



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΗΛΙΩΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΥΝΤΗΞΗΣ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ
ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ»**

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΤΗΞΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Ε. Ν. ΓΑΖΗΣ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ε. Ν. ΓΑΖΗΣ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Θ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ, ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ Γ', Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. ΕΚΕΦΕ 'Δ'

Ι. ΚΟΜΙΝΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΗΛΙΩΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΥΝΤΗΞΗΣ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ
ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ»**

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΤΗΞΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Ε. Ν. ΓΑΖΗΣ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ε. Ν. ΓΑΖΗΣ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Θ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ, ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ Γ', Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. ΕΚΕΦΕ 'Δ'

Ι. ΚΟΜΙΝΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του ερευνητικού αντιδραστήρα του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών, Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας (Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.) του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, σε συνεργασία με τη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Με το πέρασ της εργασίας αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στήριξαν αυτή μου την προσπάθεια και συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Θερμές ευχαριστίες αξίζουν στον Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π., Ε. Ν. Γαζή για την αμέριστη ενθάρρυνσή του, αλλά και συνολικά για το συντονισμό της προσπάθειας. Η διάθεση που είχε να στηρίζει έμπρακτα κάθε μου επιλογή, η εμπιστοσύνη που μου έδειξε και η όρεξή του να διευρύνει τους ορίζοντές μου, ήταν για μένα συγκινητική. Μου έδωσε κουράγιο, ακόμη μεγαλύτερη επιθυμία για την συνέχιση των σπουδών μου και ανέδειξε ακόμη περισσότερο στα μάτια μου, την ομορφιά της συνεργασίας στο χώρο της επιστήμης και της έρευνας.

Ακόμη, οφείλω ένα ιδιαίτερα μεγάλο ευχαριστώ στην Ερευνήτρια Γ' του Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Βασιλοπούλου Θεοδώρα, για τη συμπαράσταση και την κατανόησή της σε όλα τα στάδια αυτής της προσπάθειας και την αφιέρωση του προσωπικού της χρόνου σε κάθε μου πρόβλημα. Το κλίμα συνεργασίας και συναδελφικότητας που δημιούργησε από την αρχή, οι συνθήκες στις οποίες εργαζόμασταν και η εκτίμηση που μου έδειξε, έκαναν τη μελέτη αυτή ευχάριστη, δημιουργική και παραγωγική. Αποτελεί παράδειγμα στο χώρο που έχει επιλέξει να εργάζεται και προσφέρει απλόχερα το χρόνο και τις γνώσεις της σε όλους τους συνεργάτες της.

Ειλικρινά ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π., Ι. Κομίνη, για την άριστη στάση του απέναντί μου. Παρά το γεγονός ότι δε γνώριζε σε ικανοποιητικό βαθμό τις επιδόσεις μου σε προπτυχιακό επίπεδο και παρόλες τις τεχνικές δυσκολίες που παρουσιάστηκαν στην πορεία, μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ σε ένα θέμα που με γοήτευε. Χωρίς τη συμβολή του, πιθανότατα η όμορφη περίοδος της εργασίας μου στο Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. και η γνωριμία μου με όλο το αξιόλογο επιστημονικό δυναμικό του, να μην είχε ξεκινήσει ποτέ.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω ιδιαίτερα, τον ερευνητή Α' του Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Ι.Ε. Σταματελάτο, για τις παρατηρήσεις και τις διορθώσεις που μου έκανε, το ενδιαφέρον που έδειξε σε οτιδήποτε με απασχόλησε, ακόμη και έξω από τα στενά όρια της εργασίας αυτής. Δεν είναι μόνο ένας αξιόλογος επιστήμονας, αλλά και ένας εξαιρετικός άνθρωπος που ξεχωρίζει στον χώρο αυτό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος ζήτημα σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης είναι η μελέτη των διαφυγόντων νετρονίων, των νετρονίων δηλαδή που παράγονται από τις αντιδράσεις σύντηξης στην πηγή του πλάσματος και διαφεύγουν στη συνέχεια στο χώρο που περιβάλλει τον αντιδραστήρα (tokamak). Ο προσδιορισμός της ροής των νετρονίων στο εξωτερικό του tokamak, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχουν διάκενα στη βιολογική θωράκιση, αλλά και η εκτίμηση του ρυθμού δόσης στις περιοχές αυτές, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον από τη σκοπιά της ακτινοπροστασίας.

Στην παρούσα εργασία, η τεχνική της νετρονικής ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων σε διάφορα σημεία του κτιρίου που στεγάζει τον αντιδραστήρα σύντηξης Joint European Torus (JET). Ανιχνευτικές διατάξεις, αποτελούμενες από μεταλλικά ελάσματα τοποθετημένα μέσα σε κυλίνδρους πολυαιθυλενίου, ακτινοβολήθηκαν στο πεδίο νετρονίων του JET κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του με πηγή πλάσματος Δευτερίου-Δευτερίου (Deuterium-Deuterium, D-D). Μετά το πέρας της ακτινοβολήσεως, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας στο εργαστήριο του ερευνητικού αντιδραστήρα του Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.-ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος προκειμένου να προσδιοριστούν τα επίπεδα ενεργότητας των ελασμάτων και με βάση αυτά να εξαχθούν οι τιμές της ροής νετρονίων στα αντίστοιχα σημεία ενδιαφέροντος.

Η χαρτογράφηση ως προς τις ροές νετρονίων του κτιρίου του αντιδραστήρα σύντηξης JET συμβάλλει, από άποψη ακτινοπροστασίας, στις συνεχείς προσπάθειες για τη βελτιστοποίηση της θωράκισης και την ασφάλεια του προσωπικού. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρέχουν σημαντικά πειραματικά δεδομένα, που θα χρησιμοποιηθούν για την επιβεβαίωση των υπολογιστικών εργαλείων και κωδίκων που αξιοποιούνται στο JET και σε μελέτες τεχνολογίας σύντηξης.

ABSTRACT

An issue of utmost importance in a fusion reactor is the study of escaping neutrons, namely the neutrons that are produced in the plasma source and then escape to the area surrounding the tokamak. The evaluation of neutron fluence in areas far from the plasma source, especially along large ducts and other shielding penetrations, and the estimation of the corresponding dose rates, is a challenging study, which is however very important for radiation protection purposes.

In the present study, neutron activation analysis technique was used in order to determine neutron fluence in several positions inside the Torus Hall of the Joint European Torus (JET). Detector assemblies, composed of metallic foils within polyethylene cylinders, were irradiated with neutrons during JET operation with Deuterium-Deuterium plasma source. After the completion of irradiation, gamma ray measurements were performed at the research nuclear reactor lab of INRASTES-NCSR Demokritos, in order to evaluate the activity induced in each foil and derive the neutron fluence values at the respective irradiation positions in the Torus Hall.

Neutron fluence assessment in the JET Hall contributes to the continuous effort for radiation protection and biological shielding optimization. Furthermore, the results of this study provide important experimental data that will be used for the validation of computational tools and codes used at JET and in fusion technology studies.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή	
1.1 Σκοπός.....	1
1.2 Δομή της εργασίας.....	2
2. Θερμοπυρηνική σύντηξη	
2.1 Το περιβάλλον της σύντηξης.....	3
2.1.1 Βασικές αντιδράσεις.....	6
2.1.2 Τα πλεονεκτήματα και η αναγκαιότητα της σύντηξης.....	8
2.2 Ο αντιδραστήρας σύντηξης Joint European Torus (JET).....	9
3. Νευτρονική ενεργοποίηση	
3.1 Τεχνική και στάδια.....	11
3.2 Αλληλεπίδραση νευτρονίων με την ύλη.....	13
3.3 Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη.....	14
3.3.1 Αυτοαπορρόφηση ακτίνων-γ.....	16
3.3.2 Φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.....	16
4. Ακτινοβόληση σε πεδίο νευτρονίων	
4.1 Δείγματα	18
4.2 Ακτινοβόληση των δειγμάτων.....	19
5. Μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας	
5.1 Ανιχνευτική διάταξη.....	24
5.2 Απόδοση Φωτοκορυφής	26
5.3 Μετρήσεις	28
6. Ανάλυση	
6.1 Υπολογισμός ενεργότητας.....	31
6.1.1 Διορθώσεις.....	32
6.2 Υπολογισμός ροής νευτρονίων.....	33
6.3 Διάδοση σφαλμάτων και υπολογισμός αβεβαιότητας.....	35

7. Αποτελέσματα και συζήτηση

7.1 Συντελεστές διόρθωσης.....	36
7.2 Ενεργότητα.....	38
7.3 Ροή νετρονίων.....	40
7.4 Συζήτηση.....	41

8. Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

Παράρτημα

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος ζήτημα σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης είναι ο προσδιορισμός της ροής των νετρονίων στο εσωτερικό και εξωτερικό του tokamak. Ιδιαίτερα σε ένα τέτοιο περιβάλλον, όπως η αίθουσα στην οποία στεγάζεται ένας πυρηνικός αντιδραστήρας σύντηξης, προκύπτουν προβλήματα εκτίμησης και υπολογισμού δόσεων ή και επιπέδων ενεργότητας. Η συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, μιας και στις περιοχές αυτές, είναι απαραίτητη η παρουσία εξειδικευμένου επιστημονικού προσωπικού ανά τακτά χρονικά διαστήματα και επομένως είναι αναγκαίο να τηρούνται οι προβλεπόμενες αρχές της ακτινοπροστασίας. Σε αυτό συμβάλλει η κατάλληλη βιολογική θωράκιση, η οποία προσδιορίζεται και ελέγχεται με βάση τη δυνατότητά της να περιορίζει τις ροές των νετρονίων και να μειώνει τα επίπεδα ακτινοβολίας κάτω από τα περιοριστικά όρια και όσο το δυνατό είναι λογικό να επιτευχθεί σύμφωνα με την αρχή της βελτιστοποίησης της ακτινοπροστασίας.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ροής νετρονίων στο κτίριο του αντιδραστήρα σύντηξης Joint European Torus (JET). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση της τεχνικής της νετρονικής ενεργοποίησης. Σκοπός της εργασίας είναι να εκτιμηθούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία οι ροές των νετρονίων σε περιοχές της αίθουσας που στεγάζει τον συγκεκριμένο αντιδραστήρα. Η εκτίμηση των νετρονικών ροών είναι αναγκαία, ώστε να εξαχθεί ένα σαφές συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητα της δομής της θωράκισης, αλλά και για τα επίπεδα ενεργοποίησης των υλικών θωράκισης, του εξοπλισμού και οργάνων που βρίσκονται εγκατεστημένα στο χώρο αυτό, από τα διαφυγόντα νετρόνια. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν μετέπειτα να ελέγχονται και να περιορίζονται στα προβλεπόμενα περιοριστικά επίπεδα οι ροές και οι αντίστοιχες δόσεις, με γνώμονα την ασφάλεια του προσωπικού, κατά τη διάρκεια έκθεσής του στην ακτινοβολία.

Υπογραμμίζεται δε, ότι η αναγκαιότητα των αποτελεσμάτων αυτών, προκύπτει και από το γεγονός, ότι τα μέχρι στιγμής πειραματικά δεδομένα στη βιβλιογραφία έχουν προκύψει από μελέτες σε άλλα περιβάλλοντα, όπως πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης και επομένως σε ένα περιβάλλον σύντηξης χρειάζεται εκ νέου έλεγχος και επιβεβαίωση αυτών. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της εργασίας θα προσφέρουν πειραματικές μετρήσεις ως προς τις οποίες θα συγκριθούν αποτελέσματα υπολογιστικών κωδίκων, που στοχεύουν στην προσομοίωση των πεδίων νετρονίων εξωτερικά της βιολογικής θωράκισης του JET και σε απόσταση από την πηγή πλάσματος.

1.2 Δομή της εργασίας

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται αρχικά το φαινόμενο της θερμοπυρηνικής σύντηξης και στη συνέχεια η δυνατότητα αξιοποίησής της από τον άνθρωπο με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Κεφάλαιο 2). Παρατίθενται οι βασικές συνθήκες που απαιτούνται και το περιβάλλον στο οποίο η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί. Ακόμη, γίνεται αναφορά στον πυρηνικό αντιδραστήρα σύντηξης JET, στον οποίο διεξάχθηκε η συγκεκριμένη μελέτη. Στη συνέχεια, αναλύεται η τεχνική της νετρονικής ενεργοποίησης (Κεφάλαιο 3), στην οποία βασίστηκε ο υπολογισμός της ροής των νετρονίων, τα βασικά της στάδια, αλλά και τα φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση φωτονίων και νετρονίων με την ύλη. Ακολουθεί η περιγραφή του πειράματος που διεξάχθηκε, το οποίο περιλάμβανε την ακτινοβολή των προς μελέτη δειγμάτων στο περιβάλλον του αντιδραστήρα JET και τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.-ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος (Κεφάλαια 4 και 5 αντίστοιχα). Συζητούνται ακόμη, οι αρχές της γ-φασματοσκοπίας και παρουσιάζεται η ανιχνευτική διάταξη που αξιοποιήθηκε. Η εργασία συνεχίζει με την παράθεση των μαθηματικών σχέσεων και τύπων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών (Κεφάλαιο 6). Στο Κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων, και αφορούν τα επίπεδα ενεργότητας των δειγμάτων και τις τιμές της ροής νετρονίων που προσδιορίστηκαν. Τέλος, γίνεται συζήτηση πάνω στα αποτελέσματα και παρατίθενται τα συμπεράσματα από τη συνολική μελέτη (Κεφάλαιο 8). Η εργασία ολοκληρώνεται με τις βιβλιογραφικές πηγές στις οποίες αυτή στηρίχτηκε, αλλά και με ένα παράρτημα που περιλαμβάνει ορισμένες μαθηματικές σχέσεις και μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

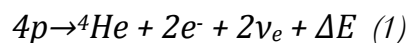
2. Θερμοπυρηνική σύντηξη

2.1 Το περιβάλλον της σύντηξης

Η αξιοποίηση της θερμοπυρηνικής σύντηξης από τον άνθρωπο, βασίστηκε στην ιδέα για παραγωγή ενέργειας με μία διαδικασία, όμοια με αυτήν που διεξάγεται στον ήλιο και τα άστρα.

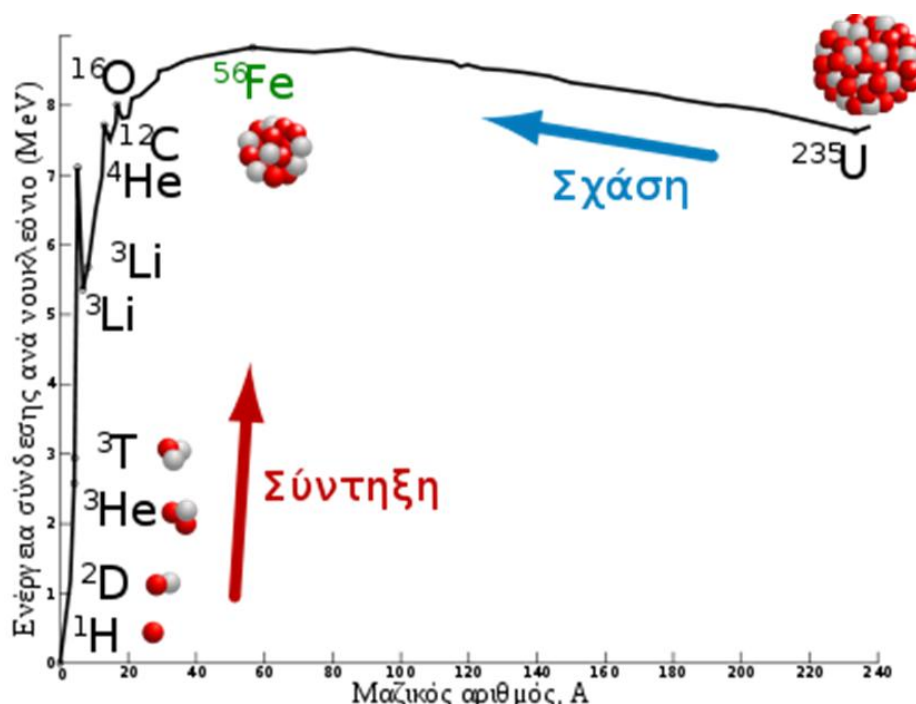
Πιο συγκεκριμένα, στον ήλιο και στα άστρα, πραγματοποιούνται διεργασίες νουκλεοσύνθεσης, απαραίτητες για την τροφοδότησή τους με ενέργεια και τη συνέχιση της ζωής τους.

Τυπικό παράδειγμα νουκλεοσύνθεσης είναι ο σχηματισμός πυρήνα ηλίου (${}^4\text{He}$) από τη συνένωση τεσσάρων πρωτονίων.



όπου ΔE η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση, δηλαδή περίπου 24.69 MeV.

Πιο συγκεκριμένα, η σύντηξη αποτελεί μία αντίδραση κατά την οποία δύο πυρήνες ελαφριών ατόμων, συντήκονται, δηλαδή συγχωνεύονται, για να σχηματιστεί ένας βαρύτερος πυρήνας, απελευθερώνοντας μεγάλα ποσά ενέργειας. Η διαδικασία αυτή διαφέρει από αυτήν της σχάσης, η οποία αναφέρεται σε βαρείς πυρήνες που σχάζονται, δηλαδή διαχωρίζονται σε δύο ελαφρύτερους, με απελευθέρωση ενέργειας. Στο Γράφημα 1, παρουσιάζεται η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του μαζικού αριθμού νουκλεονίων. Παρατηρείται, ότι η πυρηνική σύντηξη αφορά ελαφρείς πυρήνες, με μικρό δηλαδή αριθμό νουκλεονίων στον πυρήνα τους, ενώ η σχάση πραγματοποιείται σε βαρείς πυρήνες, όπως το ουράνιο-235 (${}^{235}\text{U}$) ή το πλουτώνιο-239 (${}^{239}\text{Pu}$). Όπως φαίνεται στο Γράφημα 1, ο πυρήνας με τη μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι ο σίδηρος-56 (${}^{56}\text{Fe}$).



Γράφημα 1: Γράφημα της ενέργειας σύνδεσης των νουκλεονίων συναρτήσει του μαζικού αριθμού

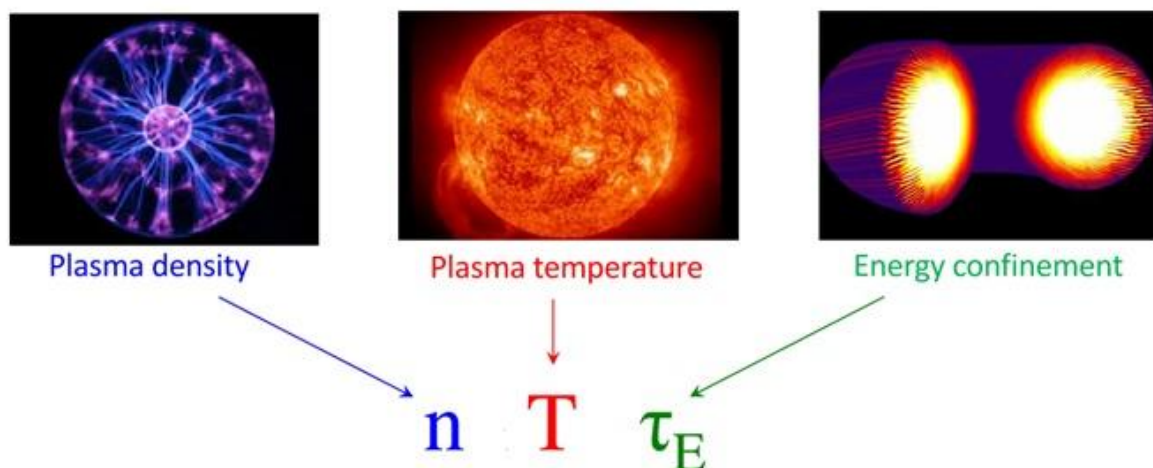
Τονίζεται εδώ, ότι για να επιτευχθεί η σύντηξη, οι πυρήνες που πρόκειται να συντηχθούν, πρέπει να υπερνικήσουν τις ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις (δηλαδή δυνάμεις Coulomb) και επομένως, οφείλουν να πραγματοποιήσουν μεταξύ τους μια σύγκρουση μεγάλης ταχύτητας.

