

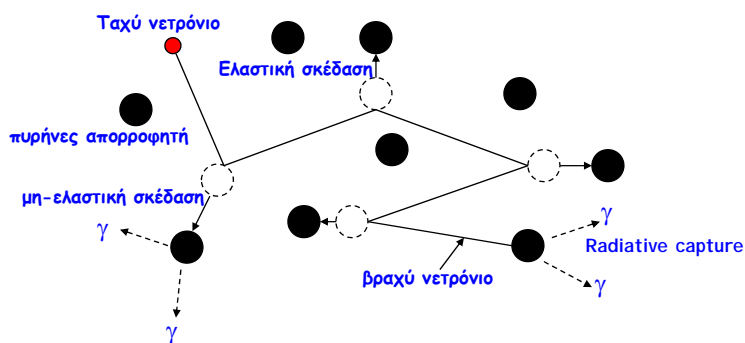
Νετρόνια

- Τα νετρόνια (n) είναι αφόρτιστα σωματίδια, απαιτείται πυρηνική αλλ/ση ώστε να μεταφερθεί ενέργεια στο υλικό (απορροφητή).
- Η πιθανότητα αλλ/σης (ενεργός διατομή, σ) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τύπο των πυρήνων του υλικού και την ενέργεια των νετρονίων.
- Γενικώς, η ενεργός διατομή, σ , είναι πολύ μικρή και τα νετρόνια μπορούν να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις (αρκετά cm) χωρίς αλλ/ση μέσα στην ύλη.
- Πάντως τα νετρόνια μπορούν να:
 1. **σκεδαζονται - μεταφέρουν ενέργεια στο σκεδαζόμενο (recoil nuclei) πυρήνα,**
 2. **να απορροφηθούν με τη βοήθεια διαφόρων πιθανών αντιδράσεων.**

Γ. Τσιπολίτης

Νετρόνια

- Ταχεία (μεγάλης ενέργειας) νετρόνια (fast neutrons):
- Τα ταχεία νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν ελαστικές σκεδάσεις, μη-ελαστικές σκεδάσεις και απορρόφηση, όπου η σύντηξη (fusion) είναι η κύρια μορφή απορρόφησης.



Γ. Τσιπολίτης

Σκέδαση Νετρονίων

- Ελαστική σκέδαση:

Ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας των νετρονίων μεταφέρεται στον πυρήνα, ειδικά στην περίπτωση που έχουμε υλικό από ελαφρύς πυρήνες (μικρό A).

- Μη-ελαστική σκέδαση:

Ο σκεδαζόμενος πυρήνας διεγείρεται και μετέπειτα αποδιεγείρεται συνήθως με την ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων, γ .

Τα νετρόνια μετά από τη μη-ελαστική σκέδαση έχουν μικρότερη ενέργεια και συνήθως υπόκεινται μεγάλες αλλαγές στην κατεύθυνση τους.

Γ. Τσιπολίτης

Απορρόφηση Νετρονίων (Capture)

- Σύντηξη των νετρονίων με τους πυρήνες του στόχου (απορροφητή).
- Ο παραγόμενος σύνθετος πυρήνας διεγείρεται σε μια ενέργεια που είναι περίπου ίση:
 - ~ **αρχική Κινητική Ενέργεια νετρονίου + Binding Energy (BE~8 MeV).**
- Αυτή η επιπρόσθετη ενέργεια του πυρήνα εμφανίζεται αργότερα ως προϊόντα αντίδρασης (ακτίνες γ , φορτισμένα σωματίδια και νετρόνια).
- Αν η πιθανότητα απορρόφησης \ll πιθανότητα σκέδασης, τότε τα νετρόνια υπόκεινται πολλαπλές σκεδάσεις με αποτέλεσμα σταδιακά να χάνουν την ενέργεια τους. Αυτή η διαδικασία «καθυστέρησης» (moderation) τα οδηγεί σε θερμική ισορροπία. Αυτά τα νετρόνια ονομάζονται **Θερμικά νετρόνια**: Η ενέργεια των θερμικών νετρονίων σε κανονική θερμοκρασία (300 °K) είναι περίπου $E \sim kT = 0.025$ eV.

