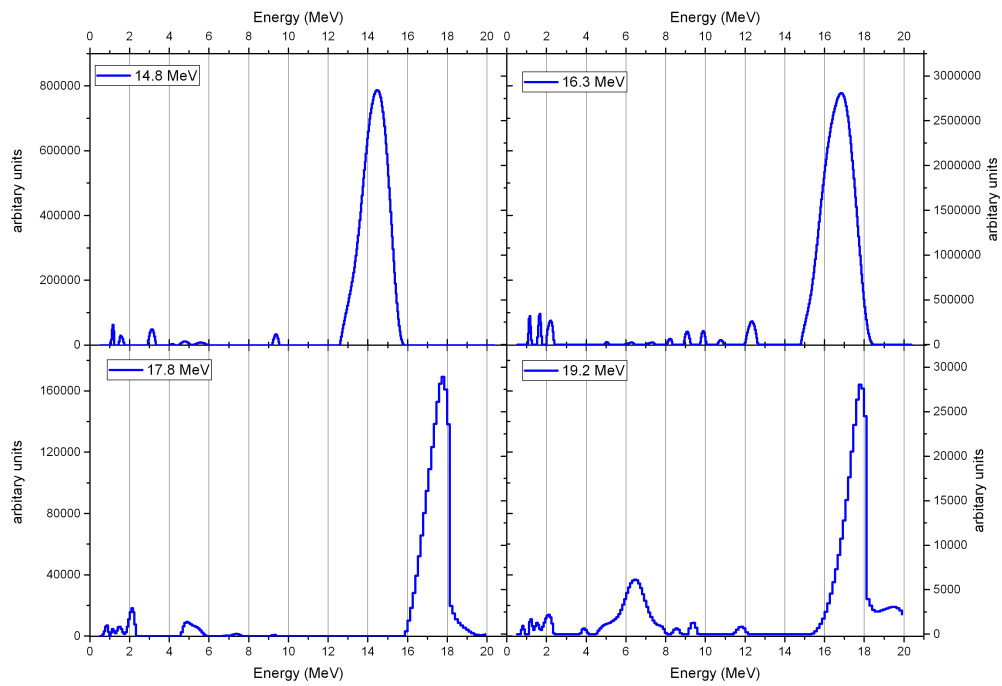
Εικόνα 3.11: Αποσυνελεγμένα πειραματικά φάσματα με εισαγωγή διαφορετικού βάρους ανά ενεργειακό εύρος

το πειραματικό φάσμα. Με δεδομένο ότι όλες οι άλλες δοκιμές που έγιναν αφορούσαν σε προσομοιώσεις που δεν μπορούσαν να αναπαράξουν σωστά τα παρασιτικά νετρόνια, και στη βάση αυτή το DIFBAS στηριζόμενο σε αυτές δεν μπορούσε να προσαρμόσει σωστά το πειραματικό φάσμα, ενισχύεται η άποψη ότι το αποτέλεσμα που επιλέχθηκε είναι το βέλτιστο.

Για την επιβεβαίωση της παραπάνω άποψης, αλλά και για τον έλεγχο της ικανότητας σύγκλισης των αποτελεσμάτων, έγινε ένας τελευταίος έλεγχος δίνοντας στατιστικό βάρος 90% στην περιοχή των παρασιτικών νετρονίων και αντίστοιχα 15% για το εύρος της κύριας δέσμης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 3.13. Η αναπαραγωγή των παρασιτικών είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα και η απόκλιση που εμφανίζεται στην κύρια δέσμη για τις ενέργειες νετρονίων 17.8 MeV και 19.2 MeV σχετίζεται και με τη δυσκολία σύγκλισης λόγω του ότι βρίσκεται στο τέλος των τιμών του πίνακα απόκρισης σε συνδυασμό με το μικρό στατιστικό βάρος.



Εικόνα 3.12: Αποσυνελεγμένα πειραματικά φάσματα με *a priori* τα αποτελέσματα του MCNP



Εικόνα 3.13: Αποσυνελιγμένα πειραματικά φάσματα με μεγάλο στατιστικό βάρος στην περιοχή των παρασιτικών νετρονίων