Η διαδικασία αυτή, επιτυγχάνεται μέσα σε συνθήκες πλάσματος. Το πλάσμα συνιστά την «τέταρτη κατάσταση της ύλης», δηλαδή *μία κατάσταση στην οποία τα άτομα είναι διαχωρισμένα στα αρνητικά ηλεκτρόνια και στα θετικά ιόντα*. Υψηλή σε κατάσταση πλάσματος, συναντάται στον ήλιο και τα άστρα, στις αστρικές ατμόσφαιρες, τα αεριώδη νεφελώματα, αλλά και στον ηλιακό άνεμο, τις ζώνες ακτινοβολίας Van Allen, τις αστραπές.

Στον ήλιο και τα άστρα λοιπόν, υφίστανται οι κατάλληλες συνθήκες για την ύπαρξη πλάσματος όπου είναι εφικτή η σύντηξη πυρήνων. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Υψηλές θερμοκρασίες. Στην περίπτωση του ήλιου η θερμοκρασία φτάνει τους $10-15 \times 10^6$ °C.
- Υψηλές πιέσεις. Στον ήλιο υφίστανται ισχυρότατες πιέσεις, ενώ ταυτόχρονα ενυπάρχουν και ισχυρότατες βαρυτικές δυνάμεις.

Ωστόσο, στη γη δεν υφίστανται τέτοιες θερμοκρασίες και πιέσεις, ενώ δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βαρύτητα. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να αντισταθμιστούν οι συνθήκες αυτές, με τη θέρμανση ενός πλάσματος χαμηλής πυκνότητας σε μια υψηλότερη θερμοκρασία (περίπου δηλαδή 100×10^6 °C ή 8-10 φορές υψηλότερη από αυτήν του πυρήνα του ήλιου). Ταυτόχρονα, απαιτείται συγκράτηση του πλάσματος μέσω ενός κατάλληλου συστήματος περιορισμού, ώστε να διατηρούνται οι εγγενώς ασταθείς αντιδράσεις της θερμοπυρηνικής σύντηξης.



Εικόνα 1: Οι παράγοντες που καθορίζουν την εμφάνιση πλάσματος: πυκνότητα, θερμοκρασία και χρόνος περιορισμού πλάσματος

Στο σημείο αυτό, τονίζεται ότι η εισροή ενέργειας για να θερμανθεί το πλάσμα πρέπει να είναι μικρότερη από την ενέργεια που παράγεται λόγω σύντηξης, επομένως χρειάζεται να ικανοποιείται το κριτήριο Lawson [1] (Σχέση (2)).

Δηλαδή:

$$n \times \tau > 10^9 \quad (2)$$

όπου

n η πυκνότητα του πλάσματος σε cm^{-3} και

τ ο χρόνος συγκράτησής του σε s . Σαν χρόνος συγκράτησης νοείται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων.

Αυστηρότεροι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν χωριστά για κάθε ιδιαίτερη διάταξη [2]. Για παράδειγμα:

- $n \times \tau \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$, για τη σύντηξη δευτερίου-τριτίου (3)
- $n \times \tau \geq 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$, για τη σύντηξη δευτερίου-δευτερίου (4)

Η αναπτυσσόμενη έρευνα πάνω στη θερμοπυρηνική σύντηξη, προκειμένου να επιτύχει τον κατάλληλο περιορισμό του πλάσματος προσανατολίζεται σε δύο διαφορετικές τεχνολογίες: το μαγνητικό και τον αδρανειακό περιορισμό.

Μαγνητικός περιορισμός

Στη μέθοδο του μαγνητικού περιορισμού, η συγκράτηση του πλάσματος γίνεται χρησιμοποιώντας μαγνητικά πεδία μεγάλης έντασης.

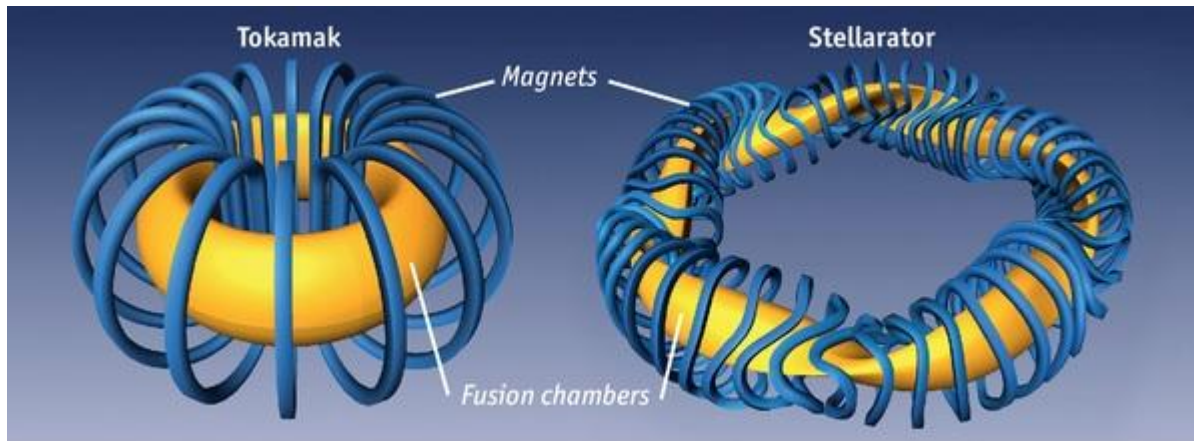
Τη δεκαετία του '50, εργάστηκαν πάνω στο πρόβλημα αυτό, οι Igor Tamm και Zakharov στο Ινστιτούτο Φυσικής και Τεχνολογίας της Σοβιετικής Ένωσης, υλοποιώντας το "tokamak" και ο Lyman Spitzer στο Princeton University των ΗΠΑ, δημιουργώντας το "stellarator".

Η πρώτη δομή γνώρισε μεγαλύτερη εξέλιξη και πλέον η ανάπτυξη των πυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης βασίζεται κατά κύριο λόγο σε αυτήν. Η γεωμετρία του, ακολουθεί το σχήμα ενός «doughnut», μίας τοροειδούς δηλαδή δομής, όπως υποδηλώνει και το όνομά του. Συγκεκριμένα, η λέξη "tokamak" προέρχεται από το: "*toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami*, μία παράφραση της ρωσικής γλώσσας που σημαίνει: **toroidal chamber with magnetic coils** ή από το *toroidal'naya kamera s aksial'nym magnitnym polem*, που σημαίνει **toroidal chamber with axial magnetic field** [3].

Ο όρος δημιουργήθηκε πρώτη φορά από τον Igor Golovin [4], τον υποδιευθυντή του Laboratory of Measuring Apparatus of Academy of Science, του σημερινού Ινστιτούτου του Kurchatov. [4]

Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί σε πειραματικό επίπεδο και αντιδραστήρες σύντηξης βασιζόμενοι στη δομή stellarator. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί ο αντιδραστήρας Wendelstein 7-X (W7-X), κατασκευασμένος στο Greifswald της Γερμανίας, από το Ινστιτούτο Μαξ Πλανκ για τη Φυσική Πλάσματος, που ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2015.

Σε αντιπαράβολή παρουνιάζονται παρακάτω οι δύο δομές (Εικόνα 2). Είναι φανερό, ότι και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται εφαρμογή κατάλληλου μαγνητικού πεδίου και η ύπαρξη του θαλάμου στον οποίο παράγεται το πλάσμα.



Εικόνα 2: Η δομή του tokamak (αριστερά): Το πλάσμα συγκρατείται από τα ισχυρά τοροειδή και πολοειδή μαγνητικά πεδία. Ανάμεσά τους διακρίνεται ο θάλαμος κενού, απαραίτητος ώστε το πλάσμα να μην έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου.

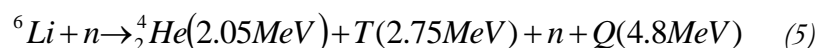
Η δομή stellarator (δεξιά): Στο σχήμα φαίνεται το απαραίτητο δοχείο κενού αλλά και οι επίπεδες και μη-επίπεδες σπείρες γύρω από αυτό.

Αδρανειακός περιορισμός

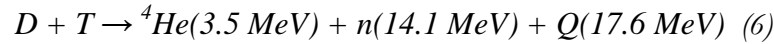
Στη μέθοδο του αδρανειακού περιορισμού, η συμπίεση του πλάσματος επιτυγχάνεται με βομβαρδισμό με δέσμες σωματιδίων (θετικά ιόντα, ηλεκτρόνια ή φωτόνια). Πρόκειται για στιγμιαίες εκπομπές lasers, που μπορούν να πετύχουν μεγάλες πυκνότητες στο πλάσμα. Για παράδειγμα, δέσμη laser με αέριο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) μπορεί να ιονίσει και να θερμάνει μια αέρια στήλη δευτερίου και τριτίου με πυκνότητες περίπου 10¹⁷ cm⁻³ [2]. Στην πράξη, το φως του laser εστιάζεται σε μία μικρή σφαίρα από δευτέριο και τρίτιο σε στερεά μορφή, που έχει πυκνότητα περίπου ίση με 10³ gr/cm³. Η ένταση του laser είναι 10¹⁵ W/cm² και η πίεση της ακτινοβολίας περίπου 10⁶ Atm. Η σφαίρα ακτινοβολείται απ' όλες τις μεριές και η ενέργεια των δεσμών απορροφάται από το φλοιό της σφαίρας που θερμαίνεται. Στη συνέχεια, η ενέργεια του φλοιού εκτονώνεται προς τα έξω, ενώ ο εσωτερικός πυρήνας συμπιέζεται, εφόσον η συνολική ορμή στη σφαίρα πρέπει να διατηρείται. Στον πυρήνα λοιπόν επιτυγχάνεται η σύντηξη.

2.1.1 Βασικές αντιδράσεις σύντηξης

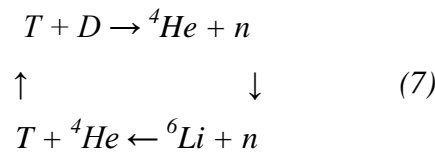
Οι αντιδράσεις σύντηξης βασίζονται κυρίως σε δύο ισότοπα του υδρογόνου (H), το δευτέριο (D) και το τρίτιο (T). Το δευτέριο διαθέτει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο και συναντάται στο νερό, όπως και το υδρογόνο. Το τρίτιο αποτελεί ένα ραδιενεργό ισότοπο του υδρογόνου, και συνίσταται σε ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια. Το ισότοπο αυτό δε συναντάται ελεύθερο στη φύση, αλλά μπορεί να παραχθεί, αν το λίθιο (⁶Li) βομβαρδιστεί με νετρόνια, δηλαδή όταν πραγματοποιείται η αντίδραση:



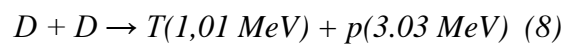
Η κυριότερη αντίδραση σύντηξης με τη μεγαλύτερη ενεργό διατομή, των 5 barn, στην οποία στοχεύει η επιστημονική κοινότητα να στηρίξει την παραγωγή ενέργειας μελλοντικά, είναι αυτή του δευτερίου-τριτίου, εξαιτίας κυρίως της υψηλότερης ενεργού διατομής της αντίδρασης και της μεγαλύτερης ενέργειας που παράγεται. Δηλαδή:



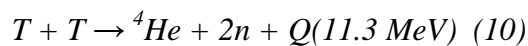
Εδώ υπογραμμίζεται, ότι τα στοιχεία που πρέπει να εξαχθούν ως πρώτη ύλη από το περιβάλλον, είναι μόνο το δευτέριο και το λίθιο. Το δευτέριο λαμβάνεται με φυσιοχημικές μεθόδους από το νερό και θα χρησιμοποιηθεί άμεσα, ενώ, όπως αναφέρεται και παραπάνω, το τρίτιο θα παραχθεί από το λίθιο, σύμφωνα με την αντίδραση (5). Ακόμη, τα παραγόμενα νετρόνια από την αντίδραση (6), μπορούν να βομβαρδίσουν εκ νέου το ${}^6\text{Li}$ για την παραγωγή τριτίου (αντίδραση (5)). Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα σε μία αντίδραση σύντηξης D-T, να ανατροφοδοτείται διαρκώς μετά την έναρξή της. Παρακάτω λοιπόν παρουσιάζεται ο κύκλος των αντιδράσεων που τελικά ακολουθείται.



Ακόμη, θα πρέπει να αναφερθούν οι αντιδράσεις σύντηξης:



οι οποίες είναι ισοπίθανες μεταξύ τους. Ωστόσο, έχουν ενεργό διατομή 100 φορές μικρότερη της προηγούμενης αντίδρασης και παράλληλα χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση.



Η αντίδραση αυτή έχει συγκρίσιμη ενεργό διατομή με αυτή της αντίδρασης δευτερίου-δευτερίου, χωρίς κάποια ενεργειακή υπεροχή και έχει σαν επιπλέον μειονέκτημα το κόστος παραγωγής του τριτίου.

Είναι λοιπόν κατανοητό, ότι η αντίδραση D-T υπερέχει ως προς το ενεργειακό και οικονομικό όφελος, ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα της ανατροφοδότησης της μέσω του κύκλου αντιδράσεων που αναδείχθηκε στη σχέση (7).

2.1.2 Η αναγκαιότητα και τα πλεονεκτήματα της σύντηξης

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, όπως ειτιμήθηκε το 2016, ήταν 157.481 TWh και καλύφθηκε από ορυκτά καύσιμα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ. Προβλέπεται ωστόσο, ότι μέχρι το 2100 ο αριθμός αυτός θα αυξηθεί κατά 125%, δηλαδή θα αγγίζει τις 354.332 TWh, λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της ανόδου του βιοτικού επιπέδου. Ταυτόχρονα, σε διάρκεια 45 ετών (1970-2015), οι τόνοι διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα αυξήθηκαν από 15.000.000 σε 35.000.000, καθώς έγινε μεγάλη χρήση ορυκτών καυσίμων, ενώ σε μία εκατονταετία παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μας κατά 1° C.

Την ανάγκη για νέες μορφές ενέργειας, πιο αποτελεσματικές και πιο φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο από τις ήδη υπάρχουσες, στοχεύει να καλύψει η τεχνολογία της σύντηξης. Αυτό αρχικά οφείλεται στο γεγονός, ότι τα αναγκαία καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας μέσω σύντηξης, υπάρχουν σε αφθονία και εξάγονται άμεσα από το φυσικό περιβάλλον. Ένα άτομο δευτερίου συναντάται περίπου ανά 6700 άτομα υδρογόνου και μπορεί με φυσικοχημικές μεθόδους να διαχωριστεί από το νερό, προκειμένου να αξιοποιηθεί σε σκοπούς σύντηξης. Αντίστοιχα το τρίτιο, παράγεται μέσω του λιθίου, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.1.1, το οποίο εντοπίζεται και εξάγεται εύκολα από τη γήινη λιθόσφαιρα. Για παράδειγμα, 10 γραμμάρια δευτερίου που μπορούν να εξαχθούν από 500 λίτρα νερό και 15 γραμμάρια τρίτιου που παράγονται από 30 γραμμάρια λιθίου, παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια για να καλυφθούν οι ανάγκες ενός ανθρώπου σε μία βιομηχανοποιημένη χώρα σε όλη τη διάρκεια της ζωής του [5]. Δε μπορεί επίσης να παραβλεφθεί, ότι πραγματοποιείται απευθείας μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς τη μεσολάβηση θερμικών κύκλων, που θα μείωναν το συντελεστή απόδοσης. Την ίδια στιγμή, η θερμοπυρηνική σύντηξη, πλην της ενεργειακής, επιδεικνύει και περιβαλλοντική υπεροχή.

- Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, δεν παράγονται οξείδια του άνθρακα ή του θείου.
- Όταν ολοκληρωθεί ο κύκλος ζωής του αντιδραστήρα αποσυναρμολογείται και τα μέρη του αποθηκεύονται όπως όλα τα ραδιενεργά κατάλοιπα. Τα ραδιενεργά κατάλοιπα διατηρούν την ενεργότητά τους σε υψηλά επίπεδα μόνο για λίγους αιώνες (δεδομένου ότι σ' αυτά κυριαρχούν βραχύχρονα ισότοπα), λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής τους και όχι χιλιάδες χρόνια όπως στην περίπτωση της σχάσης. Παράλληλα ερευνώνται κατάλληλα υλικά χαμηλής ενεργότητας, ώστε ο χρόνος αυτός να μειωθεί σε μερικές δεκαετίες.
- Οποιαδήποτε χρονική στιγμή, ο αντιδραστήρας, θα έχει πολύ μικρές ποσότητες ραδιενεργών υλικών, επομένως ακόμη και το ενδεχόμενο διαρροής του πλάσματος αντιπροσωπεύει αμελητέα επιβάρυνση του περιβάλλοντος.
- Η καθημερινή λειτουργία ενός σταθμού δεν απαιτεί μεταφορά ραδιενεργών υλικών, καθώς ακόμη και το ραδιενεργό τρίτιο, είναι δυνατό να παράγεται και να καταναλώνεται μέσα στον αντιδραστήρα.
- Εκτενείς μελέτες δε δείχνουν σημαντικές ραδιενεργές εκπομπές. Το τρίτιο εκπέμπει ακτινοβολία-β με ενέργεια περίπου 15 keV και έχει συγκριτικά μικρό χρόνο ημιζωής (12.3 γ). Αν διαφύγει τρίτιο, ανεβαίνει άμεσα στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Ανάλογα, ο βιολογικός χρόνος ημιζωής του τρίτιου στον ανθρώπινο οργανισμό είναι περίπου 10 ημέρες και επομένως δεν πραγματοποιείται μακροχρόνη συσσώρευση τρίτιου σε αυτόν.

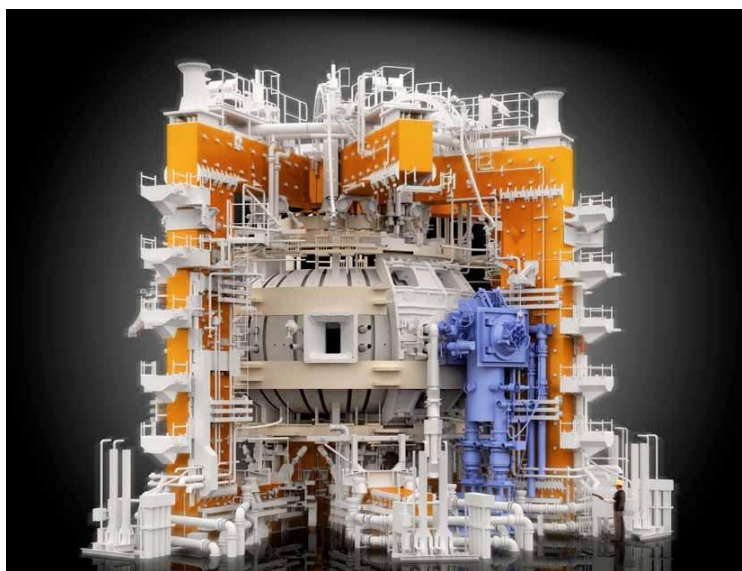
- Δεν χρησιμοποιείται αλυσιδωτή αντίδραση, όπως για παράδειγμα στη σχάση, και δεν τίθεται κίνδυνος ατυχήματος τήξης του πυρήνα της εγκατάστασης. Το καύσιμο υλικό είναι τόσο λίγο που εξαντλείται σχεδόν αμέσως.

