



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Έλεγχος Αξιοπιστίας Διαφορικών Ενεργών Διατομών
Ελαφρών Στοιχείων, σε περιοχή ενδιαφέροντος EBS (Elastic
Backscattering Spectroscopy) και NRA (Nuclear Reaction Analysis)**

Στεφανία Δέδε

Επιβλέπων Καθηγητής: Μιχάλης Κόκκορης

Ιούνιος 2016



National Technical University of Athens

School of Applied Mathematical and Physical
Science

Thesis Title:

**Benchmarking of differential cross sections for low- Z elements,
suitable for EBS (Elastic Backscattering Spectroscopy) and
NRA (Nuclear Reaction Analysis)**

Stefania Dede

Supervisor: Assoc. Prof. Michael Kokkoris

June 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου, αναπληρωτή καθηγητή Μιχάλη Κόκκορη για όλη την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου πρόσφερε απλόχερα σε όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας, καθώς και την καθηγήτρια Ρόζα Ζάννη-Βλαστού για τις συμβουλές της.

Επίσης ευχαριστώ θερμά την διδάκτορα Βαλεντίνα Πανέτα για την βοήθειά της στο σχεδιασμό και την εκτέλεση του πειράματος, καθώς και τους υποψήφιους διδάκτορες Κώστα Πρεκετέ και Θάνο Σταματόπουλο για την βοήθειά τους στα πρώτα στάδια του πειράματος.

Ακόμη, ευχαριστώ όλα τα μέλη της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Πολυτεχνείου καθώς και το προσωπικό του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Δημόκριτου για την στήριξη και τις συμβουλές τους.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου, για την στήριξη που μου προσέφεραν σε κάθε επίπεδο όλο αυτόν τον καιρό.

στους γονείς μου,
που ήταν πάντα εκεί για μένα..

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
Abstract	3
Κεφάλαιο 1:Εισαγωγικές Έννοιες	5
1.1 Έλεγχος αξιοπιστίας ενεργών διατομών	5
1.2 Ion Beam Analysis – Depth Profiling	5
1.3 Η θεωρία R – Matrix	6
1.4 Η βιβλιοθήκη δεδομένων (IBANDL) και το λογισμικό SigmaCalc	8
1.5 SIMNRA	9
1.6 Βασικά στοιχεία της θεωρίας για τις αλληλεπιδράσεις	10
Κεφάλαιο 2: Πειραματική Διάταξη	13
2.1 Επιταχυντής.....	13
2.2 Γωνιομετρικός θάλαμος	15
2.3 Ανιχνευτές – Ηλεκτρονικά.....	16
2.4 Στόχοι	17
2.5 Επιλογή Ενεργειών και Γωνιών	19
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση και Αποτελέσματα	23
3.1 Ενεργειακή Βαθμονόμηση (Calibration)	23
3.2 Διακριτική Ικανότητα των Ανιχνευτών	31
3.3 Προσδιορισμός του Πάχους του Χρυσού	33
3.4 Πυρίτιο	36
3.5 Οξυγόνο.....	62
3.5.1 Αντίδραση $^{nat}O(d,d_0)$	64
3.5.2 Αντίδραση $^{16}O(d,p_{0,1},a_0)$	77
3.6 Αλουμίνιο - Άνθρακας	83
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Προοπτικές	87
Βιβλιογραφία	89

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών (benchmarking) για τις διάφορες τεχνικές IBA (Ion Beam Analysis) είναι μια διαδικασία που ακολουθούμε έτσι ώστε να πιστοποιήσουμε την ακρίβεια των διαφορικών ενεργών διατομών φορτισμένων σωματιδίων. Αυτό γίνεται με τη χρήση φασμάτων από την ελαστική οπισθοσκέδαση (EBS) και την ανάλυση πυρηνικών αντιδράσεων (NRA) από παχείς στόχους γνωστής στοιχειομετρίας και τις προσομοιώσεις των αντιδράσεων αυτών.

Η σημασία της διαδικασίας του benchmarking έγκειται στις απαιτήσεις των τεχνικών IBA για την στοιχειομετρική ανάλυση υλικών. Όλες αυτές οι τεχνικές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των διαθέσιμων πειραματικών διαφορικών ενεργών διατομών για τις αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται, οι οποίες δεν είναι δυστυχώς μετρημένες σε όλο το χρήσιμο ενεργειακό και γωνιακό εύρος και συνήθως είναι και ασύμφωνες μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι η αξιοπιστία τους είναι αμφισβητήσιμη, στην καλύτερη περίπτωση. Επομένως, μια προσεκτικά σχεδιασμένη διαδικασία benchmarking είναι απαραίτητη. Επιπλέον το benchmarking μπορεί να προσφέρει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη μικρή διόρθωση των παραμέτρων του πυρηνικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία αξιολόγησης καθώς επίσης και να προτείνει τα καλύτερα πειραματικά δεδομένα, αν δεν υπάρχουν αξιολογημένα (evaluated) δεδομένα διαθέσιμα.

Στην παρούσα εργασία έχουν γίνει μετρήσεις στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”, για τον έλεγχο αξιοπιστίας τέτοιων ακριβώς evaluated διαφορικών ενεργών διατομών για την ελαστική σκέδαση πρωτονίων σε ^{nat}Si και ^{27}Al σε ενέργειες δέσμης από 1.1 έως 3.5 MeV σε τέσσερις γωνίες οπισθοσκέδασης, τις 140° , 150° , 160° και 170° . Επίσης πραγματοποιήσαμε μετρήσεις για την ελαστική σκέδαση των δευτερίων σε ^{12}C και ^{16}O σε ενέργειες δέσμης από 1.1 έως 1.9 MeV σε τέσσερις γωνίες οπισθοσκέδασης, τις 140° , 150° , 165° και 170° . Πιο συγκεκριμένα, για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε ένα παχύ μη λείο στόχο πυριτίου με ένα στρώμα εξαχνωμένου χρυσού στην κορυφή, ένα παχύ στόχο άμορφου άνθρακα (glassy carbon) και έναν παχύ γυαλισμένο στόχο αλουμινίου με ένα στρώμα εξαχνωμένου χρυσού στην κορυφή καθώς και μια παστίλια Nb_2O_5 .

Τα φάσματα που πήραμε τα συγκρίναμε με προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SIMNRA και τις evaluated διαφορικές ενεργές διατομές από τις βάσεις δεδομένων της IBANDL. Όλες οι πειραματικές παράμετροι διερευνήθηκαν σχολαστικά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, οι αποκλίσεις που βρήκαμε και τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του benchmarking συζητούνται και αναλύονται στην παρούσα εργασία.

Abstract

The benchmarking experimental procedure in IBA (Ion Beam Analysis) is carefully designed in order to validate differential cross-section data of charged particles via the acquisition of EBS and NRA spectra from thick targets of known composition, followed by their simulations.

The importance of the benchmarking procedure lies in the requirements of the IBA depth profiling techniques. All of these techniques depend largely on the accuracy of the available differential cross sections for the reactions involved, which are unfortunately quite rare and usually discrepant. This means that their reliability is questionable at best, thus a carefully designed benchmarking procedure is essential. Moreover, benchmarking can provide the necessary feedback for small adjustment of the parameters of the nuclear model used in the evaluation process and also indicate the best experimental datasets if evaluated data are not available.

In the present work, such benchmarking measurements have been performed at the laboratory of the Institute for Nuclear and Particle Physics “Demokritos”, for the elastic scattering of protons on ^{nat}Si and ^{27}Al in the energy range of 1.1 – 3.5 MeV at four backward angles, at 140° , 150° , 160° and 170° . In addition, we performed measurements for the elastic scattering of deuterons on ^{12}C and ^{16}O in the energy range of 1.1 – 1.9 MeV at four backward angles, at 140° , 150° , 165° and 170° . More specifically, we used a thick non-polished Si target with Au evaporated on top, a thick polished C and a thick polished Al target with Au evaporated on top and a Nb_2O_5 tablet.

The spectra acquired were compared with simulated ones using the SIMNRA program along with the evaluated differential cross-section datasets from IBANDL. All the experimental parameters were thoroughly investigated. The obtained results, the discrepancies we found and the problems we faced during the benchmarking process are discussed and analyzed.

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγικές έννοιες

1.1 Έλεγχος αξιοπιστίας ενεργών διατομών

Ο έλεγχος αξιοπιστίας διαφορεικών ενεργών διατομών (benchmarking) για τις διάφορες τεχνικές IBA (Ion Beam Analysis) [1],[2] είναι μια διαδικασία που ακολουθούμε έτσι ώστε να επικυρώσουμε τα δεδομένα των διαφορεικών ενεργών διατομών φορτισμένων σωματιδίων σε συγκεκριμένες γωνίες.

Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τα φάσματα που έχουν προκύψει από ελαστική οπισθοσκέδαση σε παχύ, ομοιόμορφο στόχο γνωστής σύστασης, με προσομοιώσεις φασμάτων από θεωρητικά δεδομένα που είναι βασισμένα στη θεωρία R-matrix [3],[4] και είναι προσαρμοσμένα σε προϋπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις (evaluated data). Τα δεδομένα αυτά παρέχονται στη διεθνή επιστημονική κοινότητα μέσω της βιβλιοθήκης IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) [5] υπό την αιγίδα της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (IAEA – International Atomic Energy Agency). Είναι σημαντικό η διαδικασία του benchmarking να γίνεται ακριβώς στις ίδιες συνθήκες που υφίστανται και σε μια διαδικασία μέτρησης ενός δείγματος άγνωστης στοιχειομετρίας, καθώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, τα προς ανάλυση δείγματα είναι παχείς στόχοι που χρησιμοποιούνται στις τεχνικές IBA.

Το ότι το πείραμα γίνεται σε παχύ στόχο, παρέχει το πλεονέκτημα της σάρωσης μιας ευρείας ενεργειακής περιοχής λόγω της απώλειας ενέργειας της δέσμης καθώς τα ιόντα εισχωρούν στο υλικό. Έτσι, σε αντίθεση με ένα πείραμα για την μέτρηση μιας ενεργού διατομής στην οποία η ενεργός διατομή μετράται αυστηρά σε αυτή την ενέργεια, κάθε μέτρηση benchmarking μπορεί να εξαγάγει συμπεράσματα για ένα εύρος ενεργειών από την ενέργεια δέσμης και κάτω.

Πολύ σημαντικό ρόλο σε ένα πείραμα benchmarking παίζει η σωστή επιλογή του στόχου[6]. Διαφορετικά στοιχεία απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση. Π.χ. στο πυρίτιο, για να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα, επιλέγουμε ένα στόχο ανεστραμμένου κρυσταλλικού πυριτίου έτσι ώστε να αποφευχθούν τα φαινόμενα διαυλισμού (channeling effects) που υπάρχουν στο κρυσταλλικό πυρίτιο, καθώς και τα φαινόμενα της εσωτερικής πολλαπλής σκέδασης (straggling effect) που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενο πείραμα με στόχο παστίλιας πυριτίου [7].

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι για να γίνει σωστά ένα πείραμα benchmarking, χρειάζεται προσεκτικός σχεδιασμός και μελέτη για την αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με τους χρησιμοποιούμενους στόχους.

1.2 Ion Beam Analysis – Depth Profiling

Η ανάλυση δειγμάτων με χρήση δέσμης φορτισμένων σωματιδίων (Ion Beam Analysis – IBA) είναι η λιγότερο καταστροφική μέθοδος για την μελέτη της επιφα-

νειακής σύνθεσης και την εύρεση του στοιχειακού προφίλ στα στρώματα κοντά στην επιφάνεια ενός δείγματος.

Η RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) και η γενική περίπτωση EBS (Elastic Backscattering Spectrometry) είναι τεχνικές IBA για την στοιχειομετρική ανάλυση υλικών. Στην RBS εξάγονται συμπεράσματα από την ανίχνευση σωματιδίων που προέρχονται από σκέδαση Rutherford, ενώ στην EBS γενικά από ελαστική σκέδαση.

Τα δείγματα που εξετάζονται είναι συνήθως μεγάλου πάχους (μη διαπερατά από την δέσμη). Για το λόγο αυτό, οι ανιχνευτές τοποθετούνται σε μεγάλες γωνίες σκέδασης ($>90^\circ$) ώστε να ανιχνεύουν τα εκεί σκεδαζόμενα σωματίδια και στη συνέχεια, με βάση την ενέργεια και την ενεργό διατομή τους να προσδιοριστεί το είδος των πυρήνων του δείγματος, και κατά συνέπεια και το υλικό.

Οι τεχνικές αυτές παρέχουν την δυνατότητα ανάλυσης σε βάθος λόγω της απώλειας ενέργειας από τις αλληλεπιδράσεις με το ηλεκτρονιακό νέφος του στόχου (σε ποσοστό $>98\%$ για κάθε τυπική ενέργεια δέσμης). Τελικά η ενέργεια των ανιχνευόμενων σωματιδίων σε μια συγκεκριμένη γωνία θα έχει ένα εύρος ΔE ανάλογο της κατανομής των πυρήνων που προκάλεσαν τη σκέδαση, δηλαδή του πάχους του υπό μελέτη δείγματος.

Αν ο στόχος είναι λεπτός, δηλαδή αν χάνουν μικρή ποσότητα ενέργειας τα σωματίδια της δέσμης μέσα στο στόχο πριν και μετά τη σκέδαση, τότε το φάσμα που καταγράφει ο ανιχνευτής θα έχει μια λεπτή κορυφή. Αν όμως ο στόχος είναι απείρου πάχους (η δέσμη δεν τον διαπερνά), τότε ανιχνεύουμε και σωματίδια που προέκυψαν από σκέδαση βαθιά μέσα στο στόχο, με ακραίο σημείο αυτά που φτάνουν στον ανιχνευτή μας με σχεδόν μηδενική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή το φάσμα εκτείνεται από την μέγιστη ενέργεια σκέδασης, που αντιστοιχεί σε σκεδάσεις στην επιφάνεια του στόχου, μέχρι σχεδόν τη μηδενική ενέργεια.

Αυτές οι τεχνικές IBA, κυρίως η EBS αλλά και η ανάλυση πυρηνικών αντιδράσεων (NRA), βασίζονται στον αριθμό των σωματιδίων που ανιχνεύονται και καταγράφονται στο φάσμα, ο οποίος εξαρτάται κυρίως από τις αντίστοιχες ενεργές διατομές.

Δεδομένου όμως ότι για τη μελέτη ελαφρών στοιχείων και για τις ενέργειες των σωματιδίων που προέρχονται από επιταχυντές, η διαφορική ενεργός διατομή δεν ακολουθεί τη σχέση του Rutherford και δεν υπάρχει αναλυτικός τρόπος για τον υπολογισμό των διαφορικών ενεργών διατομών, συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση πειραματικών δεδομένων. Επομένως είναι κατά συνέπεια απαραίτητος και ο έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών.

1.3 Η θεωρία R – Matrix [3][4]

Το πλαίσιο της θεωρίας R-matrix αναπτύχθηκε από τον Eugene Wigner, ο οποίος είχε ήδη δημιουργήσει με τον Gregory Breit την περίφημη φόρμουλα Breit-Wigner,

που χρειαζόταν μια καλύτερη βάση. Η διατύπωση της R-matrix παρείχε αυτή τη βάση.

Αρχικά αναπτύχθηκε το 1941, από τον Wigner, αλλά ολοκληρώθηκε πλήρως αμέσως μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο από τον Wigner, τον Eisenbud και άλλους. Το πλαίσιο της R-matrix είχε επίσης τις ρίζες του σε μια προηγούμενη εργασία που σχετίζεται με τις ηλεκτρομαγνητικές κοιλότητες.

Κεντρικό ρόλο στο πλαίσιο αυτό, είναι η διαίρεση του χώρου διαμόρφωσης του προβλήματος σε μια «εσωτερική» περιοχή, που αντιστοιχεί στον σύνθετο πυρήνα, και μια «εξωτερική» περιοχή, που αντιστοιχεί στις εναλλακτικές αντιδράσεις ή τα κανάλια, που είναι δυνατόν να «φτάσουν» την ένωση του σύνθετου πυρήνα ή να προκύψουν από αυτόν. Αυτή η διαίρεση του χώρου γίνεται με μια επιλογή από το όριο του σύνθετου πυρήνα: μια πυρηνική ακτίνα επιλέγεται για κάθε εναλλακτική αντίδραση. Οι συντονισμοί που εμφανίζονται στις ενεργές διατομές είναι εκείνες του σύνθετου πυρήνα και δίνονται από αριθμούς στις οριακές καταστάσεις που ορίζονται σε κάθε ακτίνα. Μια τέτοια επιλογή δίνει ένα πλήρες σύνολο κυματοσυναρτήσεων ή συντονισμών, για τον σύνθετο πυρήνα μέσω της κατασκευής του κατάλληλου προβλήματος συνοριακών τιμών. Οι ακτίνες των καναλιών και οι αντίστοιχοι αριθμοί στις οριακές καταστάσεις είναι βοηθητικές ποσότητες που δεν εισάγονται τεχνητά στο πλαίσιο αλλά υπόκεινται σε φυσικούς νόμους.

Η εξωτερική περιοχή μας παρέχει τα εφόδια της θεωρίας σκέδασης, όπως τους παράγοντες διεξόδου, τις αλλαγές φάσης, τον πίνακα προσκρούσεων (collision matrix) κλπ. Η εσωτερική περιοχή παρέχει τις παραμέτρους σχετικά με τον πυρήνα, όπως τα ενεργειακά επίπεδα, τα πλάτη των επιπέδων και τα μειωμένα πλάτη (ή αλλιώς τους φασματοσκοπικούς παράγοντες).

Ο λόγος για τον οποίο τέτοια πλαίσια αντιδράσεων δουλεύουν (δηλαδή με την κατανομή του χώρου σε εξωτερικές και εσωτερικές περιοχές), έγκειται στο ότι ο ατομικός πυρήνας έχει μία αρκετά καλά καθορισμένη ακτίνα, η οποία με τη σειρά της προέρχεται από την μικρή εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων. Ομοίως, ο λόγος για τον οποίο το πλαίσιο της R-matrix έχει αναδειχθεί ως το καλύτερο για την περιγραφή των διαδικασιών συντονισμού είναι ότι οι πυρηνικές ή εσωτερικές παράμετροι που αποδίδει είναι έντονα συνδεδεμένες με τη φυσική της πυρηνικής φασματοσκοπίας.

Η θεωρία R-matrix είναι ένα κατάλληλο πλαίσιο για την περιγραφή των αντιδράσεων συντονισμών, ιδιαίτερα για το είδος των πυρηνικών αντιδράσεων, για τους παρακάτω λόγους:

- ◆ Βασίζεται στη γνώση του ατομικού πυρήνα.
- ◆ Σχετίζεται εύκολα με τις ιδέες που σχετίζονται με το πυρηνικό μέσο πεδίο.
- ◆ Οι ενέργειες συντονισμού συνδέονται εύκολα με τα παρατηρούμενα ενεργειακά επίπεδα.
- ◆ Τα μειωμένα πλάτη της ανταποκρίνονται στους φασματοσκοπικούς παράγοντες αυτών των επιπέδων, όπως αυτοί υπολογίζονται από το πρότυπο φλοιών (shell model).

◆ Οδηγεί ευθέως στη φόρμουλα συντονισμού των ενεργών διατομών, όταν κάποιος απαιτεί προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν είτε ένα μικρό αριθμό επιπέδων ή ένα μικρό αριθμό καναλιών της αντίδρασης.

◆ Χρησιμοποιείται εύκολα για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για μέσες ενεργές διατομές σε υψηλότερες ενέργειας, όπως εκείνες που είναι απαραίτητες για την ερμηνεία του οπτικού μοντέλου των πυρηνικών αντιδράσεων.

Εν ολίγοις, έχει μια καθολικότητα στις εφαρμογές και μια στενή σχέση με τη φυσική που δεν παρατηρείται στα άλλα πλαίσια.

Παρότι η θεωρία R-matrix βασίζεται σε σφαιρική συμμετρία, η επεξεργασία των αντιδράσεων συντονισμού με την R-matrix συνήθως επικεντρώνεται σε δεδομένα σε ένα μικρό ενεργειακό διάστημα και στη συνέχεια, κατ' ανάγκη, κάνει προσεγγίσεις οι οποίες απορρίπτουν όλα τα επίπεδα ή τα κανάλια που δεν είναι σχετικά με αυτό το διάστημα. Αυτό σημαίνει ότι οι άμεσες αντιδράσεις, που απαιτούν τη συμβολή από μεγάλα ενεργειακά διαστήματα, πετιούνται μαζί με τα απορριφθέντα επίπεδα σε αυτές τις προσεγγίσεις. Ως εκ τούτου οι άμεσες αντιδράσεις, ακόμη και οι άμεσες αντιδράσεις σύλληψης, δεν είναι εύκολο να προκύψουν από το πλαίσιο της R-matrix και είναι πρόσθετο κομμάτι διότι προκύπτουν από τα μακρινά επίπεδα, που είχαν απορριφθεί.

1.4 Η βιβλιοθήκη δεδομένων (IBANDL) και το λογισμικό SigmaCalc

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, ο σκοπός του benchmarking είναι η αξιολόγηση παλαιότερων πειραματικών μετρήσεων ή evaluated δεδομένων που προέκυψαν από την θεωρία R – Matrix και προσαρμόστηκαν σε πειραματικά δεδομένα.

IBANDL

Η διαδικτυακή βιβλιοθήκη δεδομένων IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) [5] διαθέτει πειραματικά δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών για πυρηνικές αντιδράσεις καθώς και τα αντίστοιχα evaluated δεδομένα για ορισμένες αντιδράσεις. Η βιβλιοθήκη αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναζητήσει μετρήσεις διαφορικών ενεργών διατομών που έχουν γίνει για συγκεκριμένα στοιχεία και σε συγκεκριμένες γωνίες και ενέργειες. Στην ιστοσελίδα υπάρχει και το online λογισμικό SigmaCalc, το οποίο παρουσιάζει τις θεωρητικές τιμές (evaluated data) που προαναφέρθηκαν.

SigmaCalc

Το λογισμικό SigmaCalc [8],[9] αναπτύχθηκε ούτως ώστε να παρέχει στις τεχνικές IBA ένα εργαλείο για τον θεωρητικό υπολογισμό των διαφορικών ενεργών διατομών στα πλαίσια της θεωρίας R – Matrix.

Παρότι εκτελούνται συχνά πειράματα για τον υπολογισμό των διαφορικών ενεργών διατομών και υπάρχει – σε ορισμένες περιπτώσεις - μεγάλη συγκέντρωση αποτελεσμάτων στις βάσεις δεδομένων, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση των δεδομένων αυτών στα πλαίσια ενός θεωρητικού προτύπου προτού χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές. Ο λόγος έγκειται στις μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν ανάμεσα σε διαφορετικές μετρήσεις διαφορικών ενεργών διατομών του ίδιου στοιχείου σε διαφορετικά εργαστήρια, αποκλίσεις που ξεπερνούν τα όρια του στατιστικού σφάλματος.

Επιπλέον, λόγω της εξάρτησης της ενεργού διατομής από την γωνία σκέδασης, τα διαθέσιμα δεδομένα είναι έγκυρα μόνο στην περίπτωση που η γεωμετρία σκέδασης είναι παρόμοια με την γεωμετρία του πειράματος κατά την μέτρηση της ενεργού διατομής.

Η διαδικασία αξιολόγησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ◆ Αρχικά γίνεται αναζήτηση στην βιβλιογραφία ώστε να συλλεχθούν τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα.
- ◆ Τα δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές συγκρίνονται λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες των πειραμάτων και τα σφάλματα των δεδομένων.
- ◆ Επιλέγονται τα δεδομένα που κρίνονται πιο αξιόπιστα.
- ◆ Οι υπολογισμοί του μοντέλου χρησιμοποιούνται ώστε να παραχθεί η βέλτιστη θεωρητική διαφορική ενεργός διατομή. Με αυτόν τον τρόπο, οι μετρήσεις που έγιναν κάτω από διαφορετικές συνθήκες και σε διαφορετικές γωνίες σκέδασης, ενσωματώνονται στα πλαίσια μιας ενιαίας θεωρητικής προσέγγισης.
- ◆ Τέλος συγκρίνονται τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας με τα πειραματικά δεδομένα και αναλύονται οι όποιες αποκλίσεις. Αν δεν μπορεί να βρεθεί εξήγηση, τότε επαναλαμβάνεται η επιλογή των αξιόπιστων δεδομένων.

Στο πείραμά μας χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση τα αξιολογημένα πειραματικά δεδομένα από την έκδοση SigmaCalc 2.0.

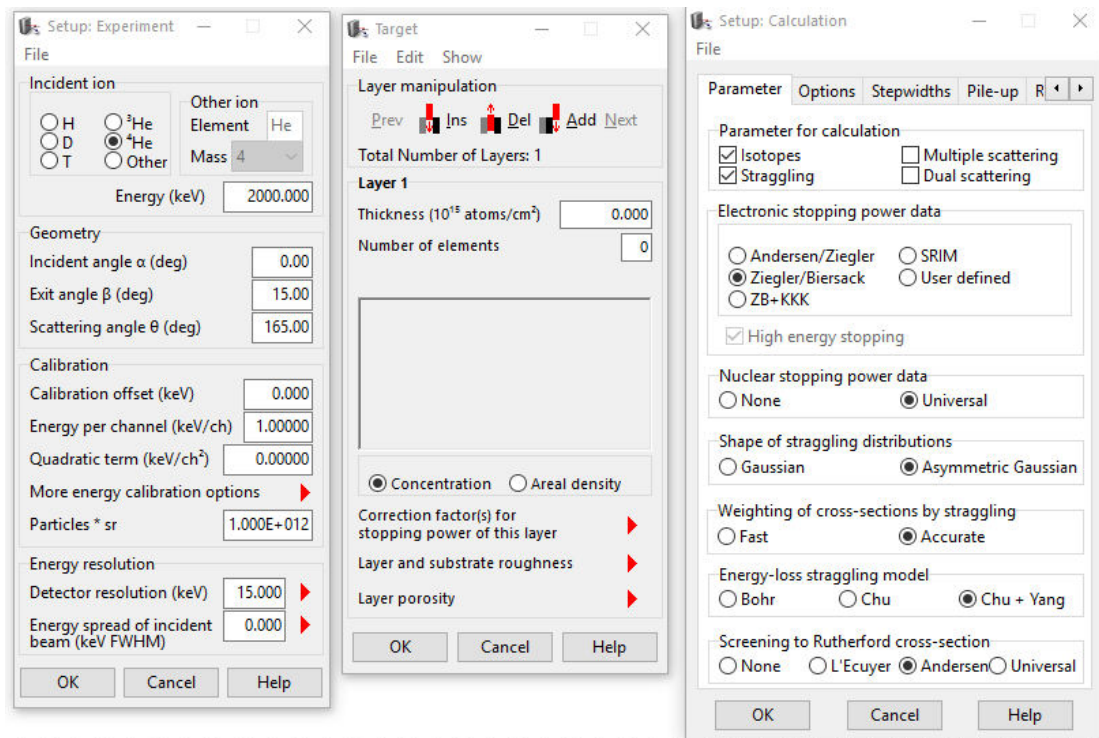
1.5 SIMNRA

Για τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αντίστοιχα αξιολογημένα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης SIMNRA (Version 6.78) [10]. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να προσομοιώσει δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών από πειράματα ή από το SigmaCalc, και με την κατάλληλη συμπλήρωση των παραμέτρων του πειράματος, να παρουσιάσει μία αναλυτική προσομοίωση του αναμενόμενου φάσματος.

Οι κύριες παράμετροι που εισάγονται από τον χρήστη είναι οι εξής:

- ◆ Το είδος και η ενέργεια της δέσμης
- ◆ Η γεωμετρία του πειράματος
- ◆ Η ενεργειακή βαθμονόμηση και η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή
- ◆ Το φορτίο $Q\Omega$ (το φορτίο της δέσμης*τη στερεά γωνία)

- ◆ Η σύνθεση και το πάχος του στόχου
- ◆ Η επιλογή απλής η πολλαπλής σκέδασης



Εικόνα 1.1 Τα πεδία επιλογής των παραμέτρων στο SIMNRA

1.6 Βασικά στοιχεία της θεωρίας για τις αλληλεπιδράσεις

Τη στιγμή που η δέσμη προσπίπτει στο στόχο, τα σωματίδια της δέσμης αλληλεπιδρούν με τα άτομα του στόχου (κυρίως με το ηλεκτρονιακό νέφος) και χάνουν ενέργεια όσο διαπερνούν το στόχο, μέχρις ότου αλληλεπιδράσουν με κάποιον πυρήνα.

Η ισχύς ανάσχεσης (stopping power S), ορίζεται ως η απώλεια ενέργειας του σωματιδίου προς την απόσταση που διένυσε στο υλικό

$$S = \frac{dE}{dx}$$

ενώ η ενεργός διατομή ανάσχεσης (stopping cross section ε), ορίζεται ως η απώλεια ενέργειας ανά άτομο ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \frac{dE}{dx}$$

με N την ατομική πυκνότητα (άτομα/cm³).

Η απώλεια ενέργειας της δέσμης μέσα στο στόχο οδηγεί στην αντίληψη του βάθους (πάχους) του στόχου και μπορεί να προσεγγιστεί θεωρητικά από τη σχέση Bethe – Bloch.

Οι στατιστικές διακυμάνσεις του φαινομένου αυτού οδηγούν στον ενεργειακό διασκεδασμό της δέσμης (energy straggling), δηλαδή μια προοδευτική διασπορά της ενεργειακής και χωρικής κατανομής των σωματιδίων. Σαν αποτέλεσμα αυτού, έχουμε τον περιορισμό του βάθους της ανάλυσης του υλικού καθώς και της ικανότητας προσδιορισμού των μαζών των πυρήνων του στόχου σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια.

Η αλληλεπίδραση τώρα, ενός σωματιδίου της δέσμης με κάποιον πυρήνα του στόχου και η ανίχνευση του αντίστοιχου εκπεμπόμενου σωματιδίου εξαρτάται από την πιθανότητα να συμβεί η συγκεκριμένη αντίδραση. Η πιθανότητα αυτή είναι η διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης, $d\sigma/d\Omega$, και μας επιτρέπει να αναλύσουμε ποσοτικά έναν στόχο.

Βέβαια, η ενέργεια του εξερχόμενου σωματιδίου εξαρτάται από την κινηματική της αντίδρασης για την ελαστική σκέδαση (παράγοντας K) και από τη διαφορά μαζών στην περίπτωση πυρηνικής αντίδρασης (Q – value), ενώ η ενέργεια των σωματιδίων που φθάνουν στον ανιχνευτή εξαρτάται και από την απώλεια ενέργειας στη διαδρομή από το σημείο της αντίδρασης (βάθος) μέχρι τον ανιχνευτή.

Τα σωματίδια που ανιχνεύονται, καταγράφονται με τη χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών σε ένα φάσμα ανάλογα με την ενέργειά τους. Το ύψος του φάσματος σε κάθε σημείο αντιστοιχεί στον αριθμό των σωματιδίων που μετρήθηκαν στο ενεργειακό διάστημα \mathcal{E} του συγκεκριμένου καναλιού. Οι τεχνικές EBS και NRA χρησιμοποιούν την ανάλυση και συσχέτιση του ύψους του φάσματος σε κάθε ενέργεια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2, με το αντίστοιχο στρώμα πάχους τ του στόχου και αριθμό ατόμων ανά επιφάνεια Nt, σε βάθος x από το σημείο όπου εκπέμπονται τα αντίστοιχα σωματίδια.

Το ύψος αυτό στην περίπτωση μονοστοιχειακού στρώματος κοντά στην επιφάνεια του στόχου, που αντιστοιχεί σε ανιχνευόμενα σωματίδια ενέργειας E_1 δίνεται από τη σχέση [11]:

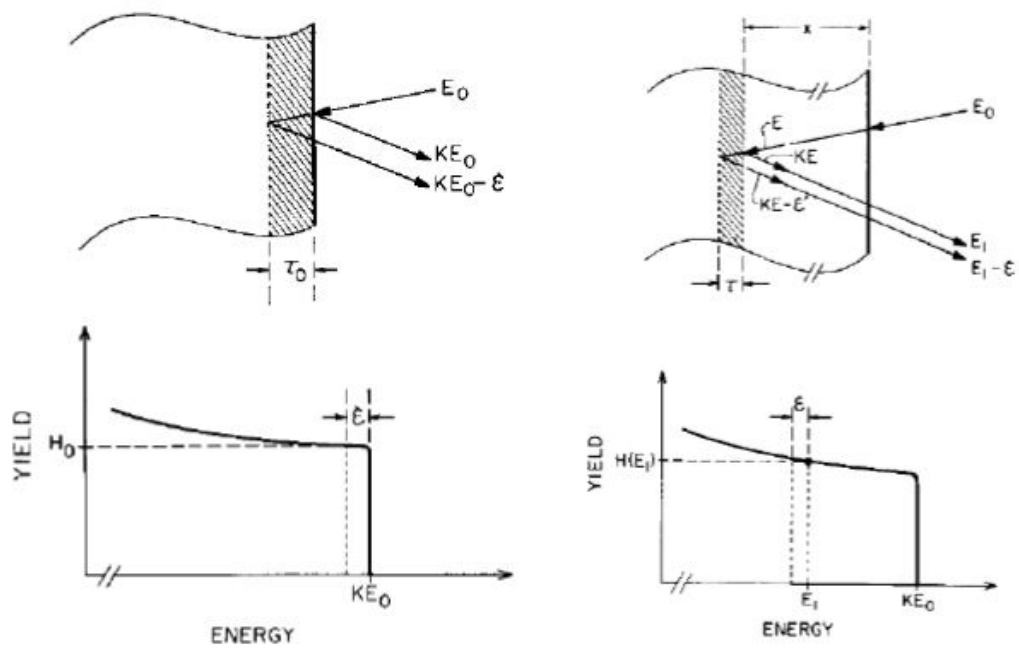
$$H(E_1) = \frac{d\sigma}{d\omega}(E, \theta) Q \Omega \frac{\delta E}{[\varepsilon(E)] \cos \theta_1}$$

όπου Q είναι ο αριθμός των σωματιδίων που προσπίπτουν στο στόχο (φορτίο), Ω είναι η στερεά γωνία ανίχνευσης, E η ενέργεια των σωματιδίων της δέσμης ακριβώς πριν τη σκέδαση – αντίδραση στο βάθος με συνολική απώλεια ενέργειας $[\varepsilon(E)]$, δE το ενεργειακό εύρος ενός καναλιού και θ_1 η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης.

Η ολοκληρωμένη περιγραφή του ύψους του φάσματος στην ενέργεια E_1 δίνεται από τη σχέση [12] :

$$H(E_1) = \int_{E_0 - \Delta}^{E_0} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{d\sigma}{d\Omega}(E'', \theta) Q \Omega \frac{\delta E}{[\varepsilon(E'')] \cos \theta_1} g(E', E_0) W(E, E', E'') dE'' dE' dE$$

όπου $g(E', E_0)$ η ενεργειακή κατανομή της δέσμης από τον επιταχυντή γύρω από τη μέση ενέργεια E_0 και $W(E, E', E'')$ ο ενεργειακός διασκεδασμός.



Εικόνα 1.2 Οπισθοσκέδαση στην επιφάνεια και σε βάθος x ενός μονοστοιχειακού στόχου καθώς και το αντίστοιχο φάσμα που καταγράφεται

Κεφάλαιο 2 – Πειραματική Διάταξη

Το πείραμά μας έλαβε χώρα στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” τον Μάιο του 2015.

2.1 Επιταχυντής

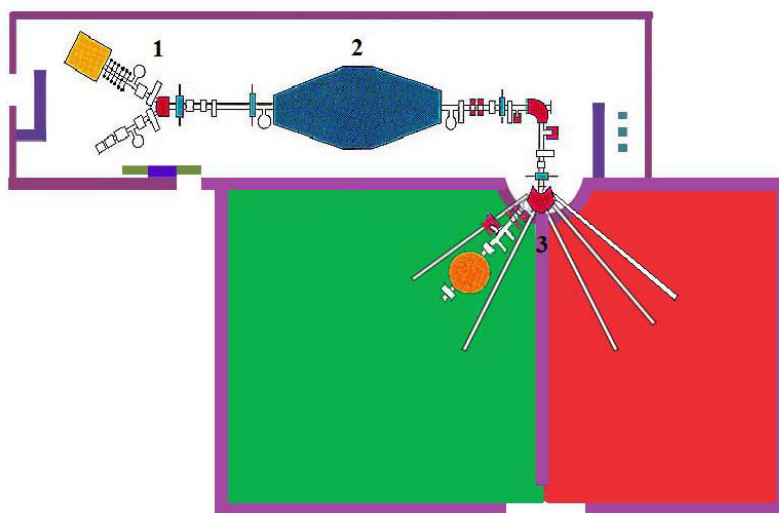
Για την παραγωγή της δέσμης των πρωτονίων και των δευτερίων χρησιμοποιήθηκε ο επιταχυντής του Ινστιτούτου [13], ο οποίος είναι ηλεκτροστατικός, τύπου Tandem Van de Graaff και μπορεί να λειτουργήσει με μέγιστη διαφορά δυναμικού 5,5 MV.



Εικόνα 2.1 Κεντρική δεξαμενή του επιταχυντή

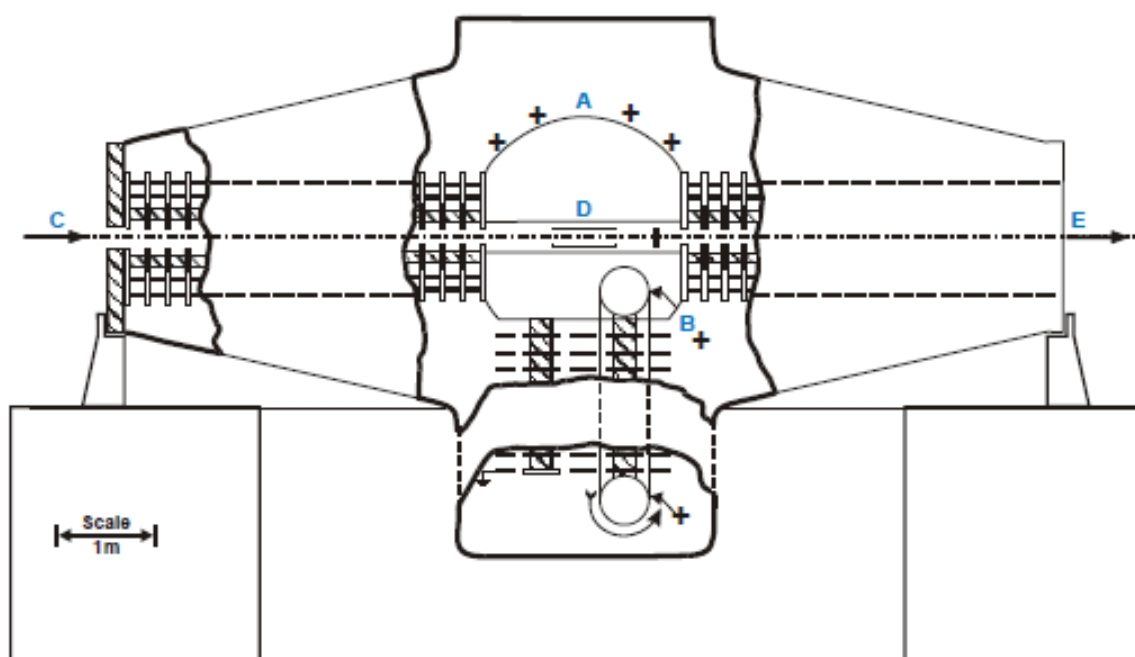
Ο επιταχυντής αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- ❖ Την πηγή των ιόντων που βρίσκεται στην αρχή της γραμμής
- ❖ Την ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff, η οποία βρίσκεται μέσα στην δεξαμενή του επιταχυντή και δημιουργεί την διαφορά δυναμικού για την επιτάχυνση των ιόντων.
- ❖ Τις 6 πειραματικές γραμμές στο τέλος της διάταξης.



Εικόνα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του επιταχυντή

Η πηγή ιόντων μας παρέχει αρχικά θετικά ιόντα, που στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν από αέριο υδρογόνο και αέριο δευτέριο. Τα ιόντα περνούν από μια περιοχή ανταλλαγής φορτίων στην οποία κερδίζουν ηλεκτρόνια μέχρις ότου να γίνουν αρνητικά φορτισμένα. Στη συνέχεια, ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο συλλέγει τα ιόντα με συγκεκριμένο λόγο e/m και τα εισάγει στον επιταχυντή (περιοχή C στο παρακάτω σχήμα). Εκεί περνούν από δύο στάδια επιτάχυνσης.



Εικόνα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση του εσωτερικού της δεξαμενής

Αρχικά, επιταχύνονται μέχρι το μέσο του όγκου του επιταχυντή (περιοχή D στο σχήμα), όπου με τη βοήθεια πολύ λεπτών φύλλων άνθρακα “απογυμνώνονται” από ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

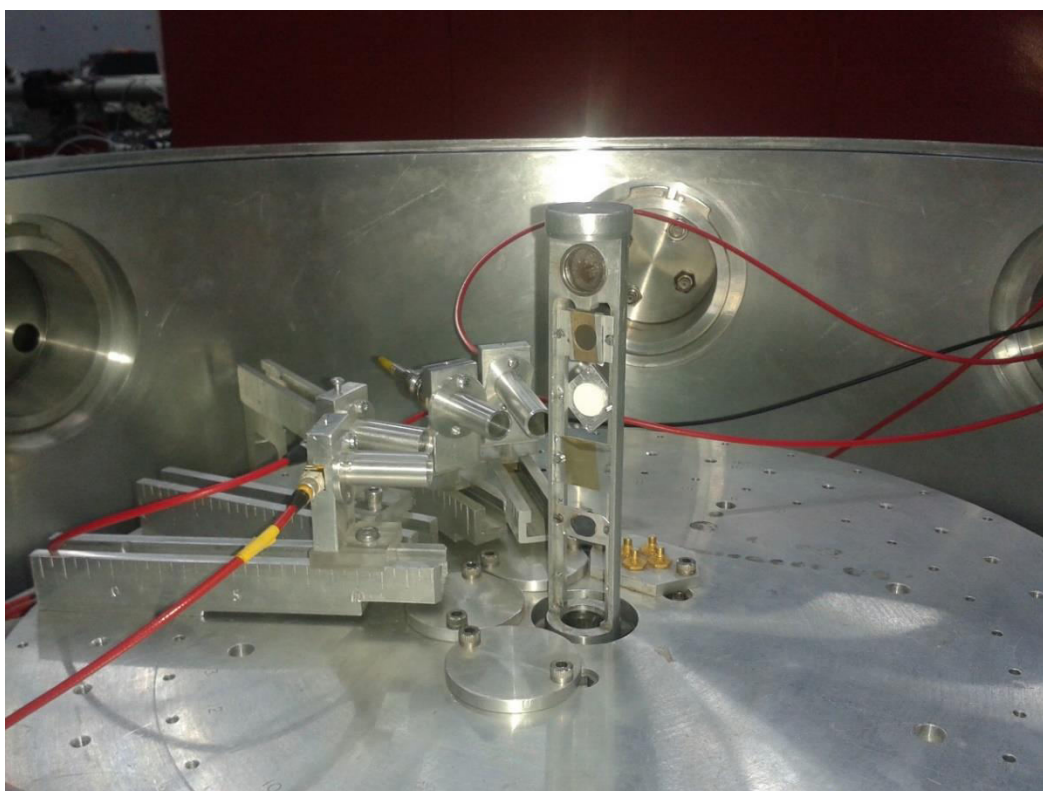
Έπειτα, τα θετικά πλέον ιόντα “απωθούνται” από το ηλεκτρικό πεδίο (περιοχή A) που έχει δημιουργήσει η γεννήτρια Van de Graaff (περιοχή B) προς το άλλο άκρο (όπου βρίσκεται ο κάθε γειωμένος πειραματικός θάλαμος). Η τελική ενέργεια που αποκτούν, εξαρτάται από τον αριθμό των φορτίων των ιόντων και το δυναμικό του επιταχυντή.