Κεφάλαιο 4

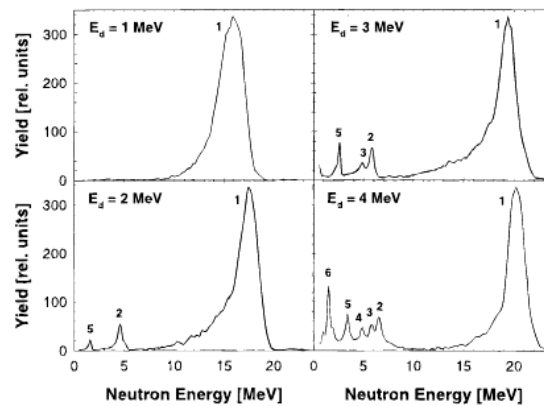
Συμπεράσματα

Κατά τη μελέτη του υγρού σπινθηριστή BC501A επιβεβαιώθηκε η εξαιρετική ικανότητά του να διαχωρίζει τα νετρόνια από τα φωτόνια. Οι περιορισμοί στην αξιοποίηση αυτής της ικανότητας τίθενται από τις ηλεκτρονικές διατάξεις που είναι διαδέσιμες. Τα σύγχρονα ψηφιακά ηλεκτρονικά μεγιστοποιούν την ικανότητα διαχωρισμού και καταγραφής χαμηλοενεργειακών νετρονίων χωρίς να καταγράφονται φωτόνια, και η χρήση τους θα βελτιώνει αισθητά την ποιότητα των πειραματικών φασμάτων που λήφθηκαν. Επιπλέον, τα όρια τάσεων που τέθηκαν στις ηλεκτρονικές μονάδες στο παρόν πείραμα, και ο καθορισμός τους με βάση την ενέργεια των φωτονίων ($eeMeV$), προσδίδει αβεβαιότητα στο κατώτερο όριο καταγραφής ενεργειών νετρονίων. Για τον ακριβή προσδιορισμό του ορίου αυτού απαιτείται πειραματικός προσδιορισμός μέσω αντιδράσεων που δίνουν μόνο χαμηλοενεργειακά νετρόνια, όπως π.χ. η αντίδραση ${}^7Li(p, n)$.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, πέραν της ικανότητας ανακατασκευής του προφίλ της δέσμης των νετρονίων, μπορεί να αξιοποιηθεί και ως online monitor της παραγόμενης ροής, δίνοντας την ικανότητα στον πειραματιστή να ελέγχει τις μεταβολές στη δέσμη. Η λειτουργία αυτή δοκιμάστηκε κι επιβεβαιώθηκε επικουρικά σε μια σειρά άλλων πειραμάτων κι αποδείχθηκε ικανή να δίνει περιγραφή, καθώς και έλεγχο της δέσμης. Η αναβαθμισμένη ικανότητα του ανιχνευτή BC501A να χαρακτηρίζει αλλά και να ελέγχει τη δέσμη τον καθιστά καλύτερο από το προηγούμενα αξιοποιούμενο monitor που ήταν ένας ανιχνευτής BF_3 και αναμένεται να τον αντικαταστήσει μόνιμα στα μελλοντικά πειράματα νετρονίων που θα διεξάγονται στη γραμμή νετρονίων του "Tandem" στο ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος".

Κυριότερα, μελετήθηκε η ενεργειακή κατανομή της δέσμης των νετρονίων. Αναφο-

ρικά με το προφίλ της δέσμης επιβεβαιώθηκε η σχετική μονοχρωματικότητα της δέσμης για χαμηλές ενέργειες δευτερίων, η οποία επηρεαζόταν από την αύξηση της ενέργειας αυτών, η οποία οδηγούσε σε μια σειρά από παρασιτικές αντιδράσεις παραγωγής δευτερογενών νετρονίων που σχετίζονταν με τις προσμίξεις του στόχου και τα υλικά της γραμμής. Επιβεβαίωση των συμπερασμάτων αναφορικά με την προέλευση των παρασιτικών νετρονίων μπορεί να αντληθεί κι από την αναφορά [27], που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1 και αφορά σε μετρήσεις που έγιναν με Time of Flight για παραπλήσιες ενέργειες δευτερίων πάνω σε στόχο τριτωμένου τιτανίου.



Εικόνα 4.1: Αποτελέσματα χαρακτηρισμού δέσμης νετρονίων με τη μέθοδο ToF

Ο κώδικας DIFBAS είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο που μπορεί να παρέχει δυνατότητα αποσυνέλιξης των φασμάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς είναι ταχύ στην εκτέλεσή του (μερικά δευτερόλεπτα) και έχει τη δυνατότητα να αυτοματοποιηθεί περαιτέρω ώστε να επεξεργάζεται ακόμα ταχύτερα πολλαπλές ενέργειες κατά τη διάρκεια πειραμάτων. Τέλος, αναφορικά με τις λύσεις που δίνει, αποδείχθηκε ότι είναι μοναδικές, στηριζόμενοι στην ενέργεια της κύριας δέσμης, αλλά και μαθηματικά συνεπείς, καθώς τα μαθηματικά αποτελέσματα της προσαρμογής που στηρίχθηκε στα "ίσα βάρη" σε κάθε ενέργεια νετρονίων συγκλίνουν με δεδομένο ότι αξιοποιώντας τα ίδια δεδομένα ως είσοδο, το αποτέλεσμα είναι παραπλήσιο.

