

## Διάλεξη 7: Αλληλεπιδράσεις νετρονίων & πυρηνική σχάση

### Αλληλεπιδράσεις νετρονίων

Το νετρόνιο ως αφόρτιστο νουκλεόνιο παίζει σημαντικό ρόλο στην πυρηνική φυσική και στην κατανόηση των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων. Ο ρόλος του νετρονίου γίνεται ιδιαίτερα σημαντικός και στον τομέα των εφαρμογών για τον ίδιο ακριβώς λόγο.

Όπως γνωρίζουμε το **ελεύθερο νετρόνιο είναι ασταθές** με χρόνο ημιζωής 10 λεπτά.

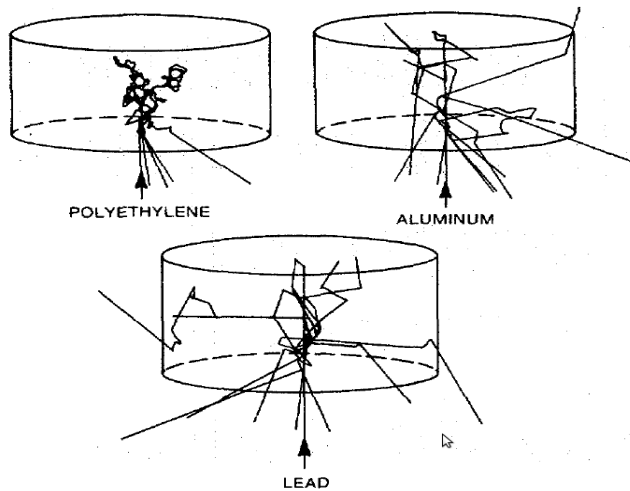
**Αποδιεγείρεται μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης** σε ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrino ηλεκτρονίου.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Η απουσία ηλεκτρικού φορτίου καθιστά το νετρόνιο ένα σωματίο με εξαιρετικά μεγάλη διαπερατότητα. Είναι εντυπωσιακό να αναφέρουμε ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή ενός νετρονίου με ενέργεια 1 MeV στον σίδηρο είναι 2.2 cm, ενώ αντίθετα, ένα πρωτόνιο με την ίδια ενέργεια σταματά σε μόλις 6 μm. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νετρόνιο λόγω της απουσίας ηλεκτρικού φορτίου δεν "αισθάνεται" σχεδόν καθόλου τις H/M αλληλεπιδράσεις οι οποίες και έχουν κυρίαρχο ρόλο στην ανάσχεση της ενέργειας του πρωτονίου. Έτσι καθώς το νετρόνιο κινείται μέσα στην ύλη χάνει διαδοχικά την ενέργεια του μέσα από αλληλάλληλες συγκρούσεις με αποτέλεσμα μετά από ικανό χρονικό διάστημα να θερμοποιηθεί. Δηλαδή η ενέργεια του να εξισωθεί με την ενέργεια  $E = (3/2)kT$ , όπου k η σταθερά Boltzmann.

Όταν συμβεί αυτό η ενέργεια του νετρονίου έχει μειωθεί αρκετά οπότε και η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μια αντίδραση σύλληψης νετρονίου αυξάνει. Και κάπως έτσι συνήθως τελειώνει το ταξίδι ενός νετρονίου εντός ενός υλικού. Η εικόνα δηλαδή είναι τελείως διαφορετική από αυτή του πρωτονίου όπου λόγω του ηλεκτρικού φορτίου το πρωτόνιο αλληλεπιδρά με συνεχή τρόπο με το νέφος ηλεκτρονίων των ατόμων με αποτέλεσμα την συνεχή και εντατική απώλεια ενέργειας.

Η διαδικασία επιβράδυνσης του νετρονίου γίνεται πιο αποτελεσματική όσο η μάζα των πυρήνων του υλικού εντός του οποίου ταξιδεύει το νετρόνιο πλησιάζει την δική του μάζα. Αυτό συμβαίνει διότι η αρχή διατήρησης της ενέργειας και της ορμής επιβάλλουν ότι σε μια κρούση η ενέργεια που μεταφέρεται από το ένα σώμα στο άλλο αυξάνει όσο η διαφορά των μαζών γίνεται μικρότερη. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα αυτού του κανόνα είναι οι σφαίρες του μπιλιάρδου όπου η κινούμενη σφαίρα σταματά πλήρως όταν έχουμε κατά μέτωπο κρούση με μία άλλη σφαίρα της ίδιας μάζας και η κινητική ενέργεια μεταφέρεται εξολοκλήρου στην προηγούμενως ακίνητη σφαίρα. Για τον λόγο αυτό **υλικά πλούσια σε H όπου έχει παρόμοια μάζα με το νετρόνιο θεωρούνται άριστοι επιβραδυντές των νετρονίων**. Να λοιπόν γιατί οι ποιο πολλοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν το νερό ως μέσο επιβράδυνσης των νετρονίων