Καθώς τα σωματίδια βγαίνουν από τον επιταχυντή (περιοχή E), ένα αποκλίνον μαγνητικό πεδίο διαλέγει εκείνα τα σωματίδια με το απαραίτητο φορτίο και ενέργεια, τα οποία υποβοηθούμενα από ένα σύστημα μαγνητικών τετραπόλων, κατευθύνονται στην επιθυμητή πειραματική γραμμή αφού πρώτα η δέσμη γίνει κατά το μέγιστο δυνατό μονοενεργειακή με την στροφή 90° από τον μαγνήτη επιλογής ενέργειας (analyser).

Όλα τα τμήματα του επιταχυντή βρίσκονται σε υψηλό κενό ($10^{-5} - 10^{-6}$ Torr), ενώ η δεξαμενή είναι γεμάτη με μονωτικό, ηλεκτραρνητικό αέριο SF_6 .

2.2 Γωνιομετρικός θάλαμος

Η πειραματική γραμμή που επιλέχθηκε για το πείραμά μας καταλήγει στο γωνιομετρικό θάλαμο που φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Η στήλη στο κέντρο του θαλάμου μπορεί να μετακινείται κάθετα και να περιστρέφεται. Στη στήλη αυτή τοποθετήθηκαν οι 4 στόχοι σε θέση κατάλληλη έτσι ώστε η δέσμη που εισέρχεται στον χώρο του θαλάμου να συγκρούεται μαζί τους στο γεωμετρικό κέντρο περίπου του κάθε στόχου.



Εικόνα 2.4 Το εσωτερικό του θαλάμου με τους ανιχνευτές και τους στόχους τοποθετημένους

Περιμετρικά μέσα στον θάλαμο βιδώθηκαν στην γωνιομετρική βάση του θαλάμου οι 4 ανιχνευτές πυριτίου στις γωνίες σκέδασης που είχαν αποφασιστεί (140° , 150° , 160° και 170°), όπως φαίνεται και παραπάνω.

Η γωνιομετρική βάση του θαλάμου αποτελείται από δύο επίπεδα (γωνιομετρικές τράπεζες), τα οποία μπορούν να περιστρέφονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, πράγμα που φάνηκε ιδιαίτερα χρήσιμο στην αλλαγή γωνίας των 160° σε γωνία 165° . Τοποθετώντας έτσι τον ανιχνευτή στο δεύτερο επίπεδο και γυρίζοντάς τον κατά 5° έχουμε τον ανιχνευτή μας στις 165° χωρίς να χρειαστεί να ανοίξουμε τον θάλαμο για να κάνουμε την αλλαγή αυτή. Η αλλαγή αυτή κρίθηκε απαραίτητη, διότι στη δέσμη δευτερίων υπάρχει πληθώρα πειραματικών δεδομένων στις 165° , σε αντίθεση με τις 160° όπου τα πειραματικά δεδομένα είναι λιγοστά.

Κατά την διάρκεια του πειράματος ο θάλαμος σκέδασης κλείνει και εφαρμόζεται υψηλό κενό. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν δύο αντλίες κενού, η μία (rotary – περιστροφική λαδιού) είναι για την επίτευξη χαμηλού κενού και η άλλη (turbomolecular - στροβιλομοριακή) για να φτάσουμε σε υψηλά επίπεδα κενού.

2.3 Ανιχνευτές – Ηλεκτρονικά

Ανιχνευτές Πυριτίου

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμά μας αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα, μαζί με κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας τους.

Πίνακας 2.1 Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν

Γωνία	Κωδικός Ανιχνευτή	Πάχος (μm)	Τάση Λειτουργίας (V)
140°	5-913-A	300	70
150°	128-E	1000	300
160° (165°)	094-U6	100	50
170°	047-B	1000	140

Το πάχος του κάθε ανιχνευτή είναι τέτοιο ώστε τα φορτισμένα σωματίδια που ανιχνεύει να σταματούν μέσα στον ενεργό όγκο του και να μην τον διαπερνούν. Στην περίπτωση που το πάχος του ανιχνευτή ήταν τέτοιο ώστε να μην μπορεί να σταματήσει τα φορτισμένα σωματίδια, τότε τα φάσματα που θα παίρναμε θα ήταν μετατοπισμένα καθώς τα σωματίδια θα άφηναν μόνο ένα μέρος της ενέργειάς τους μέσα στον ανιχνευτή, δυσκολεύοντας την ανάλυσή μας.

Η τάση λειτουργίας που εφαρμόσαμε αντιστοιχεί σε αυτή που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή (Από 50 έως 300 V).

Η διακριτική ικανότητα (resolution) του κάθε ανιχνευτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα φάσματα του άνθρακα για την αντίδραση $^{12}\text{C}(p,p0)^{12}\text{C}$ σε ενέργεια 2157 keV και 1103 keV. Θα αναφερθούμε στην ανάλυση αυτή διεξοδικότερα στη συνέχεια.

Όσον αφορά την τοποθέτηση των ανιχνευτών, δουλέψαμε ως εξής:

Προκειμένου να εμποδιστεί η ανίχνευση σωματιδίων που προέρχονται από άλλες αιτίες (όπως η σκέδαση των σωματιδίων της δέσμης στα τοιχώματα του θαλάμου) μπροστά από τους ανιχνευτές στερεώθηκαν κατευθυντήρες κυλινδρικού σχήματος (δηλαδή σωληνάκια από αλουμίνιο) τα οποία παρέχουν στους ανιχνευτές την απαιτούμενη πλάγια θωράκιση.

Εκτός από την πλάγια θωράκιση όμως, χρειάστηκε να θωρακίσουμε τους ανιχνευτές μας και στην πίσω μεριά χρησιμοποιώντας τάνταλο, διότι κατά τη διάρκεια της πρώτης δοκιμής με τη δέσμη, οι ανιχνευτές στις 150° και στις 170° που δεν είχαν θωρακιστεί στο πίσω μέρος, μας έδειχναν σημαντικά επίπεδα θορύβου, λόγω σκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από τους κατευθυντήρες σε μπροστινές γωνίες, για τα οποία οι ανιχνευτές δεν είχαν κατάλληλη θωράκιση.

Ηλεκτρονικά

Όσον αφορά τα ηλεκτρονικά μας, το σήμα που λαμβάνει ο ανιχνευτής μετά από ένα γεγονός έχει ύψος ανάλογο της ενέργειας που ανιχνεύεται. Το σήμα όμως αυτό είναι πολύ ασθενές και χρειάζεται να διαμορφωθεί κατάλληλα από ένα σύστημα ηλεκτρονικών πριν μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε.

Έτσι λοιπόν το σήμα ενισχύεται αρχικά από έναν προενισχυτή (Pre-Amplifier) για να μπορέσει να διαχωριστεί από τον θόρυβο. Έπειτα το σήμα περνάει από έναν ενισχυτή (Amplifier) για περαιτέρω ενίσχυση και διαμόρφωση. Η τάση λειτουργίας του ανιχνευτή παρέχεται από την είσοδο bias του προενισχυτή.

Στην συνέχεια, το σήμα περνά μέσα από έναν αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα ADC (Analog to Digital Converter) για να γίνει η μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή μορφή και μετά, μέσω ενός MCA (Multi – Channel Analyzer) γίνεται η καταχώρηση του σήματος στο κατάλληλο κανάλι της μνήμης του υπολογιστή, ανάλογα με το ύψος του.

Για να είναι έτοιμη η διάταξη των ηλεκτρονικών είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί η ενίσχυση (gain) του ενισχυτή, δηλαδή σε ποιο κανάλι θα εμφανίζεται το σήμα που παίρνουμε ανάλογα με το ύψος του. Η αρχική ενίσχυση επιτεύχθηκε ακτινοβολώντας με πρωτόνια τον στόχο του πυριτίου στα 3470 keV και ρυθμίζοντας το gain από την μονάδα του ενισχυτή έτσι ώστε η κορυφή του χρυσού να εμφανίζεται περίπου στο 900οστό κανάλι. Τα σκεδαζόμενα πρωτόνια από το χρυσό (βαρύ στοιχείο) έχουν ενέργεια κοντινή σε σχέση με την αρχική ενέργεια της δέσμης.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι λόγω του ότι κατά τη διάρκεια του πειράματός μας αλλάξαμε την ενίσχυση (gain) στους ανιχνευτές μας αρκετές φορές, δεν μπορούμε να έχουμε μία ενιαία ενεργειακή βαθμονόμηση (calibration) για κάθε ανιχνευτή για όλο το πείραμα. Έτσι, υπολογίζουμε κάθε φορά που γίνεται αλλαγή της ενίσχυσης την ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών μας.

2.4 Στόχοι

Οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- ❖ Ένας παχύς, μη λείος στόχος πυριτίου με ένα στρώμα εξαχνωμένου χρυσού στην κορυφή για λόγους κανονικοποίησης.

Ο λόγος που αποφασίσαμε να επιλέξουμε έναν μη λείο στόχο έγκειται στην προσπάθειά μας να μειώσουμε τα όποια φαινόμενα διαυλισμού (channeling) θα μπορούσαμε να έχουμε, καθώς το φαινόμενο αυτό επηρεάζει τη διαδρομή ενός φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε ένα κρυσταλλικό υλικό, μειώνοντας έτσι την αλληλεπίδρασή του με το υλικό. Η χρήση παστίλιας πυριτίου απορρίφθηκε καθώς τα αποτελέσματα από προηγούμενο πείραμα μας έδειξαν ότι δεν ενδείκνυται για πειράματα benchmarking.

- ❖ Ένας παχύς, γυαλισμένος στόχος μη κρυσταλλικού άνθρακα με ένα στρώμα εξαχνωμένου χρυσού στην κορυφή για τους ίδιους λόγους.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε έναν στόχο Glassy Carbon (ένα υλικό το οποίο συνδυάζει υαλώδεις και κεραμικές ιδιότητες με τις ιδιότητες του γραφίτη), το πιο κατάλληλο ίσως υλικό για πειράματα benchmarking.

- ❖ Ένας παχύς, γυαλισμένος στόχος αλουμινίου με ένα στρώμα εξαχνωμένου χρυσού στην κορυφή (ομοίως).

Για το αλουμίνιο επιλέχθηκε ατυχώς εμπορικό αλουμίνιο λόγω της έλλειψης στόχου υψηλής καθαρότητας. Δυστυχώς, το εμπορικό αλουμίνιο είχε αρκετές προσμίξεις οι οποίες επηρέασαν τη μέτρηση και τα αποτελέσματά μας, καθιστώντας τα ως μη αξιόπιστα.

- ❖ Μία παστίλια πεντοξειδίου του νιοβίου (Nb_2O_5).

Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτός ο στόχος για το οξυγόνο έγκειται στον πολύ σημαντικό ρόλο που παίζει το νιόβιο (Nb) στην επεξεργασία των φασμάτων που παίρνουμε. Η ενεργός διατομή του νιοβίου οφείλεται σε σκέδαση Rutherford σε όλη την ενεργειακή περιοχή που μελετούμε. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται κάθε φορά ως σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό του γινομένου $Q \times \Omega$. Έτσι μπορούμε να καθορίσουμε με υψηλή ακρίβεια όλους τους παράγοντες που διαμορφώνουν την προσομοίωση για να μπορέσουμε ύστερα να συγκρίνουμε τα πειραματικά ολοκληρώματα γεγονότων του οξυγόνου με αξιοπιστία. Η συγκεκριμένη σύσταση επιλέχθηκε έτσι ώστε να έχουμε αρκετά μεγάλη περιεκτικότητα σε οξυγόνο για ασφαλή ανάλυση, με περιορισμό του στατιστικού σφάλματος.

Για την κατασκευή του στόχου αυτού, χρησιμοποιήθηκε η πρέσα που υπάρχει στο εργαστήριο του Ινστιτούτου. Το υλικό του στόχου μας ήταν αρχικά σε μορφή σκόνης, στην οποία ασκήθηκε πίεση περίπου 7 τόνων για 20 λεπτά, μέχρις ότου σχηματιστεί ο στόχος σε μορφή παστίλιας. Για την αντιμετώπιση πιθανών απροόπτων κατασκευάσαμε 2 στόχους Nb_2O_5 .



Εικόνα 2.5 Η πρέσα του Ινστιτούτου με την οποία κατασκευάσαμε τις παστίλιες

Οι στόχοι του πυριτίου και του αλουμινίου, αφού τοποθετήθηκαν στις βάσεις στήριξής τους, μπήκαν στο εξαχνωτήρα για να εξαχνωθεί στην επιφάνειά τους το λεπτό στρώμα χρυσού, όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.6 Ο εξαχνωτήρας εν ώρα λειτουργίας

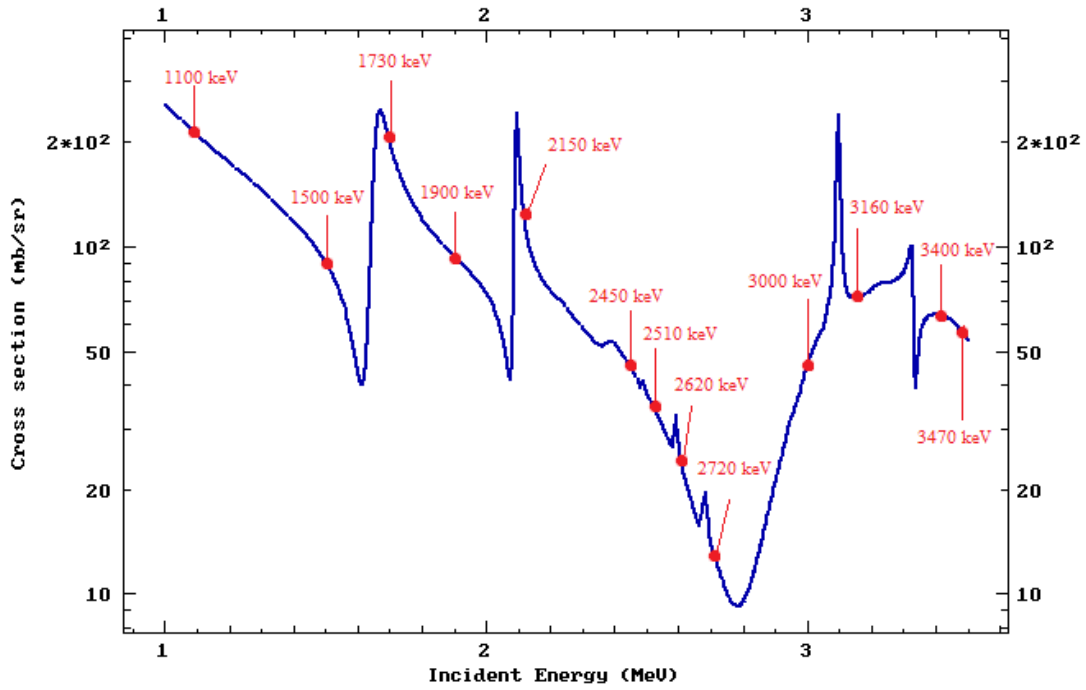
Τοποθετήθηκαν με την προς εξάχνωση επιφάνεια προς τα κάτω, σε ύψος περίπου 21 cm από το χρυσό. Μετά από την εφαρμογή υψηλού κενού στον χώρο του εξαχνωτήρα, ζεστάναμε τον χρυσό ώστε να εξαχνωθεί και να δημιουργήσει ένα λεπτό στρώμα στις επιφάνειες των στόχων μας.

2.5 Επιλογή Ενεργειών και Γωνιών

Η επιλογή τόσο των ενεργειών όσο και των γωνιών στις οποίες λήφθηκαν τα φάσματά μας έγινε με βάση τον σκοπό του πειράματός μας, ο οποίος είναι ο έλεγχος αξιοπιστίας ενεργών διατομών σε περιοχές που αποκλίνουν από τις προβλέψεις της σκέδασης Rutherford. Για το λόγο αυτό, η επιλογή των σημείων έγινε κυρίως πριν και μετά τους συντονισμούς, αλλά και σε κάποιες ενδιάμεσες περιοχές έτσι ώστε να γίνει σωστή σάρωση όλου του ενεργειακού φάσματος.

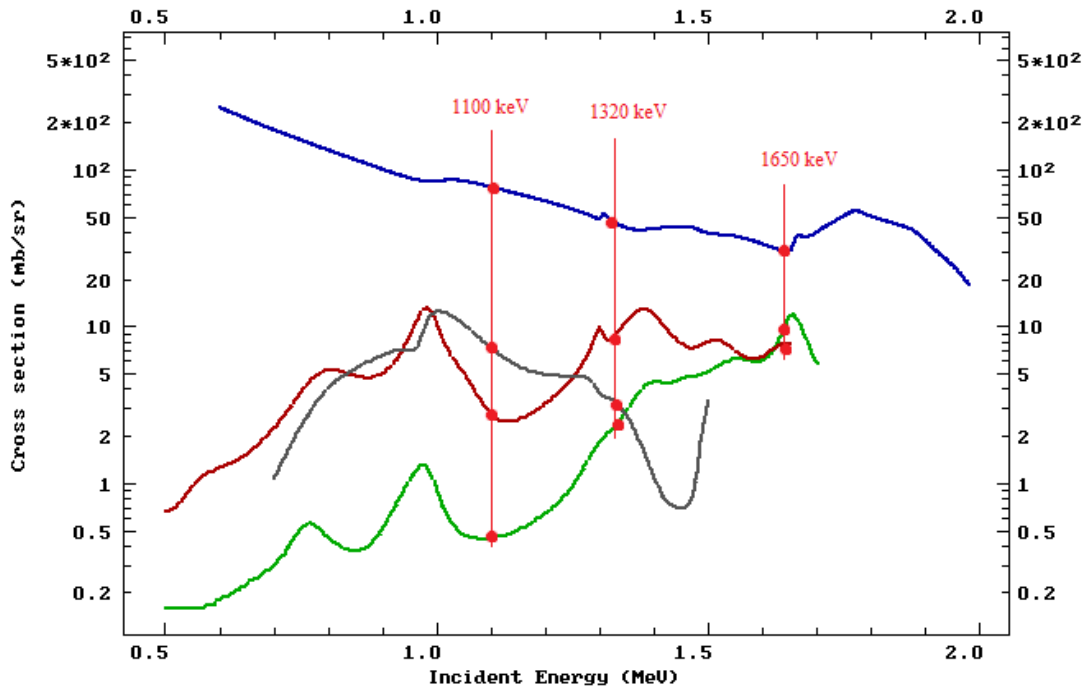
Βασιστήκαμε στα δεδομένα από την διαδικτυακή βιβλιοθήκη IBANDL, εντοπίζοντας τα σημεία με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Στις παρακάτω εικόνες έχουμε τα διαγράμματα των ενεργών διατομών του πυριτίου, του οξυγόνου, του άνθρακα και του αλουμινίου, σε γωνίες 170° και 150° . Με κόκκινο έχουμε επισημάνει τις ενέργειες που επιλέξαμε και μετρήσαμε.

IBANDL, 2015/04/17,06:26:45
SigmaCalc, natSi(p,p0)natSi 170.0deg.



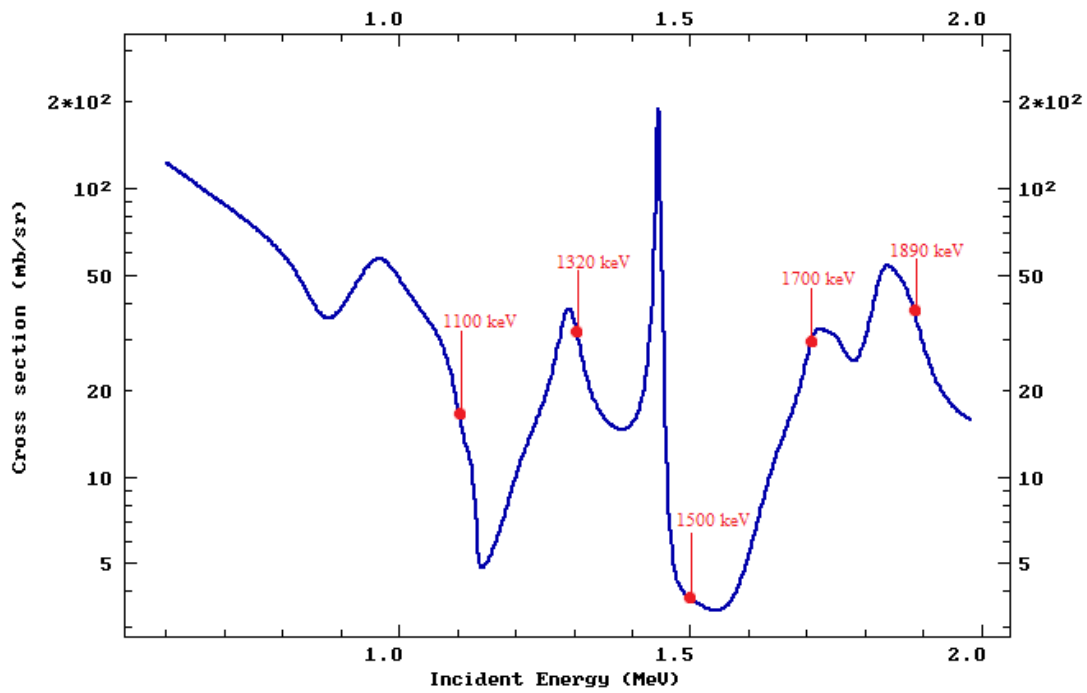
Εικόνα 2.7 Διάγραμμα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{nat}\text{Si}(p,p_0)$

ZUView2 v1.025oz
SigmaCalc, $^{16}\text{O}(d,\alpha_0)^{14}\text{N}$ 150.0deg.



Εικόνα 2.8 Διάγραμμα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{16}\text{O}(d,\alpha_0)^{14}\text{N}$

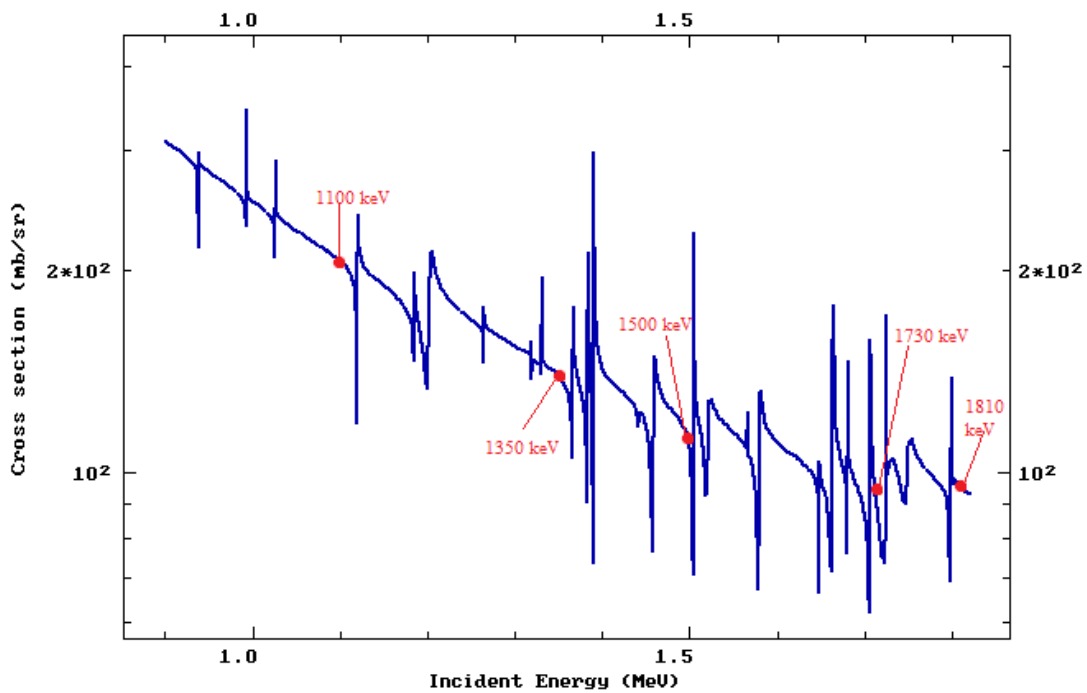
IBANDL, 2015/04/17,06:11:30
SigmaCalc, 12C(d,d0)12C 170.0deg.



Εικόνα 2.9 Διάγραμμα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{12}\text{C}(d,d_0)$

Στο αλουμίνιο, λόγω των πολλών και συνεχόμενων συντονισμών του, δεν ακολούθηθηκε η ίδια διαδικασία για την επιλογή των ενεργειών. Επιλέξαμε τις ενέργειες με τέτοιο βήμα, ώστε να έχουμε απλά μια πλήρη κάλυψη του ενεργειακού φάσματος.

IBANDL, 2015/04/17,08:22:40
SigmaCalc, 27Al(p,p)27Al 150.0deg.



Εικόνα 2.10 Διάγραμμα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p,p)$

Έχουμε λοιπόν τον παρακάτω πίνακα με τις ενέργειες που επιλέξαμε για κάθε έναν από τους στόχους μας.

Πίνακας 2.2 Ενέργειες δέσμης που επιλέξαμε

Ενέργειες (keV)	^{nat} Si(p,p ₀)	²⁷ Al(p,p)	¹⁶ O(d,d ₀ ,p ₀ ,1)	¹² C(d,d ₀)
1100	x	x	x	x
1320			x	x
1350		x		
1500	x	x		x
1650			x	
1700				x
1730	x	x		
1810		x		
1890				x
1900	x			
2150	x			
2450	x	x		
2510	x			
2620	x			
2720	x			
3000	x			
3160	x			
3400	x			
3470	x			

Η επιλογή των γωνιών έγινε κυρίως με βάση τη συνήθη χρήση τους σε πειράματα μελέτης υλικών με τις τεχνικές φασματοσκοπίας ελαστικής οπισθοσκέδασης (EBS – Elastic Backscattering Spectroscopy) και ανάλυσης με χρήση πυρηνικών αντιδράσεων (NRA – Nuclear Reaction Analysis).

Για τη σύγκριση με τα πειραματικά φάσματα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα διαφορικών διατομών που προήλθαν από προσαρμογή πυρηνικών παραμέτρων μέσω της θεωρίας R-matrix σε δεδομένα μετρήσεων ενεργών διατομών σε μεγάλο γωνιακό εύρος [14].

Τα δεδομένα αυτά παρέχονται στους χρήστες μέσω του προγράμματος SigmaCalc 2.0, οι υπολογισμοί του οποίου είναι διαθέσιμοι στην επιστημονική κοινότητα μέσω του ιστότοπου της βιβλιοθήκης. Οι υπολογισμοί μέσω του SigmaCalc αφορούν οποιαδήποτε γωνία οπισθοσκέδασης (>90°) και αποτελούν τα πιο αξιόπιστα δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αναλυτικούς σκοπούς.

Σε κάθε περίπτωση όμως, η αξιοπιστία αυτή και η ακρίβειά τους θα πρέπει να ελεγχθούν μέσω σύγκρισης με παχείς στόχους υψηλής καθαρότητας και γνωστής χημικής σύστασης, κάτι που αποτελεί και την ουσία της διαδικασίας του benchmarking.

Κεφάλαιο 3 – Ανάλυση και Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε την μέθοδο που ακολουθήσαμε για να προσδιορίσουμε την ενεργειακή βαθμονόμηση και τη διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών μας (calibration και resolution), καθώς και τη μέθοδο για τον προσδιορισμό του πάχους του χρυσού στο στόχο του πυριτίου.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των φασμάτων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε στοιχείο.

3.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση

Τα φάσματα που παίρνουμε από τους ανιχνευτές μας είναι καταχωρημένα σε κανάλια. Για να γίνει όμως σωστή σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις προσομοιώσεις, τα κανάλια στα φάσματά μας πρέπει να αντιστοιχούν σε κάποια ενέργεια. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να βρούμε την αντιστοιχία ανάμεσα στα κανάλια και την ενέργεια σε κάθε φάσμα. Τα κανάλια συνδέονται με τις αντίστοιχες ενέργειες σωματιδίων με γραμμικό τρόπο.

Η ενεργειακή βαθμονόμηση πρέπει να γίνει ξεχωριστά για κάθε ανιχνευτή καθώς και για κάθε σετ μετρήσεων, μιας και η ενίσχυση δεν ήταν ίδια για όλους τους ανιχνευτές καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Ακολουθήθηκαν δύο διαδικασίες βαθμονόμησης τις οποίες και παρουσιάζουμε παρακάτω.

❖ 1^η Μέθοδος

Σε αυτή τη μέθοδο ενεργειακής βαθμονόμησης χρησιμοποιήσαμε τις κορυφές του χρυσού από τα φάσματα του πυριτίου, καθώς και τις κορυφές του χρυσού και του άνθρακα από τα φάσματα του άνθρακα με τη δέσμη πρωτονίων. Πιο συγκεκριμένα αντιστοιχήσαμε τα κανάλια στα οποία εμφανίζεται η κορυφή του χρυσού με τις ενέργειες που αναμένουμε να βρεθούν σωματίδια δέσμης οπισθοσκεδαζόμενα από επιφανειακό στρώμα του στοιχείου αυτού σύμφωνα με την κινηματική θεωρία.

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίσαμε την ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών στο δεύτερο σετ μετρήσεων, και πιο συγκεκριμένα για ενέργειες δέσμης από 1100 keV έως 1900 keV.

Παρουσιάζουμε παρακάτω έναν χαρακτηριστικό πίνακα με τις ενέργειες και τα κανάλια καθώς και τις γραφικές παραστάσεις που μας έδωσαν την ενεργειακή βαθμονόμηση.

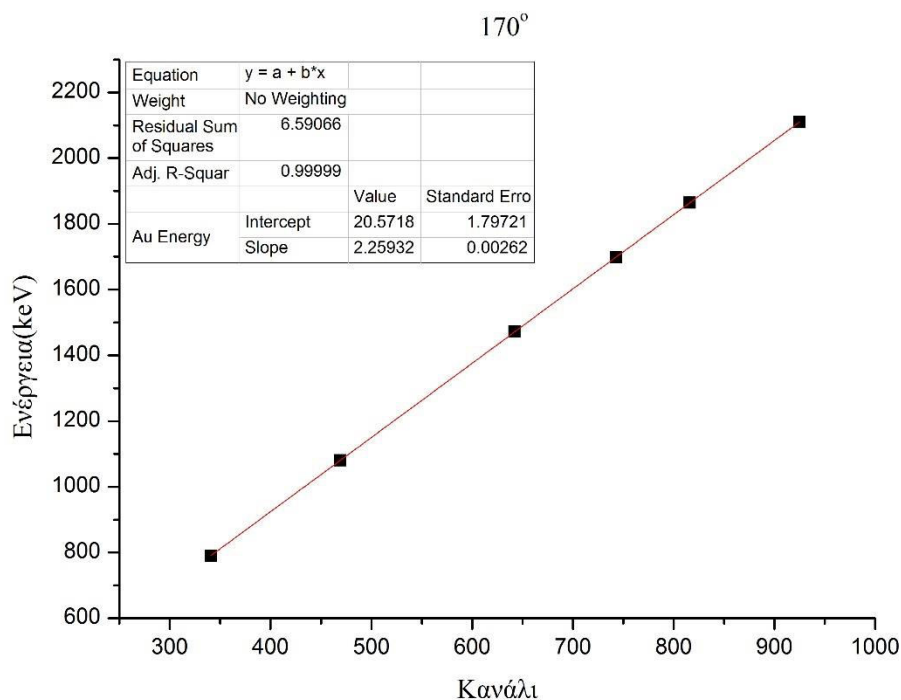
Πίνακας 3.1 Κανάλια και αναμενόμενες θεωρητικές ενέργειες για τον προσδιορισμό της ενεργειακής βαθμονόμησης στις 170°.

	A(X)	B(Y)	C1(Y)	C2(Y)	D1(Y)	D2(Y)	F1(Y)	D3(Y)	D4(Y)	E1(Y)
Long Name	Energy	Au Energy	Au Energy	Au Energy	Au Energy	Au Energy	Au Energy	Au Energy	Au Energy	Channel
Units	keV	keV	keV	keV	keV	keV	keV	keV	keV	
Comments			+3	-3	+5	-5	+6	+10	-10	
1	2150	2106.77	2109.71	2103.83	2111.67	2101.87	2112.65	2116.57	2096.97	925
2	1900	1861.8	1864.74	1858.86	1866.7	1856.9	1867.68	1871.6	1852	816
3	1730	1695.22	1698.16	1692.28	1700.11	1690.32	1701.09	1705.01	1685.42	743
4	1500	1469.84	1472.78	1466.9	1474.74	1464.94	1475.72	1479.64	1460.04	642
5	1100	1077.88	1080.82	1074.94	1082.78	1072.98	1083.76	1087.68	1068.08	469
6	1100	787.76	789.91	785.61	791.34	784.18	792.05	794.92	780.6	341
7										

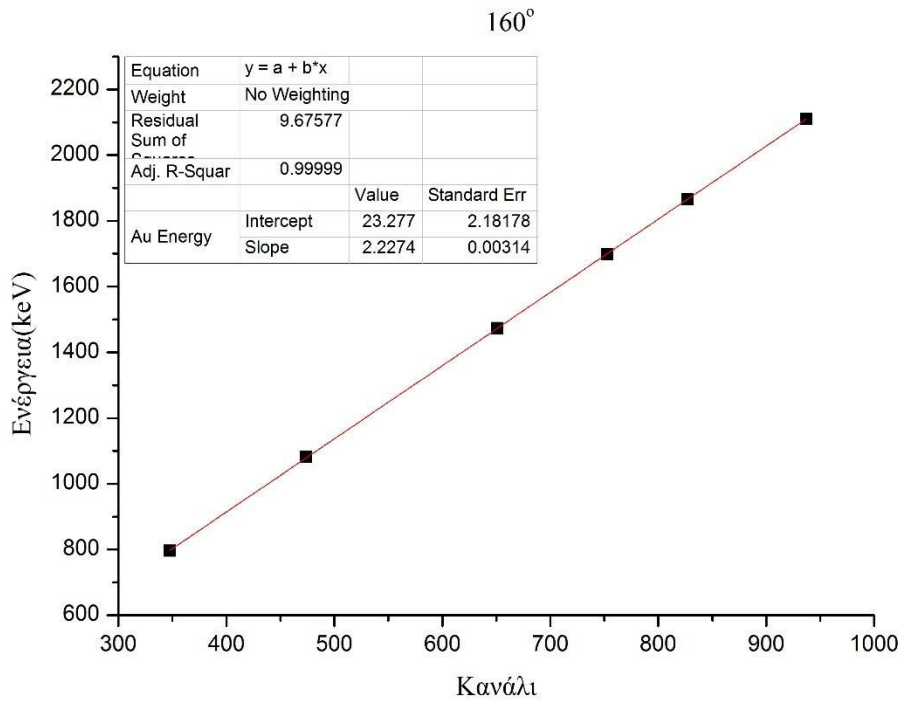
Πρέπει εδώ να αναφέρουμε ότι η ενέργεια στα 2150 keV ήταν η ενέργεια στην οποία έγινε η αλλαγή της ενίσχυσης. Για το λόγο αυτό πήραμε δύο μετρήσεις, μία με την πρώτη και μία με τη δεύτερη ενίσχυση. Ακόμη, η δεύτερη ενέργεια των 1100 keV αντιστοιχεί στον άνθρακα [15], [16] και όχι στο χρυσό όπως φαίνεται στον πίνακα. Τέλος, όπως φαίνεται και στον πίνακα, πήραμε τις θεωρητικές τιμές για ενέργειες γύρω από την ‘ονομαστική’ ενέργεια λόγω της αβεβαιότητας που έχουμε στην ενέργεια της δέσμης, μιας και δεν είχαμε τον κατάλληλο πειραματικό χρόνο να κάνουμε ενεργειακή βαθμονόμηση της μηχανής με χρήση λεπτών, ισχυρών συντονισμών σε αντιδράσεις με ακτίνες-γ στο κανάλι εξόδου.

Προέκυψε ότι την καλύτερη συμφωνία ενέργειας και ενεργειακής βαθμονόμησης την έχουμε για ενέργεια + 3 keV από την ονομαστική μας ενέργεια.

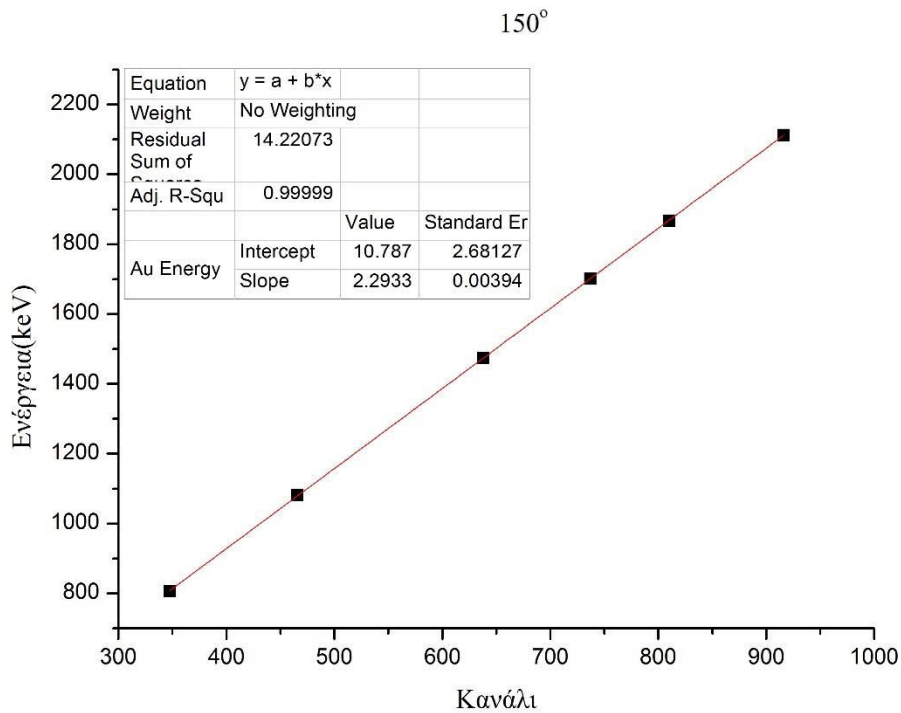
Έχουμε λοιπόν στα παρακάτω φάσματα την ενέργεια ανά κανάλι (Slope) και τη μετατόπιση (Intercept), τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε στα φάσματά μας.



Εικόνα 3.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 170°

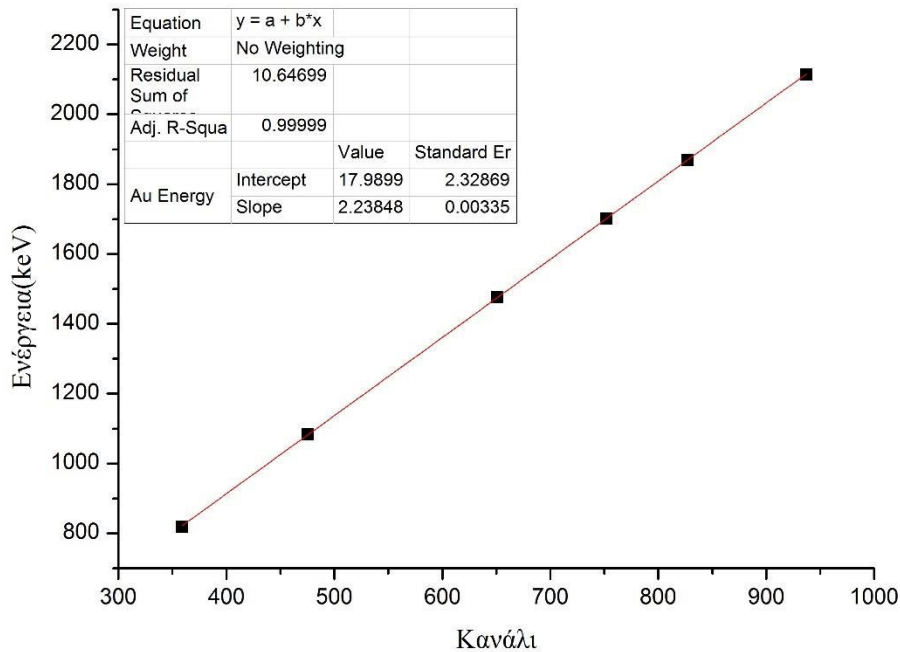


Εικόνα 3.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 160°



Εικόνα 3.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 150°

140°



Εικόνα 3.4 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 140°

Συγκεντρώνοντας όλα τα παραπάνω σε έναν πίνακα έχουμε τις τελικές τιμές που χρησιμοποιήσαμε:

Πίνακας 3.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών για τις ενέργειες από 1100 keV έως 1900 keV

	140°	150°	160°	170°
Ενέργεια/κανάλι	2.239 ± 0.003	2.292 ± 0.003	2.227 ± 0.004	2.259 ± 0.003
Μετατόπιση	14. 6 έως 15.6	6.8 έως 10.1	20.1 έως 21.6	17.2 έως 18.9

Ο λόγος που η ενέργεια/κανάλι δεν σταματά στο πρώτο ή έστω στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο αλλά στο τρίτο, έγκειται στο πλήθος των καναλιών που έχει το φάσμα μας και στο σφάλμα στην ενέργεια που απορρέει από αυτό. Πιο συγκεκριμένα, το σφάλμα στις 160°, (δηλαδή το 0.004), αν το πολλαπλασιάσουμε με το κανάλι στο οποίο βλέπουμε την επιφάνεια του πυριτίου στη μεγαλύτερη ενέργεια, (κανάλι 730 στα 1903 keV) παίρνουμε ένα σφάλμα 3 keV στην τιμή της ενέργειας μόνο από αυτό. Συνεπώς το τρίτο δεκαδικό ψηφίο γίνεται απαραίτητο για την ανάλυσή μας, διότι σφάλματα μεγαλύτερα των 3 keV στην ενέργεια δεν θα ήταν αποδεκτά και θα επηρέαζαν αρνητικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

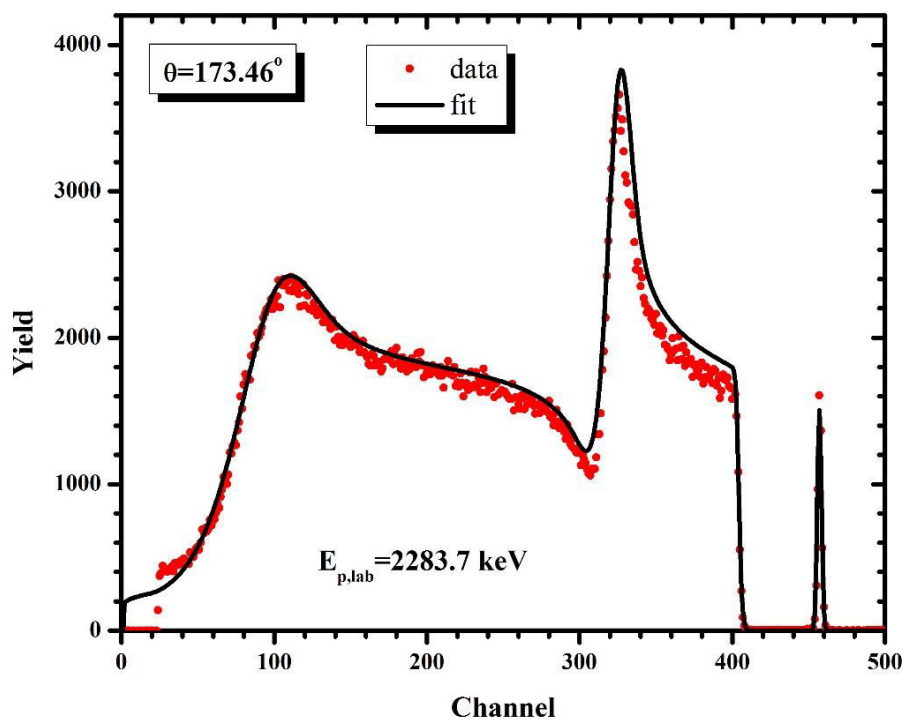
❖ 2η Μέθοδος

Σε αυτή τη μέθοδο ενεργειακής βαθμονόμησης χρησιμοποιήσαμε τα φάσματα από ένα προηγούμενο πείραμα ελέγχου αξιοπιστίας του πυριτίου, που έλαβε χώρα στο Κέντρο Ιοντικής Φυσικής του πανεπιστημίου του Surrey [17], [18]. Στο εν λόγω πείραμα είχαμε πολύ μεγάλη ακρίβεια στην ενέργεια της δέσμης, μιας και η ενεργειακή βαθμονόμηση της μηχανής έγινε με τη χρήση ακτίνων-γ. Χρησιμοποιώντας έτσι κάποια χαρακτηριστικά φάσματα και συγκρίνοντάς τα με τα δικά μας, υπολογίσαμε την ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών μας για το πρώτο σετ μετρήσεων και πιο συγκεκριμένα για ενέργειες δέσμης από 2150 keV έως 3470 keV.