Τέλος, σε περιβαλλοντικό επίπεδο, αλλά κυρίως στο πλαίσιο της ακτινοπροστασίας, της ασφάλειας του προσωπικού και συνολικά των κατοίκων μιας περιοχής, τονίζεται ότι η σύντηξη αποτελεί μία εγγενώς ασφαλή διαδικασία. Μια αντίδραση σύντηξης είναι φύσει ασταθής και επομένως κάθε εσφαλμένος χειρισμός έχει σαν αποτέλεσμα την άμεση διακοπή της αντίδρασης. Ο αντιδραστήρας δηλαδή θα σβήσει και έτσι καμία αλυσιδωτή αντίδραση που οδηγεί σε διαρροές ή τήξη πυρήνα, όπως κατά τη σχάση, δε θα πραγματοποιηθεί.

2.2 Ο αντιδραστήρας σύντηξης Joint European Torus (JET)

Το Joint European Torus (JET) (Εικόνα 3), είναι ένα από τα μεγαλύτερα πειράματα φυσικής πλάσματος μαγνητικού περιορισμού, που στοχεύει να συμβάλει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω θερμοπυρηνικής σύντηξης. Βρίσκεται στην Οξφόρδη του Ηνωμένου Βασιλείου και η λειτουργία του ξεκίνησε το 1983. Αποτελεί τον πρώτο σημαντικό σταθμό της διαδρομής προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σύντηξης, όπως περιγράφεται στο “Roadmap to the realisation of fusion energy” [6].

Ένας βασικός ρόλος του JET, είναι ότι λειτουργεί ως προσχέδιο για την κατασκευή του ITER, που στα λατινικά σημαίνει “δρόμος” ή “μονοπάτι”. Ο ITER, ο πυρηνικός αντιδραστήρας σύντηξης που θα διαδεχθεί το JET, φιλοδοξεί να αποδείξει ότι είναι εφικτό να επιτευχθεί θετικό ισοζύγιο ενέργειας ή με άλλα λόγια, συντελεστής απόδοσης μεγαλύτερος από ένα ($Q > 1$). Αυτή τη στιγμή, το JET είναι το μεγαλύτερο σε λειτουργία tokamak στον κόσμο και αποτελεί το μοναδικό αντιδραστήρα που μπορεί να πραγματοποιεί πειράματα σύντηξης δευτερίου-δευτερίου (D-D), τριτίου-τριτίου (T-T) ή δευτερίου-τριτίου (D-T). Είναι λοιπόν κατανοητό, ότι μία εγκατάσταση σαν το JET προσφέρει σημαντικό πεδίο μελέτης και έρευνας στη φυσική και τεχνολογία της σύντηξης, που αγγίζει πλήθος επιστημονικών ειδικοτήτων.

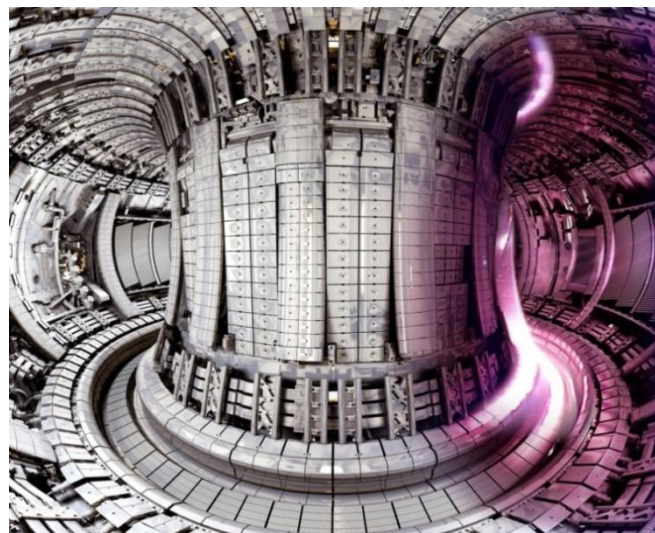


Εικόνα 3: Σκαρίφημα του πυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης JET [7]

Ακτίνα πλάσματος (m)	2.96
Όγκος πλάσματος (m ³)	100
Μαγνητικό πεδίο (T)	3.45
Ηλεκτρικό ρεύμα (A)	5×10 ⁶
Εσωτερική ακτίνα τόρου (m)	0.9
Εξωτερική ακτίνα τόρου (m)	3.0
Υλικά εσωτερικού τοιχώματος	Βηρύλλιο, βολφράμιο

Πίνακας 1: Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του JET [8]

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αφορά τη λειτουργία μιας πυρηνικής εγκατάστασης και επομένως έναν αντιδραστήρα σύντηξης, είναι η προστασία του προσωπικού, του κοινού και του περιβάλλοντος από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Σε αυτό το πλαίσιο, ένα βασικό πρόβλημα προς επίλυση είναι η διαφυγή (streaming) νετρονίων από διάκενα στη βιολογική θωράκιση του θαλάμου του αντιδραστήρα, όπως για παράδειγμα αγωγούς εξαερισμού, πρόσβασης στον πειραματικό εξοπλισμό ή θύρες πρόσβασης του προσωπικού σε περιοχές της αίθουσας (Torus Hall), που στεγάζει το tokamak (Εικόνα 4). Τα νετρόνια που παράγονται από την αντίδραση σύντηξης και διαφεύγουν είναι κατά βάση ταχεία, όπως φαίνεται και από τη σχέση (6). Ωστόσο, ένα ποσοστό αυτών θα χάσει μέρος της κινητικής του ενέργειας λόγω σκεδάσεων μέσα στον εξαιρετικά περίπλοκο εξοπλισμό και δομή του JET. Αυτό συνεπάγεται, ότι το φάσμα των νετρονίων αποτελείται από όλες τις ενεργειακές περιοχές. Επομένως, μετρήσεις ή εκτιμήσεις του ρυθμού δόσης στις περιοχές αυτές, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον από τη σκοπιά της ακτινοπροστασίας και σαφώς χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και μελέτης. Τα επίπεδα ακτινοβολίας που ενδεχομένως δημιουργούνται στα σημεία ενδιαφέροντος εξαρτώνται από τις αντίστοιχες ροές διαφυγόντων νετρονίων και σαφώς υποδεικνύουν την ανάγκη βελτίωσης της βιολογικής θωράκισης. Επομένως στα πλαίσια του προγράμματος τεχνολογικής αξιοποίησης της λειτουργίας του JET, διεξάγονται μελέτες για το σχεδιασμό και τη βελτίωση των θωρακίσεων στις περιοχές αυτές, καθώς και για την απόκτηση εμπειρίας και δεδομένων που συμβάλλουν στο σχεδιασμό των βιολογικών θωρακίσεων των επερχόμενων αντιδραστήρων σύντηξης, όπως το ITER και το DEMO [9]. Κάθε μελέτη εξειδικεύεται και αναφέρεται είτε σε μία καμπάνια δευτερίου-δευτερίου (D-D), είτε τριτίου-τριτίου (T-T), είτε δευτερίου-τριτίου (D-T) [10].



Εικόνα 4: Το εσωτερικό του tokamak του JET. Στα δεξιά φαίνεται η προσπάθεια για δημιουργία πλάσματος [7]

3. Νετρονική Ενεργοποίηση

3.1 Τεχνική και στάδια

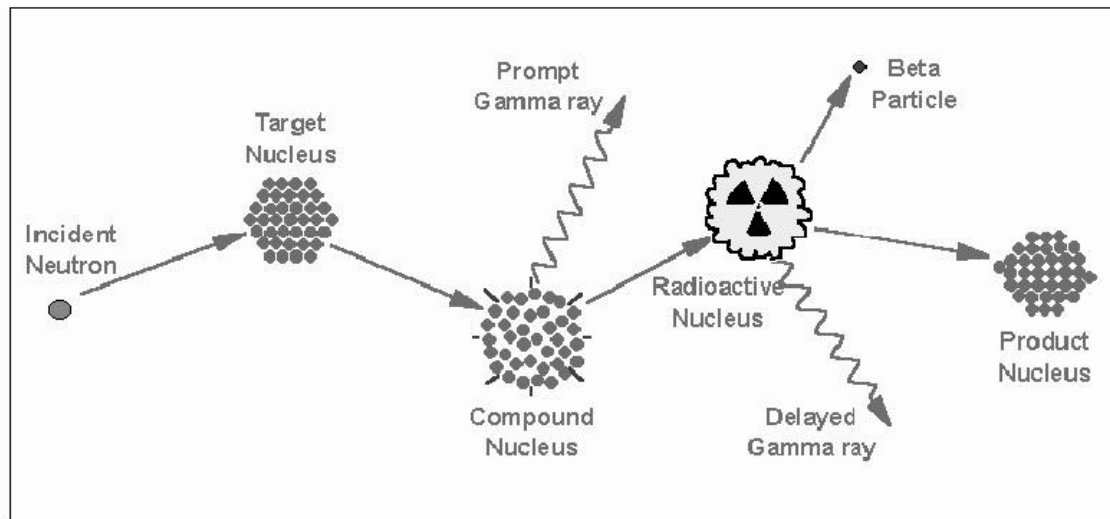
Προκειμένου να υπολογιστεί η ροή των νετρονίων σε ενεργοποιημένα από αυτά δείγματα, αξιοποιείται η τεχνική της Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση (ANE). Η διαδικασία της ANE στην παρούσα εργασία περιλαμβάνει την ακτινοβόληση σε πεδίο νετρονίων μεταλλικού ελάσματος, την καταγραφή των ακτίνων-γ που εκπέμπονται, μέσω κατάλληλης διάταξης γ-φασματοσκοπίας και τέλος την ανάλυση, δηλαδή την επεξεργασία των μετρήσεων. Η ανάλυση αυτή θα οδηγήσει στον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων στο έλασμα. Τονίζεται βέβαια, ότι η εκπλήρωση της διαδικασίας αυτής, πλην του πεδίου νετρονίων και της ανιχνευτικής διάταξης, απαιτεί και σαφή γνώση των πυρηνικών αντιδράσεων των νετρονίων με τα στοιχεία του δείγματος αλλά και των ενεργών διατομών τους.

Η νετρονική ενεργοποίηση είναι μία πυρηνική αναλυτική τεχνική, που διαθέτει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα βάσει των οποίων και επιλέχθηκε για τη δοσιμετρία νετρονίων στην εργασία αυτή. Αρχικά, διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη μελέτη σε έναν περίπλοκο σύστημα όπως αυτό του JET, διότι δεν εμπεριέχει κάποια πολυπλοκότητα στην εφαρμογή της και δεν προϋποθέτει ιδιαίτερο εξοπλισμό ή περίπλοκες διαδικασίες. Έχει διαπιστωθεί επίσης, ότι παρέχει μεγάλη αξιοπιστία και ασφάλεια ως προς τα αποτελέσματά της. Ανάλογα δε με το υλικό στο οποίο γίνεται η μέτρηση, η ευαισθησία της τεχνικής μπορεί να φτάσει και την τάξη των parts per billion (ppb) [10-12]. Τα πλεονεκτήματά της αυτά, έγκεινται στο γεγονός, ότι οι υπολογισμοί βασίζονται κυρίως σε πυρηνικά δεδομένα και τιμές που λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία, συνεπώς αποτελούν ακριβή αλλά προσδιορισμένα μεγέθη. Το μοναδικό στάδιο που μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, είναι αυτό της φασματοσκοπίας-γ. Η υπεροχή της τεχνικής επιβεβαιώνεται και αναδεικνύεται μέσα από την ικανοποιητική συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις, αλλά και με τα αποτελέσματα από μετρήσεις δοσιμέτρων θερμοφωταύγειας [13-15].

Μία τέτοια πυρηνική ανάλυση, αφορά την αλληλεπίδραση του νετρονίου με τον πυρήνα στόχο και την παραγωγή ραδιενεργού προϊόντος. Η τεχνική αυτή δύναται να εφαρμοστεί σε όλο το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων με την κατάλληλη επιλογή της πυρηνικής αντίδρασης. Αναλυτικότερα, τα νετρόνια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- *θερμικά νετρόνια*: δηλαδή νετρόνια χαμηλής ενέργειας που έχουν χάσει το μεγαλύτερο κομμάτι της ενέργειάς τους κυρίως λόγω ελαστικών σκεδάσεων
- *επιθερμικά νετρόνια*: έχουν χάσει κάποιο μέρος της ενέργειάς τους, αλλά είναι ικανά να προκαλέσουν πυρηνικές αντιδράσεις
- *ταχεία νετρόνια*: δεν έχουν υποστεί ακόμα κάποια σκέδαση ή έχουν χάσει πολύ μικρό κομμάτι της ενέργειάς τους και είναι επίσης ικανά να οδηγήσουν σε πυρηνικές αντιδράσεις

Η κυριότερη ωστόσο αντίδραση, που εξετάζεται κατά την νετρονική ενεργοποίηση και συνιστά τη βάση της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η σύλληψη νετρονίου (neutron capture) από έναν πυρήνα-στόχο και εν συνεχεία η εκπομπή φωτονίου. Η αντίδραση γράφεται σύντομα: $[n,\gamma]$ και παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Αναπαράσταση σύλληψης νετρονίου από πυρήνα-στόχο

Το νετρόνιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα-στόχο με μία μη-ελαστική σιέδαση και ακολουθεί η σύλληψή του από αυτόν. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου, «σύνθετου», διεγερμένου πυρήνα. Η ενέργεια της διεγέρσεως του «σύνθετου» πυρήνα, οφείλεται στην ενέργεια σύνδεσης του νετρονίου με τον πυρήνα. Σε διάρκεια 10^{-12} sec ο «σύνθετος» αυτός πυρήνας μεταπίπτει σε μία σταθερότερη κατάσταση, με την ταυτόχρονη εκπομπή μίας ή περισσότερων “άμεσων” ακτίνων-γ (prompt gamma rays), χαρακτηριστικές για κάθε πυρήνα. Σε πολλές περιπτώσεις, η κατάσταση προς την οποία αποδιηγείται ο «σύνθετος» πυρήνας, έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ραδιενεργού πυρήνα ο οποίος μπορεί να αποδιεγερθεί (διασπασθεί), εκπέμποντας μία ή περισσότερες χαρακτηριστικές γι’ αυτόν ακτίνες-γ. Η εκπομπή αυτών των ακτίνων-γ γίνεται με ρυθμό και με χρόνο ημιζωής, που είναι χαρακτηριστικός του ραδιενεργού πυρήνα. Ανάλογα με το ισότοπο, οι χρόνοι ημιζωής, ποικίλλουν από κλάσματα του δευτερολέπτου έως αρκετά χρόνια [14].

3.2 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη

Η σκέδαση ή η απορρόφηση των νετρονίων από την ύλη και οι αντίστοιχες ιδιότητες συνδέονται άμεσα με τη μικροσκοπική ενεργό διατομή σκέδασης (σ_s) και τη μικροσκοπική ενεργό διατομή απορρόφησης (σ_a). Οι μικροσκοπικές ενεργές διατομές αντιπροσωπεύουν τις πιθανότητες να έχει ένα νετρόνιο συγκεκριμένη αλληλεπίδραση με τον πυρήνα-στόχο και εξαρτώνται από την ενέργεια του προσπίπτοντος νετρονίου [16]. Οι πιθανές λοιπόν αλληλεπιδράσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν, είναι είτε σκέδαση του νετρονίου είτε απορρόφησης του είτε ακόμα και σχάση.

Στο σημείο αυτό, μπορεί να οριστεί ένα ακόμη σχετικό μέγεθος, αυτό της μακροσκοπικής ενεργούς διατομής. Το μέγεθος αυτό, ορίζεται βάσει όλων των ισοτόπων που ενδεχομένως υπάρχουν στο προς ανάλυση δείγμα ή υλικό και βάσει των αντίστοιχων μικροσκοπικών ενεργών διατομών.

Συγκεκριμένα:

$$\Sigma_s = \sum_i \sigma_{s,i} N_i \quad (11)$$

$$\Sigma_a = \sum_i \sigma_{a,i} N_i \quad (12)$$

Επιπλέον, η ολική μακροσκοπική ενεργός διατομή ορίζεται ως το άθροισμα των δύο επιμέρους μακροσκοπικών ενεργών διατομών.

$$\Sigma_t = \Sigma_s + \Sigma_a \quad (13)$$

όπου: σ_s : μικροσκοπική ενεργός διατομή σκέδασης [m^2]

σ_a : μικροσκοπική ενεργός διατομή απορρόφησης [m^2]

Σ_s : μακροσκοπική ενεργός διατομή σκέδασης [m^{-1}]

Σ_a : μακροσκοπική ενεργός διατομή απορρόφησης [m^{-1}]

Σ_t : ολική μακροσκοπική ενεργός διατομή [m^{-1}]

N: ατομική πυκνότητα [m^{-3}]

i: ο δείκτης για κάθε ισότοπο

3.3 Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

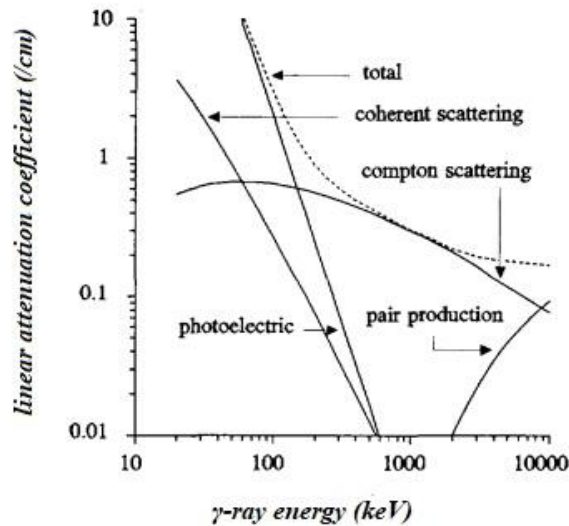
Η καταγραφή φωτονίου από έναν ανιχνευτή, για παράδειγμα κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, προϋποθέτει την αλληλεπίδραση της εκπεμπόμενης ακτίνας-γ με το υλικό του. Αναλυτικότερα, τα φαινόμενα μεταξύ ύλης και φωτονίων περιγράφονται από διάφορους μηχανισμούς, όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η δίδυμη γένεση, η σκέδαση Compton και η σύμφωνη σκέδαση.

- ❖ Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα εισερχόμενο φωτόνιο συγκρούεται και μεταδίδει όλη του την ενέργεια σε ένα ατομικό ηλεκτρόνιο. Το φωτόνιο απορροφάται πλήρως και το ηλεκτρόνιο εκπέμπεται από το άτομο με μία ενέργεια (E_e) ίση με την ενέργεια του φωτονίου (E_γ), μείον την ενέργεια σύνδεσης (E_B). Τα ηλεκτρόνια αυτά καλούνται φωτοηλεκτρόνια.
- ❖ Στο φαινόμενο της δίδυμης γένεσης, ένα εισερχόμενο φωτόνιο υφίσταται μία ηλεκτρομαγνητική επίδραση με έναν ατομικό πυρήνα και μετατρέπεται σε ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Είναι η αντίθετη διαδικασία από αυτήν της εξαΰλωσης, αφού εδώ η ενέργεια του φωτονίου μετατρέπεται σε μάζα.
- ❖ Κατά τη σκέδαση Compton, το εισερχόμενο φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ατομικό ηλεκτρόνιο της εξωτερικής ατομικής στιβάδας. Το φωτόνιο αποκτά διαφορετική συχνότητα από την αρχική του, επομένως και διαφορετική ενέργεια και στη συνέχεια, τα δύο σωματίδια σκεδάζονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις.
- ❖ Η σύμφωνη σκέδαση συμβαίνει όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη από την ενέργεια ιοντισμού του ατόμου. Αυτό συνεπάγεται, ότι η ενέργεια της ακτίνας-γ δεν είναι ικανή να απελευθερώσει το ηλεκτρόνιο από τη δεσμευμένη του κατάσταση (όπως στη σκέδαση Compton), με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεταφορά ενέργειας. Το φωτόνιο λοιπόν θα σκεδαστεί και συνεπώς, απλά θα αλλάξει κατεύθυνση.