Γ. Τσιπολίτης

Αλληλεπιδράσεις Νετρονίων

- **Ελαστική σκέδαση** με πυρήνες απορροφητή (στόχου) $A(n,n)A$: βασικός μηχανισμός απώλειας ενέργειας νετρονίων τάξης 1 MeV .
- **Μη-ελαστική σκέδαση** πυρήνες απορροφητή (στόχου) $A(n,n')A^*$, $A(n,2n')B$, κλπ: βασικός μηχανισμός απώλειας ενέργειας νετρονίων $> 1 \text{ MeV}$.
- **Radiative neutron capture** $X(n,\gamma)X$:

$$n + {}^A_Z X \rightarrow \gamma + {}^{A+1}_Z X, \quad \sigma_n^{\text{capt}} \propto \frac{1}{v}, \quad v = \text{ταχύτητα νετρονίου}$$
- **Πυρηνικές αντιδράσεις**: (n,p) , (n,n') , (n,α) , (n,d) , $(n,n'p)$, κλπ. όπου έχουμε σύλληψη νετρονίου και εκπομπή φορτισμένου σωματιδίου: $eV < E_n < keV$.
- **Πυρηνική σχάση (Fission)**: Θερμικές ενέργειες.

$$n + (Z,A) \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + n + n + \dots$$
- **Παραγωγή αδρονικού πίδακα**: υψηλές ενέργειες $E_n > 100 \text{ MeV}$.

Γ. Τσιπολίτης

Κατηγορίες Νετρονίων

- **Υψηλής ενέργειας**: $E_n > 100 \text{ MeV}$.
- **Ταχέα νετρόνια**: $100 \text{ keV} < E_n < 100 \text{ MeV}$
- **Επιθερμικά νετρόνια**: $0.1 \text{ eV} < E_n < 100 \text{ keV}$
- **Θερμικά νετρόνια**: $E_n \sim kT \sim 1/40 \text{ eV}$
- **Ψυχρά ή Υπερ-ψυχρα**: $E_n \sim \text{meV}$ ή μeV

Η ολική πιθανότητα αλληλεπίδρασης νετρονίων είναι:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{capt}} + \dots$$

πολλαπλασιάζουμε με την πυκνότητα των ατόμων \rightarrow μέσο μήκος ελεύθερης διαδρομής (mean free path length):

$$N = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad \frac{1}{\lambda} = N \sigma_{\text{tot}} = \frac{N_A \rho}{A} \sigma_{\text{tot}}$$

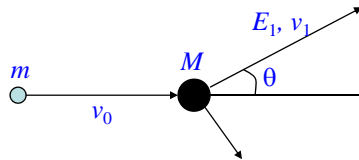
Εξασθένηση νετρονίων σε πάχος x \rightarrow

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x \exp(-x/\lambda) dx}{\int_0^{\infty} \exp(-x/\lambda) dx}$$

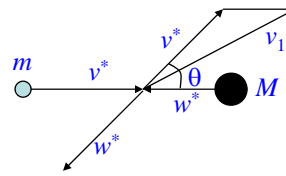
Γ. Τσιπολίτης

Νετρόνια

- Καθυστέρηση ταχέων νετρονίων → **moderation**, πολύ σημαντική διαδικασία για την πυρηνική φυσική και τεχνολογία. Νετρόνιο εισέρχεται στην ύλη και σκεδάζεται όπισθεν (**μη-ελαστική**) πρόσθια (**ελαστική**) χάνοντας ενέργεια μέχρι την θερμική ισορροπία με τα γειτονικά άτομα, οπότε συλλαμβάνεται από κάποιο πυρήνα.



σύστημα εργαστηρίου



σύστημα κέντρου μάζας (CM)

$$m v_0 = (m + M) V_{cm} \quad \text{διατήρηση ορμής}$$

$$v^* = v_0 - V_{cm} = M v_0 / (m + M)$$

$$M/m = A \quad !!$$

Γ. Τσιπολίτης

Νετρόνια

- Θεώρημα των συνημίτονων των v^* , v_1 και V_{cm} θα έχουμε:

$$v_1^2 = (v^*)^2 + (V_{cm})^2 + 2 v^* V_{cm} \cos \theta$$

$$v_1^2(\max) = (v^* + V_{cm})^2 = v_0^2 \quad (\theta = 0)$$

$$v_1^2(\min) = (v^* - V_{cm})^2 = (M - m)^2 v_0^2 / (M + m)^2 = \alpha v_0^2 \quad (\theta = 180^\circ)$$

όπου $\alpha = (M - m)^2 / (M + m)^2$

- Ενέργειες σκέδασης είναι:

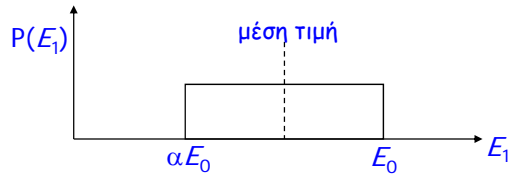
$$E_1(\max) = \frac{1}{2} m v_0^2 = E_0$$

$$E_1(\min) = \alpha E_0 \quad [= 0 \text{ for } M = m] \text{ (σκέδαση με πρωτόνιο, και επομένως}$$

έχουμε καθυστέρηση νετρονίων πιο αποδοτική με πρωτόνια ή ελαφρούς πυρήνες, για παράδειγμα: Νερό, παραφίνη, κ.λ.π.)