Ο λόγος που επιλέξαμε αυτή τη μέθοδο έγκειται στην αβεβαιότητα που είχαμε στην ενέργεια της δέσμης, μιας και όπως αναφέραμε και παραπάνω δεν έγινε ενεργειακή βαθμονόμηση της μηχανής.

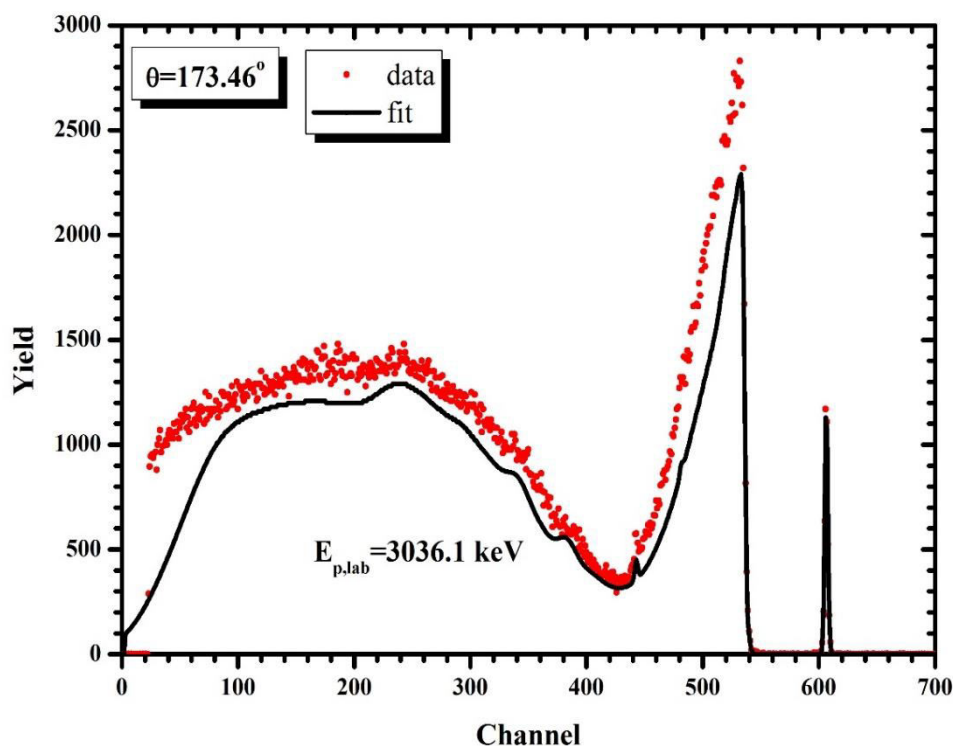
Η μεγάλη αβεβαιότητα όμως που έχουμε στις υψηλές ενέργειες οφείλεται στο φαινόμενο της μη γραμμικότητας. Εμείς θεωρούμε ότι η σχέση μεταξύ των καναλιών και της ενέργειας είναι γραμμική. Η αλήθεια όμως είναι ότι στην εξίσωση υπάρχει και ένας δευτεροβάθμιος όρος, ο οποίος στις υψηλές ενέργειες παύει να είναι αμελητέος. Έχοντας λοιπόν αβεβαιότητα στην ενέργεια της δέσμης και μην μπορώντας να επιλέξουμε μια ενεργειακή βαθμονόμηση με την πρώτη μέθοδο λόγω της μη γραμμικότητας, χρησιμοποιούμε τα φάσματα από το Surrey, τα οποία μπορούμε να εμπιστευτούμε ως προς την ενέργεια και την ενεργειακή βαθμονόμηση τους.

Παρουσιάζουμε παρακάτω τα χαρακτηριστικά φάσματα που χρησιμοποιήσαμε καθώς και έναν πίνακα με τα τελικά αποτελέσματα της ενέργειας/κανάλι και της μετατόπισης.



Εικόνα 3.5 Πειραματικά δεδομένα και προσομοίωση της ενεργής διατομής της αντίδρασης $^{28}\text{Si}(p,p_0)$

Βλέπουμε ότι η προσομοίωση μπορεί να φέρει ακριβώς τη θέση του μέγιστου αλλά και του ελάχιστου που παρουσιάζει η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{nat}\text{Si}(p,p_0)$. Πρέπει λοιπόν να βρούμε τη βέλτιστη ενεργειακή βαθμονόμηση αλλά και ενεργειακή μετατόπιση έτσι ώστε να ταυτίζονται οι θέσεις των μέγιστων και των ελάχιστων της θεωρίας με αυτά των πειραματικών μας δεδομένων.



Εικόνα 3.6 Πειραματικά δεδομένα και προσομοίωση της ενεργής διατομής της αντίδρασης $^{nat}\text{Si}(p,p_0)$

Και σε αυτό το φάσμα μπορούμε να δούμε ότι η θέση του μέγιστου και του ελάχιστου προσομοιώνονται τέλεια από τη θεωρία.

Έχοντας λοιπόν ως σημείο αναφοράς τα φάσματα από το πείραμα στο Surrey, ολοκληρώνουμε τη βαθμονόμηση για το πρώτο σετ μετρήσεων για ενέργειες δέσμης από 2150 keV έως 3470 keV.

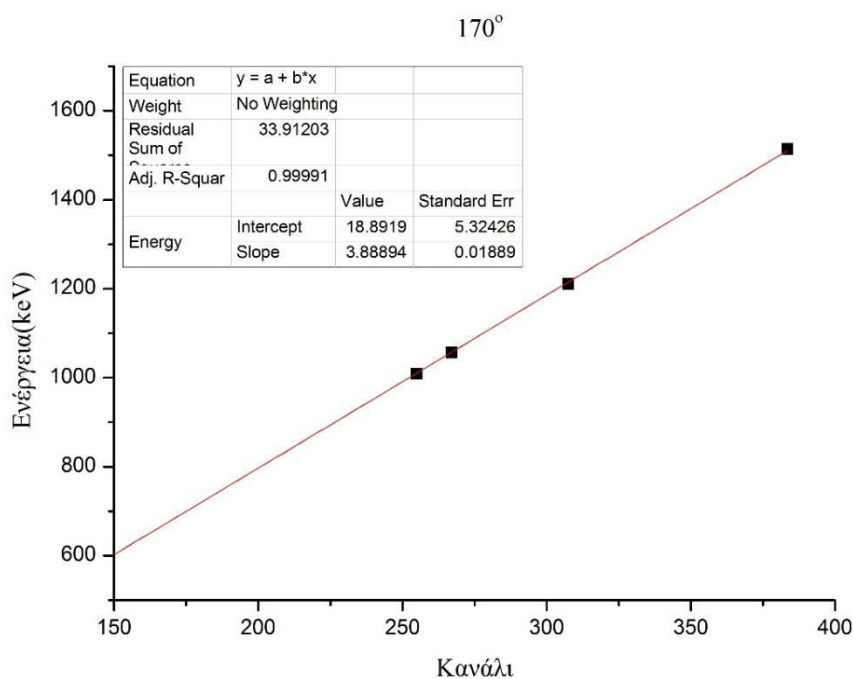
Πίνακας 3.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών για τις ενέργειες από 2150 keV έως 3470 keV

	140°	150°	160°	170°
Ενέργεια/κανάλι	3.615 ± 0.004	3.740 ± 0.005	3.718 ± 0.006	3.600 ± 0.005
Μετατόπιση	13 έως 22	- 7 έως 9	13 έως 30	11 έως 25

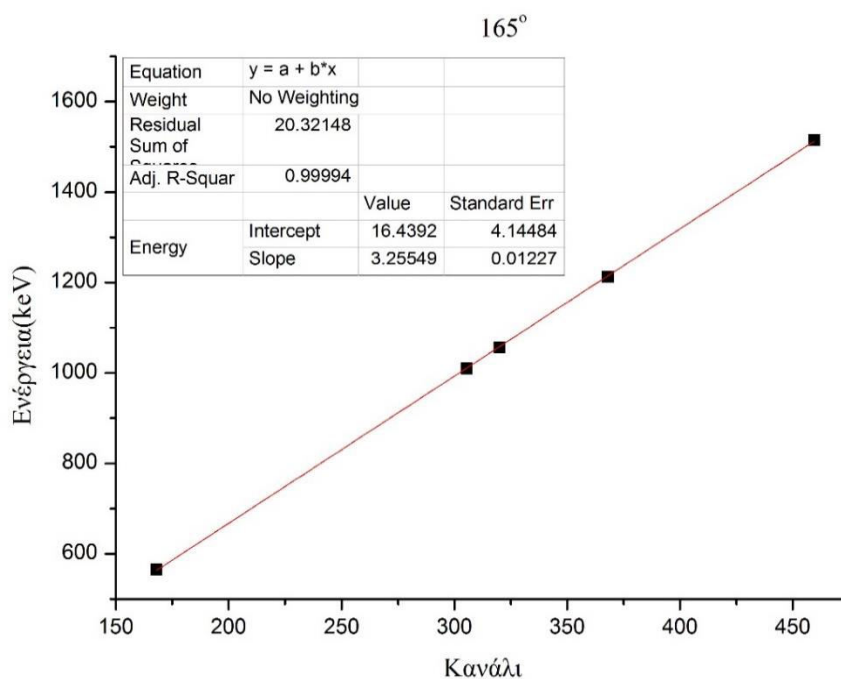
Να σημειώσουμε εδώ ότι η αλλαγή στην κεντρική τιμή της ενέργειας/κανάλι είναι τέτοια ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή προσομοίωση με σφάλμα που να μην ξεπερνάει τα 3 keV στην επιφάνεια του πυριτίου.

Για τη δέσμη των δευτερίων, χρησιμοποιήσαμε την 1^η μέθοδο βαθμονόμησης. Αντιστοιχίσαμε δηλαδή τα κανάλια στα οποία βρίσκονται οι κορυφές του χρυσού και του άνθρακα από το στόχο του άνθρακα, καθώς και η κορυφή του νιοβίου από την παστίλια του οξυγόνου, με τις ενέργειες που αναμένουμε να βρίσκονται σύμφωνα με την κινηματική θεωρία.

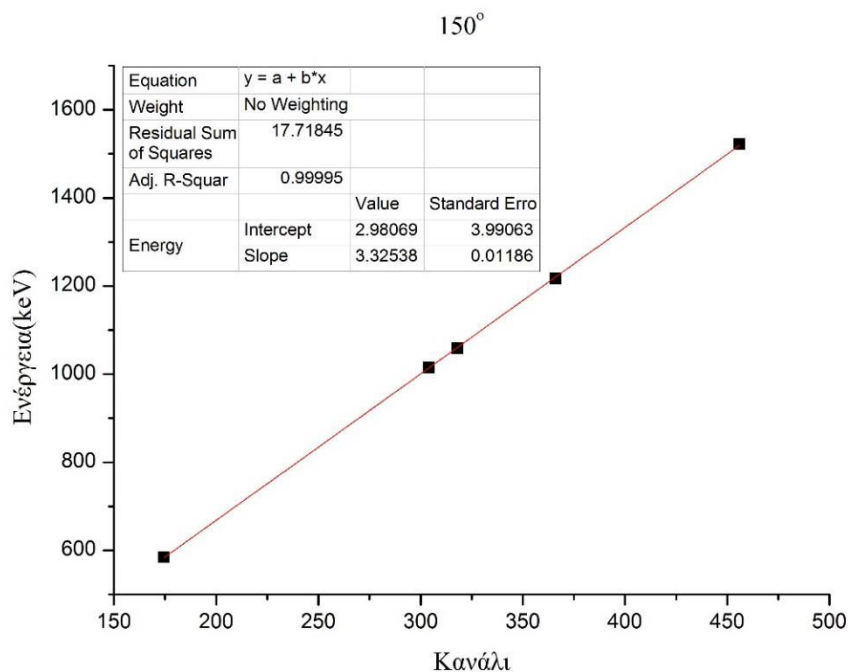
Έχουμε λοιπόν στα παρακάτω φάσματα την ενέργεια ανά κανάλι (Slope) και τη μετατόπιση (Intercept), τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε στα φάσματά μας.



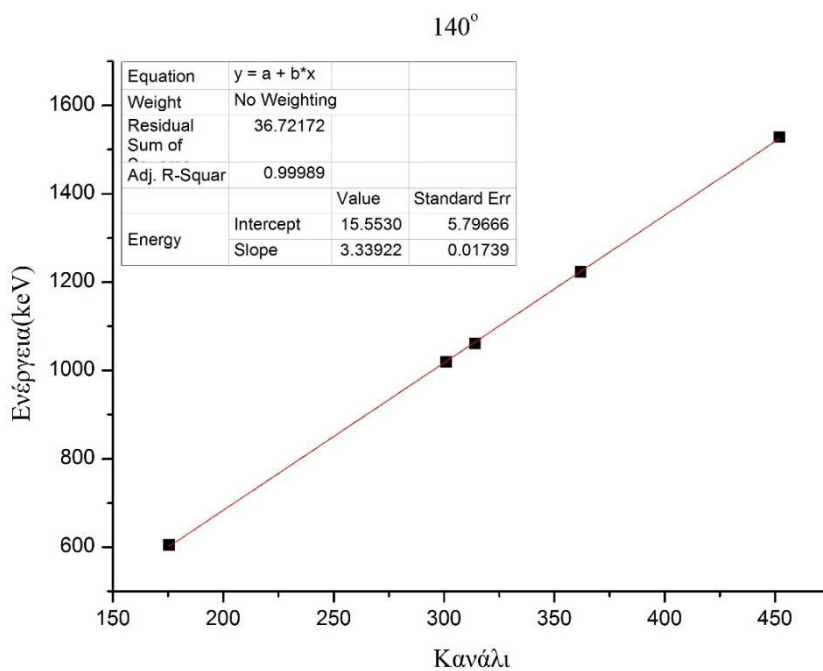
Εικόνα 3.7 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 170°



Εικόνα 3.8 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 165°



Εικόνα 3.9 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 150°



Εικόνα 3.10 Ενεργειακή βαθμονόμηση στις 140°

Προκείμενη έτσι ο παρακάτω πίνακας για την ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών μας στη μέτρηση του οξυγόνου.

Πίνακας 3.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών για τη μέτρηση του οξυγόνου

	140°	150°	160°	170°
Ενέργεια/κανάλι	3.3400 ± 0.004	3.3600 ± 0.005	3.2400 ± 0.005	3.9000 ± 0.010
Μετατόπιση	10.0 έως 16.5	- 7.5 έως -14.5	17.5 έως 22.5	11 έως 15

Ο λόγος που έχουμε μεγαλύτερα σφάλματα στις τιμές αυτές έγκειται στον περιορισμένο αριθμό σημείων που είχαμε στη διάθεσή μας για τη σχεδίαση της γραφικής παράστασης.

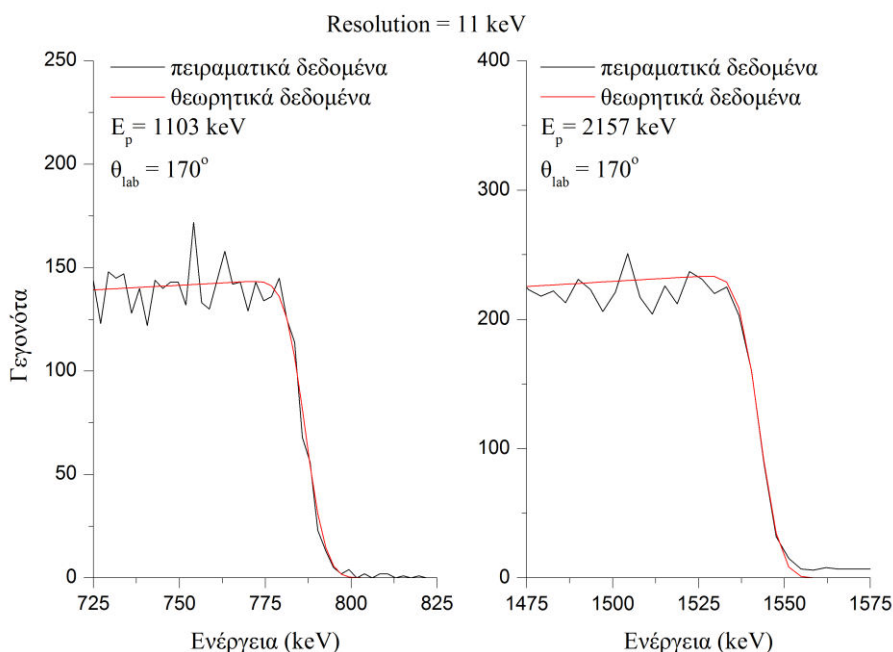
3.2 Διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών

Για την εύρεση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας (resolution) των τεσσάρων ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν, ελήφθησαν μετρήσεις ακτινοβολώντας τον στόχο λείου άνθρακα σε ενέργειες δέσμης πρωτονίων 2157 keV και 1103 keV.

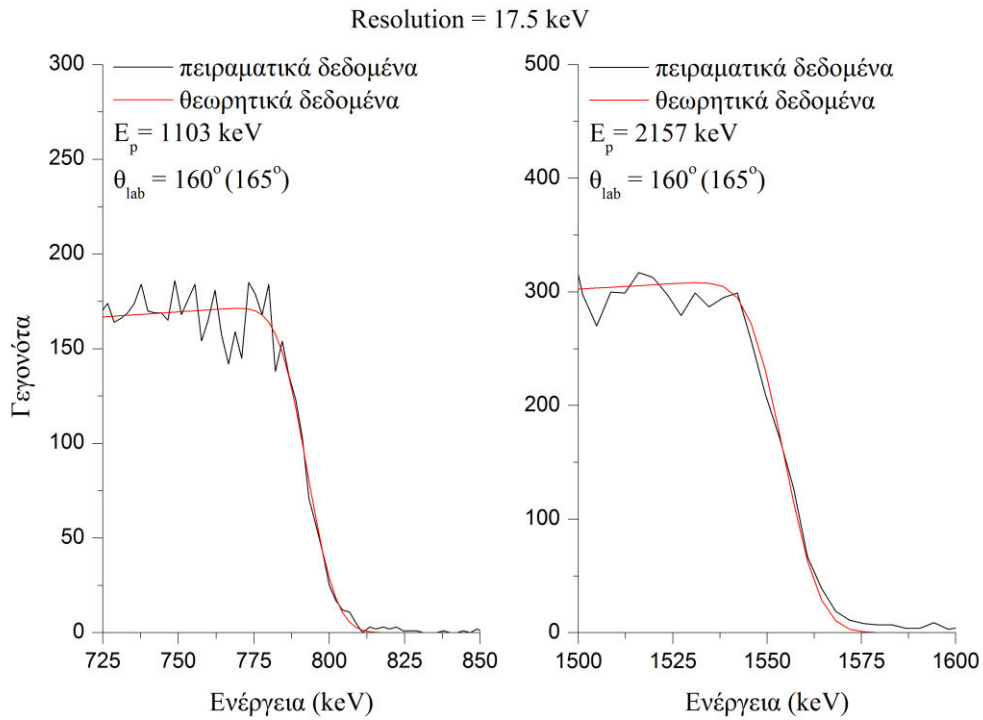
Λόγω της λείας επιφάνειας του συγκεκριμένου στόχου, στην μορφή των φασμάτων αυτών δεν συνεισφέρει η επιφανειακή τραχύτητα (roughness), οπότε μπορεί να προσδιοριστεί η διακριτική ικανότητα με αξιοπιστία. Αυτό γίνεται συγκρίνοντας τα πειραματικά φάσματα με τα αντίστοιχα προσομοιωμένα και μεταβάλλοντας κατάλληλα την διακριτική ικανότητα στο SIMNRA μέχρι να συμπέσουν οι άκρες των φασμάτων (οι οποίες αντιστοιχούν σε πρωτόνια που έχουν σκεδαστεί από την επιφάνεια τους).

Επειδή όμως η διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών μας δεν επηρεάζεται από αλλαγές στην ενίσχυση ή στην ενέργεια, η διακριτική ικανότητα στα 2157 keV θα πρέπει να συμπίπτει με την διακριτική ικανότητα στα 1103 keV για κάθε ανιχνευτή. Έχοντας αυτό στο μυαλό, επιλέγουμε την κατάλληλη τιμή έτσι ώστε να συμπίπτουν οι άκρες των πειραματικών με τα προσομοιωμένα φάσματα και για τις δύο ενέργειες, όσο μπορούμε καλύτερα.

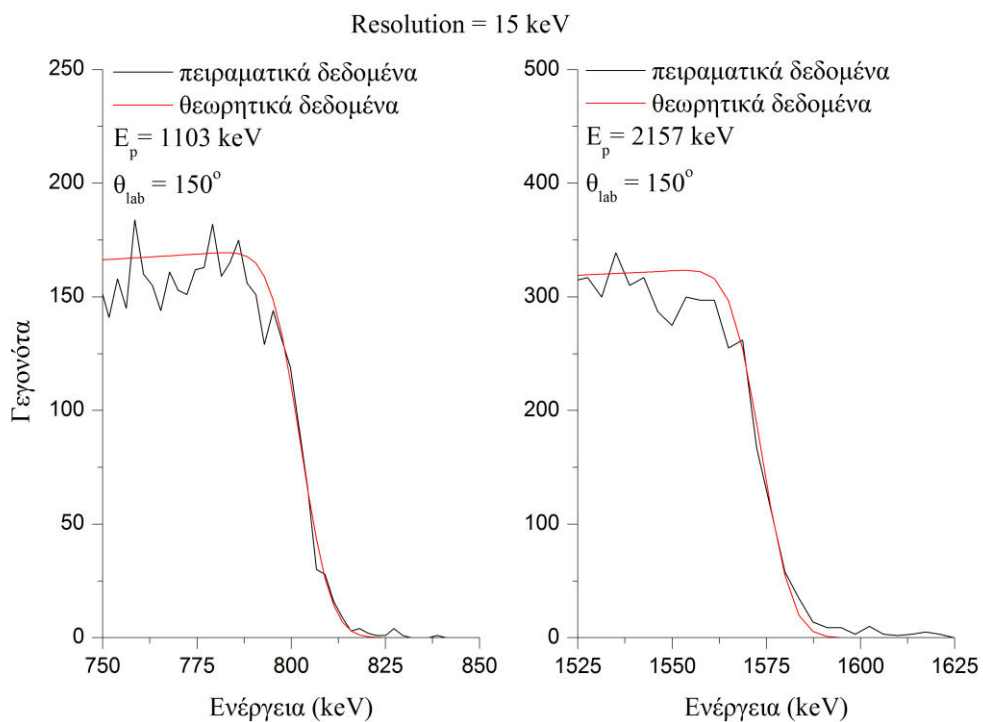
Στα παρακάτω διαγράμματα μπορούμε να δούμε τα τελικά φάσματα για τον προσδιορισμό της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας για κάθε γωνία, σε ενέργειες πρωτονίων 2157 keV και 1103 keV.



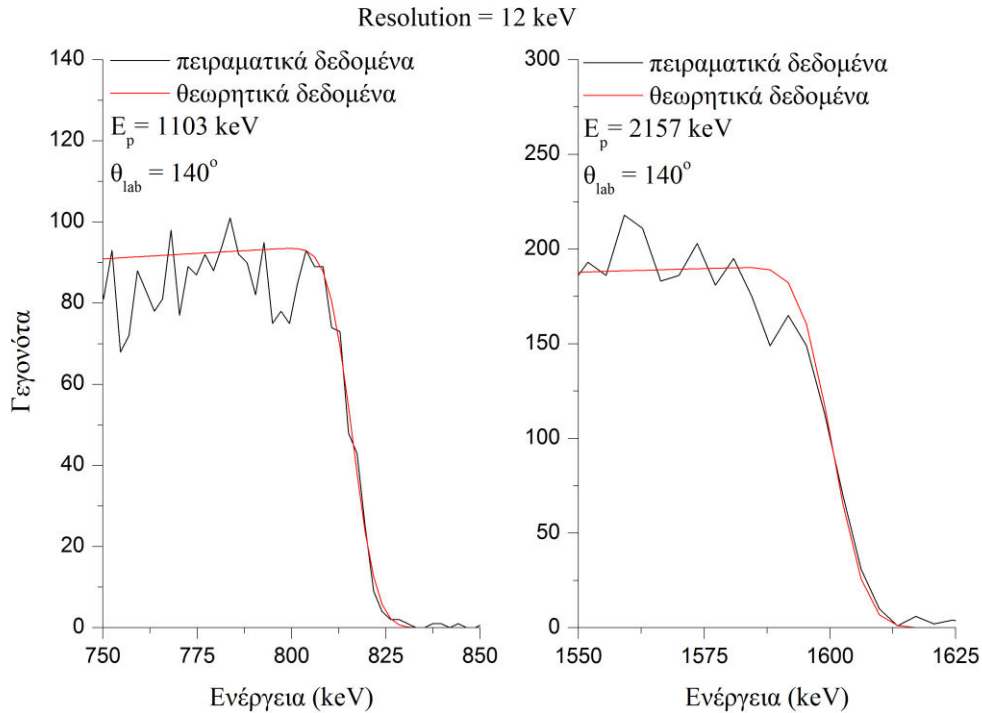
Εικόνα 3.11 Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή των 170°



Εικόνα 3.12 Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή των 160° (165°)



Εικόνα 3.13 Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή των 150°



Εικόνα 3.14 Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή των 140°

Επομένως θα έχουμε συγκεντρωτικά:

Κωδικός Ανιχνευτή	Γωνία	Διακριτική Ικανότητα (resolution)
5-913-A	140°	12 keV
128-E	150°	15 keV
094-U6	160° (165°)	17.5 keV
047-B	170°	11 keV

3.3 Προσδιορισμός του πάχους του χρυσού

Ξεκινώντας την ανάλυση και έχοντας υπολογίσει την ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών μας αλλά και την διακριτική τους ικανότητα, θέλουμε να προσδιορίσουμε το πάχος και τις πιθανές προσμίξεις του χρυσού.

Για τον προσδιορισμό του πάχους του χρυσού χρησιμοποιήσαμε τα φάσματα του πυριτίου σε όλες τις γωνίες και για ενέργεια δέσμης 1100 keV (1103 keV για την ανάλυση). Ο λόγος που επιλέγουμε αυτή την ενέργεια για να προσδιορίσουμε το πάχος του χρυσού είναι ότι η ενεργός διατομή του πυριτίου στην ενέργεια αυτή οφείλεται σε σκέδαση Rutherford. Μπορούμε έτσι να χρησιμοποιήσουμε το πυρίτιο ως σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό του γινομένου $Qx\Omega$. Στη συνέχεια, έχοντας προσδιορίσει το $Qx\Omega$, αλλάζουμε τη σύσταση και το πάχος του στόχου μας (του χρυσού συγκεκριμένα) έτσι ώστε η ολοκλήρωση των πειραματικών δεδομένων στην περιοχή του χρυσού να έχει όσο γίνεται τον ίδιο αριθμό με την προσομοίωση.

Έχουμε λοιπόν:

Πίνακας 3.4 Αρχική σύσταση του στόχου για κάθε γωνία

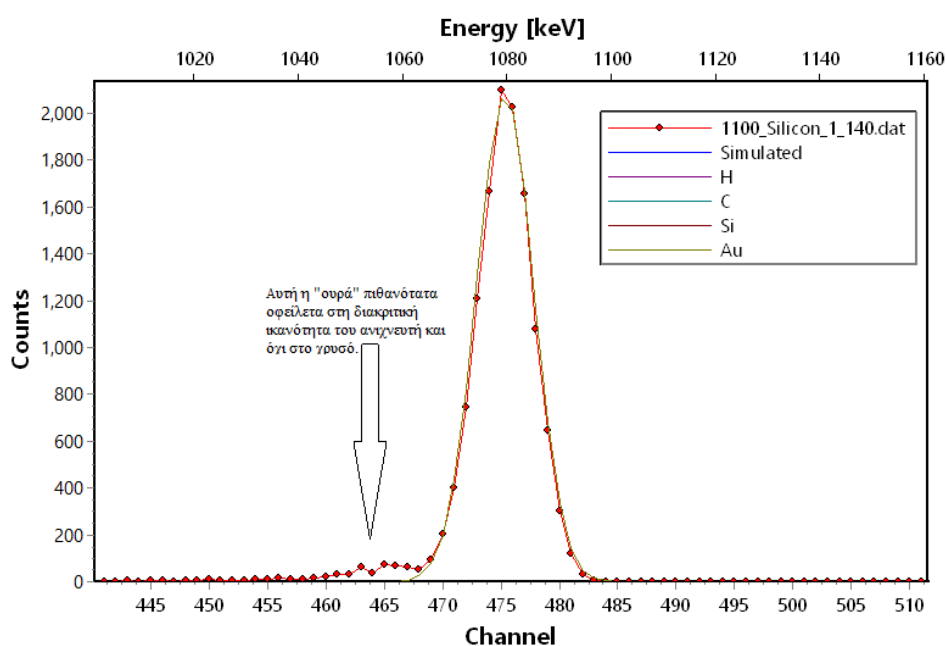
Γωνία	Κανάλια Ολοκλήρωσης	Απόκλιση	Συνολικό Πάχος (10^{15} atoms / cm^2)	Χρυσός (Au)	Άνθρακας (C)	Υδρογόνο (H)
170ο	455 - 480	0.0003%	160.643	93.312	44.204	23.127
160ο	455 - 490	0.00003%	162.249	93.735	44.938	23.576
150ο	450 - 480	0.001%	162.048	93.873	44.781	22.394
140ο	460 - 490	0.6%	167.564	98.309	45.866	23.389

Παρατηρούμε ότι η σύσταση δεν διαφέρει πολύ από γωνία σε γωνία. Βέβαια, τα νούμερα αυτά προέκυψαν ύστερα από αρκετές δοκιμές και χρήση μίας από τις λειτουργίες του SIMNRA για τον υπολογισμό της καλύτερης δυνατής σύστασης. Για να καταλήξουμε σε ένα πάχος χρυσού και μία σύσταση στόχου, παίρνουμε τον μέσο όρο των παραπάνω τιμών καταλήγοντας στους εξής δύο στόχους:

Πίνακας 3.5 Τελική σύσταση του στόχου που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις μας

Γωνία	Συνολικό Πάχος (10^{15} atoms/ cm^2)	Χρυσός (Au)	Άνθρακας (C)	Υδρογόνο (H)
170°, 160°, 150°	161.200	93.600 ± 0.800	44.400 ± 0.400	23.200 ± 0.200
140°	165.990	97.200 ± 1.100	45.400 ± 0.400	23.390 ± 0.060

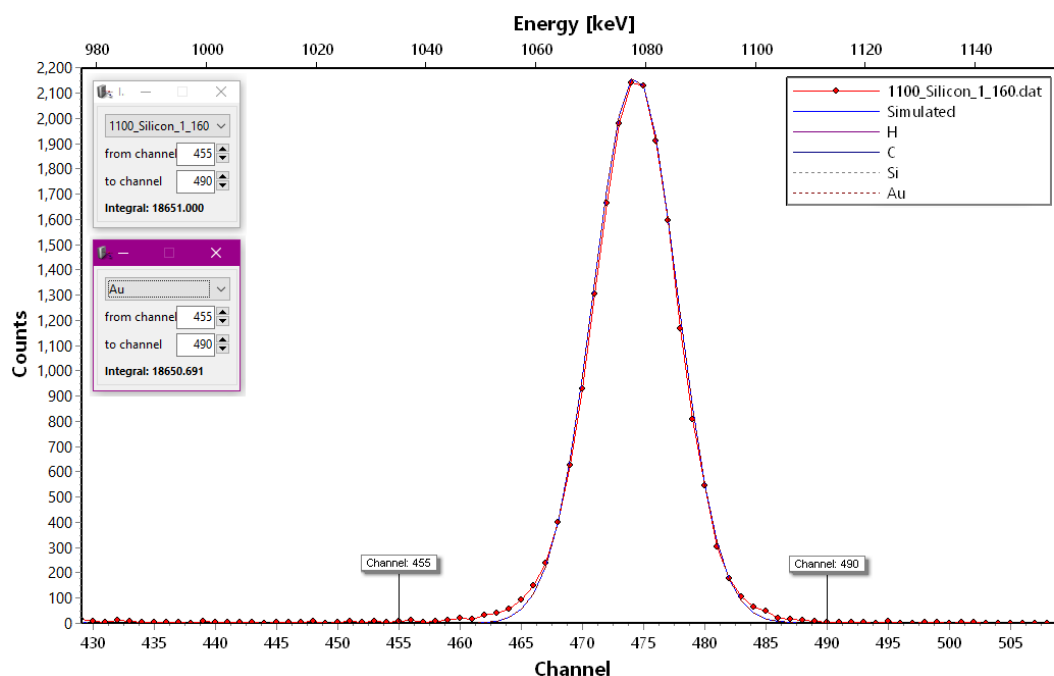
Για τις 140° αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν ξεχωριστό στόχο διότι στα φάσματά μας έχουμε μια περίεργη “ουρά” στο χρυσό εμποδίζοντάς μας από το να καταλάβουμε που ακριβώς τελειώνουν τα γεγονότα που οφείλονται στο χρυσό, όπως μπορούμε να δούμε και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.15 Προσδιορισμός του πάχους του χρυσού για τις 140°

Αντίθετα, στις υπόλοιπες γωνίες δεν παρατηρούμε κάτι τέτοιο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:

Στην παραπάνω εικόνα μπορούμε να δούμε την ελάχιστη διαφορά που έχουμε μεταξύ των πειραματικών δεδομένων μας και των θεωρητικών δεδομένων, όπως αυτά προκύπτουν για το πάχος του στόχου που υπολογίσαμε.



Εικόνα 3.16 Προσδιορισμός του πάχους του χρυσού για τις 160°

Συνεπώς για να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερες προσομοιώσεις επιλέγουμε έναν κοινό στόχο για τις τρεις από τις τέσσερις γωνίες που δεν παρουσιάζουν “ουρές” στο χρυσό, ενώ για τις 140° επιλέγουμε μια διαφορετική σύσταση, κάτι που δικαιολογείται από την σχετική αδυναμία αυτού στη συλλογή φορτίου.

Επομένως, το πάχος του στόχου μας σε μικρογραμμάρια ανά τετραγωνικό εκατοστό είναι:

Πίνακας 3.6 Τελικό πάχος και σύσταση του στόχου μας

Γωνία	Συνολικό Πάχος (μg/cm ²)	Χρυσός (Au)	Άνθρακας (C)	Υδρογόνο (H)
170°, 160°, 150°	31.0248	30.1 ± 0.3	0.886 ± 0.008	0.0388 ± 0.0003
140°	32.1452	31.2 ± 0.4	0.906 ± 0.008	0.0392 ± 0.0001

3.4 Πυρίτιο

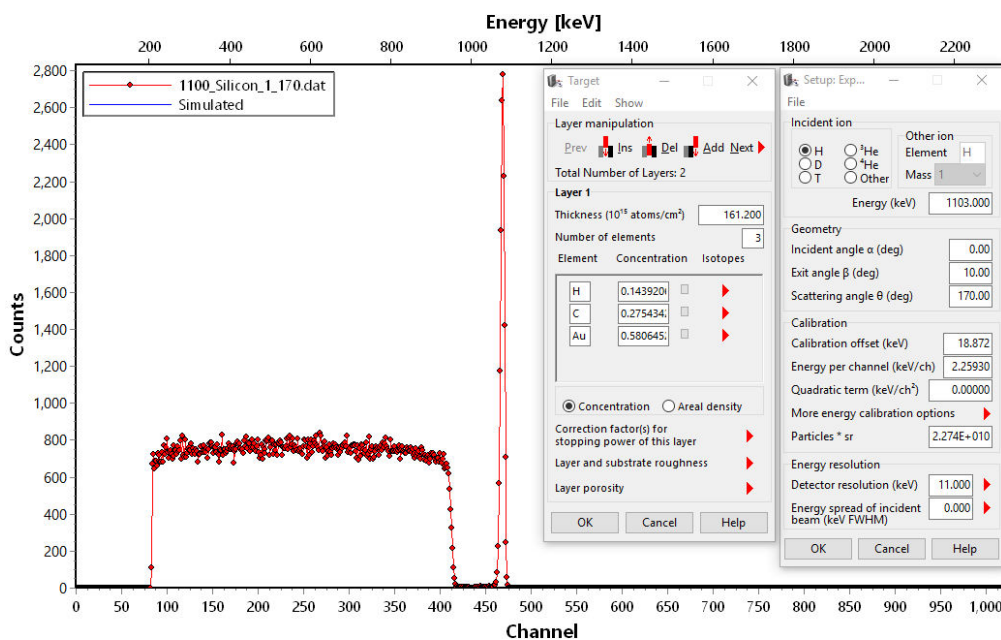
Έχοντας ήδη υπολογίσει την ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών μας για το σύνολο των μετρήσεων του πυριτίου, καθώς και το πάχος του χρυσού στο στόχο μας, είμαστε έτοιμοι να περάσουμε στην ανάλυση των φασμάτων.

Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε ότι η ονομαστική ενέργεια δέσμης που έχουμε παρουσιάζει ένα σφάλμα της τάξης των 3 keV (με βάση την ενεργειακή βαθμονόμηση αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 1 κανάλι), οπότε για τις ανάγκες της προσομοίωσης η ενέργεια που χρησιμοποιούμε είναι - 3 keV για το πρώτο σετ μετρήσεων (2150 – 3470 keV) και + 3 keV για το δεύτερο σετ μετρήσεων (1100 – 1900 keV).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των φασμάτων του πυριτίου είναι η ίδια για όλα τα φάσματα και θα παρουσιαστεί για την ενέργεια των 1100 keV στη γωνία των 170°. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα τελικά φάσματα όλων των ενεργειών και όλων των γωνιών καθώς και συγκεντρωτικοί πίνακες για τη σύγκριση των πειραματικών με τα θεωρητικά δεδομένα.

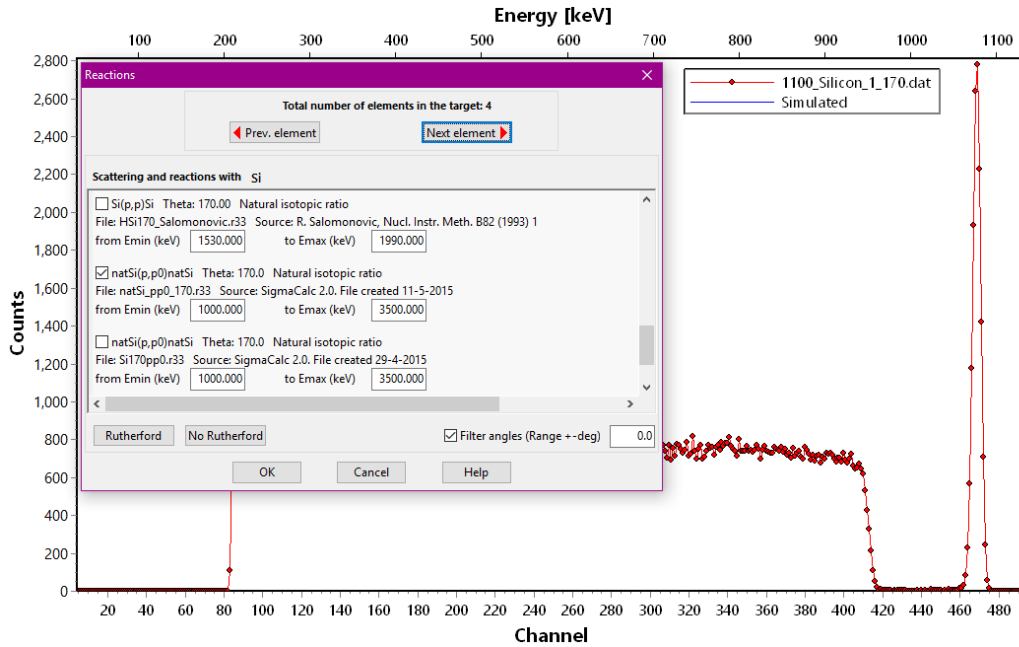
Έχουμε λοιπόν:

1. Αρχικά, αφού ανοίξουμε το SIMNRA, φορτώνουμε στο πρόγραμμα τα πειραματικά μας δεδομένα και συμπληρώνουμε όλα τα απαραίτητα πεδία στα παράθυρα του SIMNRA που αναφέρονται στο πειραματικό setup (ενέργεια δέσμης, επιταχυνόμενο ιόν, γωνία ανιχνευτή, ενεργειακή βαθμονόμηση και μετατόπιση, διακριτική ικανότητα ανιχνευτή και φορτίο δέσμης) και στον στόχο (πλήθος επιπέδων, πλήθος στοιχείων ανά επίπεδο και πάχος κάθε στοιχείου) έτσι ώστε να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε τα θεωρητικά δεδομένα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.17 Συμπλήρωση των απαραίτητων δεδομένων για την σύγκριση των πειραματικών μας δεδομένων με τα θεωρητικά

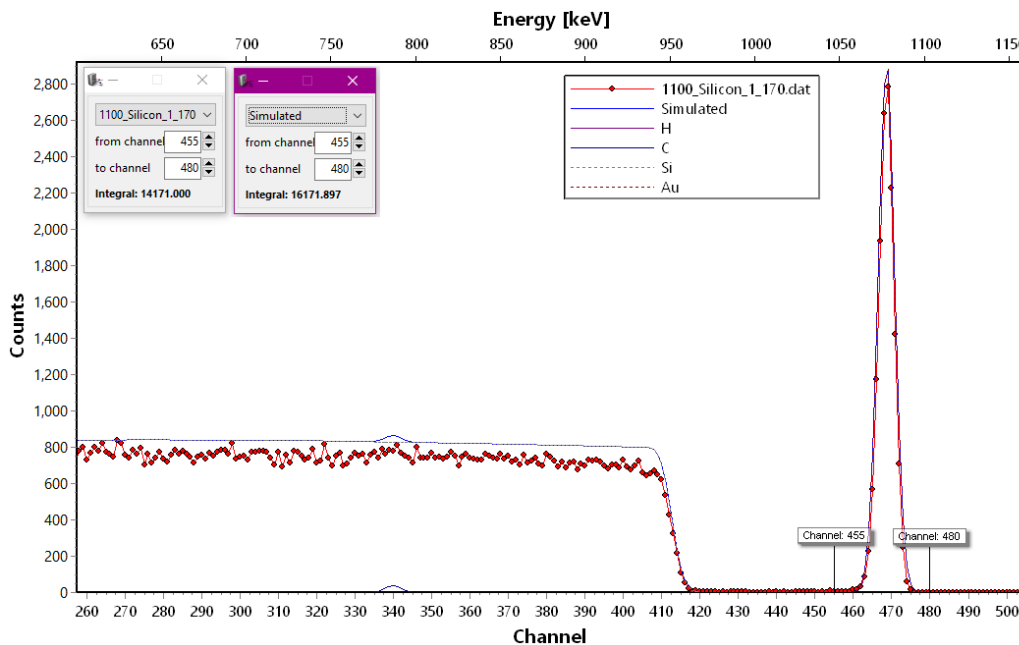
2. Στη συνέχεια, έχοντας συμπληρώσει όλα τα απαραίτητα πεδία, επιλέγουμε τις κατάλληλες αντιδράσεις για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Επιλέγουμε πάντα τις αντιδράσεις που έχουν δημιουργηθεί από το SigmaCalc 2.0, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα για το πυρίτιο.