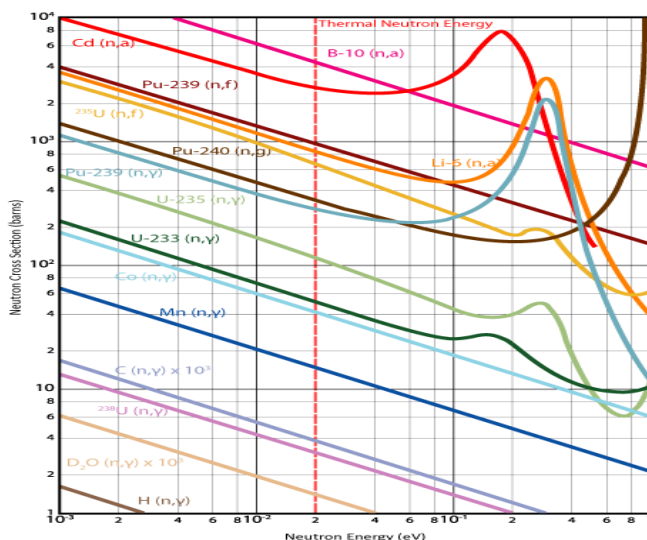


Σχήμα 1: Η τροχιά δέσμης νετρονίων σε τρία διαφορετικά υλικά.

Το ίδιο φαίνεται και στο πιο πάνω σχήμα όπου καταγράφεται η τροχιά για ένα νετρόνιο 1 MeV το οποίο προσπίπτει σε έναν κύλινδρο μολύβδου, αλουμινίου, και πολυαιθυλενίου.

**Η αντίδραση σύλληψης του νετρονίου αυξάνει γενικά όσο μειώνεται η ενεργεία του.**

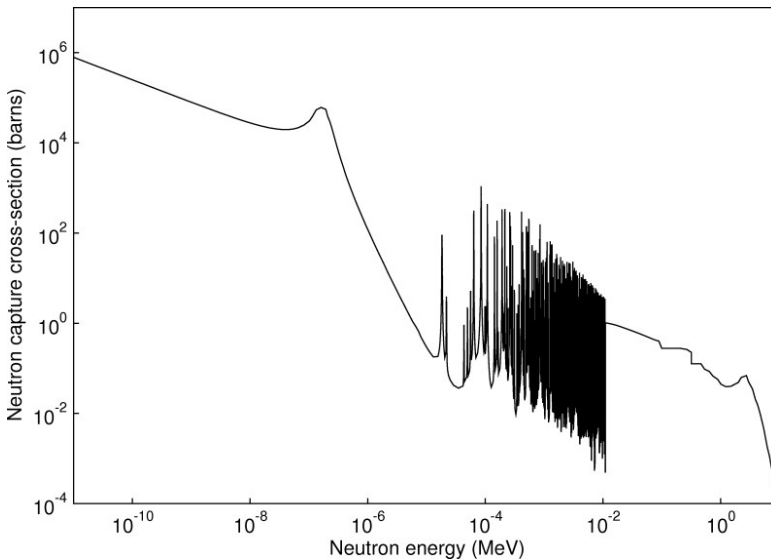
Αυτό με ποιοτικά – κλασικά επιχειρήματα μπορούμε να το καταλάβουμε ως εξής. Το νετρόνιο ως ουδέτερο σωματίο δεν χρειάζεται υψηλή ενέργεια για να πλησιάσει έναν πυρήνα – δεν νιώθει δηλαδή την άπωση Coulomb. Από την άλλη, όσο πιο μικρή είναι η ταχύτητά του τόσο περισσότερο χρόνο περνά ώσπου να διασχίσει την γειτονιά ενός πυρήνα με αποτέλεσμα να αυξάνει η πιθανότητα σύλληψης του.



Σχήμα 2: Ενεργές διατομές αλληλεπίδρασης νετρονίων με διάφορα υλικά-στόχους.

Όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα γενικά η ενεργός διατομή σύλληψης ή αλληλεπίδρασης ενός νετρονίου αυξάνει όσο μικρότερη είναι η ενέργεια αλλά υπάρχουν υλικά όπως το Cd (κόκκινο) και το B-10(ροζ) για τα οποία η ενεργός διατομή είναι τάξεις

μεγέθους μεγαλύτερη από άλλα. (Στην περίπτωση του Cd το σχήμα αναφέρει  $(n,\alpha)$  αλλά αυτό είναι λάθος. Προφανώς εννοεί  $(n,t)$  ή  $(n,\gamma)$ )  
Αυτά λοιπόν τα υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως σε διατάξεις και σε πειραματικές εγκαταστάσεις προκειμένου να απορροφήσουν τα θερμοποιημένα νετρόνια.