Γ. Τσιπολίτης

Νετρόνια



Μέση τιμή: $\bar{E}_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha)E_0 \Rightarrow \bar{E}_1 = \frac{1}{2}E_0$ for $M = m$

- Επόμενες n σκεδάσεις: $\bar{E}_n = E_0 \times \left(\frac{\bar{E}_1}{E_0}\right)^n$
- Εκθετική μείωση της ενέργειας E_n vs $n \Rightarrow$ γραμμική σε λογαριθμική κλίμακα
- Κατανομή Condon-Breit για n σκεδάσεις: $\frac{dP(E_n)}{dE} = \frac{1}{E_0(n-1)!} \left(\ln \frac{E_0}{E}\right)^{n-1}$

Γ. Τσιπολίτης

Νετρόνια

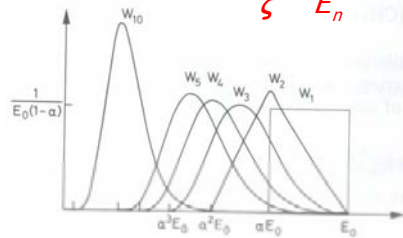
- Καλύτερα να υπολογίσουμε τη μέση μείωση του **λογαρίθμου (ενέργειας)** σε μια σκέδαση \rightarrow *logarithmic energy decrement*

$$\xi = \overline{\ln(E_0/E_1)} = 1 + \frac{(M-m)^2}{2Mm} \ln\left(\frac{M-m}{M+m}\right)$$

Για σκέδαση από πρωτόνια $M=m \rightarrow \xi=1$

Μετά από n σκεδάσεις $\overline{\ln E_n} = \ln E_0 - n\xi \Rightarrow n = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_0}{E_n}$

για $M=A < 6 \rightarrow \xi = \frac{2}{A} - \frac{4}{3A^2}$



Για σκέδαση από πρωτόνια νετρόνια αρχικής ενέργειας $E=2$ MeV Θερμοποιούνται ($E=0.025$ MeV) μετά από 18 σκεδάσεις

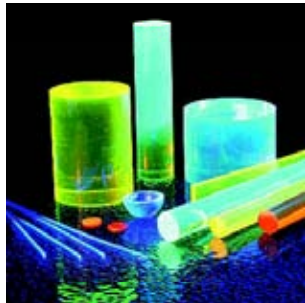
Γ. Τσιπολίτης

Θωράκιση Νετρονίων

- **Θερμοποίηση νετρονίων:**
Υλικά πλούσια σε πρωτόνια H (Νερό, παραφίνη-polythene)
- **Θωράκιση θερμικών νετρονίων:**
Μπετόν (Concrete)
Φύλλα Καδμίου (Cadmium sheet) (μεγάλη απορρόφηση στις χαμηλές ενέργειες)

Γ. Τσιπολίτης

Σπινθηριστές



Γ. Τσιπολίτης

Σπινθηριστές

Η λειτουργία των σπινθηριστών στηρίζεται στην ιδιότητα ορισμένων υλικών φωτεινότητας (luminescence) όταν εκτεθούν σε κάποια μορφή ενέργειας (φως, θερμότητα, ραδιενέργεια) να απορροφηθούν και να επανεκπέμπουν την ενέργεια υπό μορφή ορατών φωτονίων.

- Αν επανεκπομπή ενέργειας άμεσα (10^{-8} s) → φθορισμός (fluorescence)
- Αν καθυστέρηση επανεκπομπής → φωσφορισμός (phosphorescence)

Η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας επανεκπομπής περιγράφεται από:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d}$$

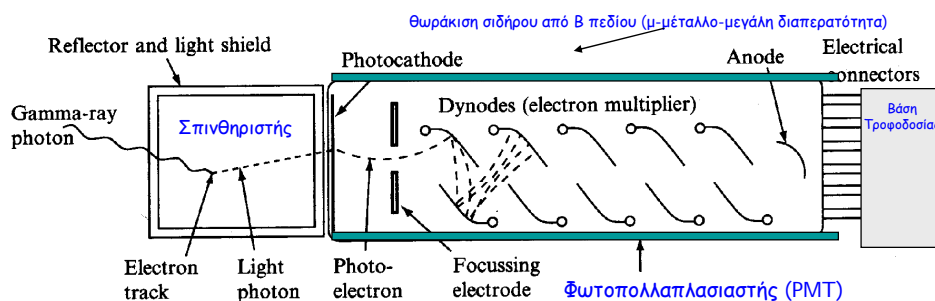
N = αριθμός φωτονίων που εκπέμπονται σε χρόνο t