Εικόνα 3.18 Επιλογή αντιδράσεων για τη δημιουργία της θεωρητικής καμπύλης.

3. Αφού επιλέξουμε τις αντιδράσεις και τρέξουμε το πρόγραμμα, πρέπει να ελέγξουμε αν το φορτίο που υποθέσαμε αρχικά ότι έχουμε είναι σωστό. Για να το ελέγξουμε αυτό χρησιμοποιούμε την κορυφή του χρυσού που έχουμε στο φάσμα.

Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνουμε το ολοκλήρωμα των πειραματικών δεδομένων του χρυσού με τα αντίστοιχα θεωρητικά.

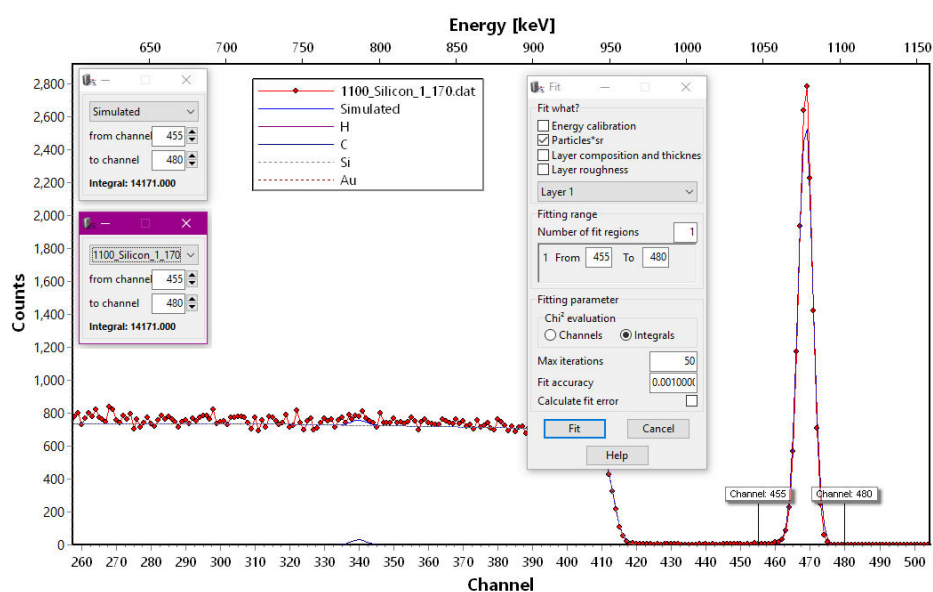


Εικόνα 3.19 Επιλογή του παραθύρου για τον προσδιορισμό του φορτίου $Qx\Omega$

Βλέπουμε την σύγκριση αυτή στην προηγούμενη εικόνα. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα ολοκληρώματα διαφέρουν, με το θεωρητικό να είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε υπερεκτιμήσει το φορτίο $Q_{x\Omega}$ και πρέπει να το μειώσουμε.

4. Για να μην μειώνουμε το φορτίο με το χέρι, χάνοντας αρκετό χρόνο μέχρι να βρούμε τη σωστή τιμή, χρησιμοποιούμε μια επιλογή του προγράμματος η οποία υπολογίζει μεταξύ άλλων το καταλληλότερο φορτίο έτσι ώστε η ολοκλήρωση σε συγκεκριμένα κανάλια να δίνει τον ίδιο αριθμό τόσο στα πειραματικά όσο και στα θεωρητικά δεδομένα.

Επομένως για κάθε φάσμα υπολογίζουμε το φορτίο συγκρίνοντας τα ολοκληρώματα θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων της κορυφής του χρυσού.

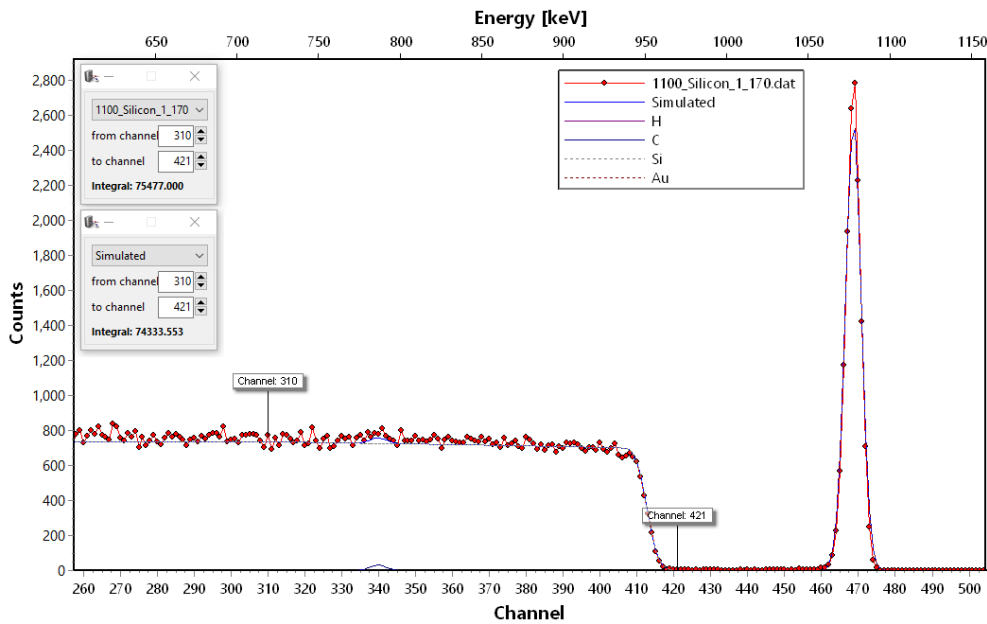


Εικόνα 3.20 Υπολογισμός του φορτίου με τη χρήση του SIMNRA

5. Συγκρίνουμε τα πειραματικά μας δεδομένα με τα θεωρητικά. Το παράθυρο ολοκλήρωσης που επιλέξαμε για το πυρίτιο είναι πλάτους 250 keV από την επιφάνεια του πυριτίου. Ο λόγος για τον οποίο περιορίσαμε την ανάλυσή μας κοντά στην επιφάνεια έγκειται στο φαινόμενο του ενεργειακού διασκεδασμού, (straggling) μέσα στο στόχο.[18] Το φαινόμενο αυτό λόγω της σχετικής αβεβαιότητας των προτύπων που ακολουθούνται για την περιγραφή του, έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραματικών δεδομένων, ιδιαίτερα σε μεγάλα βάθη (χαμηλές ενέργειες). Επομένως η ανάλυση που κάνουμε πρέπει να περιοριστεί κοντά στην επιφάνεια, έτσι ώστε να αποφύγουμε την εξάρτηση των αποτελεσμάτων μας από την επιλογή κατάλληλου μαθηματικού προτύπου για τον ενεργειακό και χωρικό διασκεδασμό.

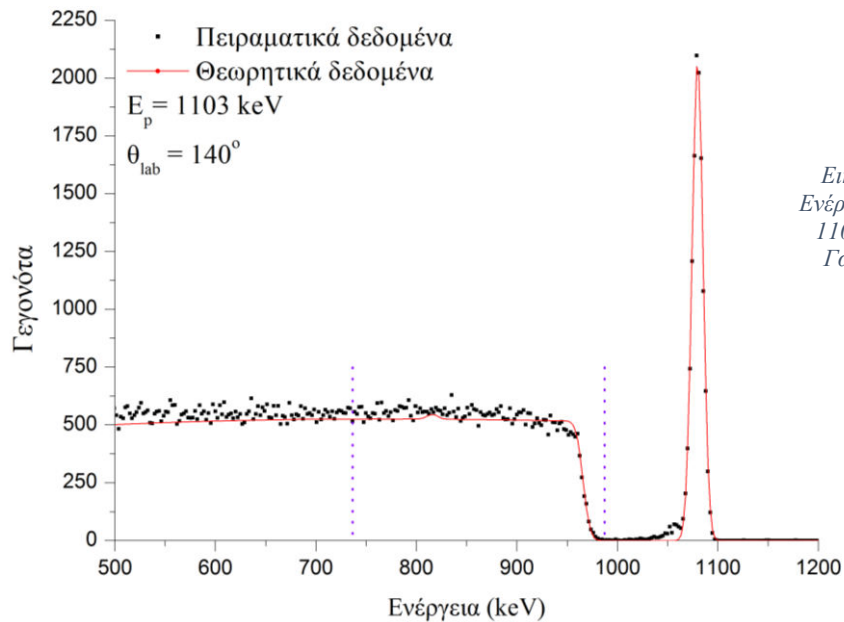
6. Ανάλογα με την ενεργειακή βαθμονόμηση που έχουμε σε κάθε φάσμα, το παράθυρο αυτό αντιστοιχεί και σε διαφορετικό αριθμό καναλιών τον οποίο και υπολογίζουμε διαιρώντας τα 250 keV με την αντίστοιχη ενεργειακή βαθμονόμηση. Στο συγκεκριμένο φάσμα, τα 250 keV αντιστοιχούν σε 111 κανάλια.

Στην εικόνα που ακολουθεί μπορούμε να δούμε καθαρά το παράθυρο ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήσαμε καθώς και τις διαφορές στα ολοκληρώματα. Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε για όλα τα φάσματα που έχουμε πάρει.

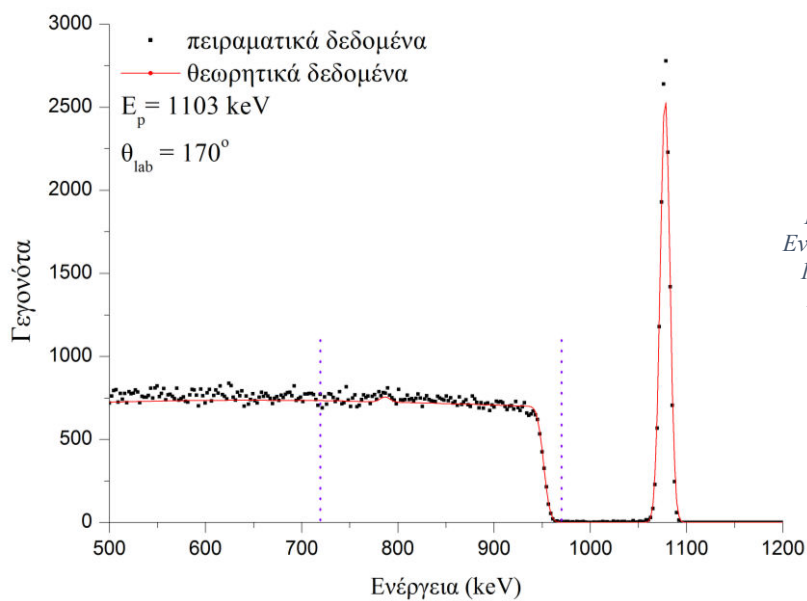
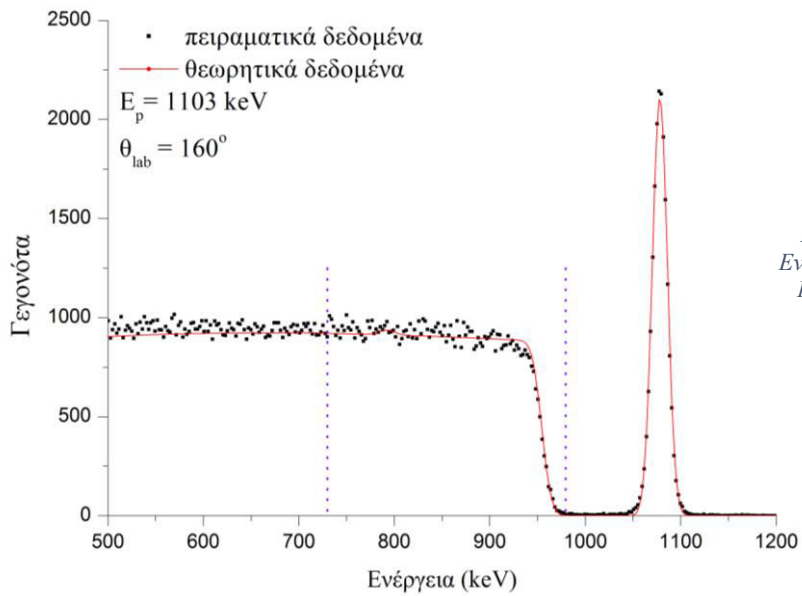
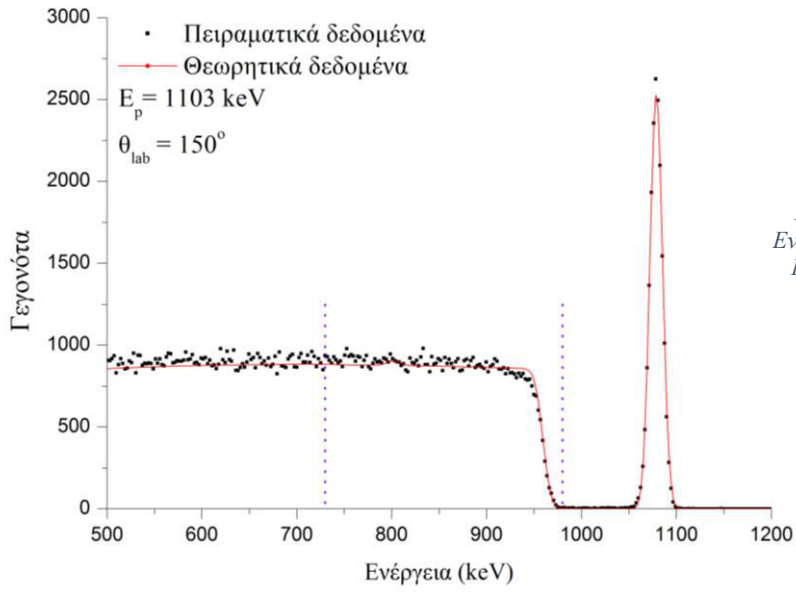


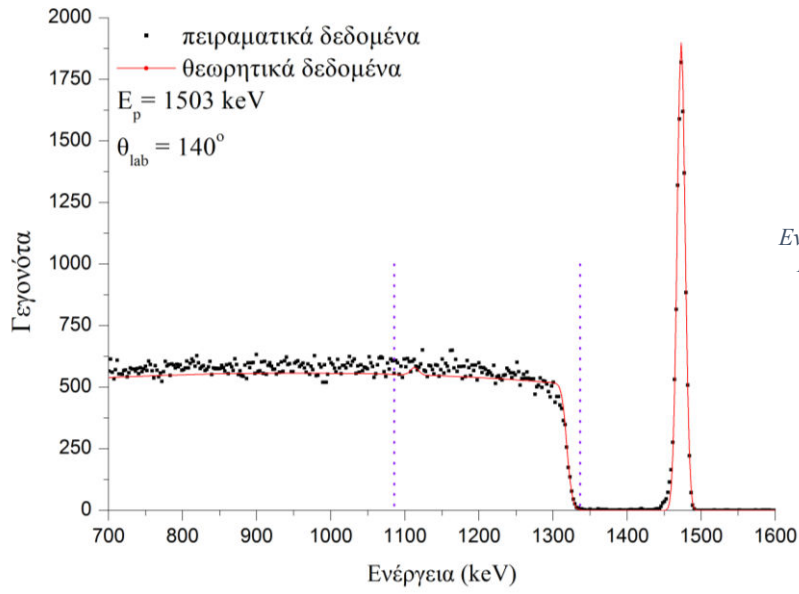
Εικόνα 3.21 Παράθυρο ολοκλήρωσης για τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του πυριτίου στις Εικόνες 3.22 – 3.73 . Με τις κάθετες, διακεκομμένες γραμμές ορίζουμε την περιοχή ολοκλήρωσης.

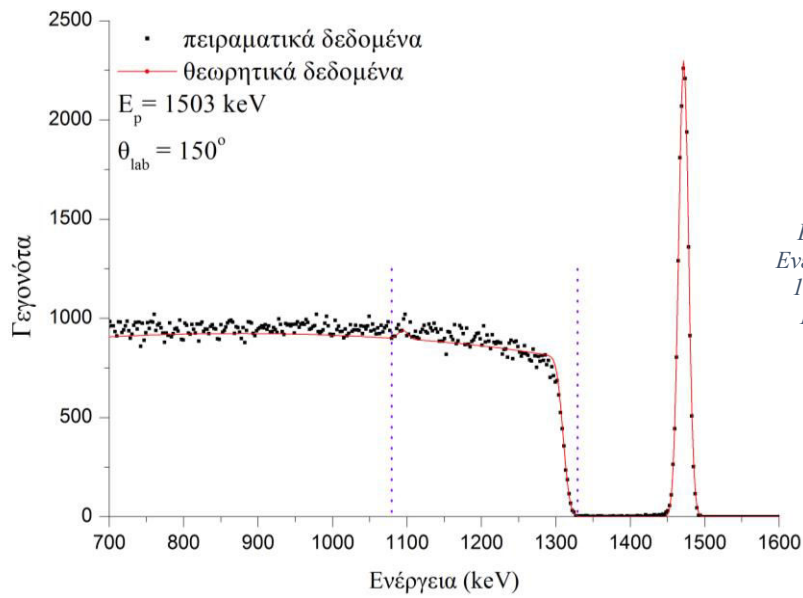


Εικόνα 3.22
Ενέργεια Δέσμης
1103 keV και
Γωνία 140°

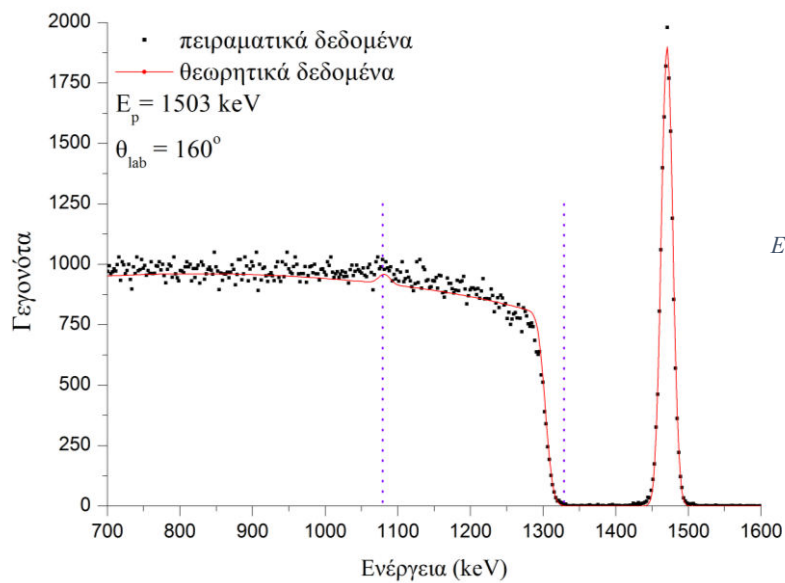




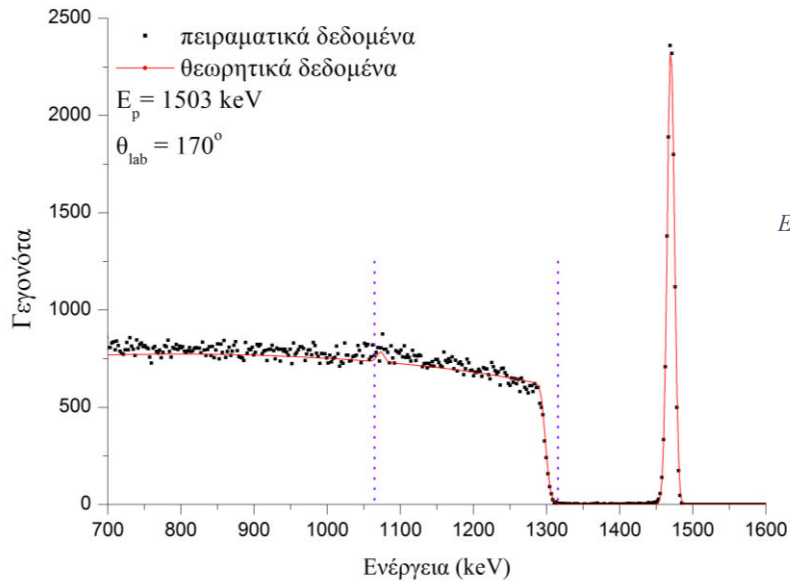
Εικόνα 3.26
 Ενέργεια Δέσμης
 1503 keV και
 Γωνία 140°



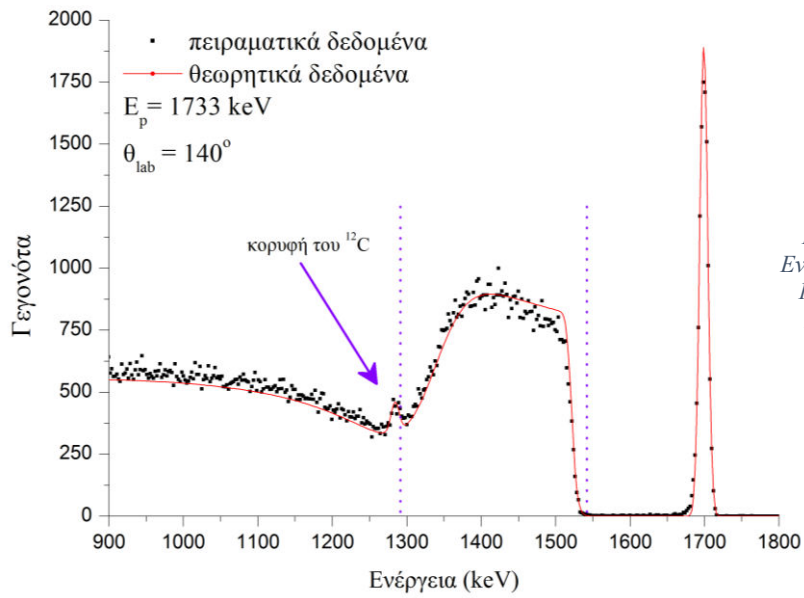
Εικόνα 3.27
 Ενέργεια Δέσμης
 1503 keV και
 Γωνία 150°



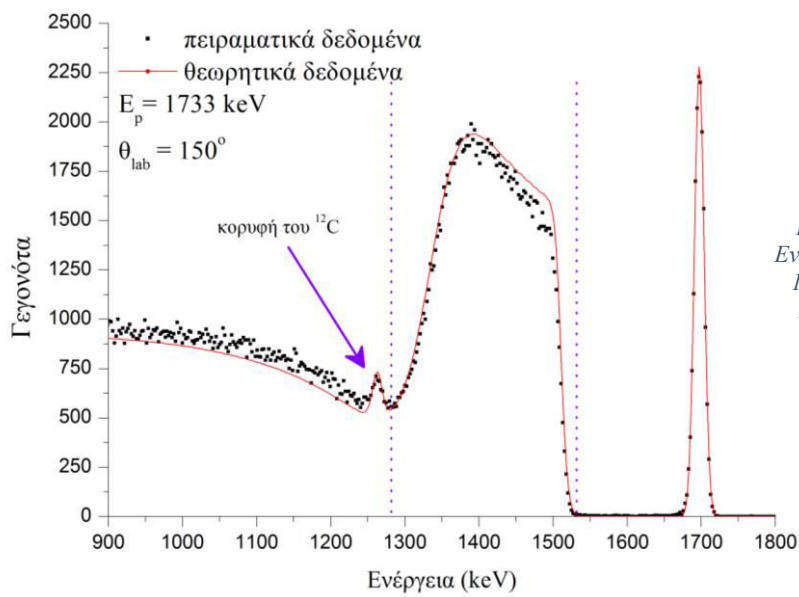
Εικόνα 3.28
 Ενέργεια Δέσμης
 1503 keV και
 Γωνία 160°



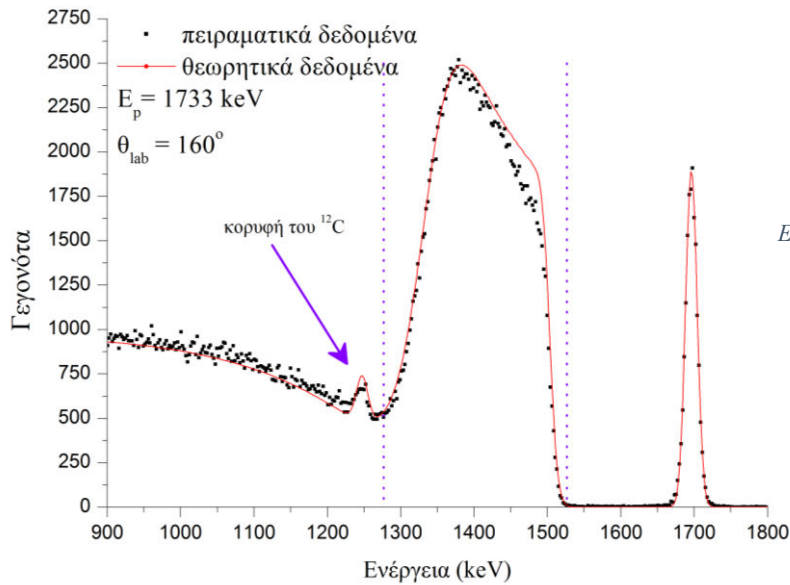
Εικόνα 3.29
Ενέργεια Δέσμης
1503 keV και
Γωνία 170°



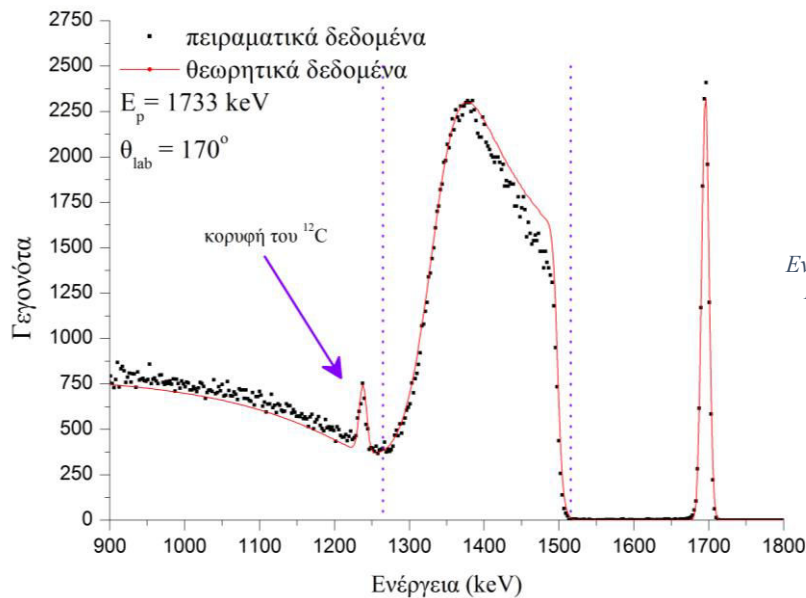
Εικόνα 3.30
Ενέργεια Δέσμης
1733 keV και
Γωνία 140°



Εικόνα 3.31
Ενέργεια Δέσμης
1733 keV και
Γωνία 150°



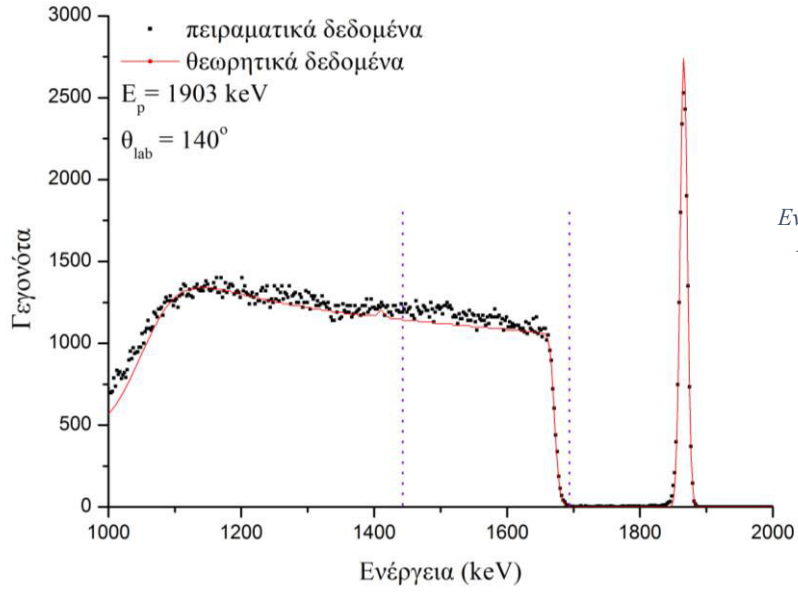
Εικόνα 3.32
Ενέργεια Δέσμης
1733 keV και
Γωνία 160°



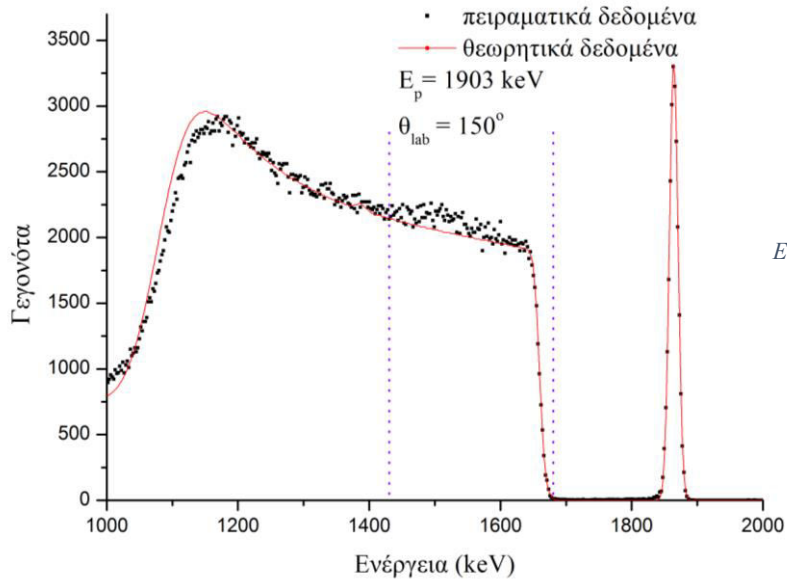
Εικόνα 3.33
Ενέργεια Δέσμης
1733 keV και
Γωνία 170°

Στα παραπάνω φάσματα, στα 1733 keV, παρατηρούμε αρχικά τον πρώτο συντονισμό στην διαφορική ενεργό διατομή του πυριτίου. Παρατηρούμε ακόμη μια μικρή κορυφή η οποία οφείλεται στον επιφανειακό άνθρακα πάνω στον στόχο μας. Η κορυφή οφείλεται σε ισχυρό συντονισμό της ελαστικής σκέδασης $^{12}\text{C}(p,p)$ ο οποίος παρατηρείται στα 1734 keV και έχει εύρος 47 keV. Για να μπορέσουμε να αναπαράξουμε το συντονισμό αυτό χρησιμοποιήσαμε τις διαφορικές ενεργές διατομές που διατίθενται στην IBANDL και δημιουργήθηκαν από το SigmaCalc.

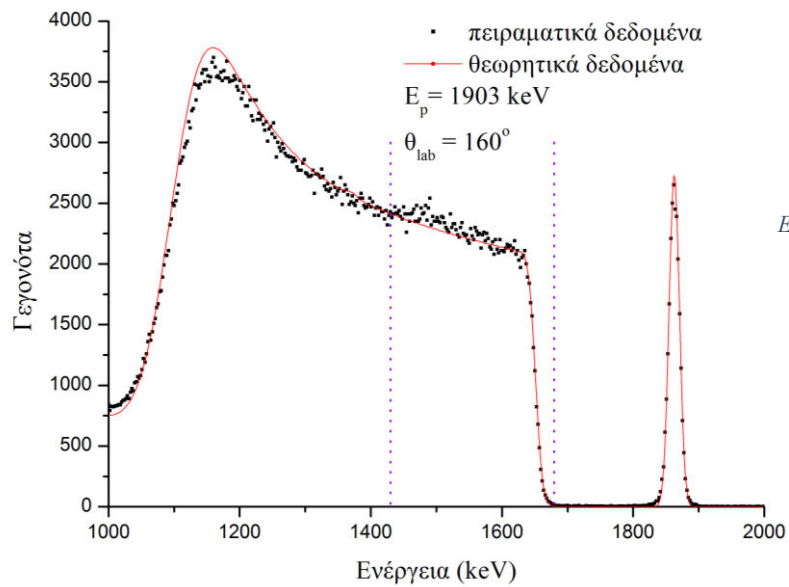
Ο λόγος που εστιάζουμε στο συντονισμό αυτό είναι ότι είναι πολύ καλά χαρακτηρισμένος ως προς την ενέργεια, και το ότι μπορούμε να τον αναπαράξουμε ακριβώς επιβεβαιώνει την ορθότητα στην επιλογή της σύστασης του στόχου καθώς και της ενέργειας που έχουμε. Επιπλέον, το ότι έχουμε ένα πολύ καλά καθορισμένο σημείο αναφοράς στην ενέργεια βοήθησε πολύ στην κατάλληλη επιλογή της ενέργειας / κανάλι (calibration).



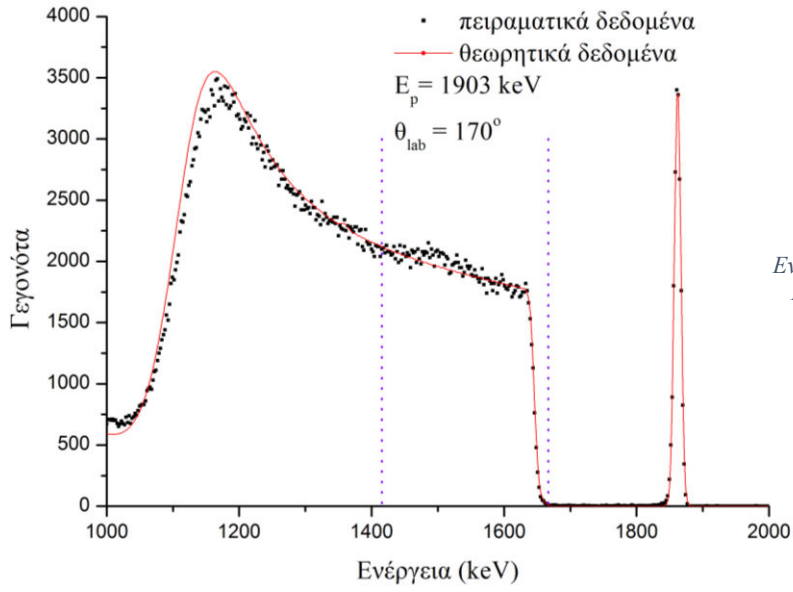
Εικόνα 3.34
Ενέργεια Δέσμης
1903 keV και
Γωνία 140°



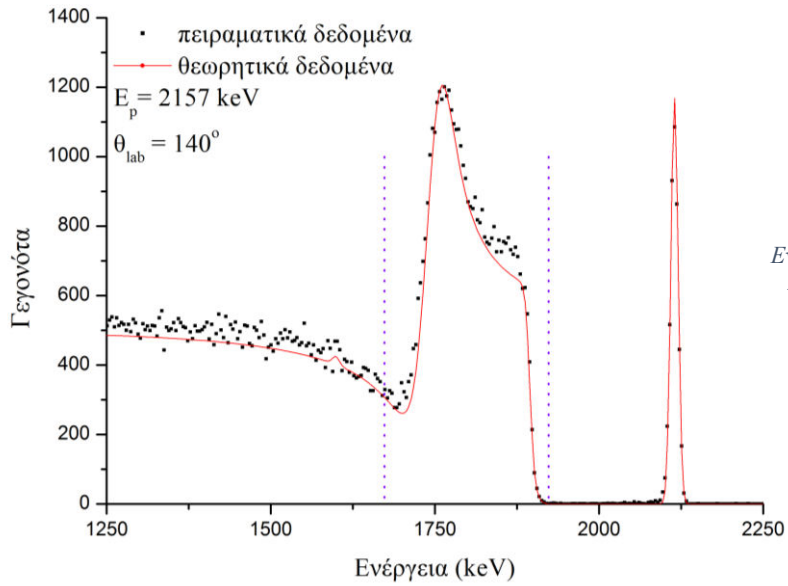
Εικόνα 3.35
Ενέργεια Δέσμης
1903 keV και
Γωνία 150°



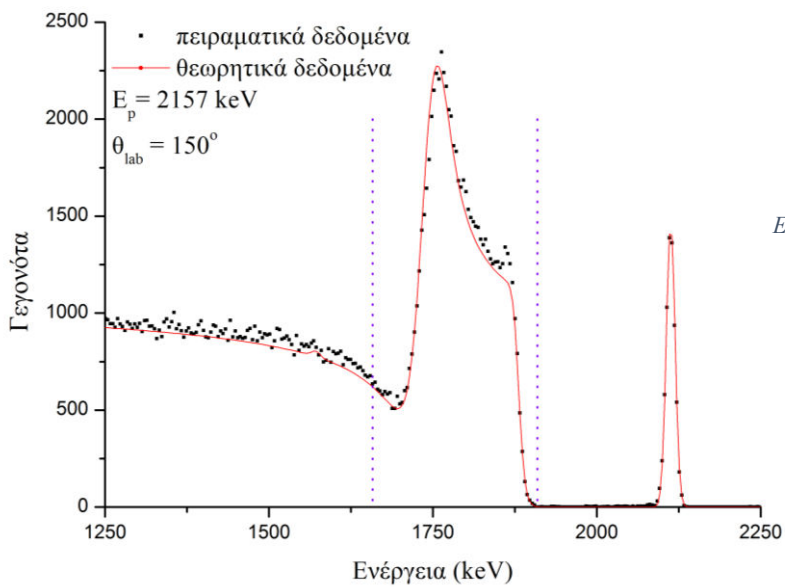
Εικόνα 3.36
Ενέργεια Δέσμης
1903 keV και
Γωνία 160°



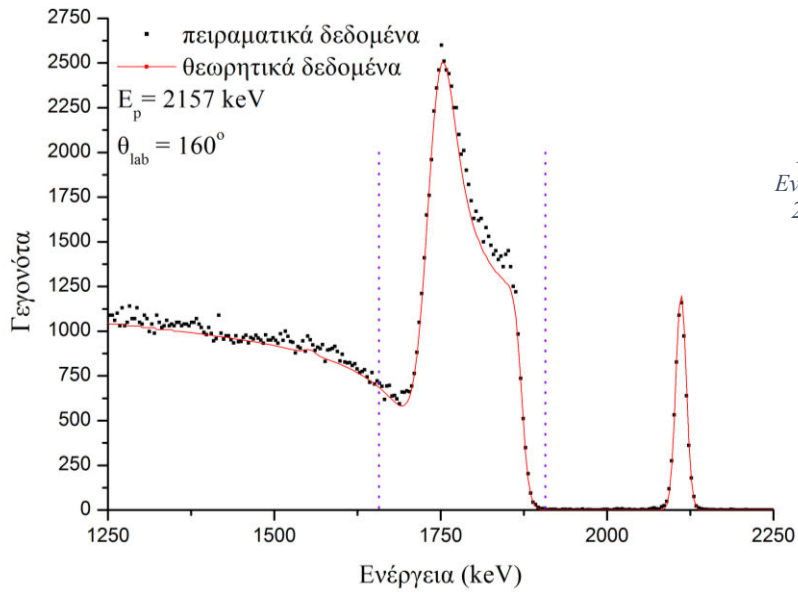
Εικόνα 3.37
 Ενέργεια Δέσμης
 1903 keV και
 Γωνία 170°



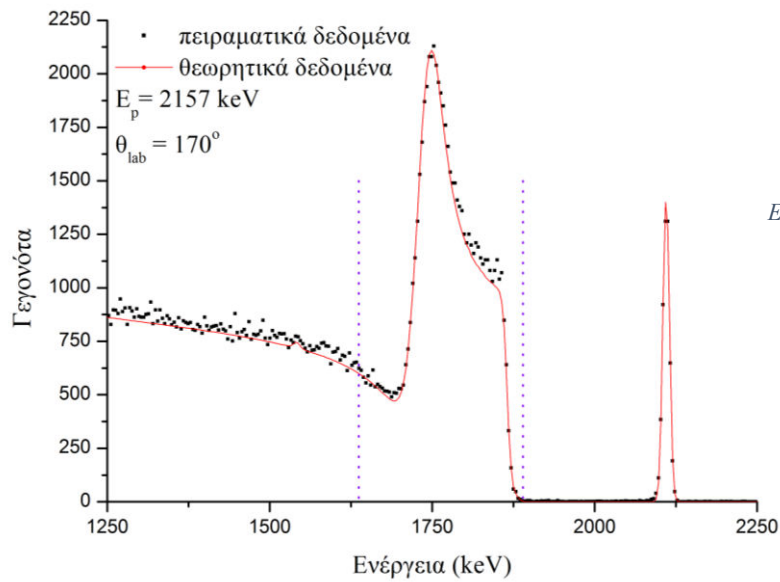
Εικόνα 3.38
 Ενέργεια Δέσμης
 2157 keV και
 Γωνία 140°



Εικόνα 3.39
 Ενέργεια Δέσμης
 2157 keV και
 Γωνία 150°

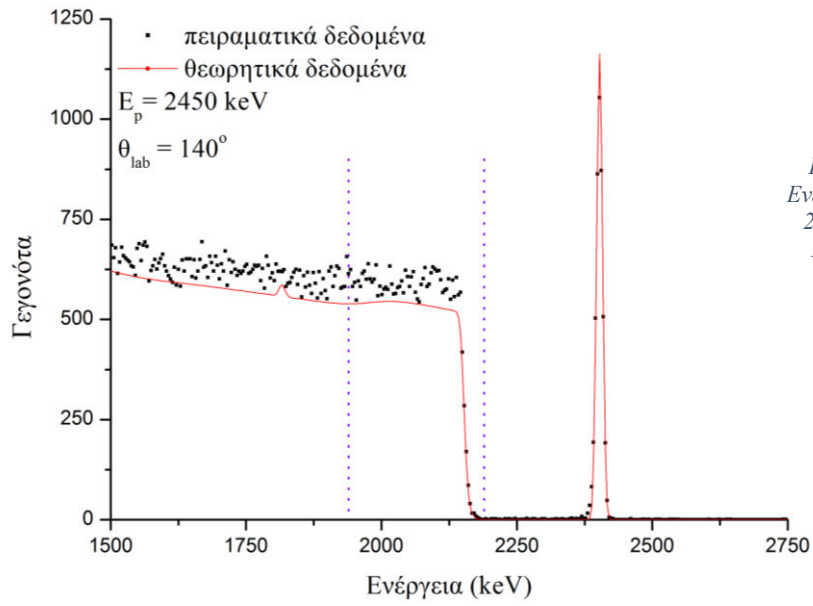


Εικόνα 3.40
Ενέργεια Δέσμης
2157 keV και
Γωνία 160°

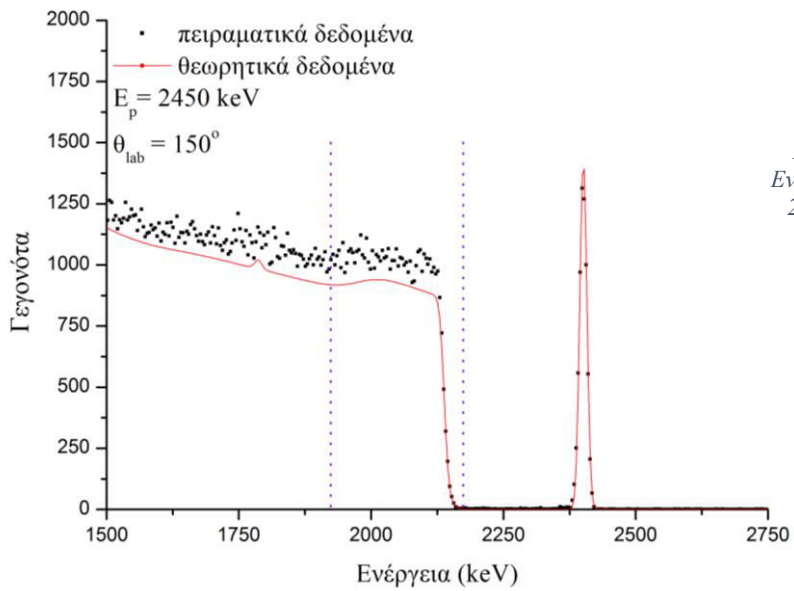


Εικόνα 3.41
Ενέργεια Δέσμης
2157 keV και
Γωνία 170°

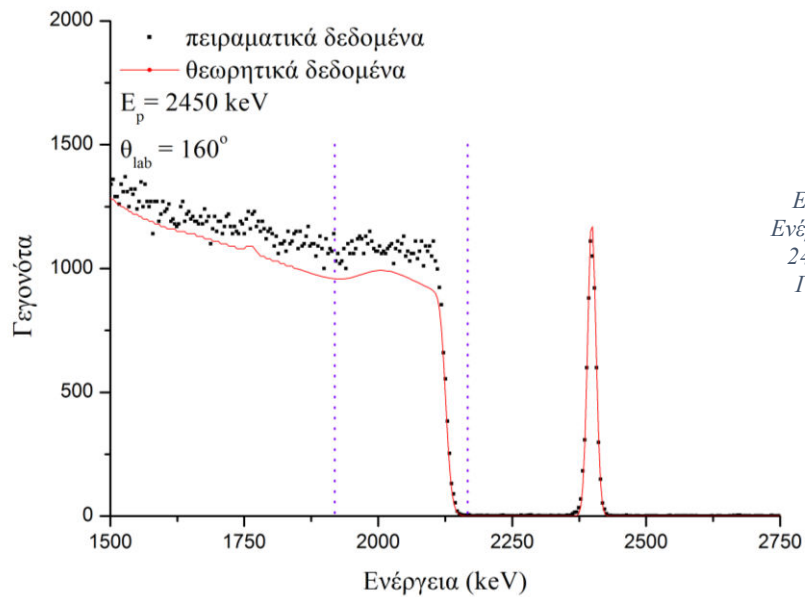
Στα παραπάνω φάσματα, στα 2157 keV, έχουμε τον δεύτερο ισχυρό συντονισμό του πυριτίου, ο οποίος εμφανίζεται σε ενέργεια 2095 keV. Ο συγκεκριμένος συντονισμός είναι πολύ καλά χαρακτηρισμένος ως προς την ενέργεια και είναι ο ίδιος συντονισμός που χρησιμοποιήσαμε για την ενεργειακή βαθμονόμηση στο πρώτο σετ μετρήσεων (2150 – 3470 keV).