Σχήμα 3: Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταβολής της ενεργού διατομής σύλληψης νετρονίου σε συνάρτηση της ενέργειας του νετρονίου ( $n+Cd$ ).

Στο σχήμα αυτό βλέπουμε ότι η ενεργός διατομή σύλληψης νετρονίου για το Cd αυξάνει μέχρι και 5 τάξεις μεγέθους καθώς η ενέργεια του μειώνεται.

## Παράδειγμα

Να προσδιοριστεί η ενεργός διατομή σύλληψης νετρονίου όταν ο ρυθμός αντιδράσεων σε ένα φύλλο αλουμινίου πάχους 0.3 mm και επιφάνειας  $1\text{ cm}^2$  είναι  $R=1.81 \cdot 10^7$  αντιδράσεις/s. Η ροή των νετρονίων που προσπίπτουν στο φύλλο αλουμινίου είναι  $5 \times 10^{12}$  n/(s  $\text{cm}^2$ )

Λύση:

Πυκνότητα ατόμων στο αλουμίνιο :

$$n = \frac{2.7 \text{ gr} \cdot \left(\frac{N_A}{27 \text{ gr}}\right)}{1 \text{ cm}^3} = \frac{2.7 \text{ gr} \cdot \left(\frac{6.02 \cdot 10^{23}}{27 \text{ gr}}\right)}{1 \text{ cm}^3} = 6.02 \cdot 10^{22} \text{ άτομα / cm}^3$$

$$I = 1 \text{ cm}^2 \cdot 5 \cdot 10^{12} \text{ n / (cm}^2 \text{ s)} = 5 \cdot 10^{12} \text{ n / s}$$

Αφού μετατρέψουμε όλες τις μονάδες σε cm έχουμε:

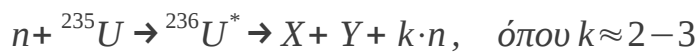
$$\sigma = \frac{R}{d \cdot n \cdot I}$$

$$\sigma = \frac{1.81 \cdot 10^7 n(\text{που συλλαμβάνονται})/s}{3 \cdot 10^{-2}(\text{cm}) \cdot 6.02 \cdot 10^{22}(\text{πυρήνες/cm}^3) \cdot 5 \cdot 10^{12}(\text{n/s})}$$

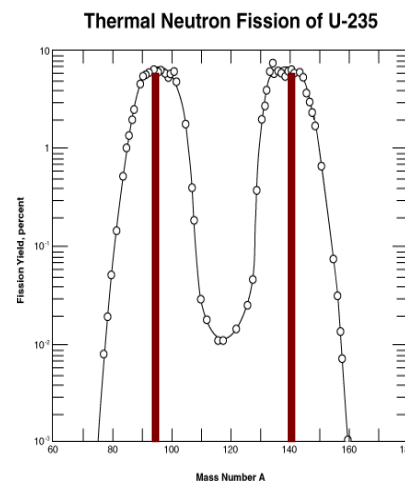
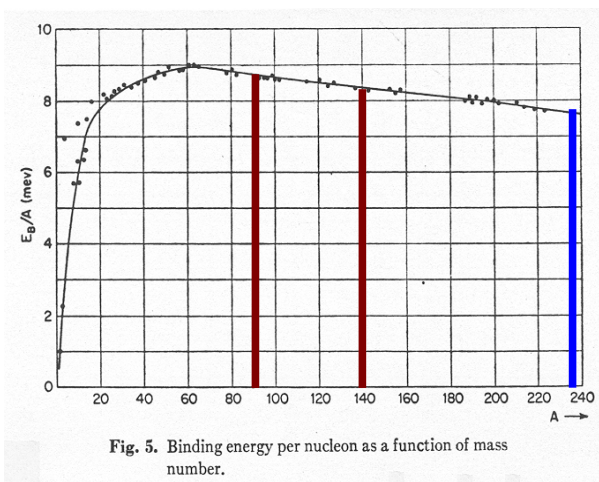
$$\sigma = 2 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2 = 2 \text{ mb}$$

## Πυρηνική σχάση

**Πυρηνική σχάση** συμβαίνει όταν ένας βαρύς πυρήνας όπως το  $^{235}\text{U}$  **διασπάται σε δύο μικρότερους πυρήνες**. Πρόκειται για μια εξώθερμη διαδικασία δεδομένου ότι το άθροισμα των μαζών των πυρήνων που παράγονται είναι κατά πολύ μικρότερο από το πατρικό πυρήνα.