Βιβλιογραφία

- [1] N. Tsoulfanidis and S. Landsberger. *Measurement and Detection of Radiation*. CRC Press, 2015.
- [2] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley and Sons Inc.
- [3] Introduction to amplifiers. Technical report.
- [4] Ortec. *Quad Timing Filter Amplifier*.
- [5] Fast-time discriminator introduction. Technical report.
- [6] Ortec. *Model CF8000 Octal Constant Fraction Discriminator Operating and Service Manual*.
- [7] Ortec. *Model 460 Delay Line Amplifier Operating and Service Manual*.
- [8] Sca-introduction. Technical report.
- [9] Ortec. *Introduction Manual 420A Timing Single-Channel Analyzer*.
- [10] R. L. Lehman. The origin of neutron groups in be(a,n) sources. *Nuclear Instruments and methods*, 60(3):253–260, April 1968.
- [11] E. A. Lorch. Neutron spectra of am/b, am/be, am/f, cm/be, pu/c and cf isotopic neutron sources. *International Journal of applied Radiation and Isotopes*, 24:585–591, 1973.
- [12] Arun Kumar and P.S. Nagarajan. The neutron spectrum of am-be neutron sources. *Nuclear Instruments and methods*, 140:175–179, 1977.
- [13] F. D. Brooks. Development of organic scintillators. *Nuclear Instruments and methods*, 162:477–505, 1979.

- [14] J. B. Birks. Pergamon Press.
- [15] R. B. Galloway and H. Savalooni. The dependence on scintillator size of the response of ne213 to electrons and protons. *Nuclear Instruments and methods*, 199:549–555, 1982.
- [16] N. Patronis et al. Aspects of geant4 monte-carlo calculations of the bc501a neutron detector. *Nuclear Instruments and methods*, 578:351–355, 2007.
- [17] M. Moszynski et al. Study of n-gamma discrimination with ne213 and bc501a liquid scintillators of different size. *Nuclear Instruments and methods*, 350:226–234, 1994.
- [18] PHYSTAT2003. *Variational Methods in Bayesian Deconvolution*, September 2003.
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Bayesian_inference. Bayesian inference.
- [20] Milos Tichy. Bayesian approach to neutron spectrum adjustment. *Nuclear Instruments and methods in Physics Research*, A(267):502–508, 1988.
- [21] Manfred Matzke. Unfolding methods.
- [22] Andrew Gelman, John B. Carlin, Hal S. Stern, and Donald B. Rubin. *Bayesian Data Analysis*. Chapman and Hall/CRC, 2004.
- [23] Lieven Vandenberghe. Cholesky factorization, 2003.
- [24] Nicholas J. Higham. Cholesky factorization. *Wires Computational Statistics*, 1, 2009.
- [25] Ευανδία Μάρα. Μελέτη του Υγρού Σπινθιριστή bc501a. Master’s thesis, ΣΕΜΦΕ, 2011.
- [26] Milos Tichy. *Difbas: A Bayesian Approach to Unfolding a Neutron Spectrum*, 1993.
- [27] A.Fessler, A.J.M Plompen, D.L. Smith, J.W. Meadows, and Y. Ikeda. Neutron activation cross-section measurements from 16 to 20 mev for isotopes of f, na, mg, al, si, p, cl, ti, v, mn, fe, nb, sn, and ba. *Nuclear Science and Engineering*, 134:171–200, 2000.
- [28] Ronald Christensen, Wesley Johnson, Adam Branscum, and Timothy E. Hanson. *Bayesian Ideas and Data Analysis: An introduction for Scientists and Statisticians*. CRC Press, 2011.

- [29] G. Larry Bretthorst. *Bayesian Interpolation and Deconvolution*. Washington University, 1992.
- [30] Xie Xufei, Yuan Xi, Zhang Xing, Fan Tieshuan, and Li Xiangqing. Calibration and unfolding of the pulse height spectra of liquid scintillator-based neutron detectors using photon sources. *Plasma Science and Technology*, 14(6), June 2012.
- [31] An OECD/NEA Report. *Neutron Sources For Basic Physics and Applications*. Pergamon Press, 1983.