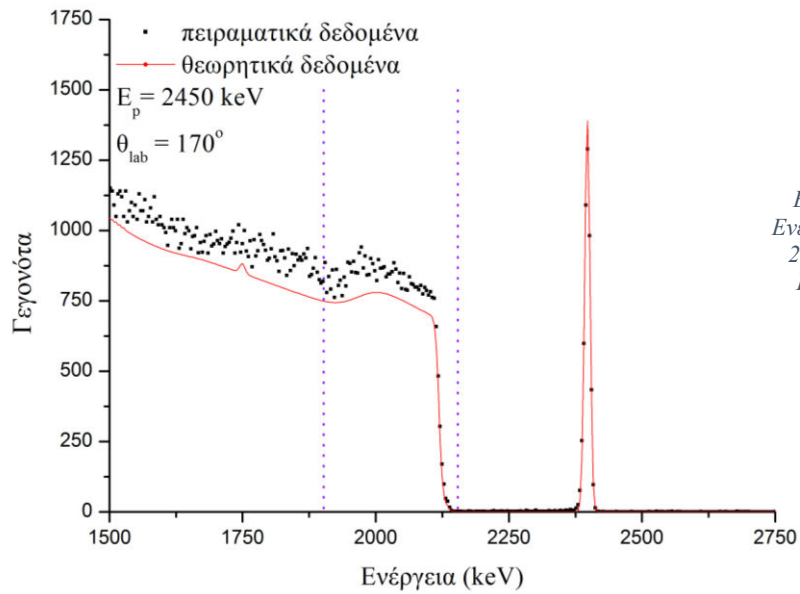
Εικόνα 3.42
 Ενέργεια Δέσμης
 2450 keV και
 Γωνία 140°



Εικόνα 3.43
 Ενέργεια Δέσμης
 2450 keV και
 Γωνία 150°

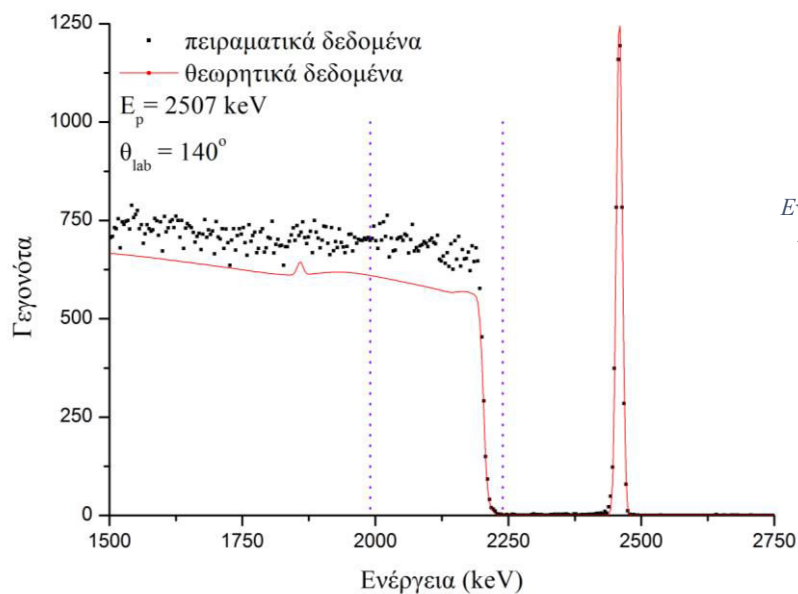


Εικόνα 3.44
 Ενέργεια Δέσμης
 2450 keV και
 Γωνία 160°



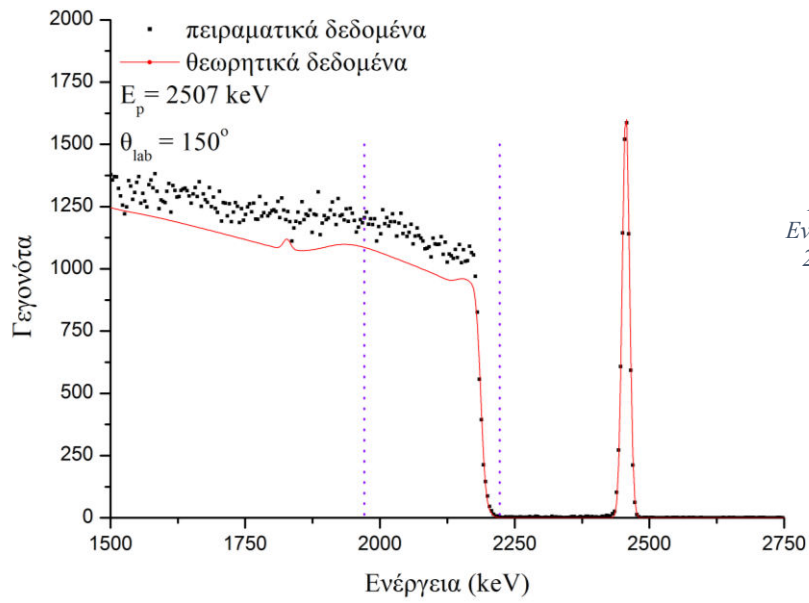
Εικόνα 3.45
Ενέργεια Δέσμης
2450 keV και
Γωνία 170°

Στο συγκεκριμένο φάσμα, 2450 keV, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η προηγούμενη κορυφή του πυριτίου έχει μετατοπιστεί αρκετά προς τα αριστερά του φάσματος και δεν είναι ορατή στη γραφική μας παράσταση. Παρατηρούμε ακόμη ότι οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής έχουν αρχίσει να μειώνονται.

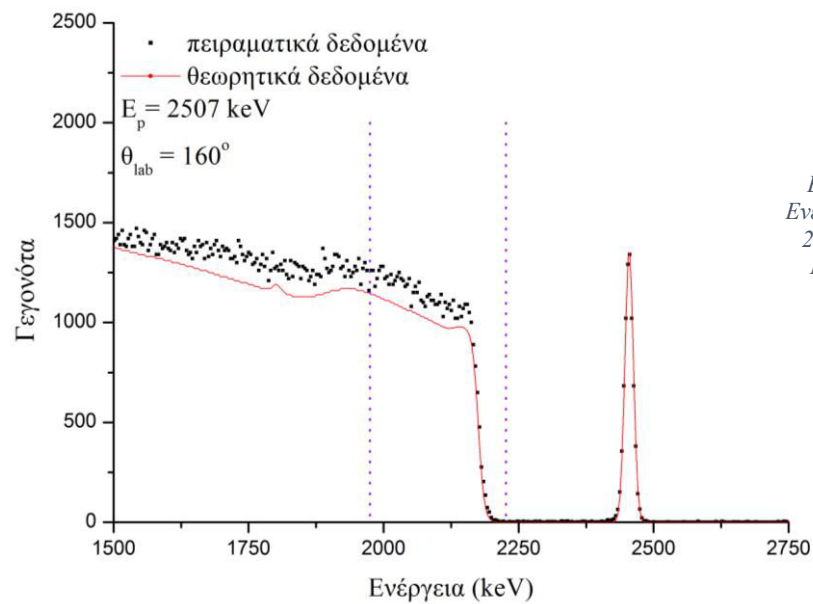


Εικόνα 3.46
Ενέργεια Δέσμης
2507 keV και
Γωνία 140°

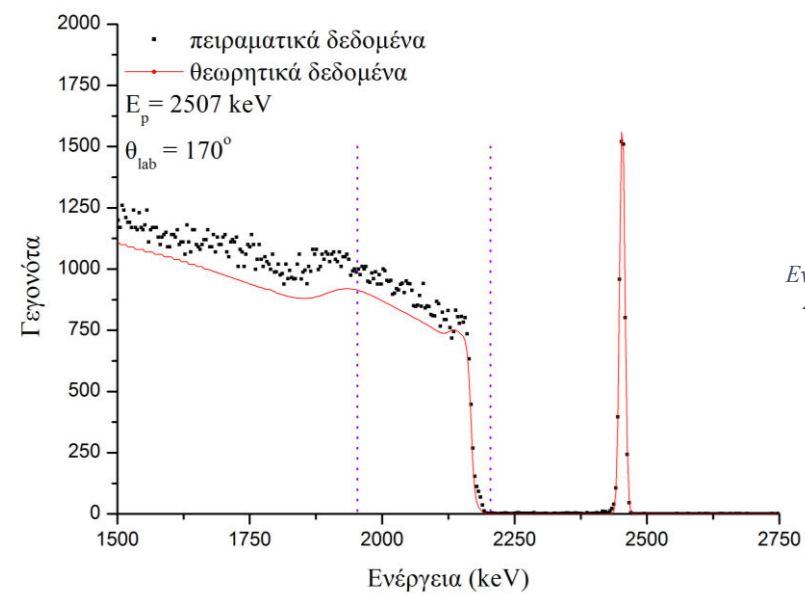
Κάτι αντίστοιχο παρατηρούμε και σ' αυτό το φάσμα, εντονότερα βέβαια στις υπόλοιπες γωνίες.



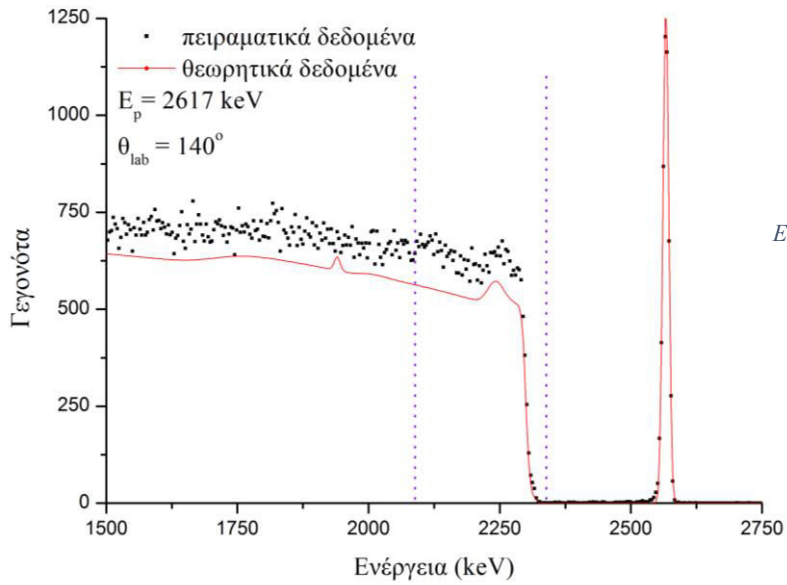
Εικόνα 3.47
Ενέργεια Δέσμης
2507 keV και
Γωνία 150°



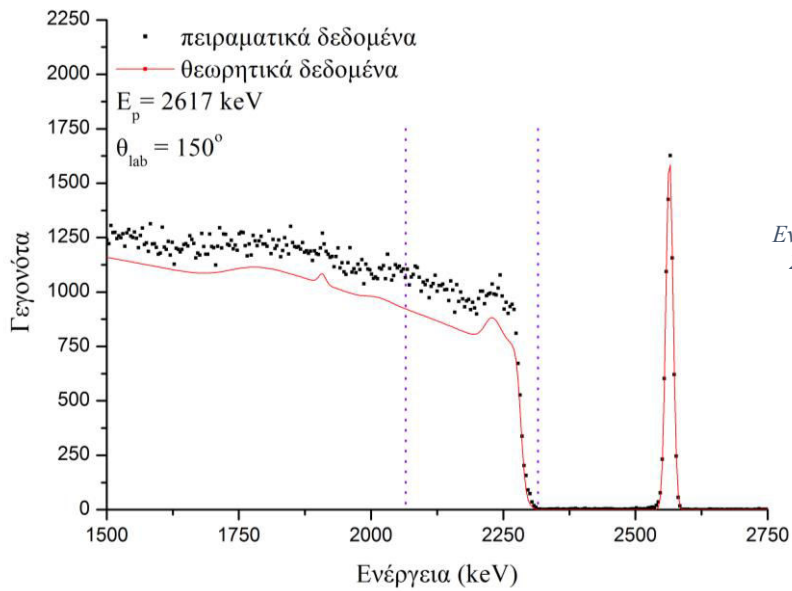
Εικόνα 3.48
Ενέργεια Δέσμης
2507 keV και
Γωνία 160°



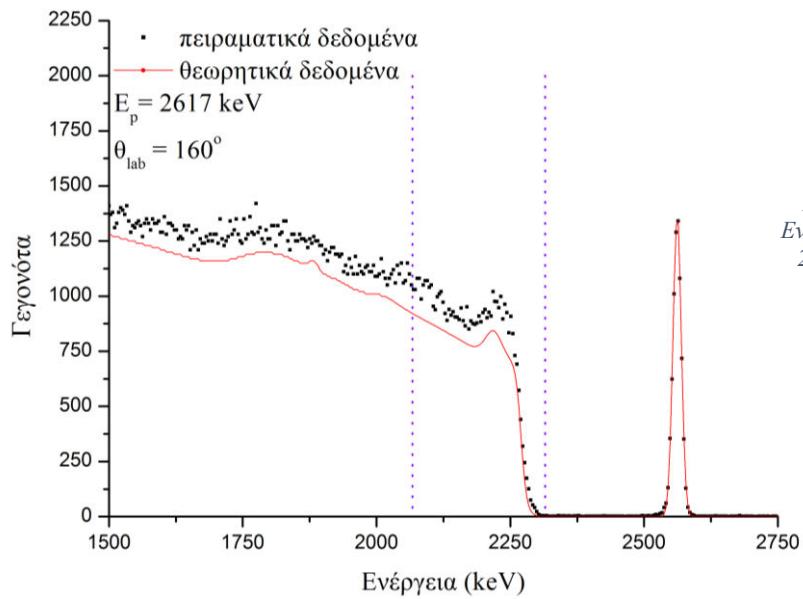
Εικόνα 3.49
Ενέργεια Δέσμης
2507 keV και
Γωνία 170°



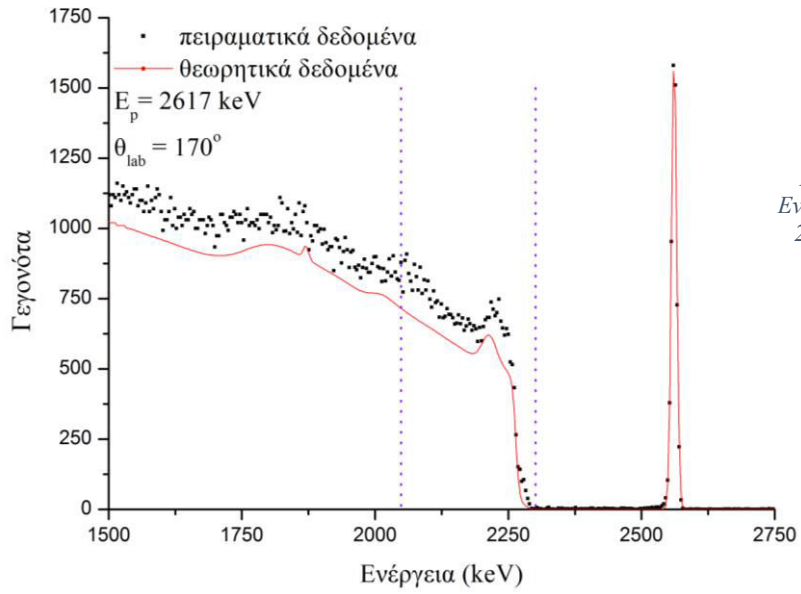
Εικόνα 3.50
 Ενέργεια Δέσμης
 2617 keV και
 Γωνία 140°



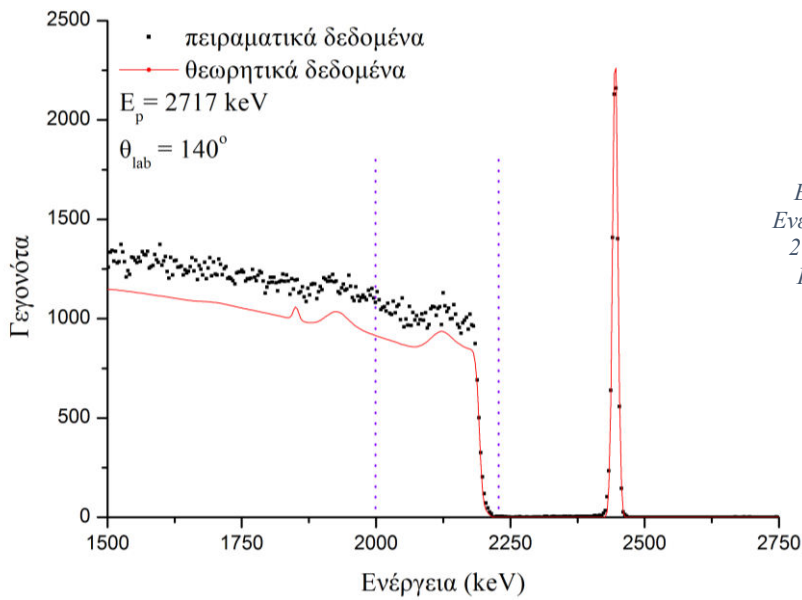
Εικόνα 3.51
 Ενέργεια Δέσμης
 2617 keV και
 Γωνία 150°



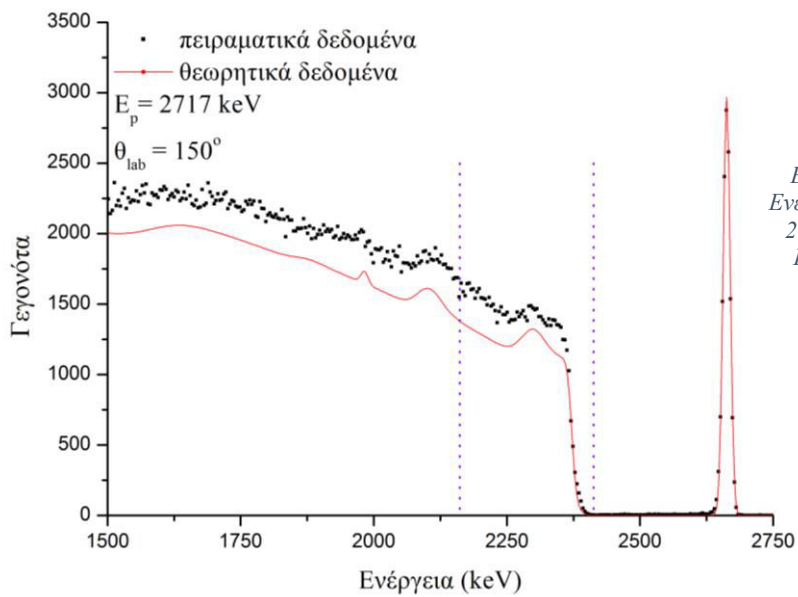
Εικόνα 3.52
 Ενέργεια Δέσμης
 2617 keV και
 Γωνία 160°



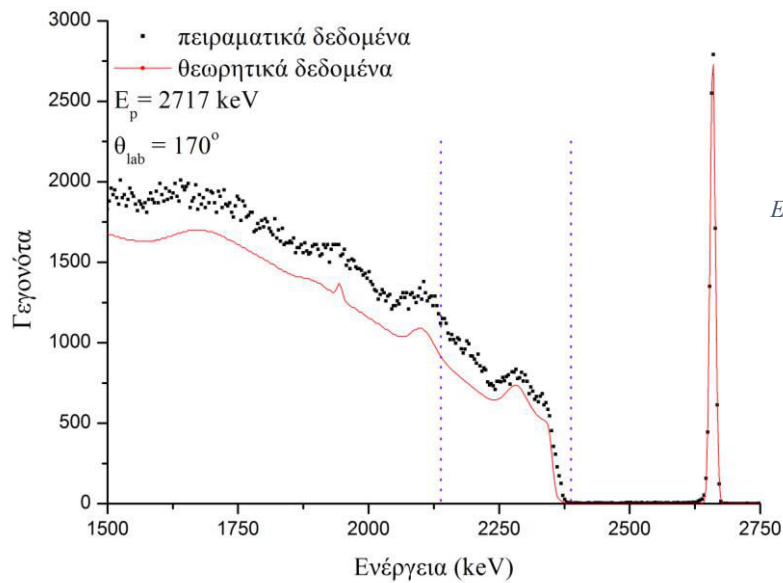
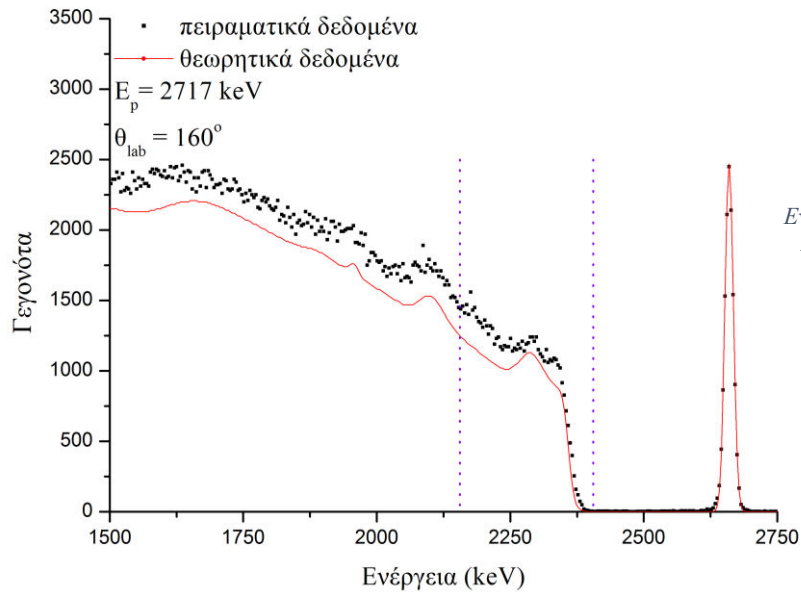
Εικόνα 3.53
Ενέργεια Δέσμης
2617 keV και
Γωνία 170°



Εικόνα 3.54
Ενέργεια Δέσμης
2717 keV και
Γωνία 140°

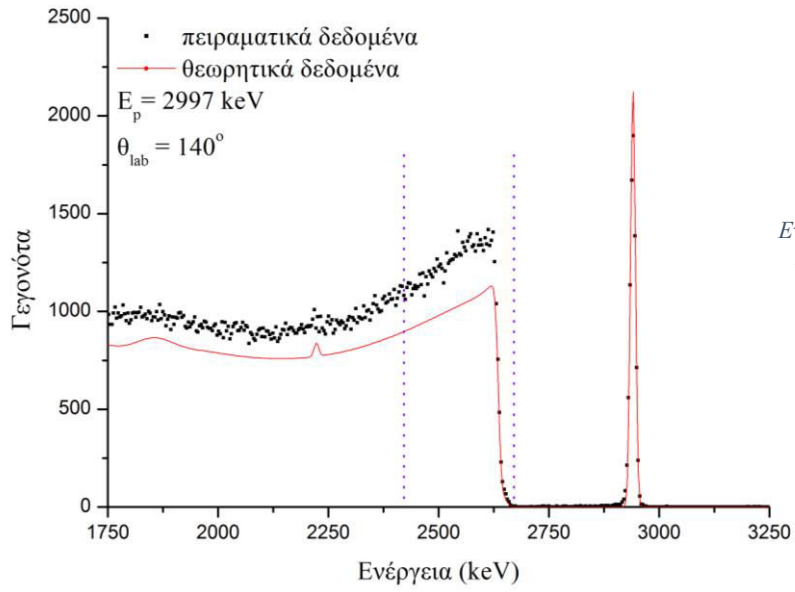


Εικόνα 3.55
Ενέργεια Δέσμης
2717 keV και
Γωνία 150°

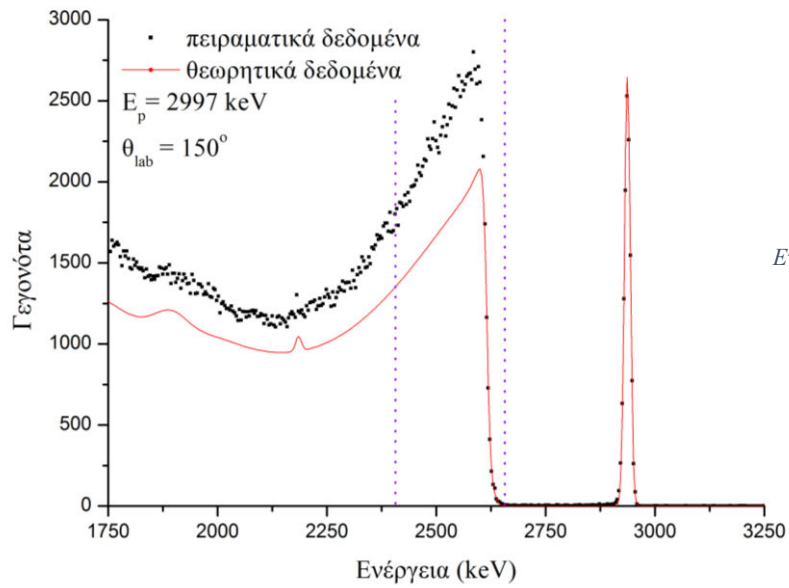


Στα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ακόμη καλύτερα η μείωση των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής. Παρατηρούμε βέβαια κάποιες μικρές κορυφές που οφείλονται στο πυρίτιο, αλλά η κύρια συμπεριφορά της διαφορικής ενεργού διατομής είναι φθίνουσα μέχρι τα $\sim 2780 \text{ keV}$.

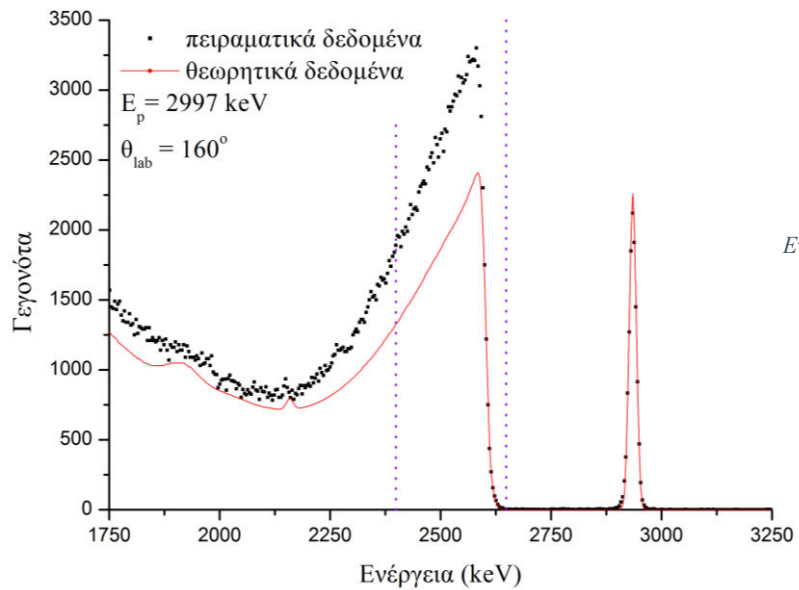
Στη συνέχεια, όπως μπορούμε να δούμε και στα παρακάτω φάσματα στα 2997 keV, οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής αρχίζει πάλι να αυξάνεται. Μπορούμε ακόμη να παρατηρήσουμε, ότι σε αυτή την ενεργειακή περιοχή έχουμε σημαντική υποτίμηση των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών.



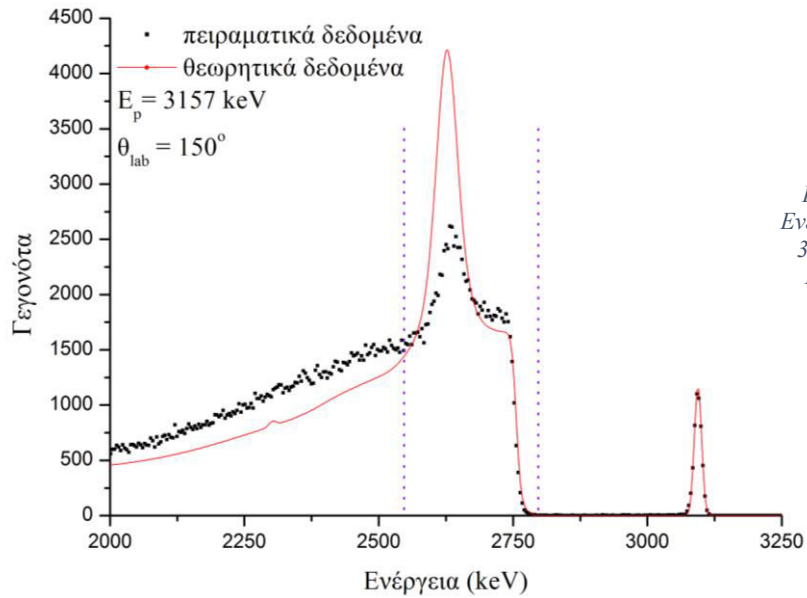
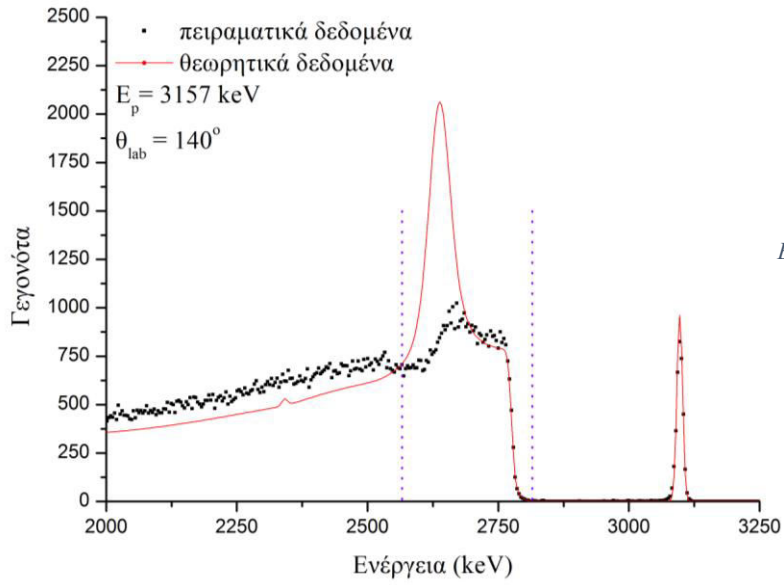
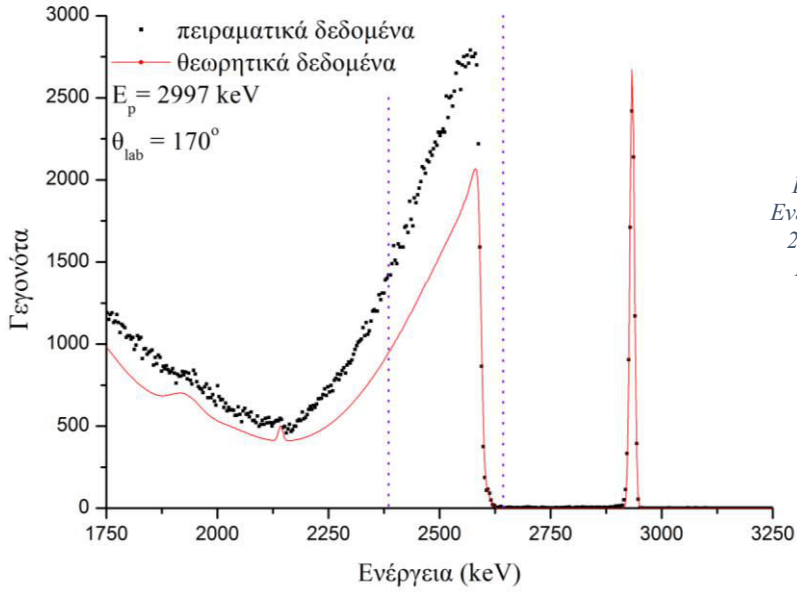
Εικόνα 3.58
 Ενέργεια Δέσμης
 2997 keV και
 Γωνία 140°

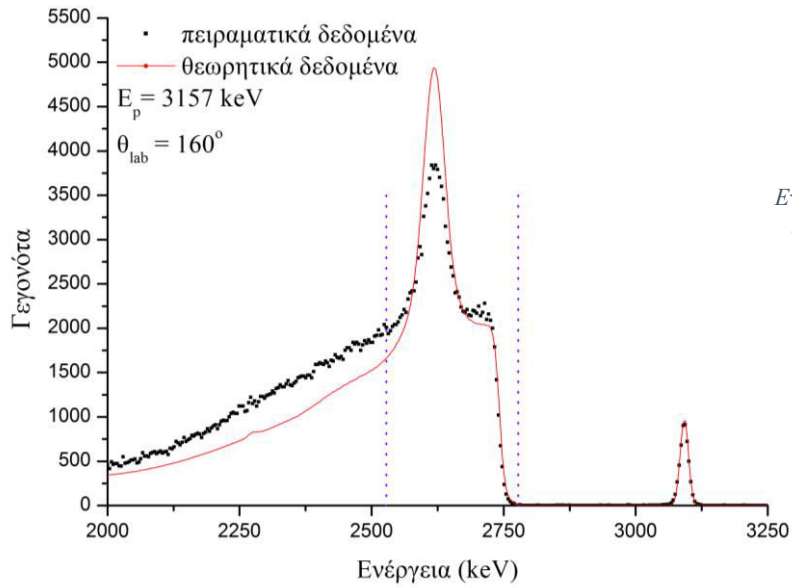


Εικόνα 3.59
 Ενέργεια Δέσμης
 2997 keV και
 Γωνία 150°

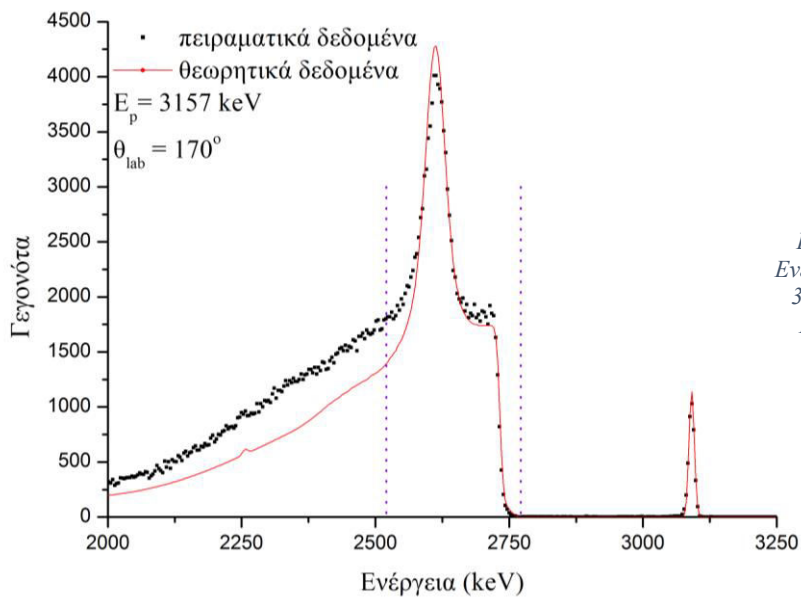


Εικόνα 3.60
 Ενέργεια Δέσμης
 2997 keV και
 Γωνία 160°



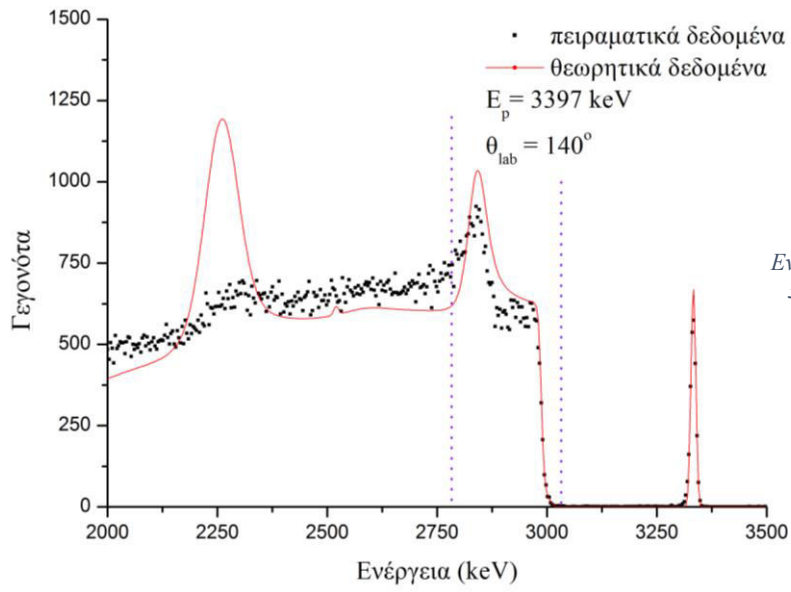


Εικόνα 3.64
 Ενέργεια Δέσμης
 3157 keV και
 Γωνία 160°

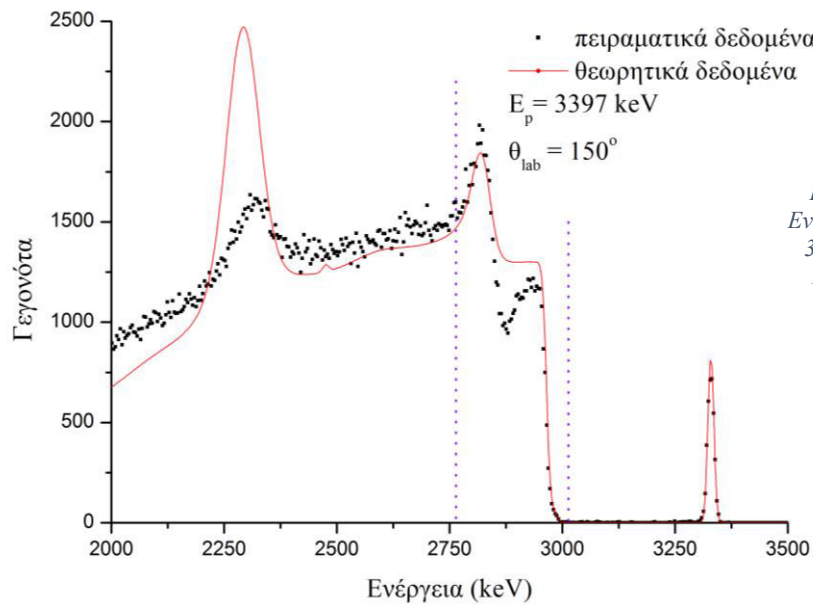


Εικόνα 3.65
 Ενέργεια Δέσμης
 3157 keV και
 Γωνία 170°

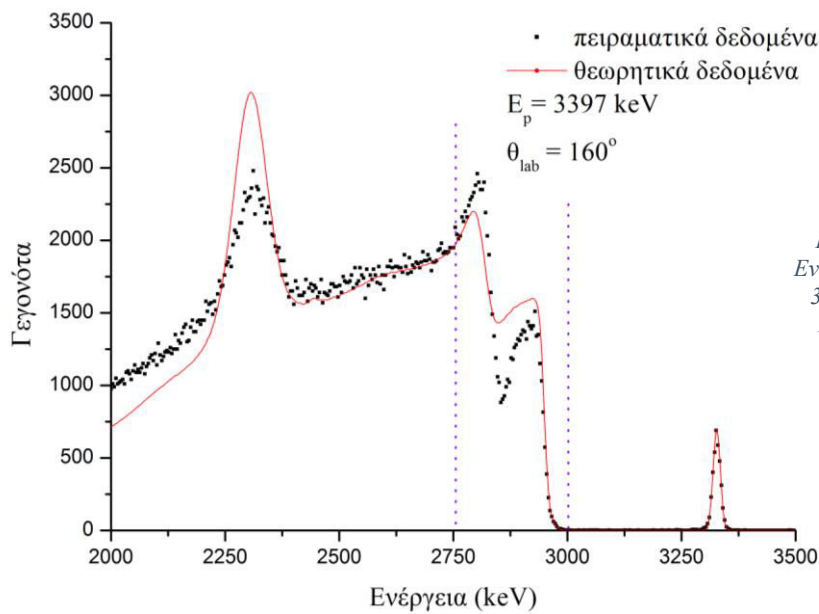
Στα 3157 keV μπορούμε να παρατηρήσουμε έναν ακόμη συντονισμό του πυριτίου ο οποίος παρατηρείται στα $\sim 3100 \text{ keV}$. Έχουμε μια εμφανή υπερτίμηση του συντονισμού αυτού, κυρίως στις 140° , 150° και 160° , ενώ σε όλες τις γωνίες η θέση του συντονισμού αναπαράγεται σε ικανοποιητικό βαθμό.