Στην πιο πάνω εξίσωση παρουσιάζονται τα βασικά στάδια μιας αντίδρασης σχάσης. Αρχικά ένα θερμικό νετρόνιο συλλαμβάνεται από έναν πυρήνα  $^{235}\text{U}$  και σχηματίζεται ένας πυρήνας  $^{236}\text{U}$  ο οποίος μάλιστα βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση. Τότε ο πυρήνας ξεκινά να παραμορφώνεται έως ότου διασπαστεί σε δύο πυρήνες. Οι παραγόμενοι πυρήνες είναι όμως πολύ πλούσιοι σε νετρόνια οπότε με την σειρά τους εκπέμπουν 2 με 3 νετρόνια. Συγκεκριμένα ο μέσος αριθμός νετρονίων για κάθε γεγονός σχάσης της παραπάνω εξίσωσης είναι  $\nu = 2.42$ . Αυτό που ακόμα και σήμερα θεωρείται ιδιαίτερα εντυπωσιακό είναι η άνιση κατανομή μαζών με πιο πιθανή την περίπτωση το ένα θραύσμα να έχει μάζα  $A=95$  και το άλλο  $A=140$ . Αυτή η **άνιση κατανομή μαζών** πρόσφατα έγινε κατανοητή μέσα από ενδελεχείς υπολογισμούς όπου η δομή των παραγόμενων πυρήνων και η διάταξη των φλοιών λήφθηκε υπόψη.



Σχήμα 4: Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για τις πιθανότερες μάζες θραυσμάτων σχάσης του  $^{235}\text{U}$

Έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε πως και γιατί παράγεται τόσο μεγάλο ποσό ενέργειας κατά την διαδικασία πυρηνικής σχάσης.

Η μάζα ηρεμίας ενός πυρήνα είναι:

$$M({}_Z^A X_N) = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - E_b$$

Από την μπλε γραμμή στο πιο πάνω σχήμα βλέπουμε ότι η **ενέργεια σύνδεσης για ένα πυρήνα στην περιοχή A=235 είναι 7.6 MeV/νουκλεόνιο**.

Στην περιοχή της μάζας **A=140** (δεξιά κόκκινη γραμμή) η **ενέργεια σύνδεσης είναι: 8.4 MeV/νουκλεόνιο** και η αντίστοιχη τιμή για **A=95 είναι 8.6 MeV/νουκλεόνιο**. Για τα δυο προϊόντα μπορούμε να πάρουμε μια μέση τιμή ενέργειας σύνδεσης τα 8.5 MeV/νουκλεόνιο.

Για να υπολογίσουμε προσεγγιστικά την παραγόμενη ενέργεια Q θα πρέπει α αφαιρέσουμε από την αρχική μάζα του  ${}^{235}\text{U}$  το άθροισμα των μαζών των προϊόντων.

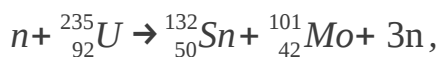
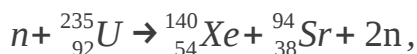
$$Q = M({}_{92}^{235}\text{U}_{143}) - M({}^{140}\text{X}) - M({}^{95}\text{Y})$$

$$Q = -E_b({}^{235}\text{U}) + E_b({}^{140}\text{X}) + E_b({}^{95}\text{Y}) = -235u \cdot 7.6 \text{ MeV}/u + (140 + 95)u \cdot 8.5 \text{ MeV}/u \\ \Rightarrow Q = 235 \cdot (8.5 - 7.6) \text{ MeV}$$

$$Q \approx 210 \text{ MeV}$$

## Παράδειγματα

1) Υπολογισμός αριθμού νετρονίων σε διάφορες περιπτώσεις σχάσης επαγόμενης από νετρόνια.



2) Παραγωγή ενέργειας από την σχάση  $1000 \text{ kg } ^{235}\text{U}$ .

Λύση:

Άτομα  $^{235}\text{U}$ :

$$N(^{235}\text{U}) = \frac{10^6 \text{ gr} \cdot N_A}{235 \text{ gr}} = 2.56 \cdot 10^{27} \text{ πυρήνες } ^{235}\text{U}$$

Ολική παραγόμενη ενέργεια:

$$E = 2.56 \cdot 10^{27} \cdot 210 \text{ MeV} = 5.4 \cdot 10^{29} \text{ MeV} = 5.4 \cdot 10^{29} \text{ MeV} \cdot 4.45 \cdot 10^{-20} \text{ kWh/MeV}$$

$$E = 2.4 \cdot 10^{10} \text{ kWh}$$

Δηλαδή ένας τόνος ουρανίου αρκεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες μιας πόλης μισού εκατομμυρίων κατοίκων για έναν ολόκληρο χρόνο!!!