Οι προαναφερθείσες αλληλεπιδράσεις, υποδεικνύουν ότι το φωτόνιο θα υποστεί απώλεια μέρους ή όλης της ενέργειάς του, μέσα στο υλικό του ανιχνευτή. Στις χαμηλές ενέργειες ακτίνων-γ, η απώλεια αυτή οφείλεται στην απορρόφηση των φωτονίων λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Στις μεγαλύτερες ενέργειες, πολλά φωτόνια εξέρχονται του κρυστάλλου του ανιχνευτή αφού σκεδαστούν (σκέδαση Compton), με αποτέλεσμα να εναποτίθεται στον ανιχνευτή ένα μόνο μέρος της ενέργειάς τους. Τέλος, για ενέργειες φωτονίων άνω των 1.022 MeV, είναι πιθανό να πραγματοποιηθεί δίδυμη γένεση, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου και στη συνέχεια να εκπεμφθούν δύο φωτόνια από την εξαΰλωση του ποζιτρονίου, ενέργειας 0.511 MeV. Τα φωτόνια αυτά είτε θα εξέλθουν από τον κρύσταλλο, είτε θα εναποθέσουν την ενέργειά τους στον ανιχνευτή, με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε στο καταγραφόμενο φάσμα την κορυφή των 0.511 MeV. Στην πρώτη περίπτωση βέβαια είναι πιθανό να διαφύγει μόνο το ένα φωτόνιο (μονή διαφυγή-single escape), αλλά είναι δυνατόν να διαφύγουν και τα δύο (διπλή διαφυγή-double escape).

Εξειδικεύοντας στην περίπτωση της εξασθένησης των ακτίνων-γ στο Γερμάνιο (Ge) (Γράφημα 2), παρατηρείται ότι στις χαμηλές ενέργειες, δηλαδή $E_\gamma < 200$ keV, υπερισχύει η

απορρόφηση με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ενώ στις υψηλές τιμές ενεργειών, $E_\gamma > 8$ MeV, παρατηρείται η δίδυμη γένεση. Εξετάζοντας τώρα τις ενδιάμεσες τιμές ενεργειών, $200 \text{ keV} < E_\gamma < 8 \text{ MeV}$, κυριαρχεί η σκέδαση Compton, ενώ η μεταφορά ενέργειας των ακτίνων- γ από τη σύμφωνη σκέδαση στον ανιχνευτή είναι αμελητέα.



Γράφημα 2: Γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης συναρτήσει της ενέργειας των ακτίνων- γ για τους κυρίαρχους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης στο Γερμάνιο [17]

Χρειάζεται συνακόλουθα να συζητηθεί ο ρόλος και η λειτουργία του ανιχνευτή, που θα καταγράψει τα αλληλεπιδρώντα με αυτόν φωτόνια. Συνήθως στις ανιχνευτικές διατάξεις, είναι η χρήση ημιαγωγόγων υλικών και συγκεκριμένα Γερμανίου (Ge) ή Πυριτίου (Si). Στους ημιαγωγούς, τα ηλεκτρόνια συνήθως βρίσκονται στη ζώνη σθένους, ενώ δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, η οποία διαχωρίζεται από τη ζώνη σθένους λόγω ενεργειακού κενού. Σε ότι αφορά το Γερμάνιο, που αποτελεί το υλικό κατασκευής του κρυστάλλου στη χρησιμοποιούμενη ανιχνευτική διάταξη, το εύρος του ενεργειακού αυτού κενού είναι 0.67 eV , σε θερμοκρασία δωματίου. Ενώ το υλικό αυτό διαθέτει φτωχή αγωγιμότητα, όταν αλληλεπιδρά με ιοντίζουσα ακτινοβολία, ηλεκτρόνια εισέρχονται στη ζώνη αγωγιμότητας και το σύστημα γίνεται στιγμιαία αγώγιμο. Αν λοιπόν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στην ανιχνευτική διάταξη με κατάλληλα ηλεκτρόδια, τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών διαχωρίζονται και κινούνται προς τα ηλεκτρόδια, στα οποία ακολούθως θα εμφανιστεί ηλεκτρικό σήμα. Ο ταχύς διαχωρισμός και η ταχεία συλλογή των φορτίων αυτών είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ενός καλού ημιαγωγού ιοντιζουσών ακτινοβολιών [18]. Το ποσοστό του ηλεκτρονικού θορύβου που δημιουργείται με τη διαδικασία αυτή, ελαχιστοποιείται με σύστημα ψύξης σε θερμοκρασία υγρού αζώτου.

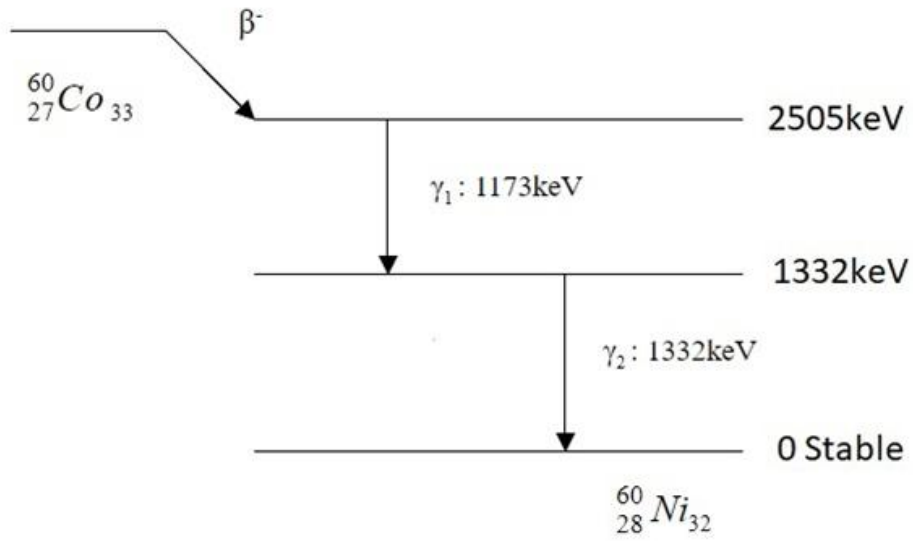
3.3.1 Αυτοαπορρόφηση ακτίνων-γ

Κατά την αλληλεπίδραση των φωτονίων με την ύλη χρειάζεται να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της αυτο-απορρόφησής τους μέσα στο υλικό (self attenuation). Πρόκειται για μία διαδικασία, κατή την οποία μία επιπεπόμενη ακτίνα-γ, απορροφάται από το ίδιο το υλικό από το οποίο διέρχεται. Συνήθως το φαινόμενο αξίζει να μελετηθεί είτε σε δείγματα μεγάλου όγκου, με αξιοσημείωτο δηλαδή μήκος διαδρομής του φωτονίου μέσα στο υλικό, είτε σε υλικά μεγάλου συντελεστή γραμμικής εξασθένησης, όπου πράγματι η απορρόφηση των φωτονίων μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα μιας αντίστοιχης μελέτης. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, παρόλο που μελετώνται δείγματα μικρού πάχους αλλά και διαμέτρου και αναμένεται να επηρεαστούν σε μικρό βαθμό τα αποτελέσματα, το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης θα ληφθεί υπόψη καθώς χρησιμοποιήθηκαν σαν ανιχνευτές νετρονίων μεταλλικά ελάσματα.

3.3.2 Φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης

Το φαινόμενο αυτό, παρατηρείται στη γ-φασματοσκοπία, όταν εκπέμπονται διαδοχικά δύο ή περισσότερα φωτόνια του ίδιου κλάδου διάσπασης του πυρήνα ενός ισότοπου, αλλά από τον ανιχνευτή ειλλαμβάνονται ως ένα. Η ενέργεια αυτού του φωτονίου θα καταγραφεί ως το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών που αποθέτουν τα φωτόνια στον ανιχνευτή. Η ύπαρξη των αθροιστικών φωτονίων αποτελεί αντικειμενική δυσκολία για τον ανιχνευτή, διότι δε μπορεί να αντιληφθεί δύο ή παραπάνω μεμονωμένα φωτόνια, αλλά μόνο ένα, με τη συνολική ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν σε αυτόν.

Εξετάζοντας για παράδειγμα μια πηγή ^{60}Co , της οποίας το ενεργειακό διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω, είναι φανερό ότι ο ασταθής πυρήνας μετά την εκπομπή σωματιδίου β^- και μετά από κάποιες διαδοχικές μεταπτώσεις σε ενεργειακές στάθμες, καταλήγει σε ^{60}Ni . Εδώ δίδεται μόνο ο κλάδος, όπου οι αποδιεγέρσεις από υψηλότερες σε χαμηλότερες στάθμες αντιστοιχούν σε εκπομπή φωτονίων ενέργειας 1173 keV και 1332 keV. Ο πυρήνας παραμένει στις ενδιάμεσες διεγερμένες στάθμες για χρονικό διάστημα μικρότερο της χρονικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή (η οποία είναι της τάξης των μικροseconds). Υπάρχει επομένως πιθανότητα να καταγραφούν τα φωτόνια των δύο αυτών ενεργειών ως ένα. Είναι κατανοητό λοιπόν, ότι το φαινόμενο δε μπορεί να αποφευχθεί, γι' αυτό και στη μελέτη αυτή θα ληφθεί υπόψη κατά τους υπολογισμούς και θα αποτελέσει μία πηγή συστηματικού σφάλματος.



Σχήμα 2: Τμήμα ενεργειακού διαγράμματος του ^{60}Co

4. Ακτινοβόληση σε πεδίο νετρονίων

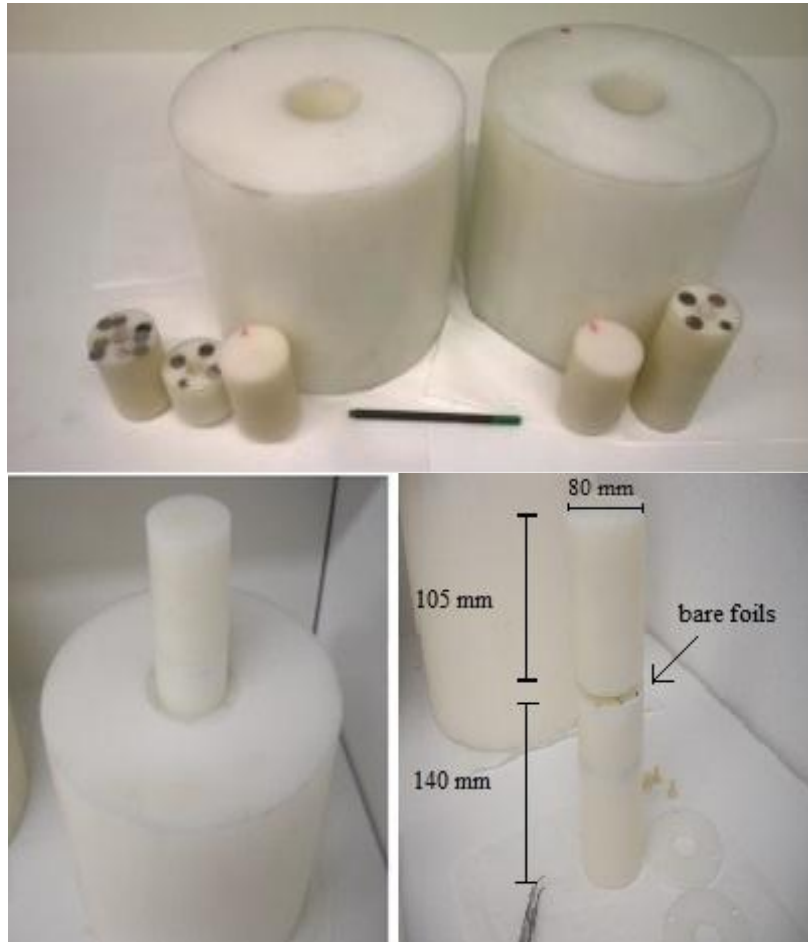
4.1 Δείγματα

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ακτινοβόληση στον αντιδραστήρα σύντηξης, αποτελούν μεταλλικά ελάσματα (foils), σε σχήμα δίσκου. Συγκεκριμένα, ακτινοβολούνται ελάσματα κοβαλτίου (Co), τανταλίου (Ta) και αργύρου (Ag), υψηλής καθαρότητας. Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα (2).

Υλικό του foil	Σχήμα	Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Χημική καθαρότητα (%)
Co	δίσκος	14.9	0.5	8.9	99.9+
Ta	δίσκος	14.9	0.5	16.6	99.9+
Ag	δίσκος	14.9	0.5	10.5	99.95+

Πίνακας 2: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην καμπάνια D-D στο JET

Τα δείγματα έχουν τοποθετηθεί σε κατάλληλες γι' αυτά διαμορφωμένες θέσεις, στο εσωτερικό μίας κυλινδρικής δομής διαμέτρου 8 cm, η οποία βρίσκεται στο κέντρο μεγαλύτερων κυλίνδρων, διαμέτρου 25.5 cm. Οι δύο κύλινδροι είναι κατασκευασμένοι από HD300 πολυαιθυλένιο (PE) πυκνότητας 0.96 g/cm³ και έχουν ύψος 25.0 cm. (Εικόνα 5). Η τοποθέτηση των ελασμάτων μέσα στους κυλίνδρους πολυαιθυλενίου έγινε με στόχο την επιβράδυνση των νετρονίων μέσα στο υλικό, δηλαδή τη μείωση της ενέργειάς τους. Όπως έχει συζητηθεί, σημαντικό ρόλο παίζει η ενέργεια των νετρονίων στη θέση ακτινοβόλησης, καθώς αυτή είναι που θα καθορίσει το είδος των πυρηνικών αντιδράσεων που θα ακολουθήσουν, την ενεργό διατομή κάθε αντίδρασης, αλλά και το ραδιενεργό προϊόν αυτής. Έτσι, με τη θερμοποίηση που θα επιτευχθεί, μπορεί να αξιοποιηθεί η διαδικασία της νετρονικής ενεργοποίησης με σύλληψη θερμικών νετρονίων.



Εικόνα 5: Κύλινδροι πολυαιθυλενίου στο κέντρο των οποίων τοποθετούνται τα δείγματα

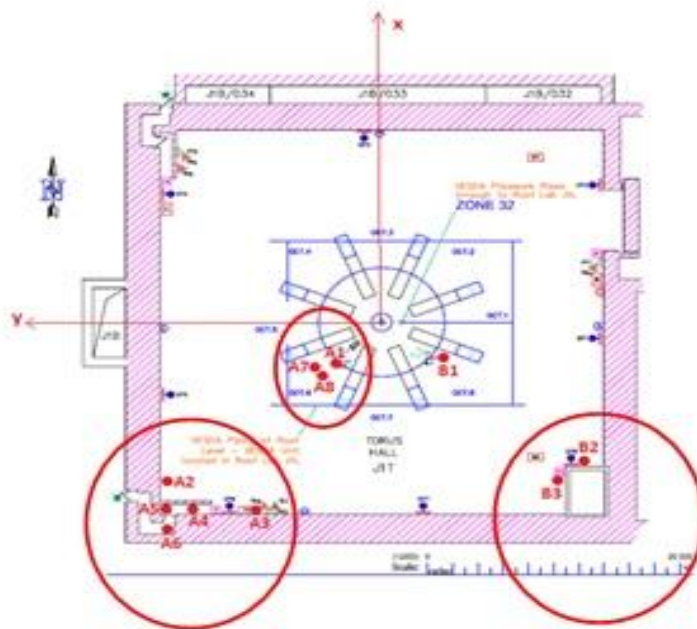
4.2 Ακτινοβόληση των δειγμάτων

Η ακτινοβόληση των ελασμάτων μέσα σε ένα πεδίο νετρονίων οδηγεί αρχικά, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3, στην ενεργοποίησή τους και στη συνέχεια στην εκπομπή ακτινοβολίας-γ.

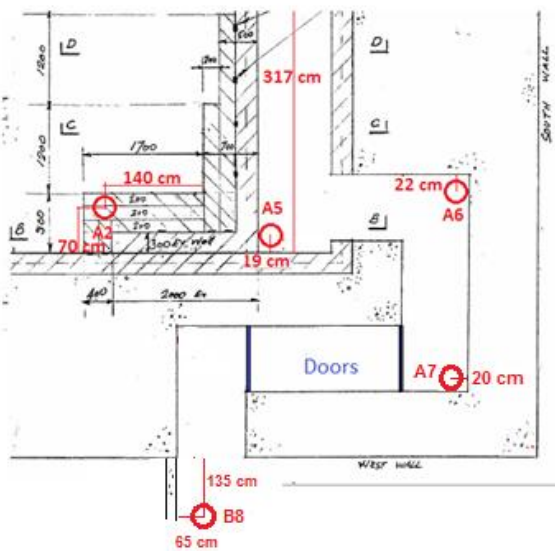
Τοποθετήθηκαν για το σκοπό αυτό σε διάφορες θέσεις και αποστάσεις από τον αντιδραστήρα, ώστε να διαμορφωθεί μία πλήρης εικόνα για τη ροή των νετρονίων σε διαφορετικά σημεία του κτιρίου.