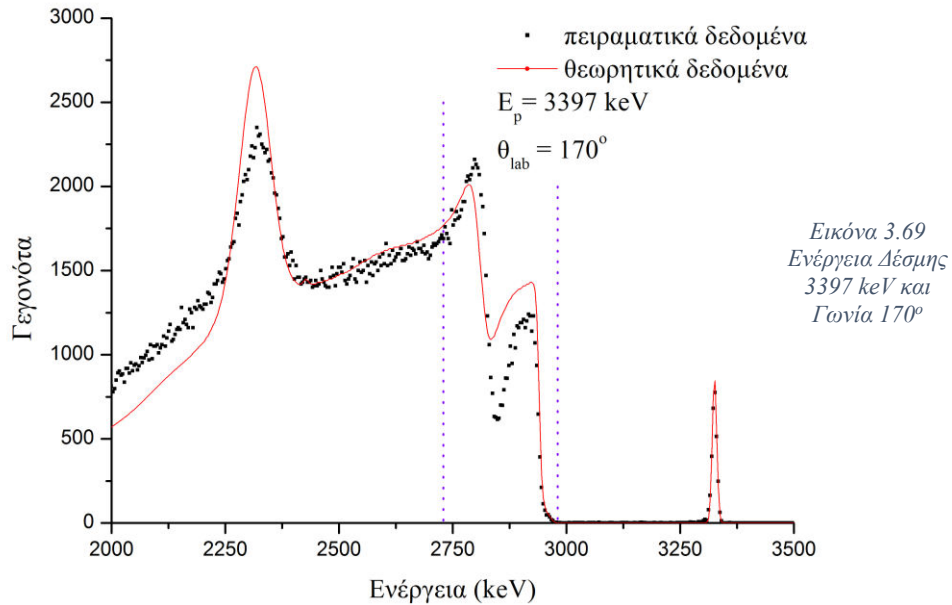
Εικόνα 3.66
Ενέργεια Δέσμης
3397 keV και
Γωνία 140°



Εικόνα 3.67
Ενέργεια Δέσμης
3397 keV και
Γωνία 150°

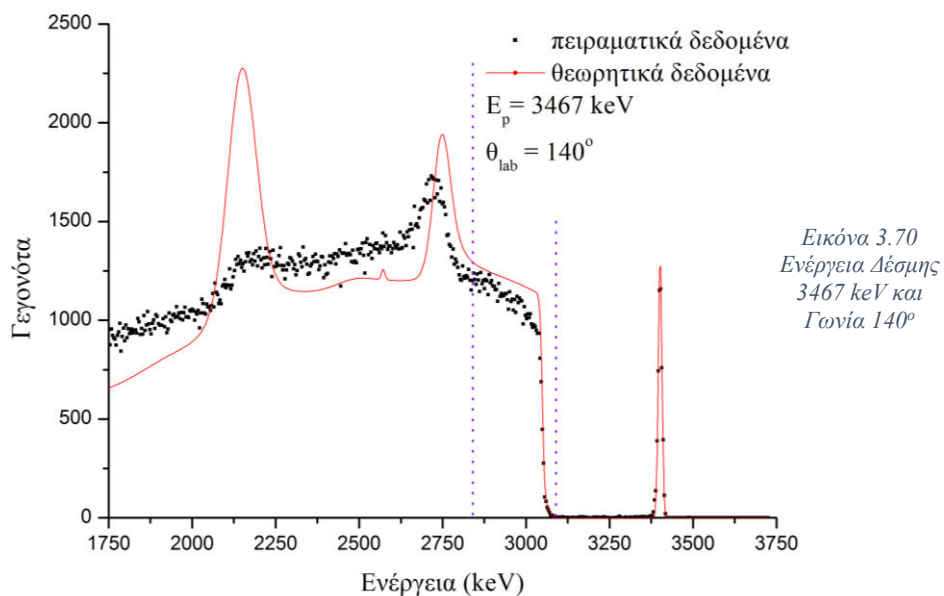


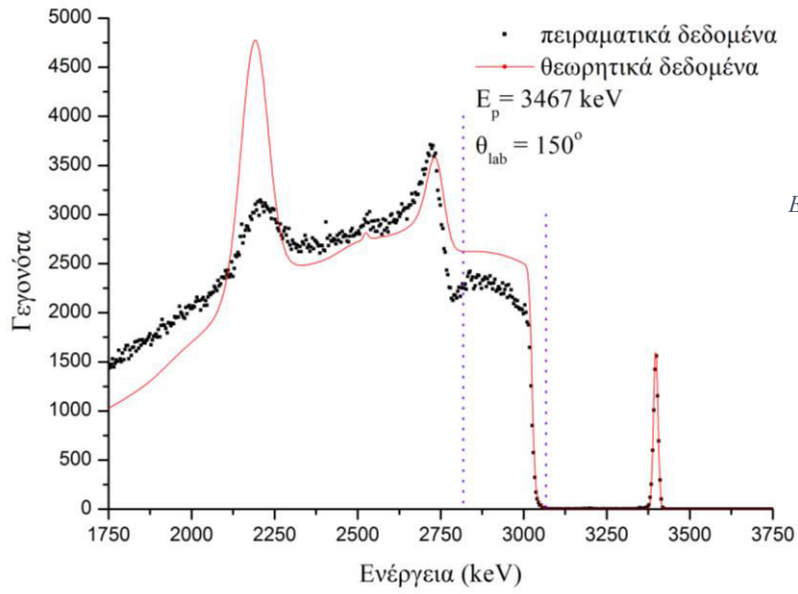
Εικόνα 3.68
Ενέργεια Δέσμης
3397 keV και
Γωνία 160°



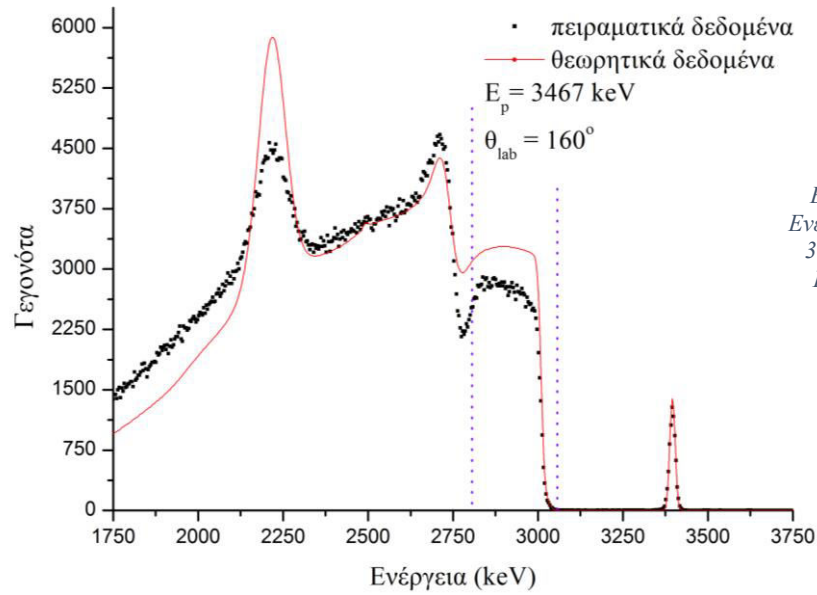
Στα φάσματα των 3397 keV μπορούμε να δούμε την κορυφή που εμφανίζεται στα $\sim 3100 \text{ keV}$ να εμφανίζεται αριστερά στο φάσμα μας. Και σε αυτή την ενέργεια έχουμε εμφανή υπερτίμηση του συντονισμού αυτού, ενώ σε όλες σχεδόν τις γωνίες η θέση του συντονισμού αναπαράγεται σε ικανοποιητικό βαθμό παρότι έχουμε μεγαλύτερη ενέργεια.

Η κορυφή που εμφανίζεται στα δεξιά του φάσματος, ένας ακόμη συντονισμός του πυριτίου, δεν αναπαράγεται ικανοποιητικά. Δεν έχουμε ικανοποιητική αναπαραγωγή ούτε στη θέση του συντονισμού αλλά ούτε και στη μορφή του. Το ίδιο παρατηρούμε αν αυξήσουμε ακόμη λίγο την ενέργεια, 3467 keV. Γνωρίζουμε βέβαια ότι οι μετρημένες διαφορικές ενεργές διατομές του πυριτίου σ' αυτές τις ενέργειες είναι λιγοστές, πράγμα το οποίο δικαιολογεί μερικώς τις αποκλίσεις που παρατηρούμε.

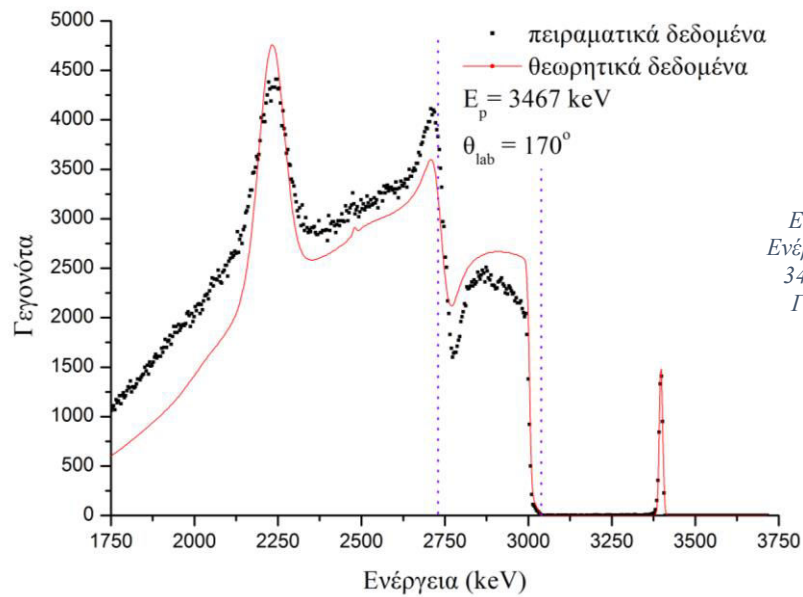




Εικόνα 3.71
 Ενέργεια Δέσμης
 3467 keV και
 Γωνία 150°



Εικόνα 3.72
 Ενέργεια Δέσμης
 3467 keV και
 Γωνία 160°



Εικόνα 3.73
 Ενέργεια Δέσμης
 3467 keV και
 Γωνία 170°

Συγκεντρωτικά έχουμε για κάθε γωνία:

140°						
Ενεργειακή Βαθμονόμηση	Ενέργεια (keV)	Q*ω	Κανάλια Ολοκλήρωσης (112 → 250keV)	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
2,2385 keV/ch 15,590 offset	1103	1,554*10 ¹⁰ (460 - 485 ch)	322 - 434	55840	54024.1	3.4%
2,2385 keV/ch 15,590 offset	1503	2,619*10 ¹⁰ (635 - 665 ch)	478 - 590	58275	56460.4	3.2%
2,2385 keV/ch 15,090 offset	1733	3,463*10 ¹⁰ (741 - 763 ch)	570 - 682	77746	78502.3	1.0%
2,2385 keV/ch 14,590 offset	1903	5,991*10 ¹⁰ (812 - 837 ch)	638 - 750	118643	113140	4.9%
3,6150 keV/ch 22,000 - offset	2157	2,054*10 ¹⁰ (567 - 585 ch)	457 - 526	46248	43147.8	7.2%
3,6150 keV/ch 16,500 - offset	2450	2,641*10 ¹⁰ (644 - 668 ch)	532 - 601	35356	31999.2	10.5%
3,6150 keV/ch 13,000 - offset	2507	3,090*10 ¹⁰ (655 - 685 ch)	547 - 616	40701	34661.7	17.4%
3,6150 keV/ch 13,500 - offset	2617	3,400*10 ¹⁰ (690 - 714 ch)	574 - 643	37509	32024.2	17.1%
3,6150 keV/ch 13,500 - offset	2717	6,596*10 ¹⁰ (711 - 742 ch)	599 - 668	60168	51536.03	16.7%
3,6150 keV/ch 13,500 - offset	2997	7,324*10 ¹⁰ (781 - 820 ch)	666 - 735	75493	60828.7	24.1%
3,6150 keV/ch 13,500 - offset	3157	3,612*10 ¹⁰ (823 - 863 ch)	706 - 775	48551	65493	-25.9%
3,6150 keV/ch 15,500 - offset	3397	2,955*10 ¹⁰ (887 - 925 ch)	766 - 835	39208	42270.59	-7.2%
3,6150 keV/ch 16,000 - offset	3467	6,053*10 ¹⁰ (917 - 943 ch)	783 - 852	62275	67857.76	-8.2%

150°						
Ενεργειακή Βαθμονόμηση	Ενέργεια (keV)	Q*ω	Κανάλια Ολοκλήρωσης (109 → 250keV)	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
2,2924 keV/ch 10,088 offset	1103	2,607*10 ¹⁰ (450 - 480 ch)	314 - 423	88810	87867.2	1.1%
2,2924 keV/ch 8,688 offset	1503	4,357*10 ¹⁰ (620 - 650 ch)	467 - 576	88788	87287.1	1.7%
2,2924 keV/ch 7,188 offset	1733	5,754*10 ¹⁰ (720 - 750 ch)	556 - 665	146973	153684	4.4%
2,2924 keV/ch 6,788 offset	1903	1,008*10 ¹¹ (795 - 825 ch)	621 - 730	209032	202904	3.0%
3,7400 keV/ch 9,072 offset	2157	3,505*10 ¹⁰ (552 - 569 ch)	441 - 508	77712	75819.5	2.5%
3,7350 keV/ch 4,072 offset	2450	4,443*10 ¹⁰ (629 - 649 ch)	514 - 581	58987	53035.7	11.2%

3,7400 keV/ch -3,072 offset	2507	5,350*10 ¹⁰ (647 - 664 ch)	528 - 595	65161	58585.6	11.2%
3,7370 keV/ch - 1,572 offset	2617	5746*10 ¹⁰ (675 - 694 ch)	553 - 620	58943	49984.5	17.9%
3,7440 keV/ch - 7,072 offset	2717	1,227*10 ¹¹ (698 - 722 ch)	580 - 647	81386	69143.3	17.7%
3,7370 keV/ch -4,572 offset	2997	1,224*10 ¹¹ (777 - 795 ch)	645 - 712	129788	97864.1	32.6%
3,7370 keV/ch -5,572 offset	3157	6,083*10 ¹⁰ (819 - 836 ch)	683 - 750	108731	129244	-15.9%
3,7370 keV/ch -5,272 offset	3397	4,945*10 ¹⁰ (877 - 900 ch)	741 - 808	74372	80232.9	-7.3%
3,7370 keV/ch -4.972 offset	3467	1,025*10 ¹¹ (896 - 918 ch)	756 - 823	123061	145213	-15.3%

160°						
Ενεργειακή Βαθμολόγηση	Ενέργεια (keV)	Q*ω	Κανάλια Ολοκλήρωσης (112 → 250keV)	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
2,2274 keV/ch 21,577 offset	1103	2,858*10 ¹⁰ (455 - 490 ch)	318 - 430	92527	91858.52	0.7%
2,2274 keV/ch 21,077 offset	1503	4,762*10 ¹⁰ (630 - 665 ch)	475 - 587	88950	87817.6	1.3%
2,2274 keV/ch 20,477 offset	1733	6,302*10 ¹⁰ (735 - 768 ch)	564 - 676	182048	190816	4.6%
2,2274 keV/ch 20,077 offset	1903	1,094*10 ¹¹ (807 - 845 ch)	633 - 745	226084	222737	1.5%
3,7180 keV/ch 29,900 offset	2157	3,730*10 ¹⁰ (547 - 568 ch)	438 - 505	84767	80492.5	5.3%
3,7120 keV/ch 24,500 offset	2450	4,755*10 ¹⁰ (627 - 648 ch)	510 - 577	60952	54679.7	11.5%
3,7140 keV/ch 19,700 offset	2507	5,754*10 ¹⁰ (643 - 665 ch)	527 - 594	62041	56299	10.2%
3,7190 keV/ch 16,000 offset	2617	6,219*10 ¹⁰ (673 - 694 ch)	551 - 618	52896	45929.7	15.2%
3,7230 keV/ch 13,000 offset	2717	1,208*10 ¹¹ (698 - 721 ch)	576 - 643	67446	57221.4	17.9%
3,7200 keV/ch 14,500 offset	2997	1,341*10 ¹¹ (770 - 795 ch)	641 - 708	144989	104773	38.4%
3,7200 keV/ch 13,500 offset	3157	6,445*10 ¹⁰ (816 - 836 ch)	676 - 743	147389	156454	-5.8%
3,7150 keV/ch 20,000 offset	3397	5,372*10 ¹⁰ (874 - 899 ch)	736 - 803	87323	92968.9	-6.1%
3,7150 keV/ch 22,000 offset	3467	1,118*10 ¹¹ (895 - 917 ch)	750 - 818	148583	180574	-17.7%

170°						
Ενεργειακή Βαθμονόμηση	Ενέργεια (keV)	Q*ω	Κανάλια Ολοκλήρωσης (111 → 250keV)	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
2,2593 keV/ch 18,872 offset	1103	2,274*10 ¹⁰ (455 - 480 ch)	310 - 421	75477	74382.4	1.5%
2,2593 keV/ch 18,672 offset	1503	3,832*10 ¹⁰ (630 - 650 ch)	463 - 574	73354	71755.6	2.2%
2,2593 keV/ch 17,672 offset	1733	5,090*10 ¹⁰ (730 - 752 ch)	552 - 663	159396	168213	5.2%
2,2593 keV/ch 17,272 offset	1903	8,964*10 ¹⁰ (800 - 827 ch)	619 - 730	198354	196980	0.7%
3,6000 keV/ch 24,700 - offset	2157	3,054*10 ¹⁰ (570 - 585 ch)	448 - 518	71274	69173.7	3.0%
3,5990 keV/ch 19,000 - offset	2450	3,855*10 ¹⁰ (651 - 667 ch)	523 - 593	51048	45932.5	11.1%
3,5990 keV/ch 15,500 - offset	2507	4,678*10 ¹⁰ (666 - 689 ch)	538 - 608	54213	49584.7	9.3%
3,6000 keV/ch 14,800 - offset	2617	5,032*10 ¹⁰ (697 - 713 ch)	565 - 635	43301	36439.5	18.8%
3,6050 keV/ch 11,000 - offset	2717	9,566*10 ¹⁰ (723 - 740 ch)	591 - 660	49865	39888.7	25.0%
3,6000 keV/ch 13,500 - offset	2997	1,100*10 ¹¹ (800 - 817 ch)	658 - 728	128106	88858.6	44.2%
3,5960 keV/ch 17,000 - offset	3157	5,206*10 ¹⁰ (845 - 861 ch)	696 - 766	140261	135987	3.1%
3,5960 keV/ch 18,400 - offset	3397	4,550*10 ¹⁰ (906 - 926 ch)	754 - 824	83025	90969.8	-8.7%
3,5950 keV/ch 20,500 - offset	3467	8,548*10 ¹⁰ (924 - 944 ch)	771 - 841	132534	155257	-14.6%

Παρατηρήσεις

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1) Στις σχετικά χαμηλές ενέργειες (κάτω από 2000 keV) έχουμε πολύ καλή συμφωνία των πειραματικών μας μετρήσεων με τα evaluated δεδομένα. Η διαφορά που υπάρχει δεν ξεπερνά το 5.5%.

2) Όσο αυξάνουμε την ενέργεια αυξάνεται και η απόκλιση των evaluated δεδομένων από τα πειραματικά, παρουσιάζοντας την μέγιστη απόκλιση στα 3000 keV (από 24% για τις 140° έως 44% στις 170°). Μέχρι και αυτή την ενέργεια έχουμε υποτίμηση των evaluated δεδομένων σε σχέση με τα πειραματικά.

3) Για ενέργειες μεγαλύτερες των 3000 keV παρατηρούμε μικρότερες μεν διαφορές στις ολοκληρώσεις (μικρότερες του 25%), αλλά αρκετά μεγάλες ως προς την μορφή των ενεργών διαφορικών διατομών. Τα evaluated δεδομένα είναι σαφώς υπερεκτιμημένα στις ενέργειες αυτές.

3.5 Οξυγόνο

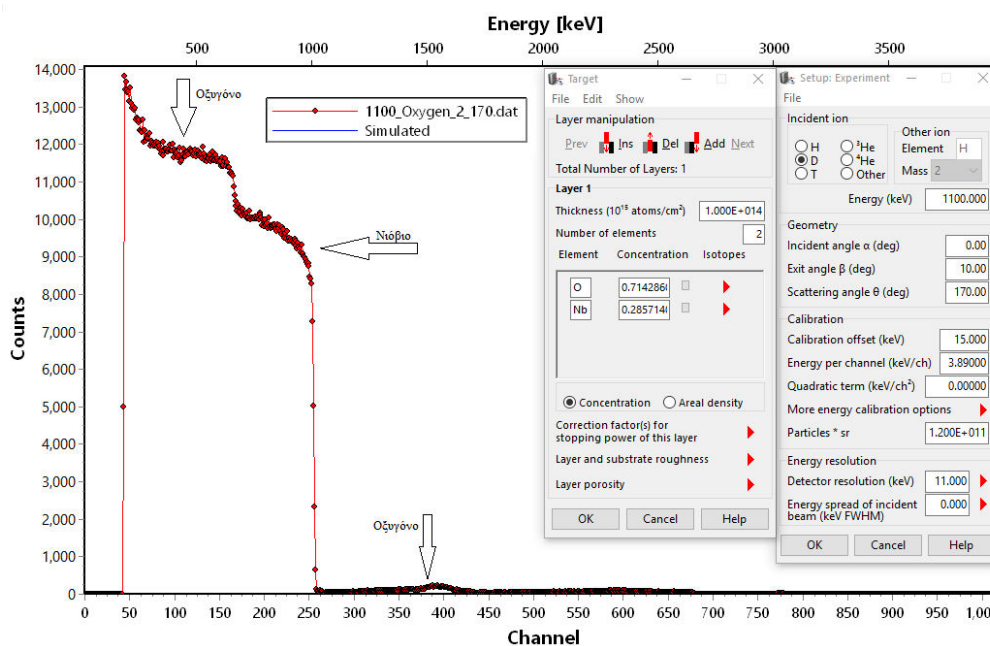
Για την ανάλυση του οξυγόνου ακολουθήθηκε παρόμοια μέθοδος με αυτή που χρησιμοποιήσαμε για το πυρίτιο.

Έχουμε ήδη υπολογίσει την ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών μας παραπάνω και είμαστε έτοιμοι να περάσουμε στην ανάλυση των φασμάτων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των φασμάτων του οξυγόνου είναι η ίδια για όλα τα φάσματα και θα παρουσιαστεί για την ενέργεια των 1100 keV στη γωνία των 170°. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα τελικά φάσματα όλων των ενεργειών και όλων των γωνιών καθώς και συγκεντρωτικοί πίνακες για τη σύγκριση των πειραματικών με τα θεωρητικά δεδομένα.

Απαραίτητη προεργασία:

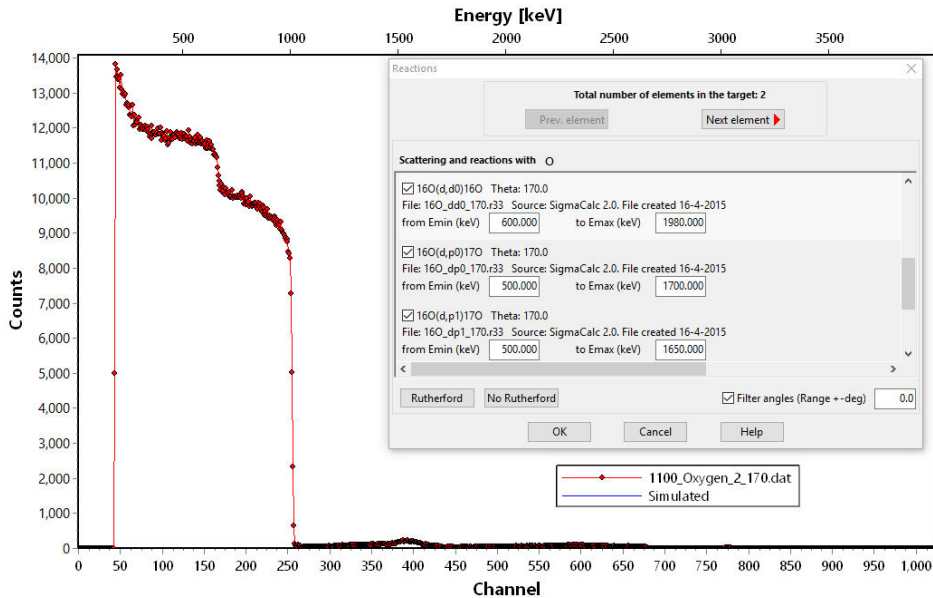
1. Αρχικά, αφού ανοίξουμε το SIMNRA, φορτώνουμε στο πρόγραμμα τα πειραματικά μας δεδομένα και συμπληρώνουμε όλα τα απαραίτητα πεδία στα παράθυρα του SIMNRA που αναφέρονται στο πειραματικό setup (ενέργεια δέσμης, επιταχυνόμενο ιόν, γωνία ανιχνευτή, ενεργειακή βαθμονόμηση και μετατόπιση, διακριτική ικανότητα ανιχνευτή και φορτίο δέσμης) και στον στόχο (πλήθος επιπέδων, πλήθος στοιχείων ανά επίπεδο και πάχος κάθε στοιχείου) έτσι ώστε να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε τα θεωρητικά δεδομένα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.74 Συμπλήρωση των απαραίτητων δεδομένων για την σύγκριση των πειραματικών μας δεδομένων με τα θεωρητικά

Συμπληρώνουμε τη συγκέντρωση του κάθε στοιχείου του στόχου καθώς και το $Q \cdot \Omega$ κατά προσέγγιση.

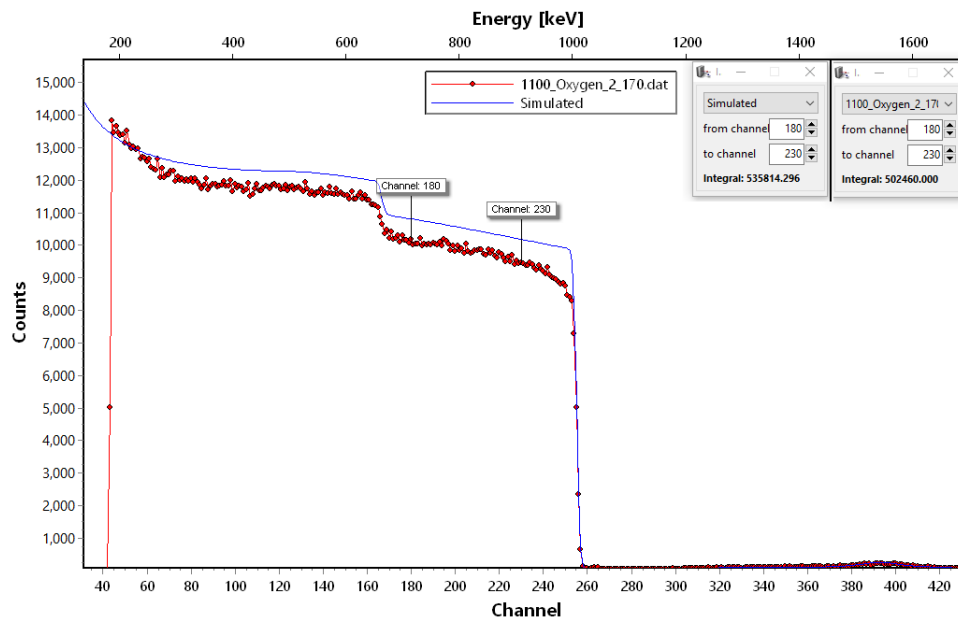
2. Στη συνέχεια, έχοντας συμπληρώσει όλα τα απαραίτητα πεδία, επιλέγουμε τις κατάλληλες αντιδράσεις για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Επιλέγουμε πάντα τις αντιδράσεις που έχουν δημιουργηθεί από το SigmaCalc 2.0, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα για το οξυγόνο. Επιλέγουμε όλες τις διαφορετικές διαθέσιμες αντιδράσεις. Το Νιόβιο ακολουθεί σκέδαση Rutherford, συνεπώς δεν έχει κάποια άλλη αντίδραση να επιλέξουμε.



Εικόνα 3.75 Επιλογή αντιδράσεων για τη δημιουργία της θεωρητικής καμπύλης.

3. Αφού επιλέξουμε τις αντιδράσεις και τρέξουμε το πρόγραμμα, πρέπει να ελέγξουμε αν το φορτίο που υποθέσαμε αρχικά ότι έχουμε είναι σωστό. Για να το ελέγξουμε αυτό χρησιμοποιούμε το πλατό του Νιοβίου.

Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνουμε το ολοκλήρωμα των πειραματικών δεδομένων στο πλατό του Νιοβίου με τα αντίστοιχα θεωρητικά. Βλέπουμε την σύγκριση αυτή στην επόμενη εικόνα.

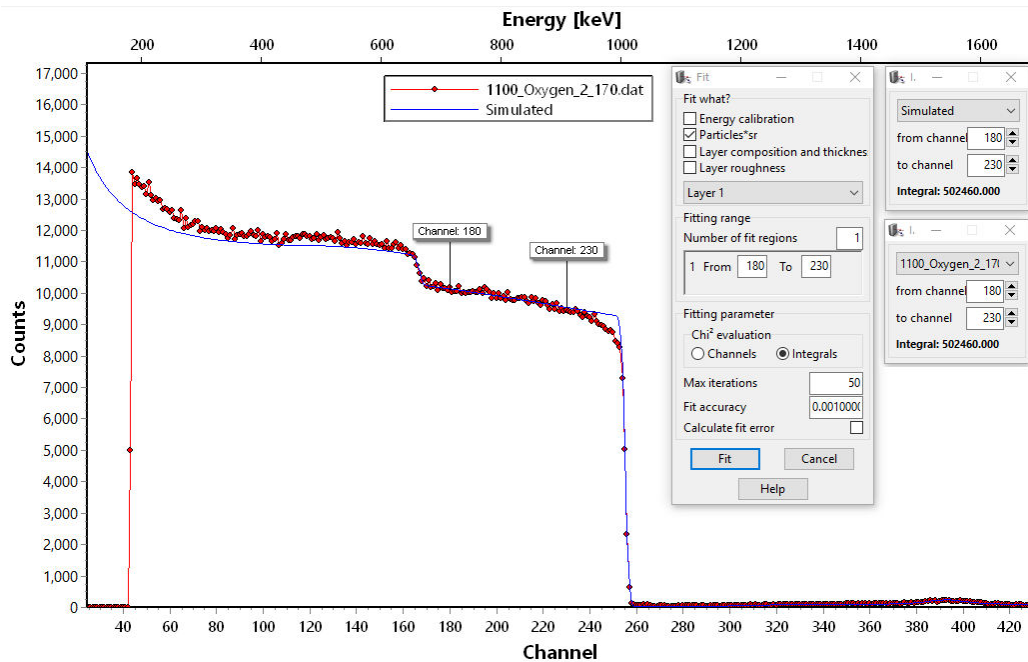


Εικόνα 3.76 Επιλογή του παραθύρου για τον προσδιορισμό του φορτίου $Qx\Omega$

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα ολοκληρώματα διαφέρουν, με το θεωρητικό να είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε υπερεκτιμήσει το φορτίο $Qx\Omega$ και πρέπει να το μειώσουμε.

4. Για να μην μειώνουμε το φορτίο με το χέρι, χάνοντας αρκετό χρόνο μέχρι να βρούμε τη σωστή τιμή, χρησιμοποιούμε μια επιλογή του προγράμματος η οποία υπολογίζει μεταξύ άλλων το καταλληλότερο φορτίο έτσι ώστε η ολοκλήρωση σε συγκεκριμένα κανάλια να δίνει τον ίδιο αριθμό τόσο στα πειραματικά όσο και στα θεωρητικά δεδομένα.

Επομένως για κάθε φάσμα υπολογίζουμε το φορτίο συγκρίνοντας τα ολοκληρώματα θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων στο πλατό του Νιοβίου.

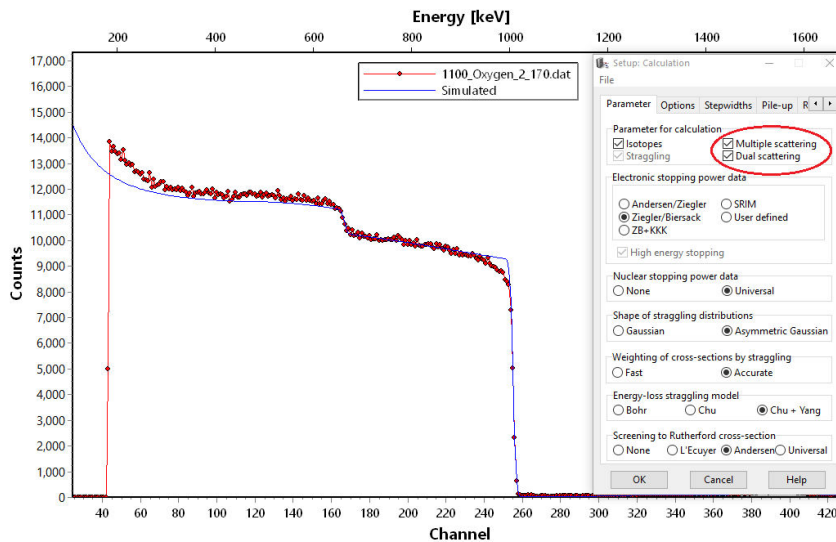


Εικόνα 3.77 Υπολογισμός του φορτίου με τη χρήση του SIMNRA

Παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια του Νιοβίου η θεωρητική καμπύλη δεν ακολουθεί τόσο καλά τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό οφείλεται στην τραχύτητα του στόχου λόγω του ότι είναι παστίλια. Θα παρουσιαστούν παρακάτω κάποια από τα τελικά φάσματα μετά την επεξεργασία τους σε κώδικα για την τραχύτητα.

3.5.1 Αντίδραση $^{nat}O(d,d_0)$

Τα παραπάνω βήματα είναι απαραίτητα για να μπορέσουμε στη συνέχεια να συγκρίνουμε πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα. Πρέπει να αναφέρουμε εδώ ότι λόγω του στόχου (παστίλια οξυγόνου), για να γίνει σωστά η σύγκριση πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας την πιθανή διπλή σκέδαση της δέσμης μέσα στο στόχο (δηλαδή τη σκέδαση σε εμπρόσθιες γωνίες με τεράστια διαφορική ενεργό διατομή και ακολούθως την οπισθοσκέδαση). Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σημαντικό για στόχους μεγάλου Z . Για το λόγο αυτό, επιλέγουμε στις ρυθμίσεις των υπολογισμών μας την πολλαπλή σκέδαση όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

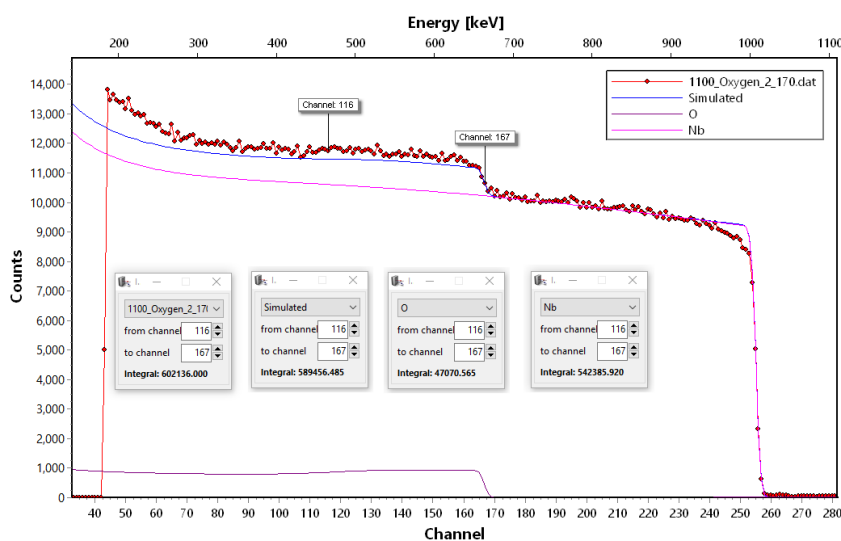


Εικόνα 3.78 Επιλογή πολλαπλής σκέδασης στο SIMNRA για σωστότερα αποτελέσματα

Παρότι η επιλογή μας αυτή θα έπρεπε να μας δίνει πιο σωστά αποτελέσματα, λόγω ενός “προβλήματος” του προγράμματος, τα νούμερα που υπολογίζει στην ολοκλήρωση δεν είναι σωστά. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα εργαζόμαστε ως εξής:

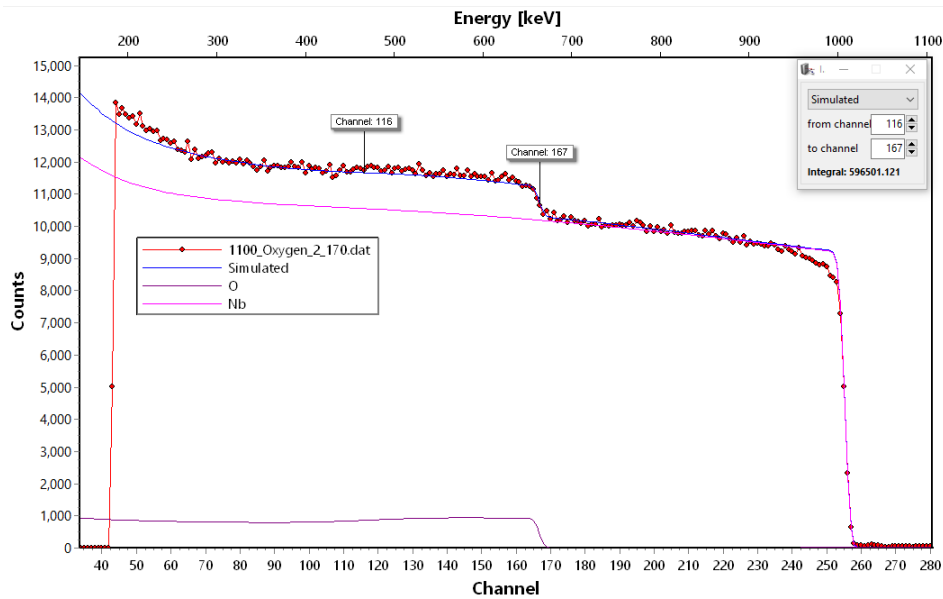
1. Επιλέγουμε το παράθυρο ολοκλήρωσης για το οξυγόνο να είναι 200 keV από την επιφάνεια του οξυγόνου. Ανάλογα με την ενεργειακή βαθμονόμηση που έχουμε σε κάθε φάσμα, το παράθυρο αυτό αντιστοιχεί και σε διαφορετικό αριθμό καναλιών τον οποίο και υπολογίζουμε διαιρώντας τα 200 keV με την αντίστοιχη ενεργειακή βαθμονόμηση. Στο συγκεκριμένο φάσμα, τα 200 keV αντιστοιχούν σε 51 κανάλια.

2. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα των καναλιών αυτών ΜΕ και ΧΩΡΙΣ πολλαπλή σκέδαση. Από την προσομοίωση χωρίς πολλαπλή σκέδαση κρατάμε το ολοκλήρωμα για το Νιόβιο, το Οξυγόνο, το συνολικό θεωρητικό καθώς και το πειραματικό, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.79 Παράθυρο ολοκλήρωσης για τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά χωρίς πολλαπλή σκέδαση

3. Από την προσομοίωση με πολλαπλή σκέδαση κρατάμε μόνο το συνολικό θεωρητικό όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.80 Παράθυρο ολοκλήρωσης για τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά με πολλαπλή σκέδαση

4. Αφαιρώντας τώρα το συνολικό θεωρητικό ολοκλήρωμα του φάσματος χωρίς πολλαπλή σκέδαση, από το συνολικό θεωρητικό ολοκλήρωμα του φάσματος με πολλαπλή σκέδαση παίρνουμε τη διαφορά στα γεγονότα που οφείλεται στη σκέδαση της δέσμης στο στόχο. Αυτή τη διαφορά την αποδίδουμε εξ' ολοκλήρου στο Νιόβιο μιας και ένα στοιχείο χαμηλού Z όπως το οξυγόνο δεν συνεισφέρει ιδιαίτερα στην πολλαπλή σκέδαση. Επομένως, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, τα γεγονότα του Νιοβίου στην περιοχή ολοκλήρωσης που θα χρησιμοποιήσουμε για τους υπολογισμούς μας θα είναι:

$$Nb_{\text{counts}} = 542385.92 + (596501.121 - 589456.485) = 549430.556$$

Μπορεί αυτή η διαφορά να φαίνεται μικρή, όμως αυξάνοντας την ενέργεια της δέσμης γίνεται αρκετά σημαντική, όπως θα δούμε και στους συγκεντρωτικούς πίνακες.