N_0 = ολικός αριθμός εκπεμπομένων φωτονίων

τ_d = σταθερά αυτοδιέγερσης, αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για την εκπομπή $1 - e^{-1} = 63\%$ φωτονίων.

Γ. Τσιπολίτης

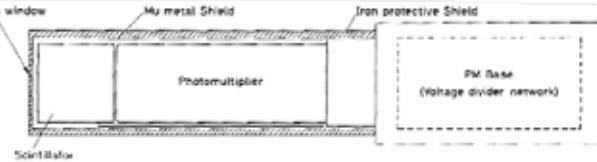
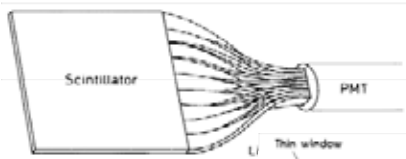
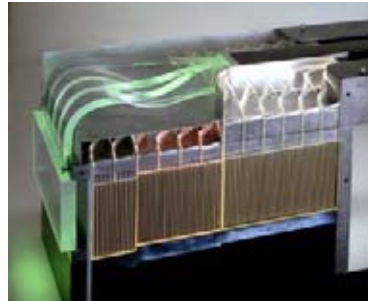
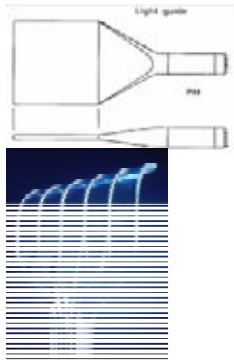
Σπινθηριστές



- Ακτινοβολία (εδώ, ακτίνες-γ) εναποθέτουν ενέργεια στο σπινθηριστή, προκαλούν μια περιοχή διέγερσης.
- Η αποδιέγερση δημιουργεί φωτόνια, τα οποία αφού κτυπούν τη φωτο-κάθοδο του ΦΤ δημιουργούν φωτο-ηλεκτρόνια.
- Τα φωτο-ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται και δημιουργούν ένα παλμό ρεύματος στην άνοδο.

Γ. Τσιπολίτης

Σπινθηριστές

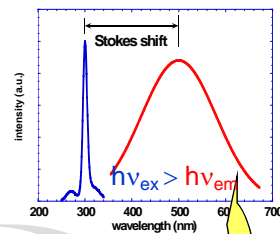


Γ. Τσιπολίτης

Σπινθηριστές

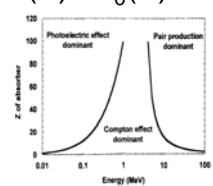
Σπινθηριστής + ΦΤ+ΒΤ = ανιχνευτής

Πως δουλεύει;

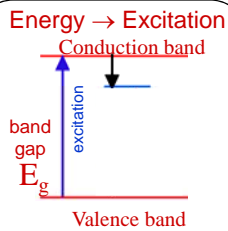


απώλεια ενέργειας e.g. γ

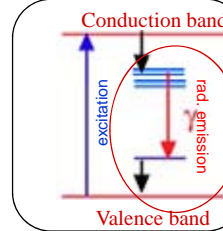
$$I(E) = I_0(E)e^{-\mu x}$$



μετατροπή ενέργειας



εκπομπή



Γ. Τσιπολίτης

Σπινθηριστές

- Τα κατάλληλα υλικά σπινθηρισμού καλύπτουν τις παρακάτω απαιτήσεις:
- Υψηλή απόδοση μετατροπής της διεγείρουσας ενέργειας σε ακτινοβολία φθορισμού.
- Διαφάνεια στο ορατό φως.
- Εκπομπή του ορατού φωτός σε φασματική περιοχή που αντιστοιχεί στην περιοχή φασματικής απόκρισης του ΦΤ.
- Μικρή σταθερά αποδιέγερσης.
- Χρησιμοποιούνται 6 τύποι υλικά:
 - Οργανικοί κρύσταλλοι
 - Οργανικά υγρά
 - Πλαστικά υλικά
 - Ανόργανοι κρύσταλλοι
 - Αέρια
 - Γυαλιά

Γ. Τσιπολίτης