Αναλυτικά οι θέσεις ακτινοβόλησης που απασχολούν τη συγκεκριμένη μελέτη είναι:

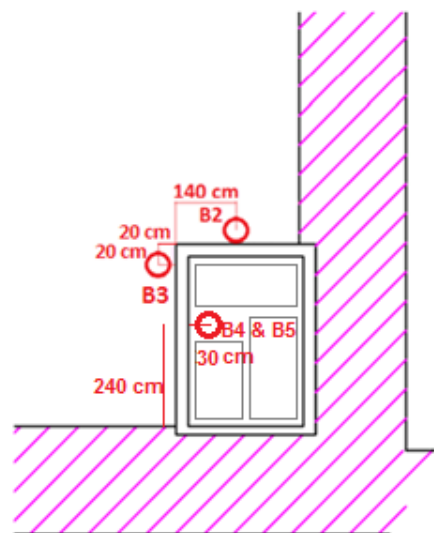
- A1: Octant 6 platform (η κοντινότερη στον αντιδραστήρα θέση)
- A2, A4: νοτιοδυτική είσοδος του κτιρίου, σχήματος λαβυρίνθου
- B2, B3: νοτιοανατολική περιοχή, που περιλαμβάνει μία δομή κάθετων αγωγών που οδηγεί στα κατώτερα επίπεδα του κτιρίου
- B5: νοτιοανατολική περιοχή, στο εσωτερικό της δομής των κάθετων αγωγών



Εικόνα 6: Κάτοψη κτιρίου του αντιδραστήρα του JET. Περιλαμβάνει τις θέσεις ακτινοβόλησης



7(α)



7(β)

Εικόνα 7(α): Νοτιοδυτική πλευρά του «Torus Hall» που εστιάζει στη δομή λαβυρίνθου

Εικόνα 7(β): Νοτιοανατολική πλευρά του «Torus Hall» που εστιάζει στον κάθετο αγωγό

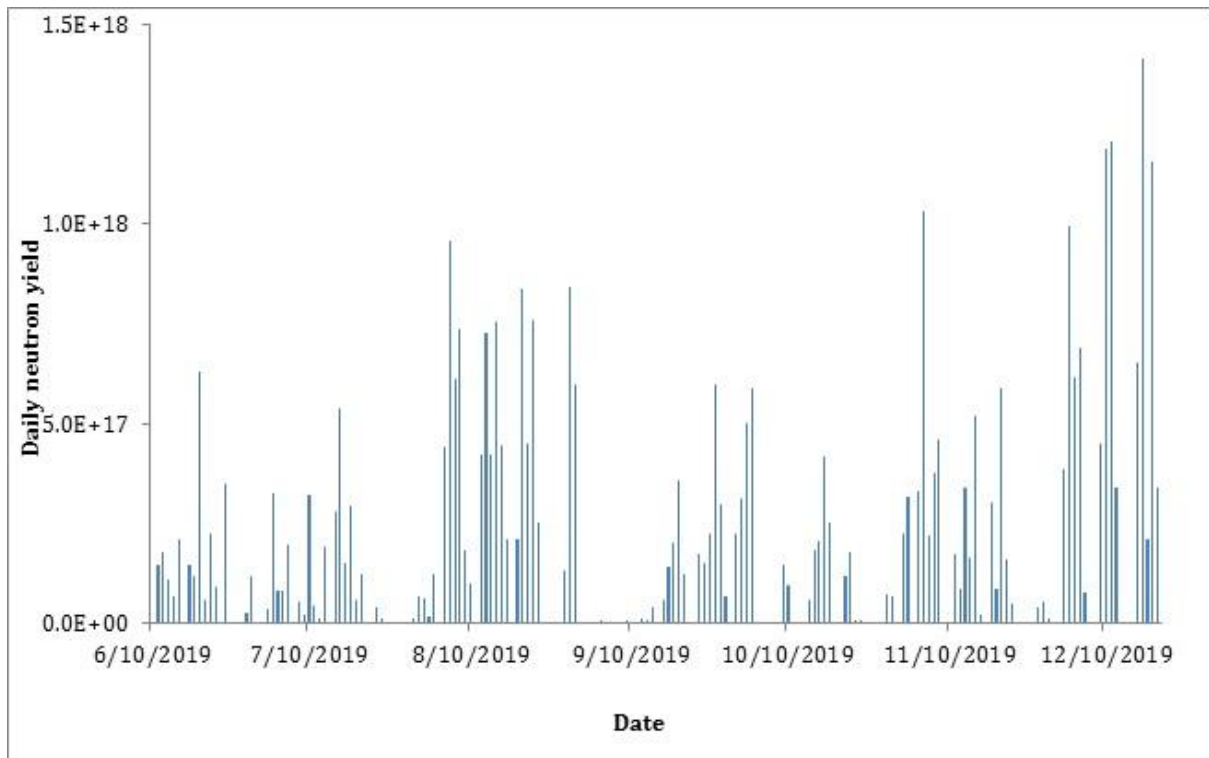
Η παραπάνω κάτοψη περιλαμβάνει φυσικά και άλλες θέσεις ακτινοβολήσης που δεν αναλύονται για τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Η Εικόνα 7(α), αναπαριστά το “λαβύρινθο” που συνδέει την αίθουσα του αντιδραστήρα με τον εξωτερικό χώρο και χρησιμοποιείται κατά κόρον από το εξουσιοδοτημένο προσωπικό. Βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του «Torus Hall» και αποτελεί μία στροφή τεσσάρων ορθών γωνιών συνολικού μήκους 11.80 m. Οι τοίχοι είναι κατασκευασμένοι από σκυρόδεμα πάχους 2.50 m, και η εσωτερική επιφάνειά τους καλύπτεται από μία στρώση βορωμένου σκυροδέματος, πάχους 0.30 m.

Το βόριο είναι ο κύριος απορροφητής των βραδέων νετρονίων, εξαιτίας της μεγάλης ενεργού διατομής που παρουσιάζει στην αντίδραση απορρόφησής τους (758 barns είναι η ενεργός διατομή για την απορρόφηση θερμικών νετρονίων από το φυσικό βόριο). Το υδρογόνο από την άλλη, που περιέχεται στη σύσταση του σκυροδέματος συνεισφέρει στην επιβράδυνση των νετρονίων που πραγματοποιούν ελαστική σκέδαση, αλλά αντίστοιχα και στην απορρόφηση των θερμικών [9].

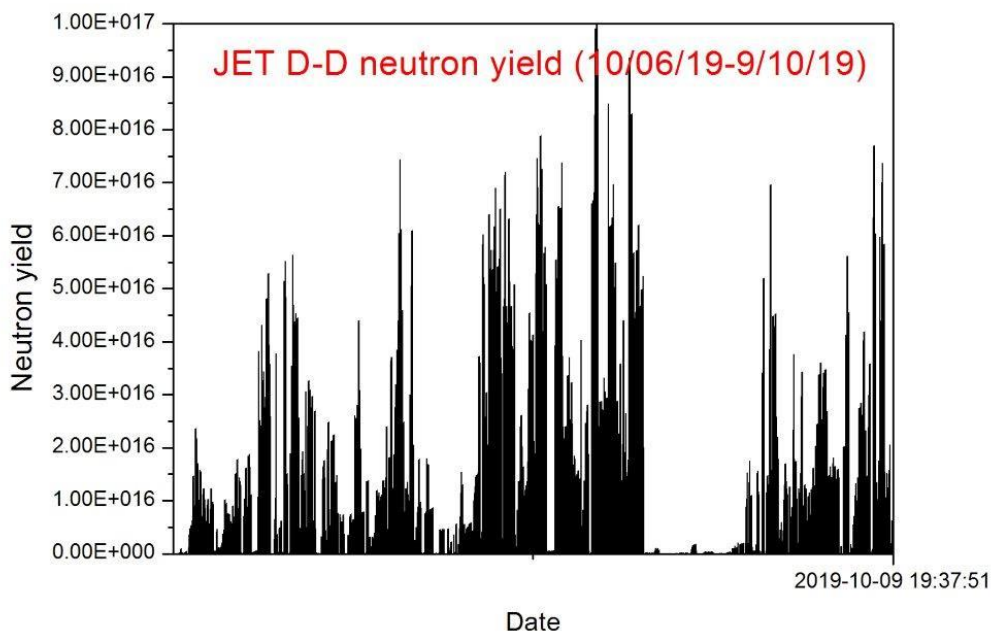
Στην Εικόνα 7(β), παρουσιάζεται η δομή των κάθετων αγωγών που τοποθετείται στη νοτιοανατολική πλευρά του «Torus Hall». Πρόκειται για μία περιοχή που προσιδιάζει με καμινάδα και οδηγεί στα κατώτερα επίπεδα του κτιρίου. Συχνά το προσωπικό χρειάζεται να χρησιμοποιεί τη δομή αυτή για να έχει πρόσβαση στον απαιτούμενο εξοπλισμό, γι’ αυτό και θεωρείται περιοχή ενδιαφέροντος.

Τα ελάσματα κοβαλτίου, τανταλίου και αργύρου ακτινοβολήθηκαν κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης της ακτινοβολήσης με πηγή πλάσματος D-D (D-D campaign) του 2019 (C38a). Η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν 194 ημέρες, δηλαδή από τις 10/06/2019 έως τις 20/12/2019. Αποτελείται από 137 ημέρες πλήρους λειτουργίας και 57 ημέρες μη λειτουργίας (αργίες, σαββατοκύριακα, διακοπή λειτουργίας λόγω τεχνικών προβλημάτων). Κατά την περίοδο αυτή παρήχθησαν από την πηγή μέσω 2360 παλμών, 3.683×10^{19} D-D νετρόνια [19]. Στο Γράφημα 3 παρουσιάζεται η ημερήσια παραγωγή νετρονίων κατά τη διάρκεια της περιόδου της D-D campaign.



Γράφημα 3: Ημερήσια παραγωγή νετρονίων από τις 10/6/2019 μέχρι τις 20/12/2019

Τονίζεται εδώ, ότι στο Γράφημα 3, παρουσιάζεται το σύνολο των νετρονίων που παράγονται κάθε μέρα. Ωστόσο δεν πραγματοποιούνταν εκπομπές παλμών μία φορά ημερησίως, αλλά περισσότερες από μία. Εστιάζοντας λοιπόν στις ημερομηνίες 10/6/2019 έως 9/10/2019, προκύπτει το Γράφημα 4, που αντικατοπτρίζει αναλυτικά τους παλμούς σε συνάρτηση με την ώρα που καταγράφηκαν.



Γράφημα 4: Παλμοί που παρήχθησαν ανά ημερομηνία και ώρα από τις 10/6/2019 έως τις 9/10/2019

Μετά την ακτινοβόλησή τους και το πέρας του απαραίτητου χρονικού διαστήματος που υποδεικνύουν οι κανόνες ακτινοπροστασίας, τα ελάσματα συλλέχθηκαν από το αρμόδιο προσωπικό του αντιδραστήρα. Αφαιρέθηκαν στη συνέχεια από τους κυλίνδρους πολυαιθυλενίου και τοποθετήθηκαν σε ειδικά δοχεία (containers) για την ασφαλή μεταφορά τους στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. Τα δείγματα έφτασαν στο εργαστήριο στις 10/2/2020, ωστόσο οι μετρήσεις ξεκίνησαν αργιέτά αργότερα.

5. Μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας

Στόχο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, αποτελεί ο προσδιορισμός, ποιοτικός αλλά και ποσοτικός, της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων στο δείγμα. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά μέσω της καταγραφής από κατάλληλη ανιχνευτική διάταξη, των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή ή το δείγμα. Στη συνέχεια, αναλύεται το ενεργειακό φάσμα, στο οποίο εμφανίζονται οι φωτοκορυφές των ανιχνευόμενων φωτονίων. Η κάθε φωτοκορυφή καταγράφεται σε ένα κανάλι, του οποίου η ενέργεια αντιστοιχεί στην ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου. Σε ποιοτικό επίπεδο ο πειραματιστής οφείλει λοιπόν να προσδιορίσει το είδος της πηγής ή των ραδιενεργών ισοτόπων που ενυπάρχουν στο δείγμα. Σε ποσοτικό επίπεδο καλείται να προσδιορίσει την ενεργότητα του δείγματος και εν συνεχεία άλλα ενδεχομένως μεγέθη που σχετίζονται με αυτήν, όπως λόγου χάριν τη ροή των νετρονίων.

5.1 Ανιχνευτική διάταξη

Η διάταξη γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη αυτή αποτελείται από ομοαξονικό ανιχνευτή Γερμανίου (GEM80) υψηλής καθαρότητας (High Purity), ο οποίος αποτελεί ημιαγωγό τύπου p. Διαθέτει απόδοση 85%, διακριτική ικανότητα ενέργειας (FWHM-Full Width at Half Maximum) ίση με 1.67 keV στην κορυφή των 1332 keV του ^{60}Co και λόγο φωτοκορυφής προς Compton (peak to Compton ratio) στα 93:1. Κατασκευάστηκε από την εταιρεία EG&G ORTEC.

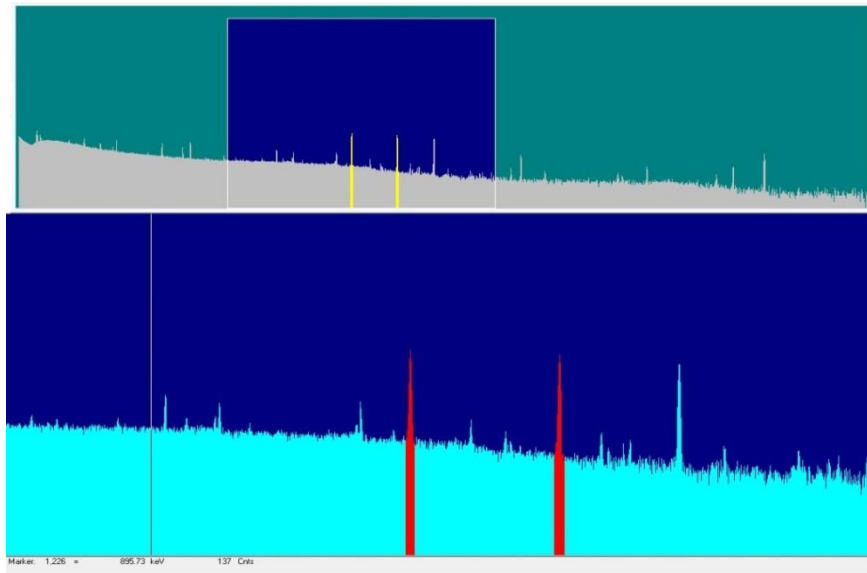
Ο ανιχνευτής συνδέεται με δοχείο υγρού αζώτου (LN_2), γνωστό ως dewar. Υπογραμμίζεται ότι ο χώρος του εργαστηρίου βρίσκεται μόνιμα σε θερμοκρασία κοντά στους 20°C.

Ακόμη, το όργανο συνοδεύεται από κατάλληλο, πλήρως αυτοματοποιημένο ηλεκτρονικό σύστημα παροχής υψηλής τάσης (2500V), αλλά και ψηφιοποίησης του σήματος, αναλογικό προ-φίλτρο, αναλυτή ύψους παλμών, καθώς και μία ηλεκτρονική μονάδα διόρθωσης των απωλειών λόγω του νεκρού χρόνου (DSPECTM).

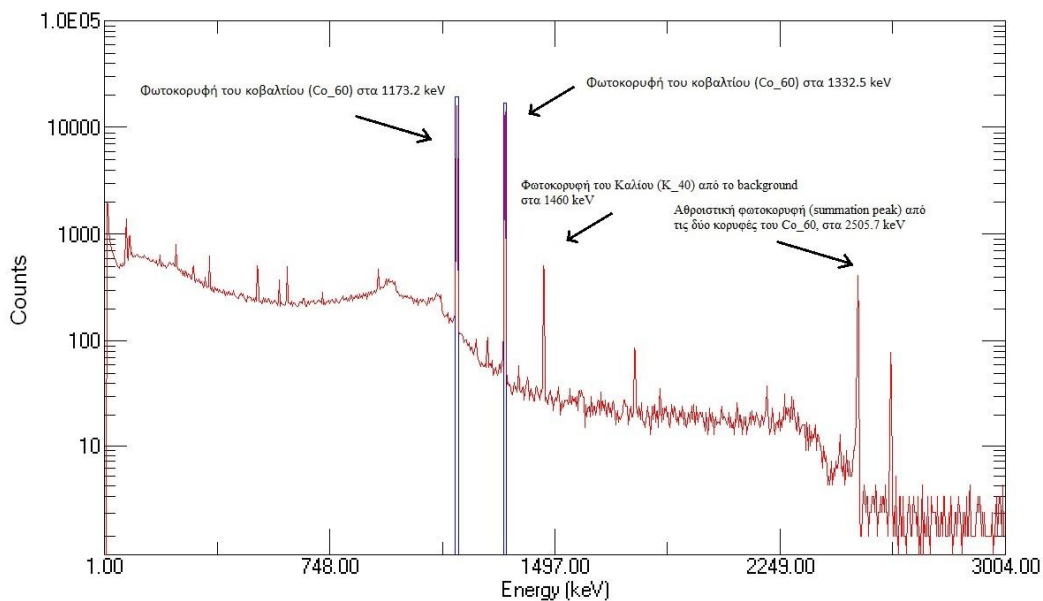
Τα φάσματα συλλέγονται και αναλύονται από εξειδικευμένο λογισμικό, το GammaVision™ της εταιρείας EG&G ORTEC.

Η διάταξη περιλαμβάνει επίσης δειγματοφορέα από plexiglass, με κυκλική οπή κυκλικής διατομής, ώστε να τοποθετείται το προς μελέτη δείγμα. Η κατασκευή αυτή, προκειμένου να μπορεί να μετακινείται και να εξυπηρετεί διάφορες αποστάσεις δείγματος-ανιχνευτή, τοποθετείται σε κατάλληλες ράγες αλουμινίου. Οι ράγες διαθέτουν 9 διαφορετικές θέσεις, για 9 καθορισμένες αποστάσεις από τον ανιχνευτή, όλες φυσικά κατά μήκος του άξονα του ανιχνευτή. Η εγγύτερη στον ανιχνευτή θέση απέχει 1cm και η τελευταία βρίσκεται στα 60cm από αυτόν. Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα φάσμα (από δείγμα κοβαλτίου), όπως φαίνεται στην οθόνη του υπολογιστή όταν καταγράφεται από το λογισμικό Gamma Vision. Στην πρώτη περίπτωση, της Εικόνας 8(α), φαίνεται το φάσμα, το οποίο υφίσταται

επεξεργασία, αναλύονται οι φωτοκορυφές του κάθε δείγματος και καταγράφεται ο αριθμός των καθαρών κρούσεων (net counts), το ενεργειακό κανάλι και η αντίστοιχη ενέργεια φωτοκορυφής. Στο άνω τμήμα έχουμε το συνολικό φάσμα, που εκτείνεται στο ενεργειακό εύρος από 20 έως 3000keV, ενώ στο κάτω, έχει γίνει μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή στην περιοχή που βρίσκονται οι προς ανάλυση κορυφές του ισότοπου του ^{60}Co . Στη δεύτερη περίπτωση, της Εικόνας 8(β), παρουσιάζεται το φάσμα, όπως τελικά αποθηκεύεται, όπου με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι φωτοκορυφές που έχουν σημειωθεί και αναλυθεί.



Εικόνα 8 (α): Φάσμα του ^{60}Co , όπως παρουσιάζεται από το λογισμικό *Gamma Vision*. Με κόκκινο χρώμα δίνονται οι προς ανάλυση φωτοκορυφές του ισότοπου αυτού.