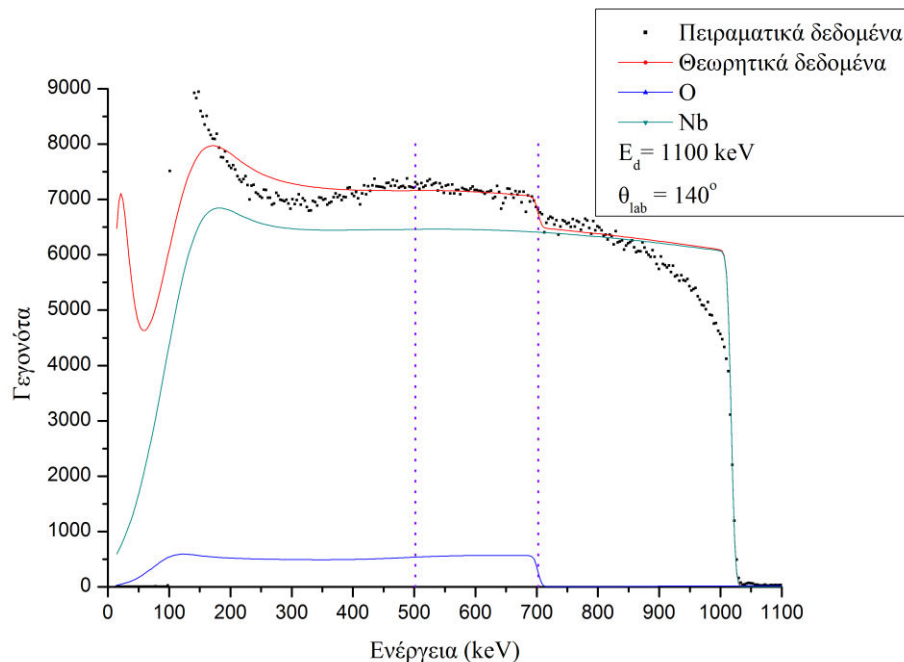
5. Στη συνέχεια αφαιρούμε από το πειραματικό ολοκλήρωμα τα γεγονότα του Νιοβίου. Αυτό που μένει είναι το πειραματικό οξυγόνο που θα χρησιμοποιήσουμε για να ελέγξουμε τις ενεργές διατομές της αντίδρασης $^{nat}\text{O}(d,d_0)$, συγκρίνοντάς το με το θεωρητικό ολοκλήρωμα του οξυγόνου που πήραμε από το φάσμα χωρίς πολλαπλή σκέδαση. Έχουμε:

$$O_{\text{πειρ.}} = 602136 - 599430.556 = 52705.444$$

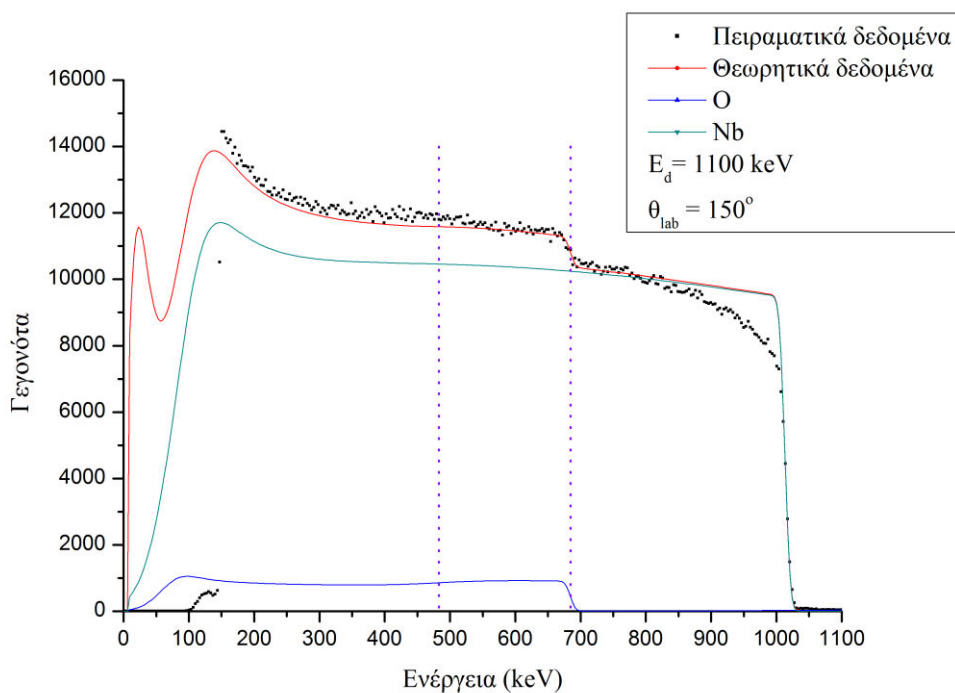
$$O_{\text{θεωρ.}} = 47070.565$$

$$\text{Απόκλιση} = [(O_{\text{πειρ.}} / O_{\text{θεωρ.}}) - 1] * 100\% = 11.97 \%$$

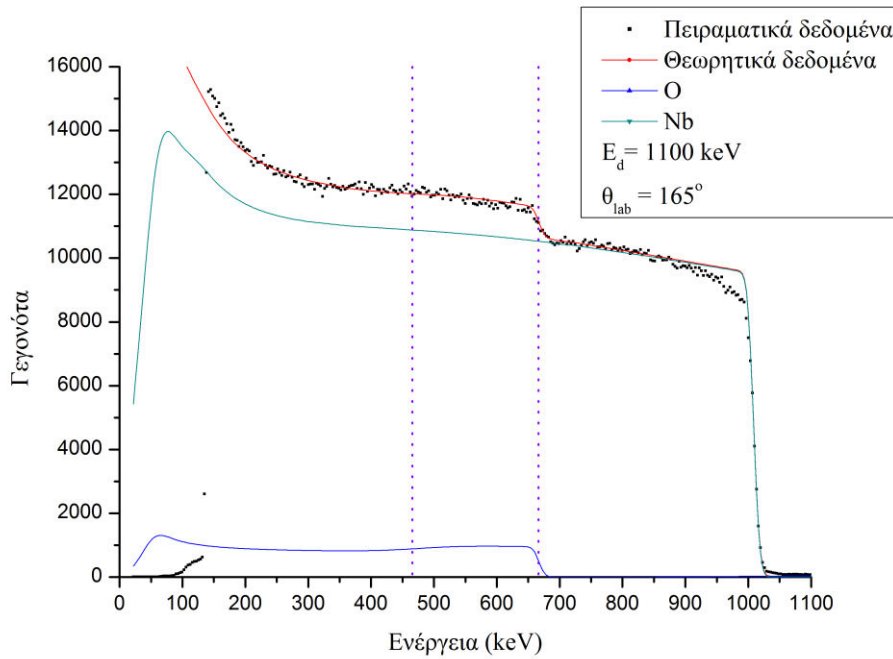
Ακολουθούμε τα ίδια βήματα για όλες τις ενέργειες και όλες τις γωνίες. Τα τελικά φάσματα που παρουσιάζονται στις εικόνες 3.81 – 3.95 είναι με πολλαπλή σκέδαση και στους συγκεντρωτικούς πίνακες παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα που θα παίρναμε αν δεν λαμβάναμε υπόψιν μας την πολλαπλή σκέδαση.



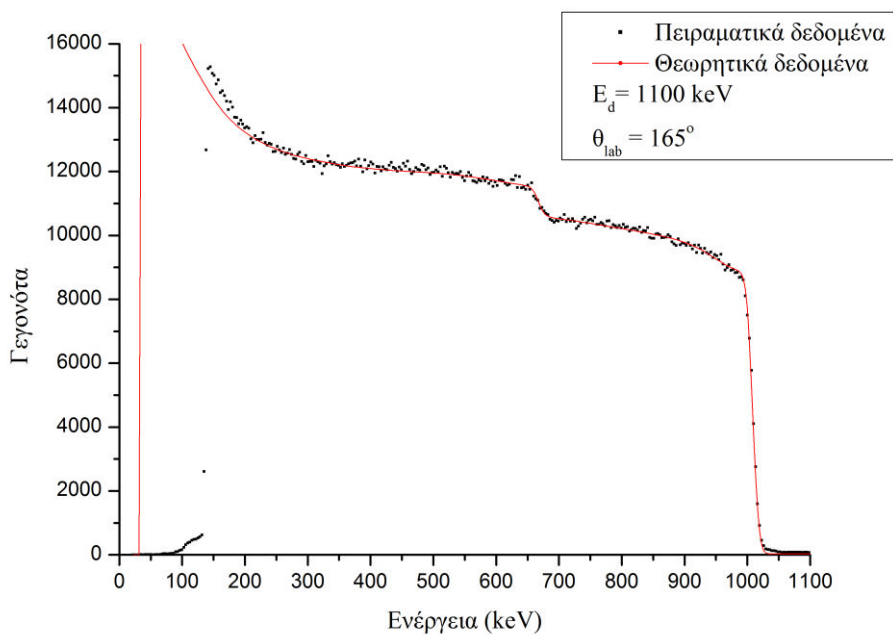
Εικόνα 3.81 Ενέργεια δέσμης 1100 keV, Γωνία 140° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου



Εικόνα 3.82 Ενέργεια δέσμης 1100 keV, Γωνία 150° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

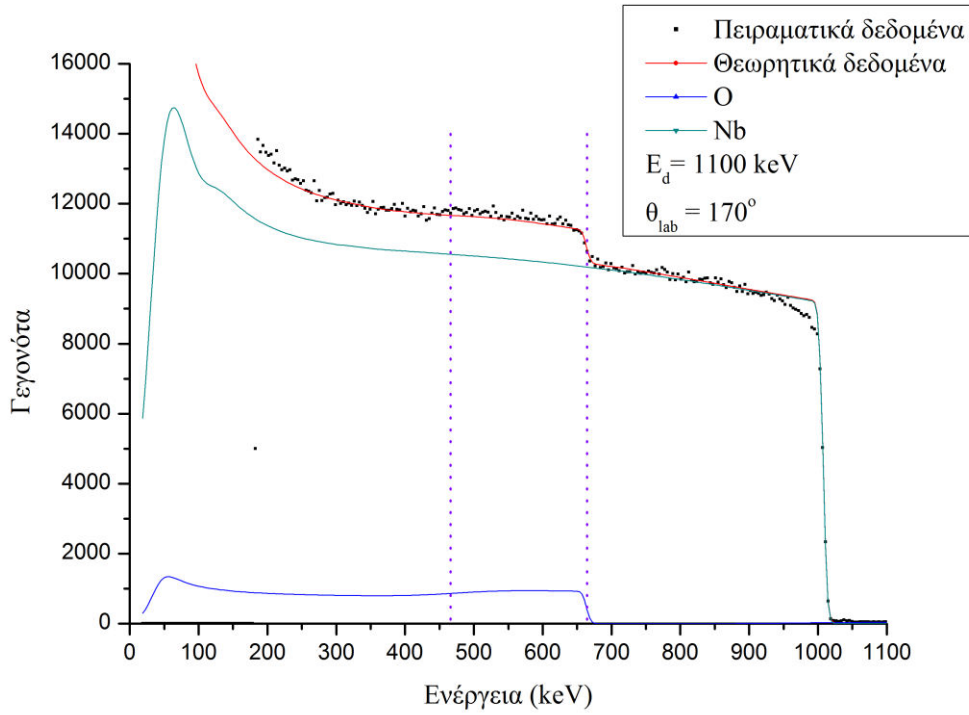


Εικόνα 3.83 Ενέργεια δέσμης 1100 keV, Γωνία 165° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

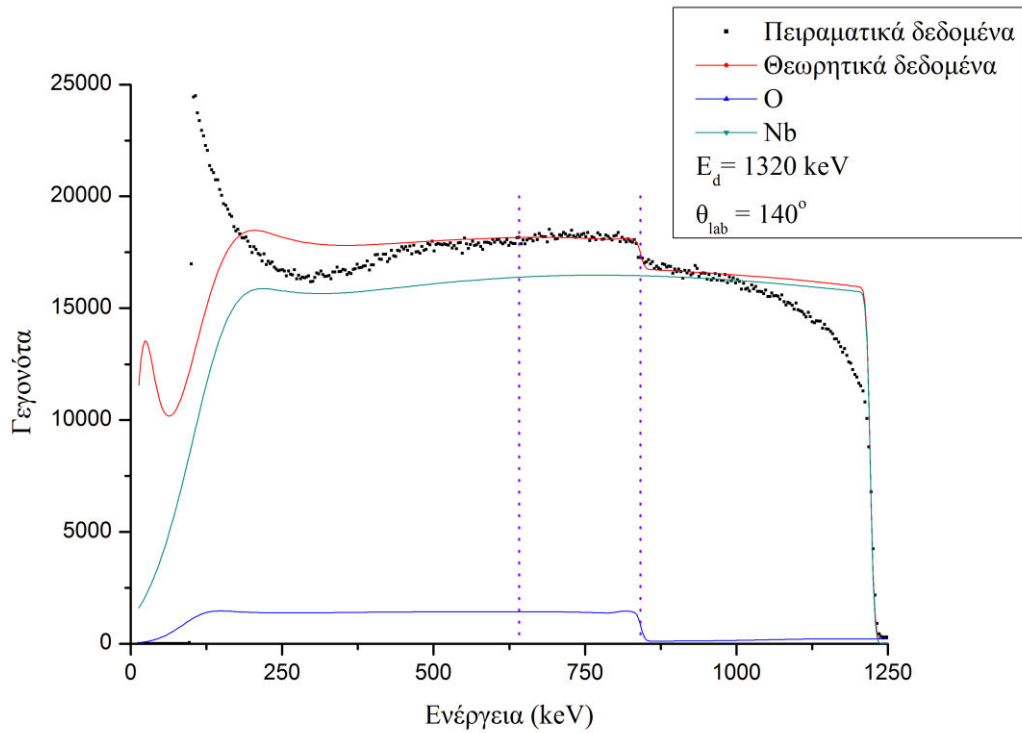


Εικόνα 3.84 Ενέργεια δέσμης 1100 keV, Γωνία 165° με πολλαπλή σκέδαση με χρήση κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

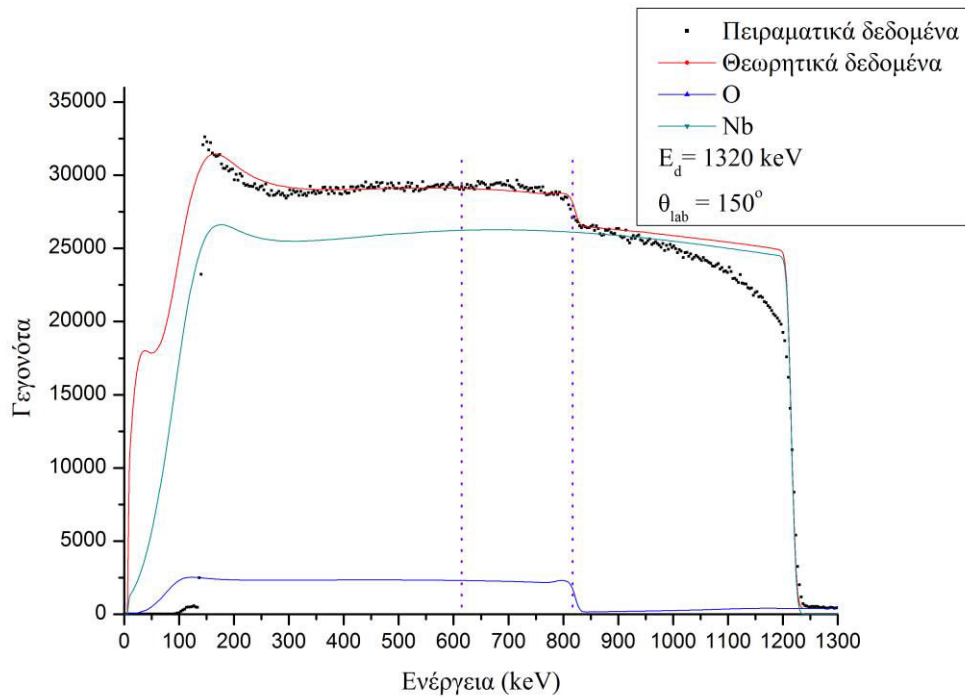
Παρατηρούμε ότι στα 1100 keV έχουμε καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων. Ακόμη, στην επιφάνεια του πυριτίου το θεωρητικό φάσμα δεν ακολουθεί τα πειραματικά δεδομένα λόγω της τραχύτητας του στόχου. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη χρήση κώδικα, ο οποίος όμως δεν επηρεάζει τα αποτελέσματά μας.



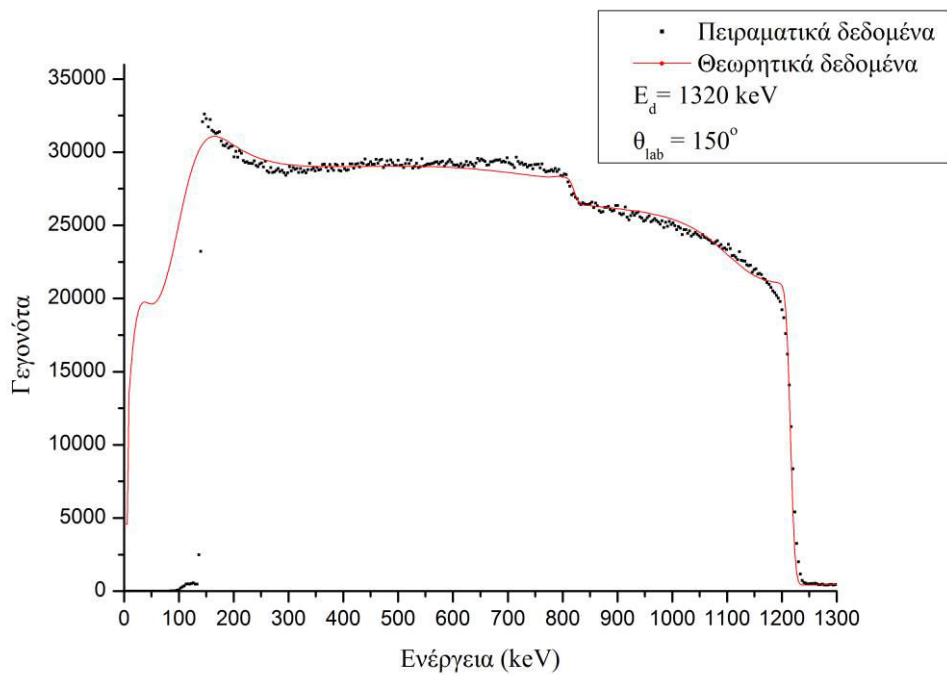
Εικόνα 3.85 Ενέργεια δέσμης 1100 keV, Γωνία 165° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου



Εικόνα 3.86 Ενέργεια δέσμης 1320 keV, Γωνία 140° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

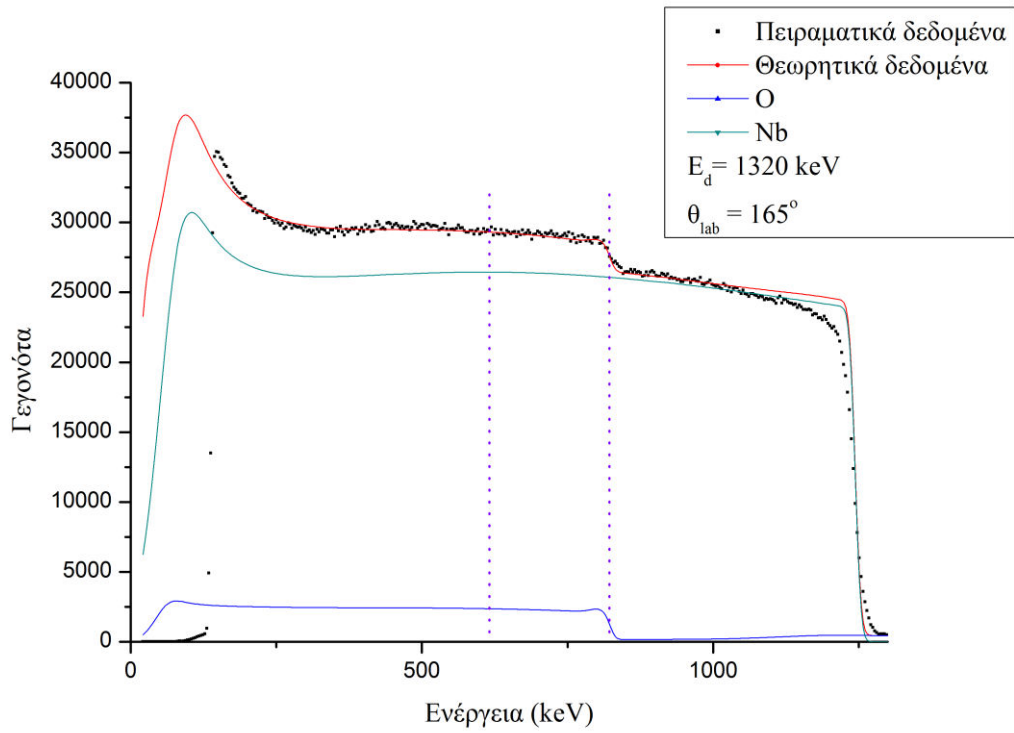


Εικόνα 3.87 Ενέργεια δέσμης 1320 keV, Γωνία 150° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

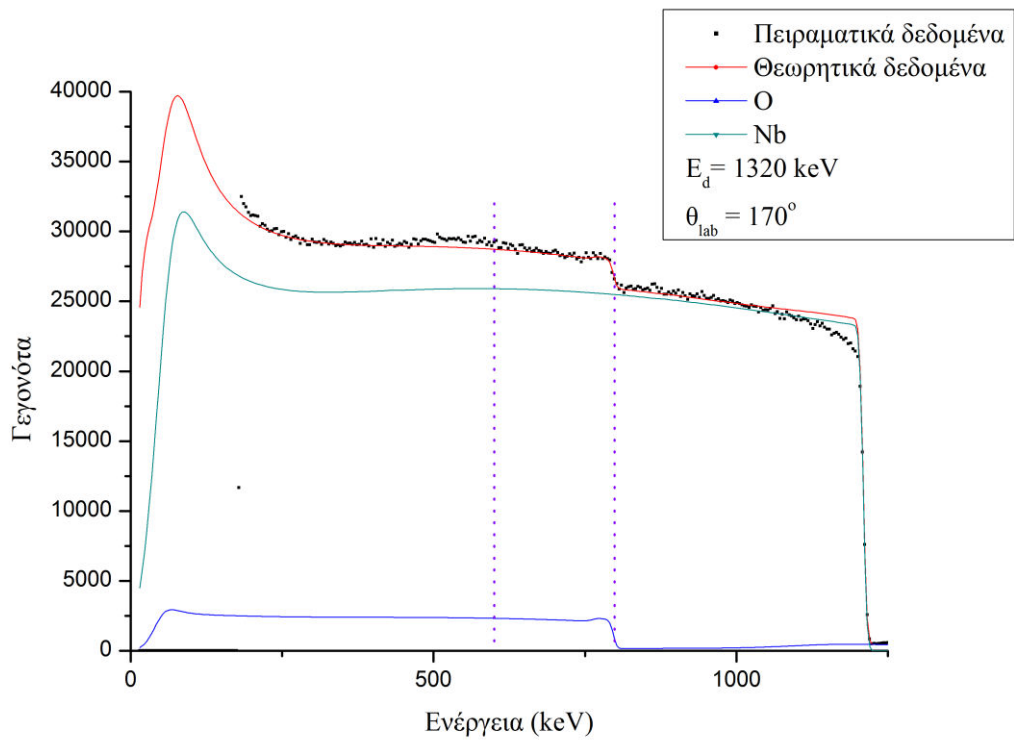


Εικόνα 3.88 Ενέργεια δέσμης 1320 keV, Γωνία 150° με πολλαπλή σκέδαση με χρήση κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

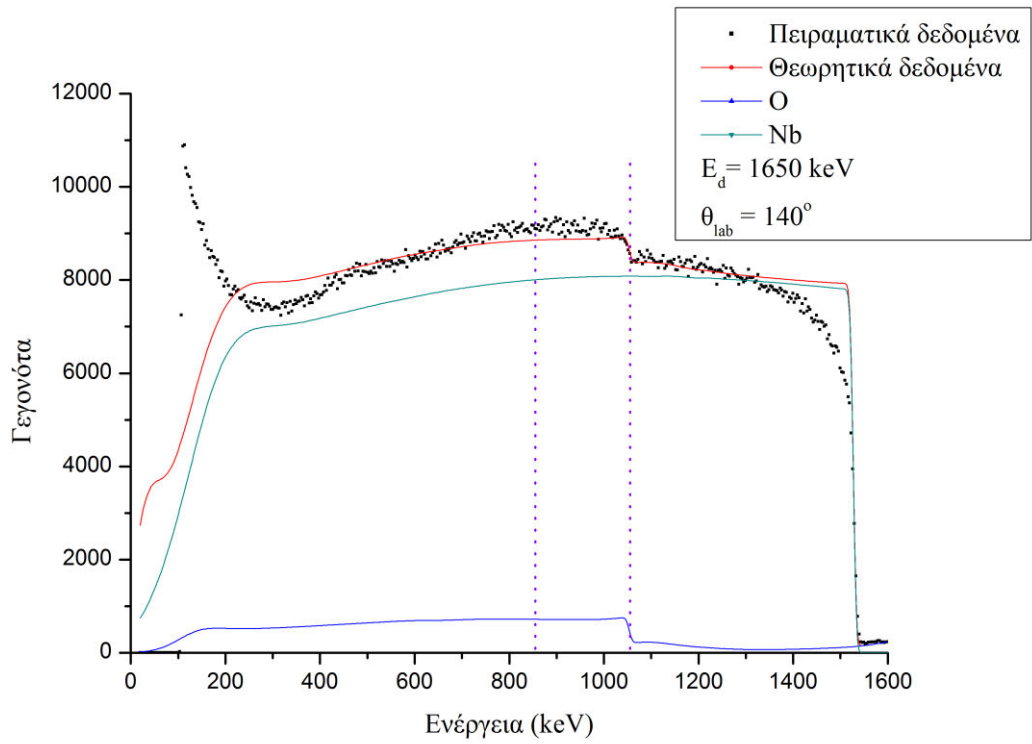
Στα 1320 keV δεν παρατηρούμε ιδιαίτερες αλλαγές από τα προηγούμενα φάσματα μικρότερης ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαφορική ενεργός διατομή σε αυτές τις ενέργειες είναι σχεδόν σταθερή, παρουσιάζοντας μια μικρή μείωση που δεν μπορούμε όμως να παρατηρήσουμε.



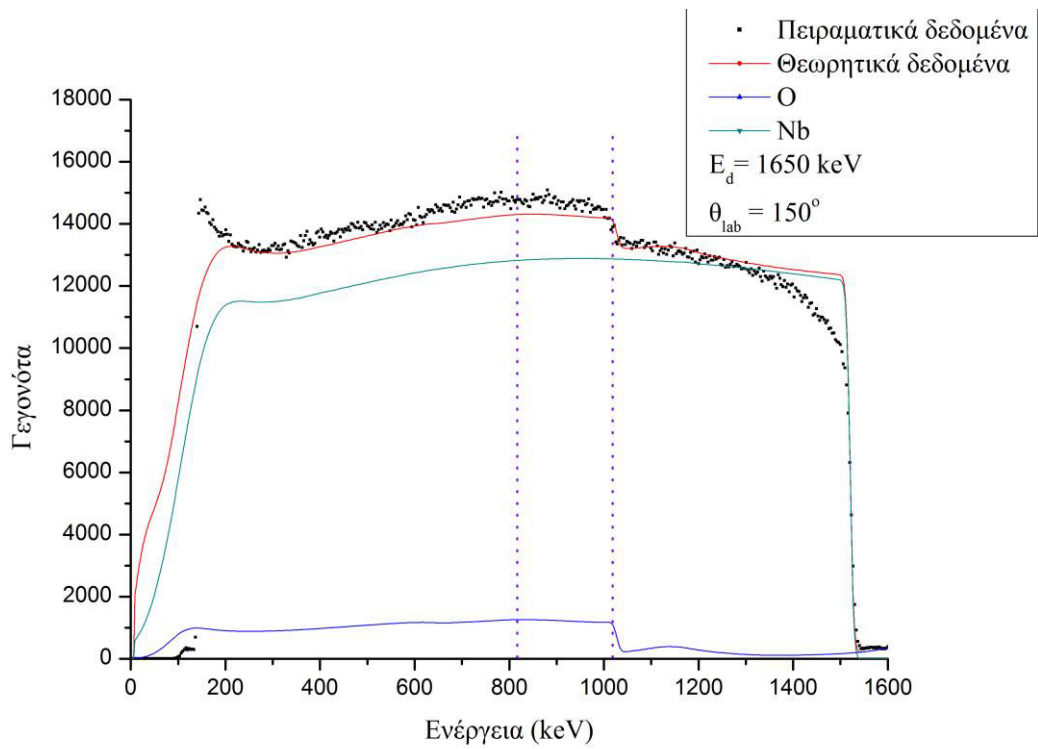
Εικόνα 3.89 Ενέργεια δέσμης 1320 keV, Γωνία 650° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου



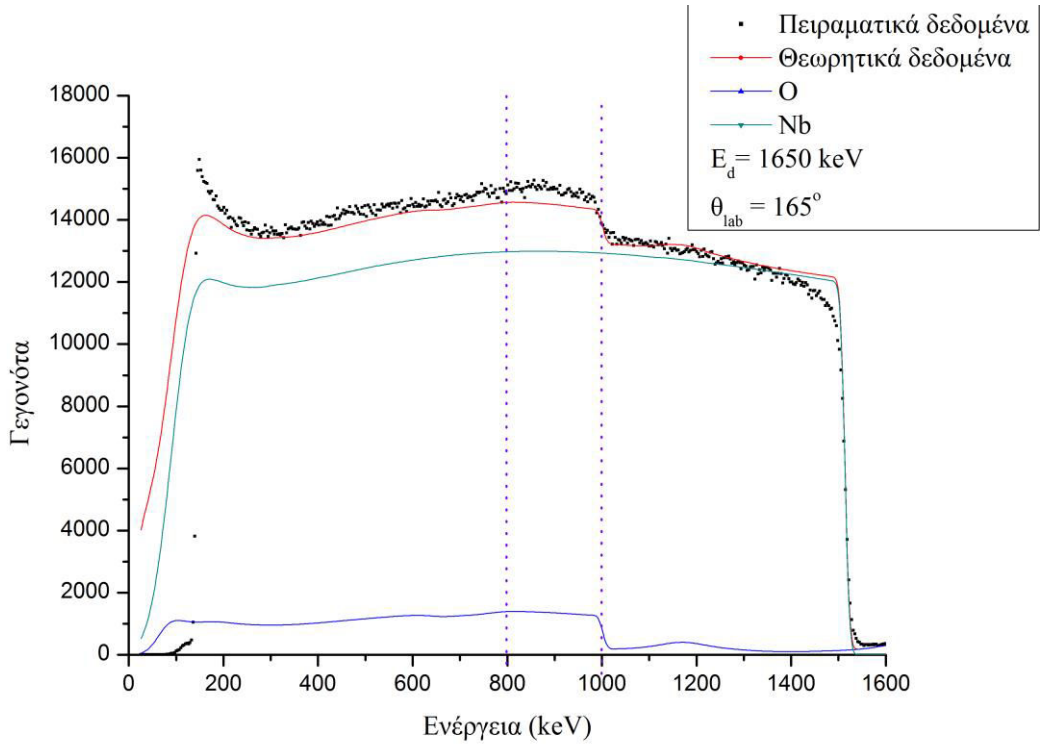
Εικόνα 3.90 Ενέργεια δέσμης 1320 keV, Γωνία 170° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου



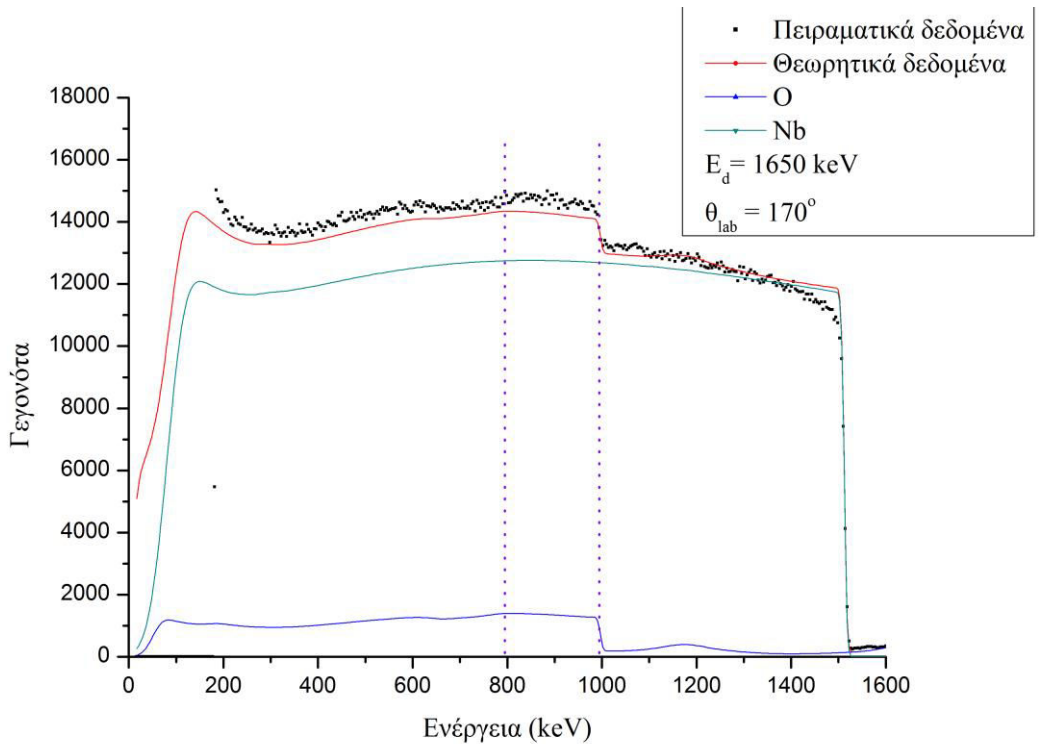
Εικόνα 3.91 Ενέργεια δέσμης 1650 keV, Γωνία 140° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου



Εικόνα 3.92 Ενέργεια δέσμης 1650 keV, Γωνία 150° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

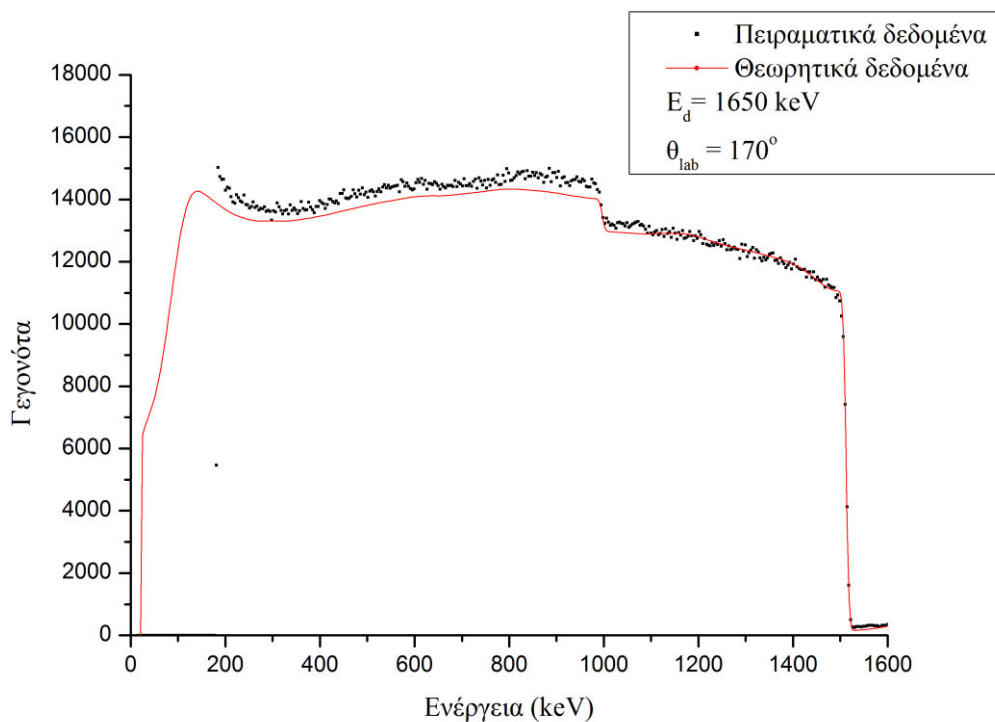


Εικόνα 3.93 Ενέργεια δέσμης 1650 keV, Γωνία 165° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου



Εικόνα 3.94 Ενέργεια δέσμης 1650 keV, Γωνία 170° με πολλαπλή σκέδαση χωρίς κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

Παρόμοια φάσματα έχουμε και για την ενέργεια των 1650 keV. Η διαφορική ενεργός διατομή παραμένει σχεδόν σταθερή, παρουσιάζοντας κι εδώ μια μικρή μείωση που δεν μπορούμε όμως να παρατηρήσουμε.



Εικόνα 3.95 Ενέργεια δέσμης 1650 keV, Γωνία 170° με πολλαπλή σκέδαση με χρήση κώδικα για την τραχύτητα του στόχου

Συγκεντρωτικά έχουμε για κάθε γωνία:

	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση
Ενεργειακή Βαθμονόμηση	3.3400 keV/ch 11.000 offset		3.3400 keV/ch 10.000 offset		3.3400 keV/ch 16.500 offset	
Ενέργεια (keV)	1100		1320		1650	
Q*Ω	7.862*10 ¹⁰ (220 - 260 ch)		2.651*10 ¹¹ (258 - 298 ch)		1.805*10 ¹¹ (330 - 400 ch)	
Κανάλια Ολοκλήρωσης (60 → 200keV)	147 – 207		189 – 249		251 – 311	
140° Πειραματικά Δεδομένα	435404		1106000		553500	
Θεωρητικά Δεδομένα	427913.6	434021.4	1092000	1105000	535652.3	541131.2
Πειραματικά Γεγονότα Nb	394319.6	400427.4	1006000	1019000	492409.4	497888.3
Πειραματικά Γεγονότα O	41084.4	34976.6	100000	87000	61090.6	55611.7
Θεωρητικά Γεγονότα O	33593.98	—	85399.994	—	43242.924	—
Απόκλιση	22.30 %	4.12 %	17.10 %	1.87 %	41.27 %	28.60 %

		Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση
150°	Ενεργειακή Βαθμονόμηση	3.3600 keV/ch -7.500 offset		3.3650 keV/ch -14.500 offset		3.3650 keV/ch -14.500 offset	
	Ενέργεια (keV)	1100		1320		1650	
	Q*Ω	1.270*10 ¹¹ (220 - 255 ch)		4.248*10 ¹¹ (259 - 289 ch)		2.906*10 ¹¹ (321 - 369 ch)	
	Κανάλια Ολοκλήρωσης (60 → 200keV)	146 – 206		187 – 247		247 – 307	
	Πειραματικά Δεδομένα	704370		1771000		892098	
	Θεωρητικά Δεδομένα	688750.6	698270.3	1741000	1761000	861339	869794.4
	Πειραματικά Γεγονότα Nb	634641.8	644161.5	1605000	1625000	787076.4	795531.8
	Πειραματικά Γεγονότα O	69728.2	60208.5	166000	146000	105021.6	96566.2
	Θεωρητικά Γεγονότα O	54108.8	—	136103.8	—	74262.6	—
	Απόκλιση	28.87 %	11.27 %	21.97 %	7.27 %	41.42 %	30.03 %

		Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση
165°	Ενεργειακή Βαθμονόμηση	3.2400 keV/ch 18.500 offset		3.2350 keV/ch 17.500 offset		3.2450 keV/ch 22.500 offset	
	Ενέργεια (keV)	1100		1320		1650	
	Q*Ω	1.383*10 ¹¹ (215 - 265 ch)		4.514*10 ¹¹ (255 – 325 ch)		3.099*10 ¹¹ (315 - 395 ch)	
	Κανάλια Ολοκλήρωσης (62 → 200keV)	138 – 200		180 – 242		239 – 301	
	Πειραματικά Δεδομένα	742868		1829000		938491	
	Θεωρητικά Δεδομένα	73676.9	745279.7	1805000	1823000	903722.2	911024.3
	Πειραματικά Γεγονότα Nb	678124.1	686642.8	1663000	1681000	819901.6	827203.7
	Πειραματικά Γεγονότα O	64743.9	56225.2	166000	148000	118589.4	111287.3
	Θεωρητικά Γεγονότα O	58636.9	—	141470.4	—	83820.6	—
	Απόκλιση	10.42 %	- 4.11 %	17.34 %	4.62 %	41.48 %	32.77 %

		Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση	Απλή Σκέδαση	Πολλαπλή Σκέδαση
170°	Ενεργειακή Βαθμονόμηση	3.8900 keV/ch 15.000 offset		3.9000 keV/ch 11.000 offset		3.9100 keV/ch 13.000 offset	
	Ενέργεια (keV)	1100		1320		1650	
	Q*Ω	1.1206*10 ¹¹ (180 - 230 ch)		3.678*10 ¹¹ (210 – 280 ch)		2.536*10 ¹¹ (264- 340 ch)	
	Κανάλια Ολοκλήρωσης (51 → 200keV)	116 – 167		151 – 202		200 – 251	
	Πειραματικά Δεδομένα	602136		1479000		762271	
	Θεωρητικά Δεδομένα	589456.5	596501.1	1457000	1472000	734009.2	740168.4
	Πειραματικά Γεγονότα Nb	542385.9	549430.7	1343000	1358000	664534.4	670693.6
	Πειραματικά Γεγονότα O	59750.1	52705.4	136000	121000	97736.6	91577.4
	Θεωρητικά Γεγονότα O	47070.6	—	114068.9	—	69474.8	—
	Απόκλιση	26.94 %	11.97 %	19.23 %	6.08 %	40.68 %	31.81 %

Παρατηρήσεις

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1) Λόγω της φύσης του στόχου μας (παστίλια οξυγόνου) και της τραχύτητας που τον διακρίνει, είναι αδύνατον να αναπαράγουμε τα πειραματικά μας δεδομένα στην επιφάνεια του Νιοβίου χωρίς την χρήση κώδικα. Βέβαια, τα αποτελέσματά μας δεν αλλάζουν με τη χρήση του κώδικα, παρά μόνον φαίνονται πιο σωστά. Χρησιμοποιήσαμε τον κώδικα αυτόν σε ένα χαρακτηριστικό φάσμα για κάθε ενέργεια.

2) Ο λόγος που μειώσαμε το παράθυρο ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήσαμε έγκειται στην πολλαπλή σκέδαση, η οποία, όσο πιο βαθιά μπαίνουμε στο στόχο, τόσο πιο έντονη γίνεται.

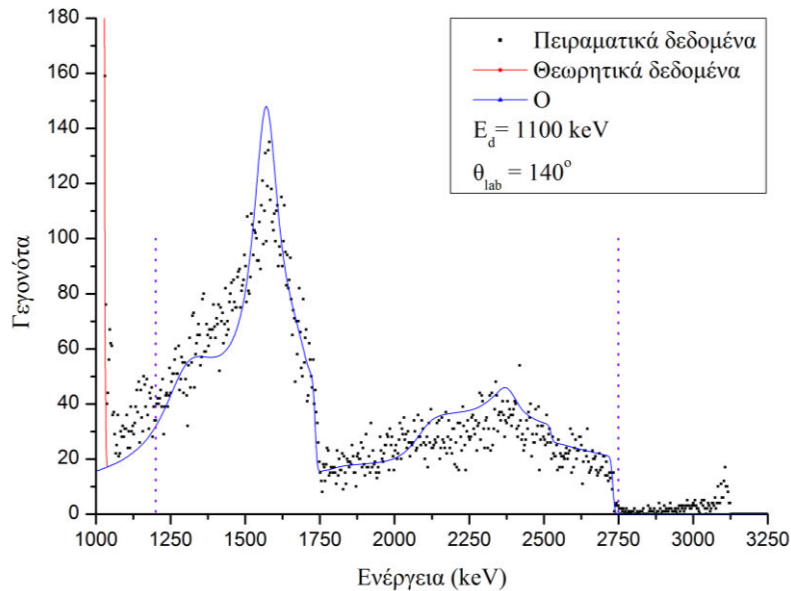
3) Η πολλαπλή σκέδαση επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματά μας όπως είδαμε. Δεν μπορούμε να την αγνοήσουμε, διότι η απόκλιση των πειραματικών δεδομένων από τα evaluated δεδομένα αυξάνεται σημαντικά, οδηγώντας έτσι σε λάθος συμπεράσματα. Επομένως η διαδικασία που ακολουθήθηκε, αν και δύσκολη, ήταν απαραίτητη για τη σωστή εξαγωγή αποτελεσμάτων.

4) Η καλύτερη συμφωνία πειραματικών και evaluated δεδομένων παρατηρείται στην ενέργεια των 1320 keV ενώ στα 1650 keV η απόκλιση φτάνει το 30 %.