Εικόνα 8 (β): Φάσμα του ^{60}Co , όπου με μπλε χρώμα δίνονται οι προς ανάλυση φωτοκορυφές του ισότοπου

5.2 Απόδοση Φωτοκορυφής

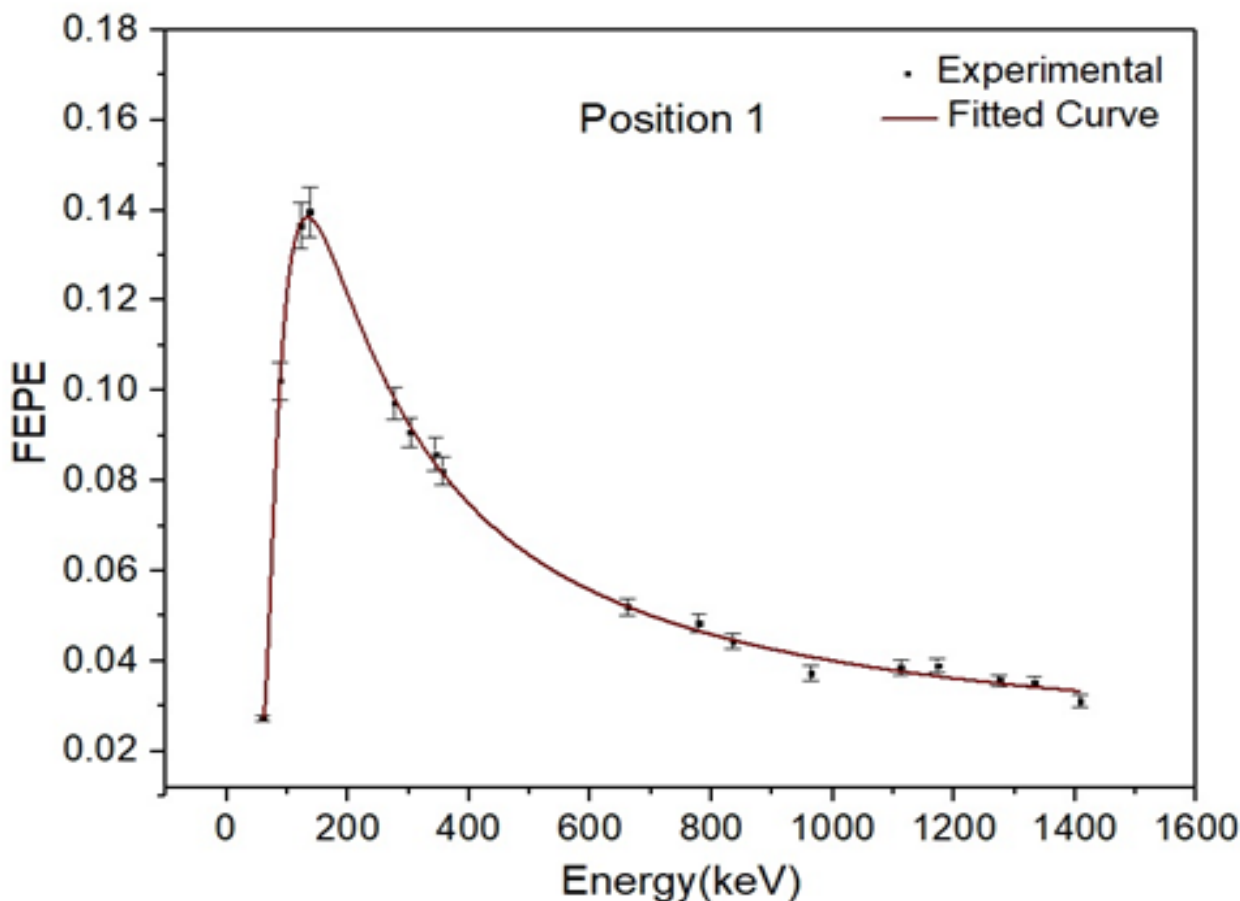
Η χρήση ενός ανιχνευτή, προϋποθέτει τη βαθμονόμησή του ως προς την ενέργεια αλλά και ως προς την απόδοσή του.

Σε ότι αφορά την πρώτη παράμετρο, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μία συσχέτιση μεταξύ της κλίμακας των καναλιών και της ενεργειακής κλίμακας. Ουσιαστικά δηλαδή, μετά τη βαθμονόμηση αυτή, κάθε τιμή της ενέργειας θα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Χρησιμοποιείται λοιπόν μια σειρά από πηγές με προσδιορισμένες από τη βιβλιογραφία φωτοκορυφές, βάσει των οποίων προσδιορίζεται η σχέση καναλιών και ενεργειών.

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος που συμβάλλει στον προσδιορισμό της ενεργότητας του υπό ανάλυση δείγματος, είναι η απόδοση φωτοκορυφής που παρέχεται από τον χρησιμοποιούμενο ανιχνευτή. Να σημειωθεί εδώ, ότι η απόδοση ενός συγκεκριμένου ανιχνευτή εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων και τη γεωμετρία δείγματος-ανιχνευτή. Έτσι λοιπόν, ο πειραματιστής οφείλει να βαθμονομήσει ως προς την απόδοση το όργανο που διαθέτει, προκειμένου να βασιστεί σε ασφαλή στοιχεία. Το αποτέλεσμα αυτής της βαθμονόμησης, εκφράζει την ικανότητα του οργάνου να ανιχνεύει ολόκληρη την ενέργεια που έχει εναποτεθεί πλήρως από ένα φωτόνιο συγκεκριμένης αρχικής ενέργειας. Όλα τα φωτόνια με την ίδια αρχική ενέργεια, που καταγράφονται πλήρως, συλλέγονται στο φάσμα κάτω από την αντίστοιχη ενέργεια φωτοκορυφής. Ο λόγος του πλήθους των φωτονίων που αποδίδουν στον ανιχνευτή όλη την ενέργειά τους και συνεπώς καταγράφονται κάτω από την φωτοκορυφή (επιφάνεια φωτοκορυφής), προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή στην ενέργεια αυτή, ορίζεται ως απόδοση φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency-FEPE) [16].

Η βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης ως προς την απόδοση έγινε στα πλαίσια Πρακτικής Άσκησης [20].

Οι πειραματικές τιμές και η αναλυτική σχέση που εκφράζει το μέγεθος της απόδοσης (FEPE) συναρτήσεως της ενέργειας για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 1cm, δίνεται στο Γράφημα 5.



Γράφημα 5: Η γραφική παράσταση της FEPE συναρτήσει της ενέργειας για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 1cm

Η αναλυτική σχέση που περιγράφει τη συγκεκριμένη καμπύλη, είναι:

$$y=0.0175 + 21.41825x^{-1} + 1539.50091x^{-2} - 407162.0377x^{-3} + 1.43871E7x^{-4} \quad (14)$$

Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση της συγκεκριμένης καμπύλης (Σχέση (14)), ο συντελεστής προσδιορισμού είναι: $R^2=0.99447$ [20].

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 , αποτελεί δείκτη συσχέτισης δύο μεγεθών, εκφράζοντας την εξάρτηση της διακύμανσης της μεταβλητής Y από τη διακύμανση της μεταβλητής X . Υποδεικνύει ουσιαστικά την «προσαρμογή» της καμπύλης αναδρομής στα αντίστοιχα πειραματικά σημεία. Το εύρος τιμών του είναι μεταξύ 0 (καθόλου εφαρμογή) και 1 (τέλεια εφαρμογή).

Επομένως η συγκεκριμένη καμπύλη (Σχέση (14)) παρουσιάζει πολύ ικανοποιητική σύγκλιση.

Είναι λοιπόν πλέον εφικτό, αντικαθιστώντας την τιμή της εκάστοτε ενέργειας στη θέση του x στην εξίσωση (14), να προσδιορίζεται η απόδοση του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη ενέργεια.

5.3 Μετρήσεις

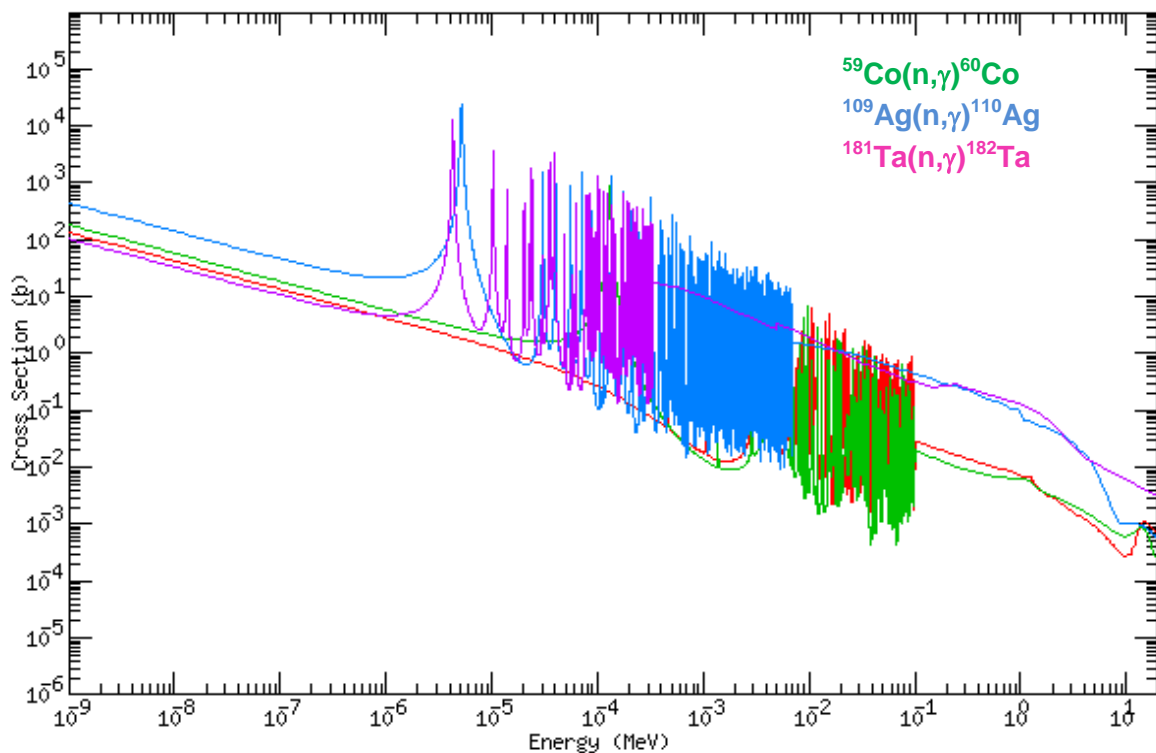
Πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπική ανάλυση σε 18 διαφορετικά δείγματα. Χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή 6 δείγματα Co, 6 δείγματα Ta και 6 δείγματα Ag, το καθένα από τα οποία είχε ακτινοβοληθεί σε διαφορετική θέση στον αντιδραστήρα JET, όπως συζητήθηκε στην παράγραφο 4 (θέσεις A1, A2, A4, B2, B3, B5 για κάθε δείγμα).

Κατά την πειραματική διαδικασία στον ανιχνευτή γερμανίου, λήφθηκαν μετρήσεις για μία απόσταση δείγματος-ανιχνευτή ίση με 1 cm (Θέση 1), βάσει ενός συνδυασμού κριτηρίων, όπως ο χρόνος ημιζωής των ισοτόπων και τα επίπεδα ενεργότητάς τους. Πιο συγκεκριμένα, η θέση αυτή επιλέχθηκε αρχικά με γνώμονα την τιμή της απόδοσης του οργάνου, ως η πιο κοντινή στον ανιχνευτή και επομένως ως αυτή με τη μεγαλύτερη απόδοση. Ταυτόχρονα όμως, λήφθηκε υπόψη το γεγονός, ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν αρκετό χρονικό διάστημα μετά το πέρας της ακτινοβόλησης, περίπου έξι μηνών, ενώ παράλληλα κάποιες από τις θέσεις ακτινοβόλησης στο «Torus Hall», βρίσκονταν μακριά από την πηγή του πλάσματος και επομένως είχαν χαμηλή αναμενόμενη τιμή ροής νετρονίων. Έτσι εκτιμήθηκε, ότι θα παρουσιάσουν μειωμένη ενεργότητα. Ακόμη, παρόλο που επιλέχθηκε η κοντινότερη θέση στον ανιχνευτή, δόθηκε μεγαλύτερη διάρκεια μέτρησης στα δείγματα με το μικρότερο χρόνο ημιζωής. Για παράδειγμα, το Co αποτελεί ένα αρκετά ενεργό δείγμα, με χρόνο ημιζωής, 1925 μέρες, με αποτέλεσμα η ενεργότητά του, ακόμα και με την πάροδο μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος, να μην έχει μειωθεί σημαντικά ώστε να δυσχεραίνει ιδιαίτερα τη μελέτη του. Ωστόσο, το αντίστοιχο μέγεθος για το ταντάλιο και τον άργυρο είναι 115 και 250 μέρες για το καθένα. Επομένως η πάροδος περίπου έξι μηνών, είχε σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της ενεργότητάς τους, κατά 80% για το ταντάλιο και κατά 50% για τον άργυρο. Τελικά, τα δείγματα κοβαλτίου μετρήθηκαν από 6 έως 72 h περίπου, τα δείγματα τανταλίου από 24 έως 72 h και τα δείγματα αργύρου από 24 έως 197 h περίπου. Μετά το πέρας των μετρήσεων αυτών, λήφθηκε ακόμη μία σημαντική μέτρηση, αυτή του υποβάθρου (background). Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη, προκειμένου να αφαιρεθεί ο αριθμός των κρούσεων που προσμετρώνται στις κορυφές του φάσματος, λόγω των ισοτόπων που υπάρχουν στο φυσικό υπόβαθρο.

Στον Πίνακα 3 φαίνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ενώ στο γράφημα 6 απεικονίζονται οι ενεργές διατομές συναρτήσει της ενέργειας για τις αντιδράσεις που μελετήθηκαν.

Foils	Πυρηνική αντίδραση	Ισοτοπική αφθονία (%)	Χρόνος ημιζωής ισότοπου (d)	Ενέργεια κύριων φωτοκορυφών (keV)	Ποσοστό εκπομπής ακτινών-γ (%)
Co	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	100.00	1925.28 ± 0.15	1173.2 1332.5	99.9 100.0
Ta	$^{181}\text{Ta}(n,\gamma)^{182}\text{Ta}$	99.99	114.74 ± 0.12	1121.3 1189.0 1221.4 1231.0	35.0 16.4 27.4 11.6
Ag	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$	48.16	249.83 ± 0.04	657.8 884.7 937.5 1384.3	94.7 72.9 34.3 24.3

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται στα δείγματα [21]



Γράφημα 6: Ενεργές διατομές για την αντίδραση (n,γ) συναρτήσει της ενέργειας, για το κοβάλτιο, το ταντάλιο και τον άργυρο στους 293 K [22]

Ο στόχος των μετρήσεων, ήταν να εξαχθεί μία τιμή για τις καθαρές κρούσεις, στην περίπτωση κάθε δείγματος και κάθε θέσης. Στην τιμή αυτή συνυπολογίστηκε και η παράμετρος του «νεκρού χρόνου». Πρόκειται για τη διαφορά χρόνου, ανάμεσα στο χρόνο που στην πραγματικότητα διαρκεί η μέτρηση και στο χρόνο κατά τον οποίο ο ανιχνευτής καταγράφει φωτόνια. Ουσιαστικά το όργανο, διαθέτει μία δυνατότητα απόκρισης από την καταγραφή ενός φωτονίου μέχρι την επόμενη και στο χρονικό αυτό διάστημα, είναι πιθανό να εκπνευθεί και να μην καταγραφεί ένα επόμενο φωτόνιο. Η παράμετρος του «νεκρού χρόνου» αυξάνεται με τη μείωση της απόστασης δείγματος-ανιχνευτή και ιδιαίτερα στα υψηλά επίπεδα ενεργότητας. Ωστόσο, στην περίπτωση των προς μελέτη δειγμάτων, η ενεργότητα, μετά το πέρας των έξι μηνών, είναι πλέον χαμηλή, επομένως ακόμα και για τη θέση 1, η παράμετρος αυτή επηρεάζει ελάχιστα τα αποτελέσματα.

6. Ανάλυση

6.1 Υπολογισμός ενεργότητας

Η ενεργότητα του δείγματος κατά τη λήξη της ακτινοβόλησης προσδιορίζεται ως εξής:

$$A_o = \frac{C}{\varepsilon y e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (15)$$

όπου:

- C: τα Net Counts
- ε: Full Energy Peak Efficiency, δηλαδή η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή
- y: το yield
- λ: η σταθερά διάσπασης για το παραγόμενο ραδιονουκλίδιο
- t_d : ο χρόνος που περνάει από τη λήξη της ακτινοβόλησης μέχρι την έναρξη της μέτρησης
- t_c : ο χρόνος που διήρκησε η μέτρηση

Για τον υπολογισμό της ενεργότητας κόρου του εκάστοτε δείγματος, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$A_{sat} = \frac{C \lambda}{\varepsilon y e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \times \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t_{irr}})} \quad (16)$$

όπου:

t_{irr} : ο χρόνος ακτινοβόλησης

Ο παράγοντας $(1 - e^{-\lambda t_c})$, αντικατοπτρίζει το γεγονός, ότι κατά την ακτινοβόληση έχουμε ταυτόχρονα διασπάσεις του ραδιενεργού ισοτόπου.

Αν το δείγμα έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής συγκριτικά με τον απαιτούμενο χρόνο για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, δηλαδή: $t_{1/2} \gg t_c$, τότε, έχουμε:

$$(1 - e^{-\lambda t_c}) \approx \lambda t_c \quad (17)$$

Δηλαδή η σχέση (15) γίνεται:

$$A_o = \frac{C}{\varepsilon y e^{-\lambda t_d} \lambda t_c} \quad (18)$$

ενώ η σχέση (16) διαμορφώνεται ως εξής:

$$A_{sat} = \frac{C \lambda}{\varepsilon y e^{-\lambda t_d} \lambda t_c} \times \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t_{irr}})} \quad (19)$$

Για παράδειγμα, το ^{60}Co , είναι ένα ισότοπο με χρόνο ημιζωής 5.3 y, γεγονός που υποδεικνύει ότι συγκριτικά με αυτόν, το διάστημα των μετρήσεων που για παράδειγμα είναι 48 h, είναι σχεδόν αμελητέο.

6.1.1 Διορθώσεις

Όπως αναλύθηκε στις παραγράφους 3.1.1 και 3.1.2, στην επεξεργασία και την ανάλυση των μετρήσεων, λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα που θα επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα. Αρχικά, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε το φαινόμενο αυτοαπορρόφησης (self-attenuation) των ακτίνων-γ, από το προς μελέτη δείγμα (παράγραφος 4.1.1). Προκειμένου να συμπεριληφθεί το φαινόμενο αυτό στους υπολογισμούς, ενσωματώνεται ένας συντελεστής διόρθωσης στη σχέση της ενεργότητας κατά τη λήξη της ακτινοβόλησης (A_o).

Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος της FEPE του ανιχνευτή για ένα καθορισμένο δείγμα, προς τη FEPE του ανιχνευτή για μία σημειακή πηγή στο κενό (χωρίς δηλαδή κάποιο δείγμα). Για να υπολογιστεί, γίνεται χρήση προσομοιώσεων Monte Carlo και συγκεκριμένα του κώδικα MCNP (Monte Carlo N-Particle), κατάλληλα προσαρμοσμένου στον χρησιμοποιούμενο ανιχνευτή γερμανίου, για τις παραμέτρους και το υλικό του δείγματος που εξετάζεται σε κάθε περίπτωση, αλλά και τις ενέργειες φωτοκορυφής.

Εφαρμόζοντας λοιπόν το συντελεστή που δίνεται από την προσομοίωση, στην ενεργότητα κατά τη λήξη της ακτινοβόλησης (A_o), η σχέση διορθώνεται ως εξής:

$$A_o = \frac{C \lambda}{\varepsilon f_\gamma y e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (20)$$

όπου f_γ : ο συντελεστής αυτοαπορρόφησης των ακτίνων-γ.