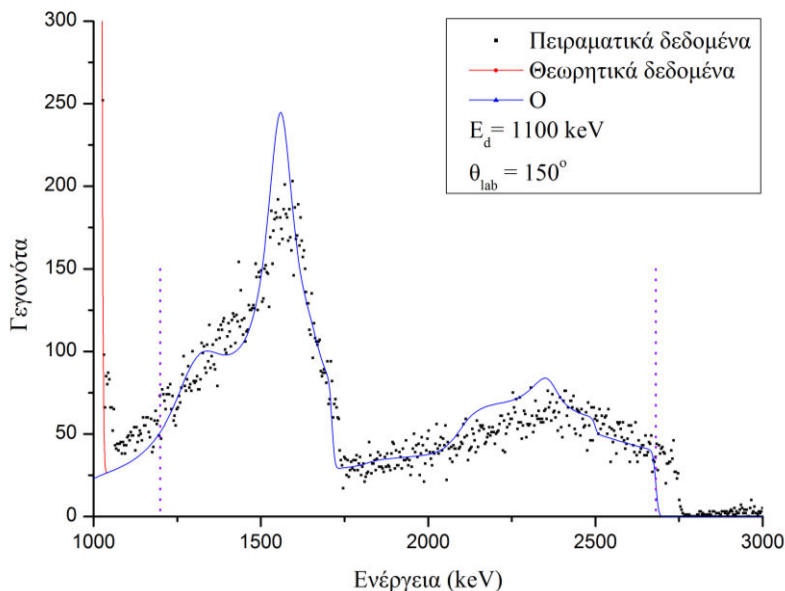
3.5.2 Αντίδραση $^{16}\text{O}(\text{d},\text{p},\text{n},\text{a})$

Για τη μελέτη της αντίδρασης $^{16}\text{O}(\text{d},\text{p},\text{n},\text{a})$, χρησιμοποιούμε τα φάσματα από τις Εικόνες 3.81 – 3.95 εστιάζοντας στα κανάλια υψηλότερης ενέργειας, μιας και τα σωματίδια που ανιχνεύουμε από αυτές αντιδράσεις (πρωτόνια και σωματίδια α) εμφανίζονται στο φάσμα πιο δεξιά από το Νιόβιο. Έχοντας λοιπόν τελειώσει με την απαραίτητη προεργασία, μπορούμε στη συνέχεια να συγκρίνουμε τα πειραματικά δεδομένα με τα αντίστοιχα evaluated. Αυτή τη φορά θα εργαστούμε διαφορετικά μιας και δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε τις τρεις παραπάνω αντιδράσεις. Έχουμε έτσι ένα ενιαίο παράθυρο ολοκλήρωσης, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από τα παράθυρα ολοκλήρωσης που χρησιμοποιούσαμε μέχρι τώρα.

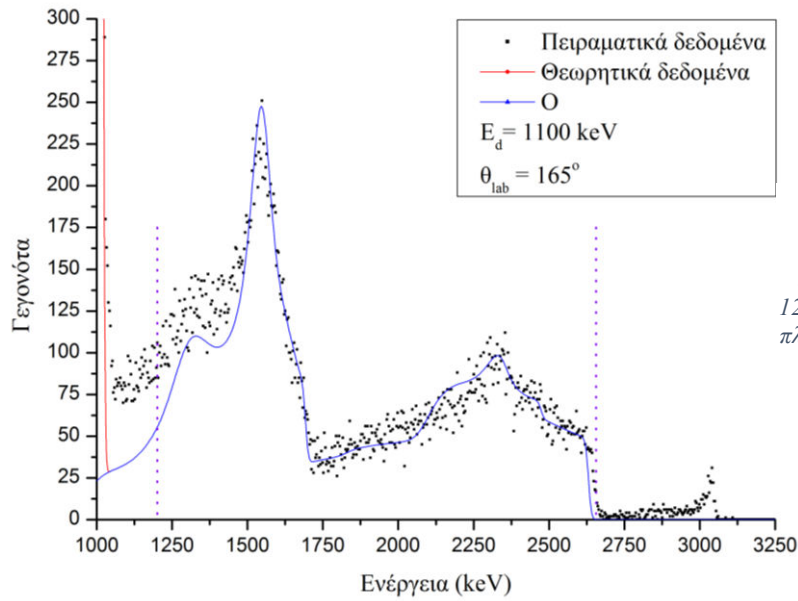
Η ολοκλήρωση ξεκινά από μια συγκεκριμένη ενέργεια και εκτείνεται σχεδόν μέχρι την επιφάνεια του οξυγόνου για τις συγκεκριμένες αντιδράσεις. Ακολουθούν τα τελικά φάσματα στις εικόνες 3.96 – 3.108. Οι περιοχές ολοκλήρωσης ορίζονται από τις κάθετες διακεκομμένες γραμμές



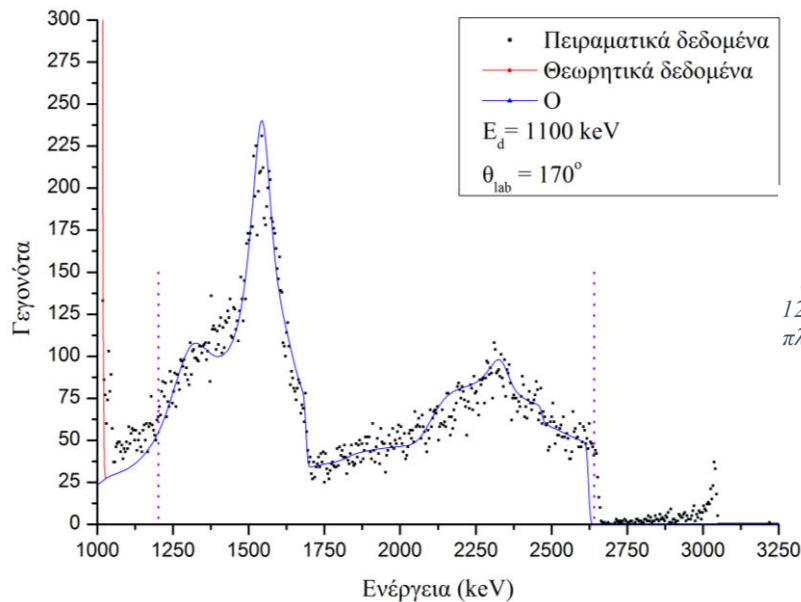
Εικόνα 3.96 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1200 keV και έχει πλάτος 1550 keV.



Εικόνα 3.97 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1200 keV και έχει πλάτος 1500 keV.



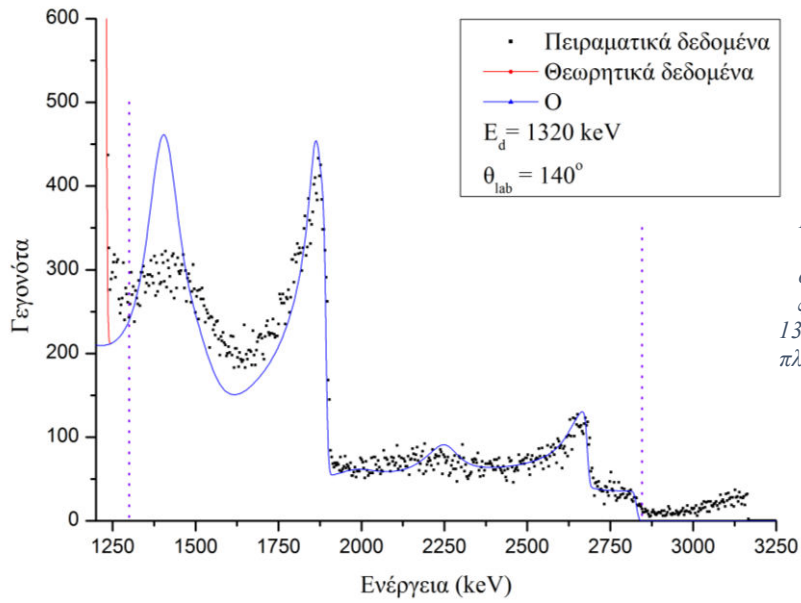
Εικόνα 3.98
Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1200 keV και έχει πλάτος 1455 keV.



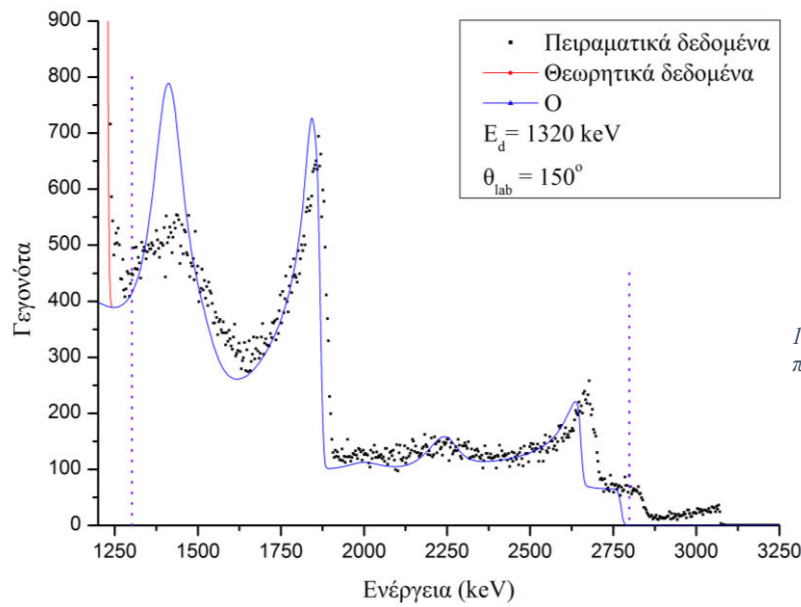
Εικόνα 3.99
Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1200 keV και έχει πλάτος 1440 keV.

Στα παραπάνω φάσματα έχουμε την διαφορική ενεργό διατομή τριών αντιδράσεων, και πιο συγκεκριμένα της $^{16}\text{O}(d,p_0)$, $^{16}\text{O}(d,p_1)$ και $^{16}\text{O}(d,a_0)$.

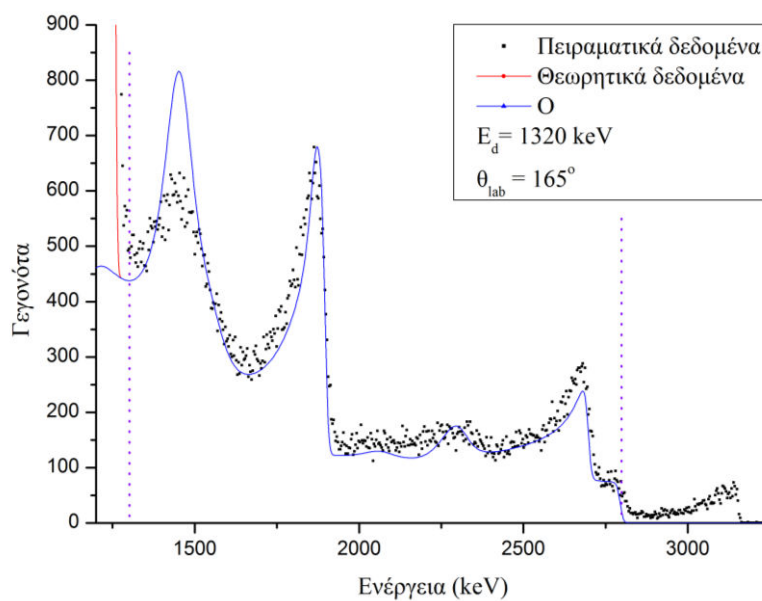
Η κορυφή που εμφανίζεται στα αριστερά του φάσματος οφείλεται και στις τρεις αντιδράσεις, μιας και στην ενέργεια αυτή παρουσιάζουν συντονισμό και οι τρεις αντιδράσεις όπως μπορούμε να δούμε και στην Εικόνα 2.8. Δυστυχώς δεν μπορούμε ξεχωρίσουμε τη συνεισφορά της κάθε αντίδρασης. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στη μικρότερη κορυφή που εμφανίζεται στα δεξιά του φάσματος.



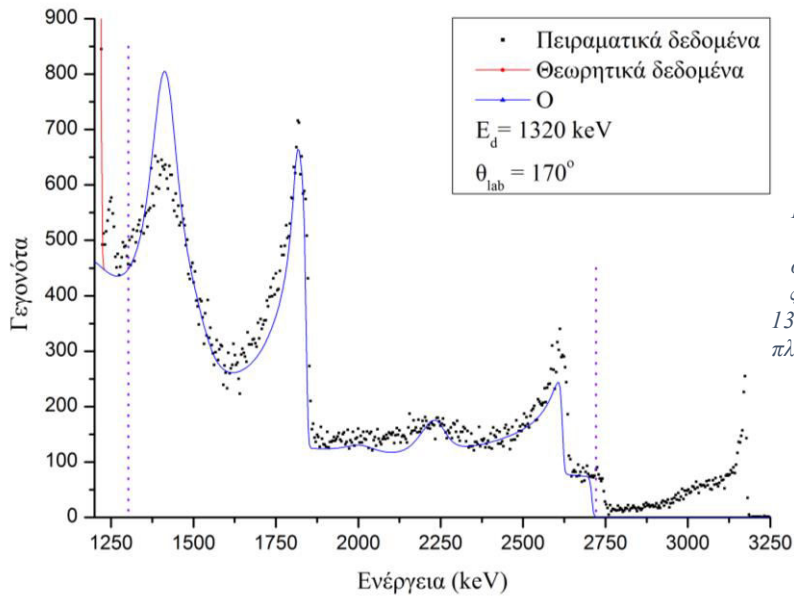
Εικόνα 3.100
 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1320 keV και έχει πλάτος 1547 keV.



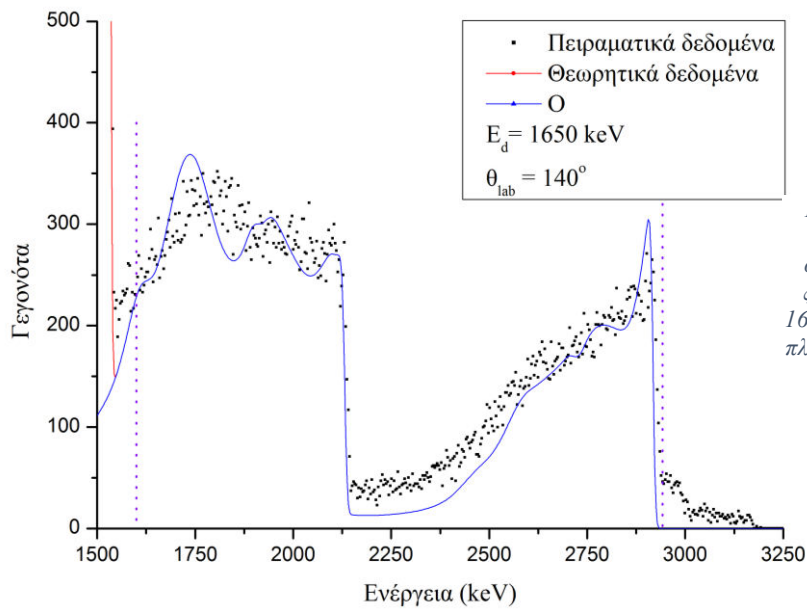
Εικόνα 3.101
 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1320 keV και έχει πλάτος 1498 keV.



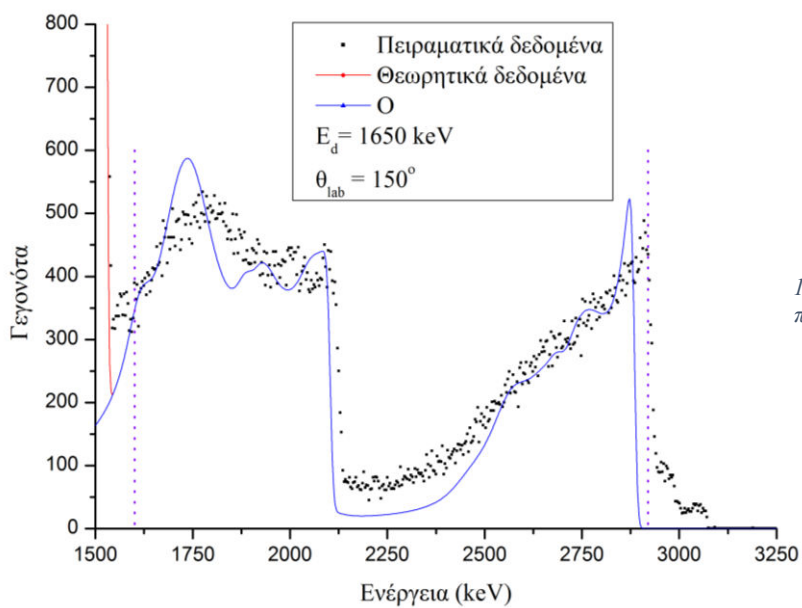
Εικόνα 3.102
 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1320 keV και έχει πλάτος 1490 keV.



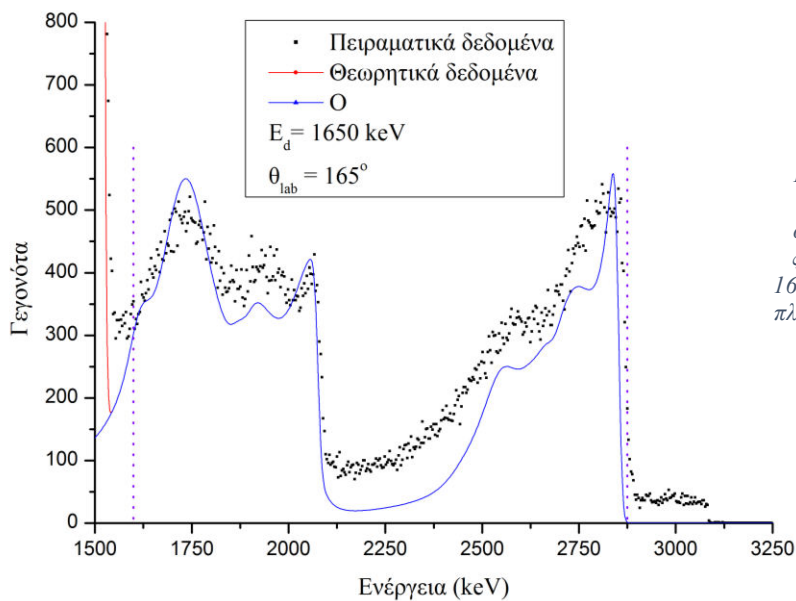
Εικόνα 3.103
 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1320 keV και έχει πλάτος 1420 keV.



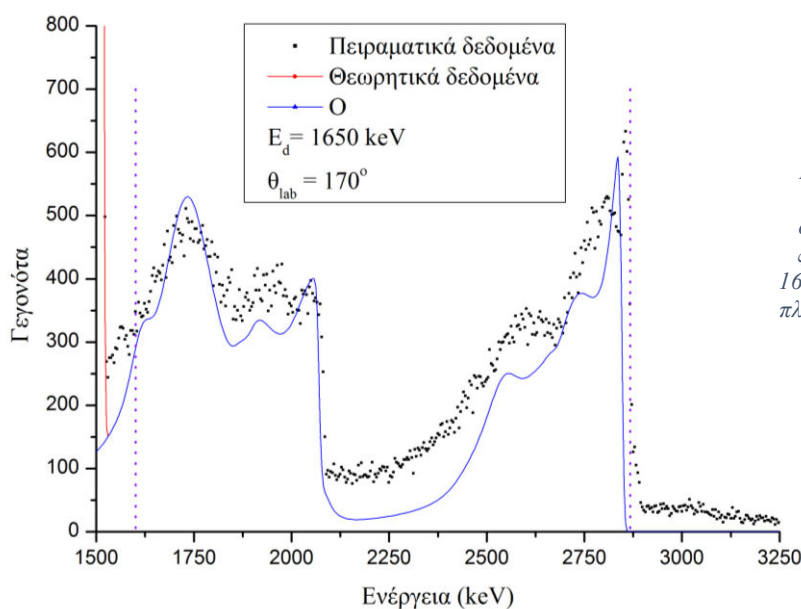
Εικόνα 3.104
 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1650 keV και έχει πλάτος 1340 keV.



Εικόνα 3.105
 Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1650 keV και έχει πλάτος 1320 keV.



Εικόνα 3.106
Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1650 keV και έχει πλάτος 1275 keV.



Εικόνα 3.107
Η περιοχή ολοκλήρωσης ξεκινά από τα 1650 keV και έχει πλάτος 1267 keV.

Συγκεντρωτικά έχουμε:

140°							
Ενεργειακή Βαθμολόγηση	Ενέργεια (keV)	Q*Ω	Ενέργεια Καναλιού	Κανάλια Ολοκλήρωσης	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
3.3400 keV/ch 11.000 offset	1100	$7.862 \cdot 10^{10}$ (220 - 260 ch)	1200 keV	356 - 820 1549.76 keV	19206	20061.4	-4.26%
3.3400 keV/ch 10.000 offset	1320	$2.651 \cdot 10^{11}$ (258 - 298 ch)	1300 keV	386 - 849 1546.42 keV	67450	67290.7	0.24%
3.3400 keV/ch 16.500 offset	1650	$1.805 \cdot 10^{11}$ (330 - 400 ch)	1600 keV	474 - 876 1342.68 keV	76099	70206.5	8.39%

150°							
Ενεργειακή Βαθμονόμηση	Ενέργεια (keV)	Q*Ω	Ενέργεια Καναλιού	Κανάλια Ολοκλήρωσης	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
3.3600 keV/ch -7.500 offset	1100	1.270*10 ¹¹ (220 - 255 ch)	1200 keV	359 - 806 1501.92 keV	31872	33391.8	-4.55%
3.3650 keV/ch -14.500 offset	1320	4.248*10 ¹¹ (259 - 289 ch)	1300 keV	391 - 836 1497.43 keV	112575	110055.5	2.29%
3.3650 keV/ch -14.500 offset	1650	2.906*10 ¹¹ (321 - 369 ch)	1600 keV	480 - 872 1319.08 keV	117873	104628.3	12.66%

165°							
Ενεργειακή Βαθμονόμηση	Ενέργεια (keV)	Q*Ω	Ενέργεια Καναλιού	Κανάλια Ολοκλήρωσης	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
3.2400 keV/ch 18.500 offset	1100	1.383*10 ¹¹ (215 - 265 ch)	1200 keV	365 - 814 1454.76 keV	38847	36594.8	6.15%
3.2350 keV/ch 17.500 offset	1320	4.514*10 ¹¹ (255 - 325 ch)	1300 keV	386 - 841 1489.425 keV	123627	119842.7	3.16%
3.2450 keV/ch 22.500 offset	1650	3.099*10 ¹¹ (315 - 395 ch)	1600 keV	486 - 879 1275.285 keV	121976	99599.4	22.47%

170°							
Ενεργειακή Βαθμονόμηση	Ενέργεια (keV)	Q*Ω	Ενέργεια Καναλιού	Κανάλια Ολοκλήρωσης	Πειραματικά Δεδομένα	Θεωρητικά Δεδομένα	Απόκλιση
3.8900 keV/ch 15.000 offset	1100	1.1206*10 ¹¹ (180 - 230 ch)	1200 keV	305 - 675 1439.3 keV	29416	29617.7	-0.68%
3.9000 keV/ch 11.000 offset	1320	3.678*10 ¹¹ (210 - 280 ch)	1300 keV	331 - 695 1419.6 keV	97959	93275.2	5.02%
3.9100 keV/ch 13.000 offset	1650	2.536*10 ¹¹ (264 - 340 ch)	1600 keV	406 - 730 1266.84 keV	99701	79317.5	25.70%

Παρατηρήσεις

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1) Όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι αδύνατον να βρούμε σωστά το ολοκλήρωμα για κάθε αντίδραση ξεχωριστά, επομένως τα συμπεράσματα που βγάζουμε αφορούν και τις τρεις αντιδράσεις σαν σύνολο.

2) Έχουμε αρκετά καλή συμφωνία στις χαμηλότερες ενέργειες που μετρήσαμε (1100 keV και 1320 keV), με την απόκλιση να μην ξεπερνά το 6.5 %. Βέβαια έχουμε υπερεκτίμηση της κορυφής που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια του Νιοβίου, στην οποία και οφείλεται αυτή η απόκλιση.

3) Στα 1650 keV η απόκλιση κυμαίνεται από ~ 9 % στις 140° έως 25 % στις 170°. Παρατηρούμε όμως, εκτός από τη διαφορά στα ολοκληρώματα, ότι δεν έχουμε ικανοποιητική ποιοτική συμφωνία στη μορφή των evaluated δεδομένων.

3.6 Αλουμίνιο – Άνθρακας

Όσον αφορά τους στόχους του αλουμινίου αλλά και του άνθρακα, δεν έγινε κάποια ανάλυση εφόσον διαπιστώθηκε από τις πρώτες κιόλας μετρήσεις ότι δεν θα μπορούσαμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα.

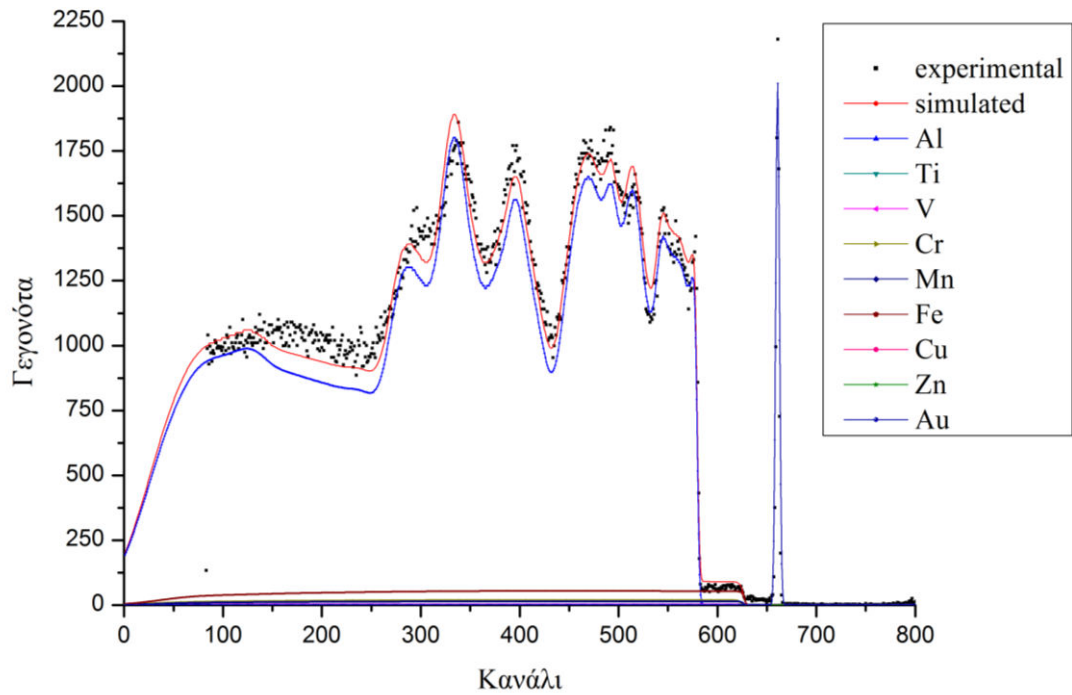
Αλουμίνιο

Στο αλουμίνιο, η αποτυχία μας έγκειται στην επιλογή εμπορικού αλουμινίου για στόχο, λόγω της έλλειψης στόχου αλουμινίου υψηλής καθαρότητας. Ο στόχος που επιλέξαμε περιείχε αρκετές προσμίξεις όπως μπορούμε να δούμε και στον παρακάτω πίνακα:

Στοιχείο	Σύσταση κατά βάρος	Σφάλμα
Al (Αλουμίνιο)	97.700%	0.590%
Fe (Σίδηρος)	1.250%	0.050%
Cr (Χρώμιο)	0.501%	0.015%
Mn (Μαγγάνιο)	0.351%	0.022%
Ti (Τιτάνιο)	0.072%	0.070%
V (Βανάδιο)	0.063%	0.070%
Cu (Χαλκός)	0.014%	0.003%
Zn (Ψευδάργυρος)	0.005%	0.001%

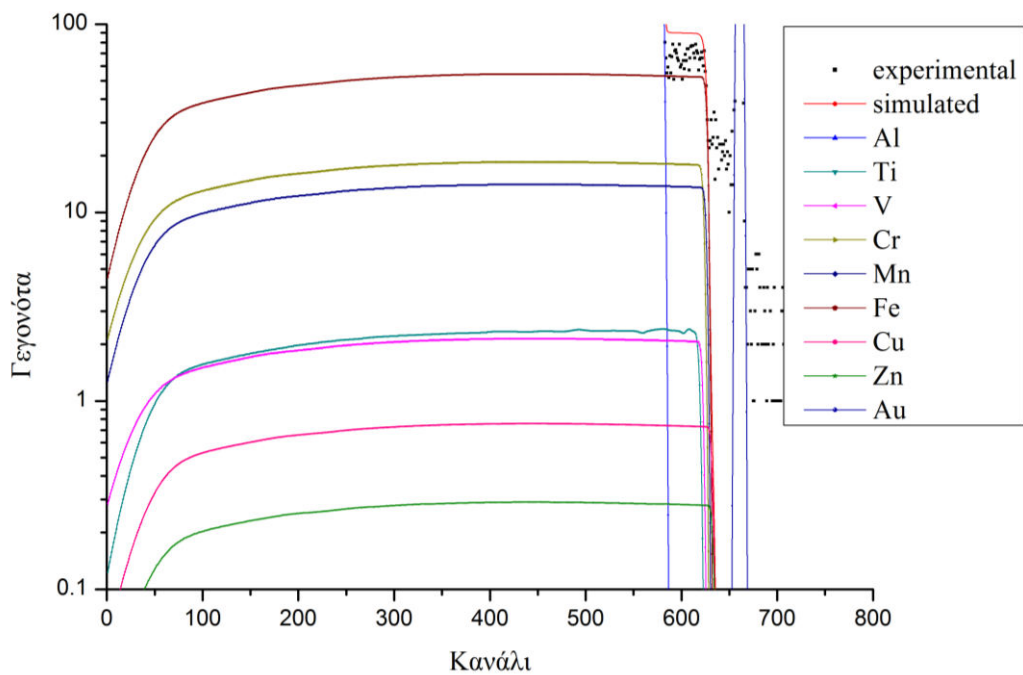
Για να βρεθεί η σύσταση του στόχου μας χρησιμοποιήσαμε τη διάταξη του XRF, η οποία βρίσκεται στο Ινστιτούτο που έλαβε χώρα το πείραμά μας. Δυστυχώς, η στοιχειομετρική ανάλυση του στόχου αυτού έγινε μετά το πέρας του πειράματος.

Έχοντας λοιπόν τόσα πολλά στοιχεία στο στόχο μας δεν μπορούμε να βγάλουμε ένα σωστό και ασφαλές συμπέρασμα για τις ενεργές διατομές του αλουμινίου, όπως μπορούμε να δούμε και στο παρακάτω φάσμα.



Εικόνα 3.108 Φάσμα αλουμινίου στις 170° για ενέργεια δέσμης 2450 keV

Για να αναδειχθεί η συνεισφορά των προσμίξεων που βρίσκονται στο στόχο μας, (Fe, Cr, Mn, Ti, V, Cu, Zn) παρουσιάζεται η Εικόνα 3.108 μεγεθυμένη στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.109 Μεγέθυνση της εικόνας 3.20 στην περιοχή γεγονότων χαμηλής στατιστικής

Παρότι θα μπορούσαμε να αφαιρέσουμε τα δεδομένα από τα βαριά αυτά στοιχεία, όπως θα κάναμε με τα γεγονότα υποβάθρου, και να αναλύσουμε στη συνέχεια τα φάσματα που πήραμε, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι ο στόχος δεν περιέχει και ελαφρά στοιχεία, (με ατομικό αριθμό μικρότερο από αυτόν του αλουμινίου), τα οποία δεν ανιχνεύονται σε μια μέτρηση με XRF. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε να μην αναλύσουμε τα φάσματα αυτά, διότι αυτή η αβεβαιότητα που θα είχαμε στα αποτελέσματά μας δεν είναι κάτι αποδεκτό σε ένα πείραμα benchmarking.

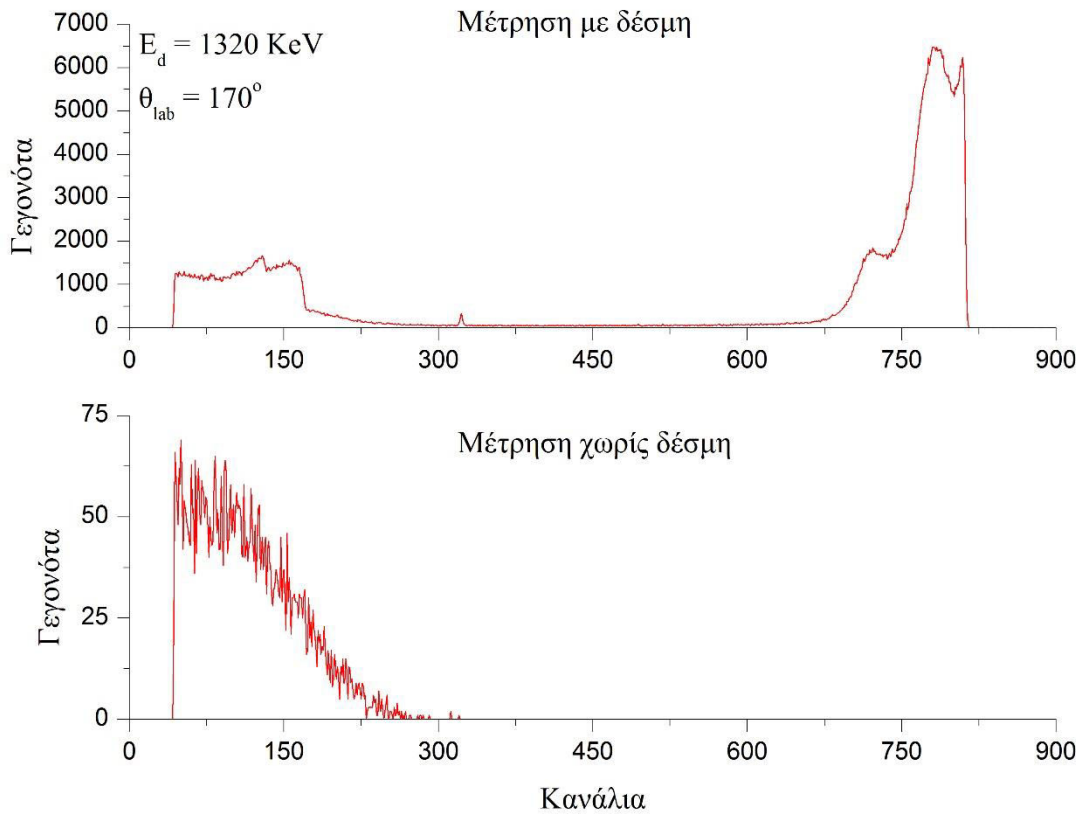
Άνθρακας

Το πρόβλημα που υπήρξε στις μετρήσεις, όσον αφορά τον άνθρακα, ήταν η ενεργοποίησή του.

Τα βήματα που ακολουθήσαμε κατά τη μέτρηση στον στόχο του άνθρακα ήταν τα ακόλουθα:

- ♦ Αρχικά αλλάξαμε την ενίσχυση στους ανιχνευτές έτσι ώστε να μπορούμε να βλέπουμε καθαρά την κορυφή που οφείλεται στην $d - d$ του ^{12}C στους τρεις από τους τέσσερις ανιχνευτές, ενώ στον τέταρτο θέλαμε να βλέπουμε καθαρά την $d - p$ για να προσδιορίσουμε έτσι το φορτίο. Αυτό που παρατηρήσαμε όμως ήταν ότι οι ανιχνευτές μας μετρούσαν χωρίς να έχουμε δέσμη, συνεπώς κάτι είχαμε ενεργοποιήσει μέσα στο θάλαμο.
- ♦ Για να είμαστε σίγουροι ότι αυτό δεν ήταν ένα τυχαίο γεγονός πήραμε φάσματα χωρίς δέσμη για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα των 155s, ανά τακτά χρονικά διαστήματα και μετά από κάθε μέτρηση με δέσμη. Για να σιγουρευτούμε όμως ότι η ενεργοποίηση οφείλεται στο στόχο του άνθρακα και όχι σε κάτι άλλο μέσα στο θάλαμο πήραμε τέτοιου είδους μετρήσεις στο αλουμίνιο, στο οξυγόνο αλλά και σε μια παστίλια γραφίτη που φτιάξαμε κατά τη διάρκεια του πειράματος για αυτό το σκοπό. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ενεργοποίηση πραγματοποιείται μόνο στους στόχους του άνθρακα και του γραφίτη, ενώ στο αλουμίνιο και το οξυγόνο δεν έχουμε καμία μέτρηση στους ανιχνευτές χωρίς δέσμη.

Στην γραφική παράσταση που ακολουθεί μπορούμε να δούμε μια μέτρηση του άνθρακα και την αμέσως επόμενη μέτρηση χωρίς δέσμη.



Εικόνα 3.110 Φάσμα μέτρησης του άνθρακα με και χωρίς δέσμη

Παρότι τα γεγονότα χωρίς δέσμη δεν είναι της τάξης μεγέθους των γεγονότων με δέσμη, δεν θα μπορούσαμε να αναλύσουμε αυτά τα δεδομένα διότι κατά τη διάρκεια της μέτρησης με δέσμη τα γεγονότα από την ενεργοποίηση του άνθρακα θα είναι σαφώς περισσότερα, επηρεάζοντας τα αποτελέσματά μας.

Πιο συγκεκριμένα, καθώς η δέσμη δευτερίων χτυπά τον στόχο του άνθρακα μπορούν να συμβούν δύο αντιδράσεις.

Η πρώτη αντίδραση είναι: $^{12}\text{C} + \text{d} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{p}$ με Q-value 2721 keV. Παρότι αυτή η αντίδραση έχει μεγάλη πιθανότητα να γίνει, ο ^{13}C είναι σταθερό ισότοπο. Επομένως δεν δικαιολογείται η μέτρηση χωρίς δέσμη [19].

Η δεύτερη αντίδραση είναι: $^{12}\text{C} + \text{d} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$ με Q-value 10272 keV. Το ^{13}N είναι ραδιενεργό ισότοπο αφού έχει χρόνο ημιζωής 9.965 λεπτά και αποδιεγίρεται με β^+ αποδιέγερση. Ο χρόνος ημιζωής του είναι αρκετός για να μπορούμε να το ανιχνεύσουμε αφού κλείσουμε τη δέσμη.

Εφόσον λοιπόν έχουμε ενεργοποίηση του άνθρακα, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για τα αποτελέσματά μας.

Κεφάλαιο 4 – Συμπεράσματα και Προοπτικές

Στην παρούσα εργασία έγινε συστηματική προσπάθεια για την αξιολόγηση των θεωρητικών δεδομένων που είναι βασισμένα στη θεωρία R-matrix και είναι προσαρμοσμένα σε προϋπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις (evaluated data). Πιο συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις για να ελεγχθούν οι διαφορικές ενεργές διατομές για την ελαστική σκέδαση πρωτονίων σε ^{nat}Si και ^{27}Al καθώς επίσης και για την ελαστική σκέδαση των δευτερίων σε ^{12}C και ^{16}O . Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν παχείς στόχοι γνωστής στοιχειομετρίας.

Για το πυρίτιο και το οξυγόνο έγινε μία αρκετά καλή δουλειά η οποία θα συμπληρώσει αποτελεσματικά την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Αντίθετα, για τον άνθρακα και το αλουμίνιο, δεν ήταν δυνατόν να γίνει μια αξιόπιστη αξιολόγηση των διαφορικών ενεργών διατομών. Αυτό συνέβη διότι η ενεργοποίηση του άνθρακα και οι προσμίξεις που υπήρχαν στο αλουμίνιο κατέστησαν τις μετρήσεις αναξιόπιστες.

Συνιστάται στο μέλλον να ξαναγίνουν μετρήσεις benchmarking, κυρίως στο αλουμίνιο, με στόχο υψηλής καθαρότητας. Για τον άνθρακα δεν υπάρχουν πολλές επιλογές, μιας και η ενεργοποίηση δεν θα μπορούσε να αποφευχθεί με κάποιον τρόπο.

Βιβλιογραφία

- [1] Handbook of Modern Ion Beam Analysis, Y. Wang, M. Nastasi, Materials Research Society, 2010
- [2] Measurements and evaluation of differential cross-sections for Ion Beam analysis, Gurbich, A.F., Abriola, D., Barradas, N.P., Ramos, A.R., Bogdanovic-Radovic, I., Chiari, M., Jeynes, C., Kokkoris, M., Mayer, M., Shi, L., Vickridge, I., Journal of the Korean Physical Society, Volume 59, Issue 23, August 2011, Pages 2010-2013
- [3] R-MATRIX THEORY By Erich Vogt, TRIUMF, Vancouver, Canada, 2004
- [4] Improving R-matrix estimates of astrophysical S-factors, Vogt, E., Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics, Volume 389, Issue 4, 26 December 1996, Pages 637-641
- [5] www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm
- [6] Accurate ion beam analysis in the presence of surface roughness, Molodtsov, S.L., Gurbich, A.F., Jeynes, C. Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 41, Issue 20, 21 October 2008, Article number 205303
- [7] Διπλωματική Εργασία: Έλεγχος αξιοπιστίας ενεργών διατομών ελαστικής σκέδασης πρωτονίων για την ανίχνευση ελαφρών στοιχείων, Καντρέ Καρίμ-Αλέξανδρος, dspace.lib.ntua.gr/dspace2/handle/123456789/41095, 2015
- [8] <http://sigmacalc.iate.obninsk.ru>, www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.html
- [9] SigmaCalc recent development and present status of the evaluated cross-sections for IBA, Gurbich, A.F., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 371, 15 March 2016, Pages 27-32
- [10] M. Mayer, SIMNRA User's Guide, Report IPP 9/113, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany, 1997
- [11] Benchmarking Spectroscopy, Chapters 2 and 3, W.-K. Chu, W. Mayer and M. -A. Nicolet, Academic Press, 1978
- [12] Cauldrons in the Cosmos, C Rolfs, W. S. Rodney, The University of Chicago Press, 1988
- [13] Η Πυρηνική Φυσική ως Εφαρμοσμένη Έρευνα, Κ.Α.Κάλφας, D.Phil
- [14] Evaluated differential cross-sections for IBA, Gurbich, A.F., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 268, Issue 11-12, June 2010, Pages 1703-1710
- [15] Evaluation of the $^{12}\text{C}(d, p_0)^{13}\text{C}$ reaction cross-section for energies and detection angles suitable for nuclear reaction analysis, Abriola, D., Gurbich, A.F., Kokkoris,

M., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 301, 2013, Pages 41-46

[16] Proton elastic scattering differential cross-sections for ^{12}C , Abriola, D., Gurbich, A.F., Kokkoris, M., Lagoyannis, A, Paneta, V., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 269, Issue 18, 15 September 2011, Pages 2011-2016

[17] Benchmarking experiments for the proton backscattering on ^{23}Na , ^{31}P and natS up to 3.5 MeV, Paneta, V., Colaux, J.L., Gurbich, A.F., Jeynes, C, Kokkoris, M., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 328, 1 June 2014, Pages 1-7

[18] Doctoral Dissertation, Study of Differential Cross Section Suitable for EBS and NRA, Valentina Paneta, NTUA 2015

[19] A detailed study of the $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$ reaction at detector angles between 135° and 170° , for the energy range $E_d, \text{lab} = 900\text{-}2000 \text{ keV}$ (Article), Kokkoris, M., Misaelides, P., Kossionides, S., Zarkadas, Ch., Lagoyannis, A., Vlastou, R., Papadopoulos, C.T., Kontos, A., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 249, Issue 1-2 SPEC. ISS., August 2006, Pages 77-80