Εν συνεχεία, εισήχθη η αντίστοιχη διόρθωση για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.1.2. Στην περίπτωση αυτή γίνεται χρήση του κατάλληλου λογισμικού “TrueCoinc” [23], το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Ινστιτούτο Πειραματικής Φυσικής Kossuth, της Ουγγαρίας και υποστηρίζεται από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency) [24]. Ομοίως, η τιμή της ενεργότητας κατά τη λήξη της ακτινοβόλησης θα διορθωθεί με τον συντελεστή f_{TCC} , που έχει δοθεί από το λογισμικό. Άρα τελικά:

$$A_o = \frac{C \lambda}{\varepsilon f_{\gamma} y f_{TCC} e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (21)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει σαφώς να τονιστεί, ότι οι προαναφερθείσες διορθώσεις εισάγονται και στον υπολογισμό της ενεργότητας κόρου (A_{sat}), δηλαδή τελικά:

$$A_{sat} = \frac{C \lambda}{\varepsilon f_{\gamma} y f_{TCC} e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \times \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t_{irr}})} \quad (22)$$

6.2 Υπολογισμός ροής νετρονίων

Η ενεργότητα κόρου (saturation activity) συνδέεται με τη ροή νετρονίων με την παρακάτω σχέση:

$$A_{sat} = \lambda N_t \int \sigma(E) \Phi(E) dE \quad (23)$$

όπου:

- N_t : ο αριθμός των πυρήνων
- $\sigma(E)$: η μικροσκοπική ενεργός διατομή για την εκάστοτε αντίδραση και για ενέργεια E
- $\Phi(E)$: η ροή των νετρονίων στην ενέργεια E

Αναλυτικότερα ο αριθμός των πυρήνων N_t , υπολογίζεται ως εξής:

$$N_t = \frac{m \alpha N_{Av}}{M} \quad (24)$$

όπου:

- m : η μάζα του ακτινοβολημένου foil
- α : η ισοτοπική αφθονία
- N_{Av} : ο αριθμός Avogadro
- M : το ατομικό βάρος [25]

η εξίσωση τώρα μπορεί να γραφεί ως:

$$A_{sat} = \lambda \frac{m \alpha N_{Av}}{M} \int \sigma(E) \Phi(E) dE \quad (25)$$

ή πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με τη ροή

$$A_{sat} = \lambda \frac{m \alpha N_{Av}}{M} \Phi_{PE} \frac{\int \sigma(E) \varphi(E) dE}{\int \varphi(E) dE} \quad (26)$$

όπου Φ_{PE} : η ροή νετρονίων του foil στο κέντρο του κυλίνδρου πολυαιθυλενίου

Ορίζοντας τώρα την ενεργό διατομή:

$$\sigma_{eff} = \frac{\int_0^{E_{max}} \sigma(E) \varphi(E) dE}{\int_0^{E_{max}} \varphi(E) dE} \quad (27)$$

η εξίσωση (26) απλοποιείται ως εξής:

$$A_{sat} = \lambda \frac{m \alpha N_{Av}}{M} \Phi_{PE} \sigma_{eff} \quad (28)$$

Επιλύοντας ως προς τη ροή:

$$\Phi_{PE} = \frac{A_{sat} M}{\lambda m \alpha N_{Av} \sigma_{eff}} \quad (29)$$

Προσδιορίζοντας λοιπόν την τιμή της ενεργότητας κόρου, πειραματικά, μέσω της καταγραφής των net counts και γνωρίζοντας την ενεργό διατομή (σ_{eff}), μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της ροής των νετρονίων, στο κέντρο του κυλίνδρου πολυαιθυλενίου.

Στην παρούσα εργασία, η ενεργός διατομή σ_{eff} , λαμβάνεται από το συνδυασμό πειραματικών μετρήσεων και προσομοιώσεων, περαιτέρω αναφορά στις οποίες θα γίνει στην Παράγραφο 7.4.

6.3 Διάδοση σφαλμάτων και υπολογισμός αβεβαιότητας

Στο σημείο αυτό, χρειάζεται να προσδιοριστεί η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα που θα προκύψει από τις εξισώσεις στην Παράγραφο 6.2, συνυπολογίζοντας όλα τα μεγέθη που συνεισφέρουν σε αυτήν. Στην παρούσα μελέτη, λήφθηκαν υπόψη σφάλματα του χρόνου ημιζωής (half life), των καθαρών κρούσεων (net counts), του συντελεστή της πραγματικής σύμπτωσης (f_{TCC}), του συντελεστή αυτοαπορρόφησης ακτινών-γ (f_γ) και του συντελεστή σ_{eff} , όπως αυτός δίνεται από την προσομοίωση με τον κώδικα MCNP (Monte Carlo Neutron Particle). Η αβεβαιότητα για τις τιμές που αναφέρονται σε χρονική διάρκεια (t_{irr} , t_d , t_c) είναι αμελητέα και δε λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάδοση σφαλμάτων, όπως επίσης και η αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής ακτινών-γ (yield).

Σύμφωνα λοιπόν με τη διάδοση σφαλμάτων, η αβεβαιότητα για την τιμή της ενεργότητας κατά το πέρας της ακτινοβολήσης θα είναι:

$$\sigma(A_0) = \sqrt{\sigma(\text{net counts})^2 + \sigma(\text{half life})^2 + \sigma(f_{TCC})^2 + \sigma(f_\gamma)^2} \quad (30)$$

όπου $\sigma(\text{net counts})$: η σχετική αβεβαιότητα για τον αριθμο των καθαρών

$\sigma(\text{half life})$: η αβεβαιότητα του χρόνου ημιζωής

$\sigma(f_{TCC})$: η αβεβαιότητα του συντελεστή διόρθωσης

$\sigma(f_\gamma)$: η αβεβαιότητα του συντελεστή αυτοαπορρόφησης

και η αβεβαιότητα για την τιμή της ροής θα είναι:

$$\sigma(\Phi_{PE}) = \sqrt{\sigma(\text{net counts})^2 + \sigma(\text{half life})^2 + \sigma(f_\gamma)^2 + \sigma(f_{TCC}) + \sigma(\sigma_{eff})} \quad (31)$$

όπου $\sigma(\sigma_{eff})$: η αβεβαιότητα του παράγοντα σ_{eff} .

Αναλυτικά λοιπόν για τον κάθε όρο:

- Η αβεβαιότητα των καθαρών κρούσεων δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(\text{net counts}) = \frac{\delta(\text{net counts})}{\text{net counts}} \quad (32)$$

Η τιμή του απόλυτου σφάλματος των καθαρών κρούσεων, δηλαδή ο όρος $\delta(\text{net counts})$, λαμβάνεται από το λογισμικό που χρησιμοποιείται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

- $\sigma(\text{half life})$: λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία για το κάθε ισότοπο [21]
- $\sigma(f_{TCC})$: δίνεται από το λογισμικό «True Coinc». Οι αναλυτικοί πίνακες για το συντελεστή δίνονται στην παράγραφο 7.1
- $\sigma(f_\gamma)$: υπολογίζεται από τον κώδικα προσομοίωσης MCNP
- $\sigma(\sigma_{eff})$: υπολογίζεται από κώδικα προσομοίωσης και αντίστοιχη πειραματική μελέτη

Σημειώνεται εδώ ότι τα σφάλματα δίνονταν από τα κατάλληλα λογισμικά και από τη βιβλιογραφία είτε ως σχετικές αβεβαιότητες σε ποσοστά επί τοις εκατό είτε ως απόλυτα σφάλματα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $\sigma_x = \frac{\delta_x}{x}$, με σ_x την σχετική αβεβαιότητα του μεγέθους x και δ_x το απόλυτο σφάλμα του.

7. Αποτελέσματα και συζήτηση

7.1 Συντελεστές διόρθωσης

Τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη, όπως αυτά αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, επιδρούν στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό, εισάγονται και λαμβάνονται υπόψη οι αντίστοιχοι συντελεστές για κάθε μέγεθος, με στόχο να εξαχθεί ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται αρχικά οι συντελεστές αυτοαπορρόφησης ακτινών-γ με τη σχετική τους αβεβαιότητα, σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων. Οι συντελεστές αυτοί, υπολογίζονται για κάθε έλασμα με χρήση του κώδικα MCNP [26].

Foil	Ενέργεια κύριων φωτοκορυφών (keV)	f_{γ}	$\sigma(f_{\gamma})$ (%)
Co	1173.2	0.943	0.1
	1332.5	0.944	0.1
Ta	1121.3	0.928	0.1
	1189.0	0.930	0.1
	1221.4	0.931	0.1
	1231.0	0.931	0.1
Ag	657.8	0.928	0.1
	884.7	0.936	0.1
	937.5	0.937	0.1
	1384.3	0.944	0.1

Πίνακας 4: Συντελεστές αυτοαπορρόφησης ανά δείγμα και ενέργεια φωτοκορυφής

Στον Πίνακα 5 δίδονται ακόμη, οι συντελεστές διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης συνοδευόμενοι από τη σχετική αβεβαιότητα (ποσοστιαία), οι οποίοι όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.3.2, υπολογίζονται με χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού «True Coinc» [26].

Foil	Ενέργεια κύριων φωτοκορυφών (keV)	f_{TCC}	σ_{TCC} (%)
Co	1173.2	0.968	2.9
Co	1332.5	0.968	2.9
Ta	1121.3	0.883	2.7
Ta	1189.0	1.047	3.1
Ta	1221.4	0.941	2.8
Ta	1231.0	0.892	2.7
Ag	657.8	0.913	2.7
Ag	884.7	0.906	2.7
Ag	937.5	0.908	2.7
Ag	1384.3	0.970	2.9

Πίνακας 5: Συντελεστές διόρθωσης TCC, ανά δείγμα και ανά ενέργεια φωτοκορυφής

Τέλος, στον Πίνακα 6, παρουσιάζονται οι τιμές του παράγοντα σ_{eff} (ανά foil, και θέση ακτινοβολήσης στο Totus Hall) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Σημειώνεται ότι οι συντελεστές αυτοί προσδιορίστηκαν στα πλαίσια προηγούμενης μελέτης, συνδυάζοντας πειραματικά δεδομένα και προσομοιώσεις Monte Carlo [27-28]. Πιο συγκεκριμένα, βάση για τον υπολογισμό των συντελεστών σ_{eff} αποτέλεσαν οι τιμές των ενεργών διατομών που προσδιορίστηκαν πειραματικά κατά τη διάρκεια ακτινοβολήσης των δειγμάτων με D-T νετρόνια στο πεδίο αναφοράς της γεννήτριας νετρονίων Frascati Neutron Generator. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε στις τιμές αυτές κατάλληλος συντελεστής διόρθωσης, ο οποίος υπολογίστηκε με χρήση του κώδικα MCNP, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετική ενέργεια νετρονίων της πηγής D-D του JET, και την διαφορετική κάθε φορά θέση ακτινοβολήσης.

Επισημαίνεται ότι, λόγω έλλειψης λεπτομερούς μοντέλου στην περιοχή του Octant 6, δεν ήταν δυνατό να υπολογιστούν μέσω προσομοιώσεων συντελεστές για τη θέση ακτινοβολήσης A1 και γι αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές που αντιστοιχούν στη θέση A2.

Foil	σ_{eff} (cm ²)					
	Θέση A1	Θέση A2	Θέση A4	Θέση B2	Θέση B3	Θέση B5
Co	3.46E-19	3.46E-19	3.61E-19	3.61E-19	3.60E-19	4.23E-19
Ta	1.07E-20	1.07E-20	1.09E-20	1.09E-20	1.08E-20	1.29E-20
Ag	6.07E-21	6.07E-21	6.30E-21	6.30E-21	6.29E-21	7.33E-21

Πίνακας 6: Οι τιμές του παράγοντα σ_{eff} για κάθε θέση ακτινοβολήσης

Η αβεβαιότητα των συντελεστών σ_{eff} , είναι σε όλες τις περιπτώσεις ίση με 10.5% [28].

Όλοι οι παραπάνω συντελεστές διόρθωσης, συνεισφέρουν στα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στις παραγράφους 7.2 και 7.3, σύμφωνα με τις μαθηματικές σχέσεις (17), (18) που δόθηκαν στο κεφάλαιο 6.

7.2 Ενεργότητα

Στην παράγραφο αυτή, δίνονται οι τιμές της ενεργότητας κατά τη λήξη της ακτινοβόλησης (A_0), μετά την επεξεργασία των μετρήσεων. Στον Πίνακα 7, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με την αντίστοιχη αβεβαιότητα επί τοις εκατό, για το κάθε έλασμα στην εκάστοτε θέση στο «Torus Hall». Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 5.2, στο κάθε δείγμα που εξετάστηκε, αναλύθηκαν περισσότερες από μια φωτοκορυφές (δύο για το κοβάλτιο, τέσσερις για το ταντάλιο και τέσσερις για τον άργυρο). Για το λόγο αυτό, έχει ληφθεί υπόψη ο σταθμισμένος μέσος των αποτελεσμάτων για την ενεργότητα, με βάση τη διαδικασία στάθμισης που περιγράφεται στο Παράρτημα της εργασίας.

Θέση στο «Torus Hall»	Foil	A_0 (Bq)	$\sigma(A_0)$ (%)
A1	<i>Co</i>	7.09E+01	2.16
	<i>Ta</i>	5.61E+02	5.41
	<i>Ag</i>	2.39E+01	2.78
A2	<i>Co</i>	3.64E+00	2.57
	<i>Ta</i>	2.39E+01	6.84
	<i>Ag</i>	9.72E-01	2.08
A4	<i>Co</i>	9.55E-01	2.40
	<i>Ta</i>	6.97E+00	10.00
	<i>Ag</i>	1.12E-01	15.2
B2	<i>Co</i>	1.93E+00	2.67
	<i>Ta</i>	7.75E+00	6.96
	<i>Ag</i>	1.64E-01	1.62
B3	<i>Co</i>	3.98E+00	2.65
	<i>Ta</i>	1.61E+01	5.31
	<i>Ag</i>	4.05E-01	15.81
B5	<i>Co</i>	6.05E-02	7.26
	<i>Ta</i>	5.82E-01	23.2
	<i>Ag</i>	-	-

Πίνακας 7: Οι τιμές της ενεργότητας κατά το πέρας της ακτινοβόλησης, για κάθε θέση των δειγμάτων στο «Torus Hall»

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα του Πίνακα 7, παρατηρείται ότι όσο ένα δείγμα απομακρύνεται από την πηγή του πλάσματος, τόσο η τιμή της ενεργότητάς του κατά το πέρας της ακτινοβόλησης μειώνεται. Η παρατήρηση αυτή γενικεύεται και ισχύει αντίστοιχα σε όλα τα ελάσματα. Για παράδειγμα, το δείγμα του κοβαλτίου παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή της ενεργότητας στη θέση Α1, που όπως έχει αναδειχθεί στην Εικόνα 6 του Κεφαλαίου 4, είναι η κοντινότερη στο tokamak, ενώ όσο η απόσταση αυτή αυξάνεται και μεσολαβούν περισσότερα τοιχώματα ή στοιχεία του εξοπλισμού του κτιρίου, η τιμή αυτή μειώνεται διαρκώς.

Εξετάζοντας τώρα τη συμπεριφορά των δειγμάτων ανά θέση ακτινοβόλησης, διαπιστώνεται ότι η μεγαλύτερη ενεργότητα αντιστοιχεί στο ταντάλιο, ενώ ακολουθεί το κοβάλτιο και τέλος ο άργυρος. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ενεργό διατομή του τανταλίου στις αντιδράσεις (n,γ) που μελετώνται, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για την άργυρο και το κοβάλτιο, όπως φαίνεται από το Γράφημα 6 στο Κεφάλαιο 5. Αυτό λοιπόν συνεπάγεται, ότι το ταντάλιο ενεργοποιείται περισσότερο από τα άλλα δύο δείγματα, επομένως σε όλες τις περιοχές θα παρουσιάζει υψηλότερα επίπεδα ενεργότητας.

Υπογραμμίζεται εδώ, ότι η τιμή της ενεργότητας του ελάσματος αργύρου στη θέση Β5 δε μπορεί να δοθεί, διότι εκτιμήθηκε ως μη αξιόπιστη. Ουσιαστικά, λόγω της μεγάλης του απόστασης από την πηγή πλάσματος, αλλά και της μικρής ενεργού διατομής στην αντίδραση (n,γ), το δείγμα δεν ενεργοποιείται επαρκώς. Ο παράγοντας αυτός σε συνδυασμό με το πέρας μεγάλου χρονικού διαστήματος από τη λήξη της ακτινοβόλησης οδηγεί σε σημαντικά μειωμένη ενεργότητα. Επομένως, κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, η καταγραφή των καθαρών κρούσεων δε συνοδεύεται από ικανοποιητική στατιστική και δεν προκύπτουν ασφαλή αποτελέσματα για το συγκεκριμένο δείγμα.

7.3 Ροή νετρονίων

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται οι τιμές της ροής των νετρονίων, σε κάθε θέση ακτινοβολήσης στο «Torus Hall», συνοδευόμενες από τη σχετική αβεβαιότητα σε ποσοστό επί τοις εκατό. Οι τιμές που δίνονται στον Πίνακα 8, προκύπτουν με τη χρήση του σταθμισμένου μέσου, συνυπολογίζοντας τις τιμές της ροής ανά δείγμα, καθώς και την αντίστοιχη αβεβαιότητα.

Θέση «Torus Hall»	Foil	Φ_{PE} (n/cm ²)	$\sigma(\Phi_{PE})$ (%)	$\Phi_{σταθμ}$ (n/cm ²)	$\sigma(\Phi_{σταθμ})$ (%)
A1	Co	4.58E+06	7.71	5.25E+06	17.97
	Ta	6.94E+06	5.45		
	Ag	4.81E+06	5.45		
A2	Co	2.34E+05	7.75	2.28E+05	17.69
	Ta	2.99E+05	6.65		
	Ag	1.96E+05	6.46		
A4	Co	6.00E+04	7.80	4.43E+04	50.99
	Ta	8.40E+04	10.02		
	Ag	2.28E+04	18.03		
B2	Co	1.19E+05	7.79	7.32E+04	47.49
	Ta	9.25E+04	7.05		
	Ag	3.33E+04	19.11		
B3	Co	2.47E+05	7.74	1.71E+05	38.43
	Ta	2.07E+05	5.53		
	Ag	8.24E+04	16.49		
B5	Co	3.21E+03	10.39	3.35E+03	17.20
	Ta	5.70E+03	23.83		
	Ag	-	-		

Πίνακας 8: Οι τιμές της ροής των νετρονίων ανά θέση ακτινοβολήσης στο «Torus Hall»

Με βάση τον Πίνακα 8, διαπιστώνεται ότι οι νετρονικές ροές είναι αυξημένες σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στο tokamak και επομένως στην πηγή πλάσματος. Εξετάζοντας την περίπτωση της θέσης A4, η οποία βρίσκεται στην αρχή του λαβυρίνθου στη νοτιοδυτική πλευρά του κτιρίου (Εικόνα 7), παρατηρείται ότι η ροή των νετρονίων είναι σχεδόν δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στη θέση A1 (ανά δείγμα), δηλαδή η ροή μειώνεται σημαντικά με την απομάκρυνση από το tokamak. Τέλος, η μικρότερη ροή υπολογίζεται στη θέση B5, δηλαδή στο εσωτερικό της δομής των κάθετων αγωγών στη νοτιοανατολική περιοχή του «Torus Hall». Λόγω της μεγάλης απόστασης αλλά και του πολύπλοκου εξοπλισμού που μεσολαβεί από την πηγή πλάσματος μέχρι τη θέση αυτή,

πραγματοποιούνται περισσότερες σιεδάσεις νετρονίων, επομένως η συμπεριφορά αυτή αναμενόταν.

Σημειώνεται ακόμη, ότι όμοια με την περίπτωση της ενεργότητας στην Παράγραφο 7.2 για τον Ag, δεν δίνεται τιμή για τη ροή των νετρονίων, λόγω του πολύ αυξημένου σφάλματος που την καθιστά μη αξιόπιστη.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών των ροών που υπολογίζονται από κάθε έλασμα, γεγονός που εκφράζεται και στις μεγάλες αβεβαιότητες της σταθμισμένης μέσης τιμής ανά θέση. Οι αποκλίσεις αυτές είναι μικρότερες στις περιοχές πλησιέστερα στο tokamak και αυξάνονται με την απομάκρυνση από την πηγή πλάσματος. Εξαιρέση αποτελεί η σχετικά χαμηλή αβεβαιότητα που αντιστοιχεί στη σταθμισμένη μέση τιμή της ροής στη θέση B5, η οποία ωστόσο οφείλεται στις μεγάλες αβεβαιότητες των επιμέρους τιμών (από κάθε έλασμα) που τη συνθέτουν.

7.4 Συζήτηση

Από την ανάλυση που προηγήθηκε στις Παραγράφους 7.2 και 7.3, παρατηρείται ότι οι τιμές της ενεργότητας, αλλά και της ροής των νετρονίων, παρουσιάζουν μείωση με την απομάκρυνση των δειγμάτων από τον αντιδραστήρα, γεγονός που αναμενόταν. Για παράδειγμα, είναι φανερό από τον Πίνακα 8, ότι οι τιμές των ροών στη θέση A1 είναι κατά τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στη θέση B5.

Σημειώνεται εδώ, ότι αξιοποιήθηκαν διαφορετικά δείγματα για τη μέτρηση της ροής στις διάφορες θέσεις του «Totus Hall», με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων που θα μπορούσαν από μία ευρεία σκοπιά, να εξασφαλίσουν την ορθότητα των υπολογισμών. Ουσιαστικά δηλαδή εκτιμήθηκε, ότι θα ήταν ορθότερο να ληφθούν υπόψη αποτελέσματα από υλικά που διαφέρουν ως προς τη σύσταση, τους χρόνους ημιζωής των ραδιοϊσοτόπων που περιέχουν και τις ενεργές τους διατομές κατά την αντίδραση (n,γ). Σύγκλιση των τιμών των διαφορετικών ελασμάτων θα επιβεβαίωνε ολοκληρωτικά και την αξιοπιστία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Είναι φανερό ωστόσο από τον Πίνακα 8, ότι οι τιμές των νετρονικών ροών που υπολογίζονται βάσει του κάθε δείγματος, παρόλο που κατά κύριο λόγο συνοδεύονται από ικανοποιητικά σφάλματα (κάθε μία ξεχωριστά), δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ τους ανά θέση. Η διαφορά των τιμών που προκύπτουν, εξετάζεται και σε άλλες συναφείς μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν αλλά και σήμερα, πάνω σε μία D-D campaign. Οι αποκλίσεις ανάμεσα στις τιμές της ροής νετρονίων που υπολογίζονται για τα διάφορα ελάσματα, μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι, λόγω έλλειψης τιμών ενεργών διατομών που να ανταποκρίνονται με ακρίβεια στις "πραγματικές" συνθήκες ακτινοβόλησης (πηγή πλάσματος D-D με λεπτομερή περιγραφή των θέσεων ακτινοβόλησης στο JET) χρησιμοποιήθηκαν "ισοδύναμες" ενεργές διατομές που υπολογίστηκαν συνδυάζοντας πειραματικές τιμές και προσομοιώσεις. Οι τιμές αυτές αφενός στηρίζονται σε ενεργές διατομές που προσδιορίστηκαν πειραματικά σε πεδίο D-T (και όχι D-D) γεννήτριας νετρονίων, αφετέρου περιλαμβάνουν συντελεστές διόρθωσης που εκτιμήθηκαν

μέσω προσομοιώσεων με βάση το μοντέλο του κτιρίου του JET. Πρόκειται ωστόσο για μια εξαιρετικά περίπλοκη γεωμετρία, που περιλαμβάνει -εκτός από το tokamak και την πηγή πλάσματος- πλήθος οργάνων, εξαρτημάτων και δομών (πχ σκαλωσιές, σωληνώσεις κ.α.) που σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να περιγραφούν λεπτομερώς από ένα μοντέλο. Οι προσεγγίσεις που περιέχονται στο μοντέλο του JET εισάγουν αβεβαιότητες στους διάφορους υπολογισμούς και μπορεί να συμβάλλουν στην "απομάκρυνση" των τιμών που προσδιορίζονται για τα διάφορα ελάσματα.

Έτσι, η χρήση των ενεργών αυτών διατομών οδηγεί τελικά σε μεγάλη απόκλιση μεταξύ των τιμών των ροών, διότι δεν αναφέρονται στην περίπτωση των συγκεκριμένων ενεργειών των νετρονίων που εξετάζονται και συνεπώς δεν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στα πραγματικά δεδομένα του συγκεκριμένου περιβάλλοντος. Το ζήτημα αυτό εξετάζεται και γίνονται προσπάθειες για την επίλυσή του στις τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες. Ουσιαστικά, όλο αυτό το εγχείρημα στοχεύει στην ανακατασκευή του ενεργειακού φάσματος των νετρονίων σε ένα περιβάλλον σύντηξης, το οποίο θα παρέχει όλες τις απαραίτητες και ρεαλιστικές πληροφορίες για το περιβάλλον του αντιδραστήρα.

8. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας, ήταν η χαρτογράφηση των νετρονικών ροών στο εσωτερικό του κτιρίου του αντιδραστήρα σύντηξης JET. Προκειμένου να εξαχθούν οι τιμές αυτές, μελετήθηκαν μεταλλικά ελάσματα, τα οποία είχαν ακτινοβοληθεί σε πηγή πλάσματος D-D, τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις ενδιαφέροντος μέσα στο κτίριο του αντιδραστήρα. Τα ενεργοποιημένα ελάσματα, μετά το πέρας της ακτινοβόλησης, μελετήθηκαν μέσω γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν οι τιμές για την ενεργότητα κατά τη λήξη της ακτινοβόλησης και στη συνέχεια μέσω μαθηματικών σχέσεων, προσδιορίστηκε η τιμή των νετρονικών ροών για κάθε θέση, όπως δίνεται από κάθε δείγμα.

Με το πέρας της μελέτης αυτής λοιπόν, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα για τα επίπεδα της ενεργότητας σε διάφορες αποστάσεις από την πηγή πλάσματος, τη ροή των νετρονίων και συνεπώς την απαιτούμενη βιολογική θωράκιση.

Αρχικά, είναι φανερό ότι τα υλικά από τα δείγματα που αξιοποιήθηκαν, ενεργοποιήθηκαν πράγματι με την ακτινοβόλησή τους από νετρόνια προκειμένου να εκπέμψουν ικανοποιητικά επίπεδα ακτινοβολίας και ακολούθως να καταγραφούν από τον ανιχνευτή Γερμανίου. Διαπιστώθηκε λοιπόν, ότι η τιμή της ενεργότητας εμφανίζεται μειωμένη, όσο ένα δείγμα απομακρύνεται από την πηγή πλάσματος, δηλαδή στην πραγματικότητα από την περιοχή όπου διαφεύγει μεγάλος αριθμός νετρονίων. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι το ίδιο δείγμα έχει ενεργοποιηθεί σε μικρότερο βαθμό στις μεγαλύτερες από το tokamak αποστάσεις και για το λόγο αυτό η ειπομπή ακτινοβολίας-γ είναι μειωμένη. Με άλλα λόγια, κατά την καταγραφή του φάσματος, παρατηρήθηκε χαμηλός αριθμός καθαρών κρούσεων στις απομακρυσμένες από το tokamak θέσεις ακτινοβόλησης, συνοδευόμενος μάλιστα και από μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Τονίζεται βέβαια ότι ένα δείγμα μπορεί να παρουσιάζει μεγαλύτερη ενεργότητα από ένα άλλο, διαφορετικού δηλαδή υλικού, ακόμα και αν βρίσκεται πιο μακριά από την πηγή του πλάσματος, επομένως η προσέγγιση αυτή αναφέρεται σε ένα υλικό, με τα ίδια χαρακτηριστικά από θέση σε θέση. Αντιθέτως, θέσεις, όπως αυτή της A1, στις οποίες δε μεσολαβεί μεγάλη απόσταση από τον αντιδραστήρα, αλλά ούτε κάποιος πολύπλοκος εξοπλισμός που να συνεπάγεται σκεδάσεις των νετρονίων, παρουσιάζουν αυξημένη ενεργότητα και επομένως αυξημένες τιμές νετρονικών ροών.

Χρειάζεται στο σημείο αυτό να σχολιασθεί η συμπεριφορά μεταξύ των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Είναι φανερό ότι το ταντάλιο, που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ενεργό διατομή για την αντίδραση (n,γ), ενεργοποιήθηκε αρκετά, ώστε να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ενεργότητα κατά τη λήξη της ακτινοβόλησης. Ωστόσο, καθοριστικό ρόλο στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δειγμάτων έπαιξε και ο χρόνος ημιζωής τους. Η βραχύβια ημιζωή του τανταλίου και του αργύρου (μερικές δεκάδες μέρες), σε συνδυασμό με την καθυστέρηση λήψης των μετρήσεων γ-φασματοσκοπίας (έξι μήνες μετά την ακτινοβόληση), οδήγησε στη σημαντική μείωση της ενεργότητάς τους. Επομένως, κατά τις μετρήσεις καταγραφής των φωτονίων, παρουσιάστηκαν αυξημένα σφάλματα στους υπολογισμούς, που προήλθαν κατά κύριο λόγο από τα χαμηλά επίπεδα ενεργότητας, με

άμεση συνέπεια, τη δυσκολία του ανιχνευτή να καταγράψει μεγάλο αριθμό ακτίνων-γ. Υπογραμμίζεται βέβαια, ότι κατά τη διαδικασία των μετρήσεων γ-ακτινοβολίας το γεγονός αυτό εκτιμήθηκε και επιλέχθηκε η διάρκεια των μετρήσεων να είναι πολυήμερη και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη στα λιγότερο ενεργά δείγματα. Στόχος της προσαρμογής αυτής, ήταν να επιτευχθεί μία καλή στατιστική στις μετρήσεις. Από την άλλη, τα δείγματα κοβαλτίου με χρόνο ημιζωής σχεδόν 5 χρόνων, επηρεάστηκαν αμελητέα από το πέρας των έξι μηνών από τη λήξη της ακτινοβόλησης, οπότε και η τιμή της αβεβαιότητας στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική.

Βάσει λοιπόν όσων αναλύθηκαν είναι αρχικά φανερό, ότι από την πλευρά της ακτινοπροστασίας, ο παράγοντας της απόστασης συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των νετρονικών ροών. Για παράδειγμα, μεταξύ των θέσεων A1 και A2, όπου δε μεσολαβεί κάποιου είδους θωράκιση, παρά μόνο αντικείμενα του εξοπλισμού του κτιρίου, η ενεργότητα μειώνεται σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους σε κάθε μεταλλικό έλασμα. Τέλος, διαπιστώνεται, ότι στη μείωση των επιπέδων της ροής των νετρονίων, συμβάλλει καθοριστικά η βιολογική θωράκιση. Πράγματι, άμεσα από τα πειραματικά αποτελέσματα εξάγεται, ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στις τιμές αυτές για τις θέσεις κοντά στην πηγή πλάσματος συγκριτικά με αυτές στον λαβύρινθο ή τον κάθετο αγωγό. Συνεπώς, η βιολογική θωράκιση και ταυτόχρονα η κατασκευή του λαβύρινθου με σκοπό τις περισσότερες σιεδάσεις των νετρονίων, οδηγούν πράγματι στη μείωση των νετρονικών ροών και την βελτίωση των επιπέδων ασφάλειας του προσωπικού.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, παρέχουν σημαντικά δεδομένα για τη χαρτογράφηση ως προς τις ροές νετρονίων του κτιρίου του αντιδραστήρα σύντηξης JET. Καταπιάνεται με ένα σημαντικό πρόβλημα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα της σύντηξης, δηλαδή τη βελτιστοποίηση της ακτινοπροστασίας της πηγής πλάσματος, κατά τη διάρκεια της σύντηξης των πυρήνων. Η παραγωγή αυτών των ταχέων νετρονίων είναι αναπόφευκτη κατά την πραγματοποίηση της σύντηξης πυρήνων, γι' αυτό και μελετάται διεξοδικά η αντιμετώπιση και η διαχείριση της διαφυγής τους μέσω διάκενων που απαραίτητα υπάρχουν στη θωράκιση. Τέτοιες μελέτες συμβάλλουν στον καθορισμό των συνθηκών λειτουργίας του αντιδραστήρα και στη σαφή γνώση όλων όσων διεξάγονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του tokamak, δίνοντας πληροφορίες χρήσιμες ως προς τη βιολογική θωράκιση του JET, αλλά και την ασφάλεια του επιστημονικού προσωπικού και όσων εξουσιοδοτημένων εργαζομένων έχουν μόνιμη ή περιστασιακή πρόσβαση σε αυτό.

Η έρευνα που διεξάγεται στον τομέα της τεχνολογίας της σύντηξης και ιδιαίτερα σε αυτήν την κατεύθυνση, είναι διαρκώς αναπτυσσόμενη, γίνονται προσπάθειες για τη βελτίωση των ήδη εφαρμοζόμενων τεχνικών προσομοίωσης και πειραμάτων, ενώ αναζητούνται νέες και περισσότερο αξιόπιστες. Η αντιμετώπιση των ζητημάτων αυτών και η συνεχής εξέλιξη των χρησιμοποιούμενων μεθόδων, θα αποτελέσει ένα ακόμη βήμα στην εκπλήρωση του στόχου για παραγωγή ενέργειας μέσω θερμοπυρηνικής σύντηξης και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών για εκατομμύρια χρόνια.

Βιβλιογραφία

- [1] W.N. Cottingham, D.A. Greenwood, An introduction to nuclear physics – Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική, Εκδόσεις ΤΥΠΩΘΗΤΩ/ΔΑΡΔΑΝΟΣ, 2002
- [2] Θ. Κ. Γεράνιος, Πυρηνική Τεχνολογία, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 1985
- [3] Tokamak, <https://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>, προσπελάστηκε στις 30/8/2020
- [4] V. Shafranov, On the history of the research into controlled thermonuclear fusion, Journal of the Russian Academy of Sciences 44 (8) (2001) 835–865
- [5] IAEA Fusion Portal, <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/Fusion%20Portal.aspx>, προσπελάστηκε στις 2/9/2020
- [6] F. Romanelli et al., Fusion Electricity: a roadmap to the realisation of fusion energy, European Fusion Development Agreement, 2012, ISBN 978-3-00-040720-8
- [7] EUROFUSION Picture Gallery, <https://www.euro-fusion.org/index.php?id=237>, προσπελάστηκε στις 5/9/2020
- [8] EUROFUSION JET's salient features, <https://www.euro-fusion.org/index.php?id=135&L=634>, προσπελάστηκε στις 5/9/2020
- [9] T. Vasilopoulou et al. Neutron streaming along ducts and labyrinths at the JET biological shielding: Effect of concrete composition, Radiation Physics and Chemistry (2015) 359-364
- [10] P. Bode, Instrumental and Organizational Aspects of a Neutron Activation Analysis Laboratory, PhD thesis, Delft University of Technology, 1996
- [11] M. D. Glascock, Tables for Neutron Activation Analysis, The University of Missouri Research Reactor Center, Columbia MO, 1996
- [12] S. J. Parry, Handbook of neutron activation analysis, Viridian Pub., 2003
- [13] I.E. Stamatelatos et al., Neutron streaming studies along JET shielding penetrations, European Physical Journal – WoC 153, 07028 (2017)
- [14] R. Villari et al., ITER oriented neutronics benchmark experiments on neutron streaming and shutdown dose rate at JET, Fusion Engineering and Design 123 (2017) 171-176
- [15] T. Vasilopoulou et al., Activation foil measurements at JET in preparation for D-T plasma operation, Fus. Eng. Des. 146 (2019) 250-255
- [16] Θ. Βασιλοπούλου, Ανάπτυξη πυρηνικών τεχνικών στοιχειακής ανάλυσης δειγμάτων μεγάλου όγκου, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π, 2012
- [17] R. M. W. Overwater, The Physics of Big Sample Instrumental Neutron Activation Analysis, PhD thesis, Delft University of Technology, 1994

- [18] Ε. Ν. Γαζής, Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες, Φυσική-Εφαρμογές στη Βιολογία και Ιατρική, Ε.Μ.Π., 1999
- [19] C. Nobs, Copy of JET Neutron Yields 2019 update for JN_17_3_2020, Excel file distributed by email on 6/4/2020
- [20] Α. Μηλιώνη, Βαθμονόμηση ανιχνευτή Γερμανίου, Πρακτική Άσκηση, Ε.Μ.Π., Ιούλιος 2020
- [21] Nuclear Data Center at KAERI, Table of nuclides, <http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/>, προσπελάστηκε στις 15/9/2020
- [22] Α. Koning et al., The JEFF-3.1 Nuclear Data Library, JEFF Report 21, NEA No. 6190, OECD 2006
- [23] S. Sudar, TRUECOINC, A program for calculation of true coincidence corrections for gamma rays, True Coincidence Program Version 1.01, Institute of Experimental Physics, Kossuth University, Debrecen, Hungary, 2000
- [24] IAEA-TECDOC-1275, Specialized Software Utilities for Gamma-ray Spectrometry, Final report of a co-ordinated research project, Vienna, IAEA, 2002
- [25] Periodic Table, <https://ptable.com/?lang=el#%CE%99%CE%B4%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B5%CF%82>, προσπελάστηκε στις 17/9/2020
- [26] T. Vasilopoulou and I.E. Stamatelatos, Analyses of the activation foils measurements of JET 2019 D-D experiment, Technical report emitted on 30th June 2020
- [27] T. Vasilopoulou et al., Improved neutron activation dosimetry for fusion, Fus. Eng. Des. 139 (2019) 109-114
- [28] T. Vasilopoulou et al., Neutron activation detector calibration experiment at Frascati Neutron Generator, Technical Report emitted on 13 October 2017
- [29] G. Gilmore and J. Hemingway, Practical Gamma-Ray Spectrometry, John Wiley & Sons, Chichester, 1995

Παράρτημα – Σταθμισμένος μέσος

Στο παράρτημα αυτό, θα περιγραφεί η διαδικασία στάθμισης μιας δέσμης τιμών ή με άλλα λόγια θα υπολογιστεί ο σταθμισμένος μέσος των τιμών αυτών και της αντίστοιχης αβεβαιότητας βάσει της βιβλιογραφίας [29].

Έστω ότι i μετρήσεις της παραμέτρου x δίνουν

$$x_1 \pm \delta x_1, x_2 \pm \delta x_2, \dots, x_i \pm \delta x_i$$

όπου

x_1, x_2, \dots, x_i : οι μετρούμενες τιμές του μεγέθους και

$\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_i$: οι αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Στην περίπτωση που οι αβεβαιότητες είναι ίσες μεταξύ τους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση τιμή των x_i . Αν όμως οι αβεβαιότητες διαφέρουν, δεν είναι στατιστικά ορθός ο προσδιορισμός της μέσης τιμής, διότι λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές, ανεξάρτητα από το σφάλμα που τις συνοδεύουν, μικρό ή μεγαλύτερο. Για να αποφευχθεί λοιπόν η απλοϊκή αυτή προσέγγιση ο «σταθμισμένος» μέσος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i}$$

όπου

w_i : συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι ίσοι με το αντίστροφο κλάσμα της απόκλισης της

κάθε τιμής, δηλαδή $w_i = \frac{1}{(\delta x_i)^2}$

Η τυπική απόκλιση της σταθμισμένης μέσης τιμής θα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$\text{var}(x) = \frac{1}{\sum w_i}$$

που καλείται και «εσωτερική διακύμανση», διότι συνυπολογίζει μόνο την αβεβαιότητα κάθε τιμής.

Αν χρειαστεί να ληφθεί υπόψη και η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή, προκύπτει η εξωτερική διακύμανση, δηλαδή:

$$\text{var}(x) = \frac{\sum [x_i - \bar{x}]^2 w_i}{\sum w_i}$$

Από τις δύο αυτές προσεγγίσεις, επιλέγεται εκείνη με τη μεγαλύτερη τιμή στην αβεβαιότητα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υποεκτίμησης του σφάλματος.

Ακολουθώντας λοιπόν την παραπάνω διαδικασία, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος των τιμών με την αντίστοιχη αβεβαιότητα, όπου αυτό χρειάζεται στην παρούσα εργασία.

Επομένως, η πλήρης έκφραση του αποτελέσματος, θα είναι:

$$\bar{x} \pm \text{var}(x)$$

όπου \bar{x} ο σταθμισμένος μέσος και $\text{var}(x)$ η αντίστοιχη αβεβαιότητα.