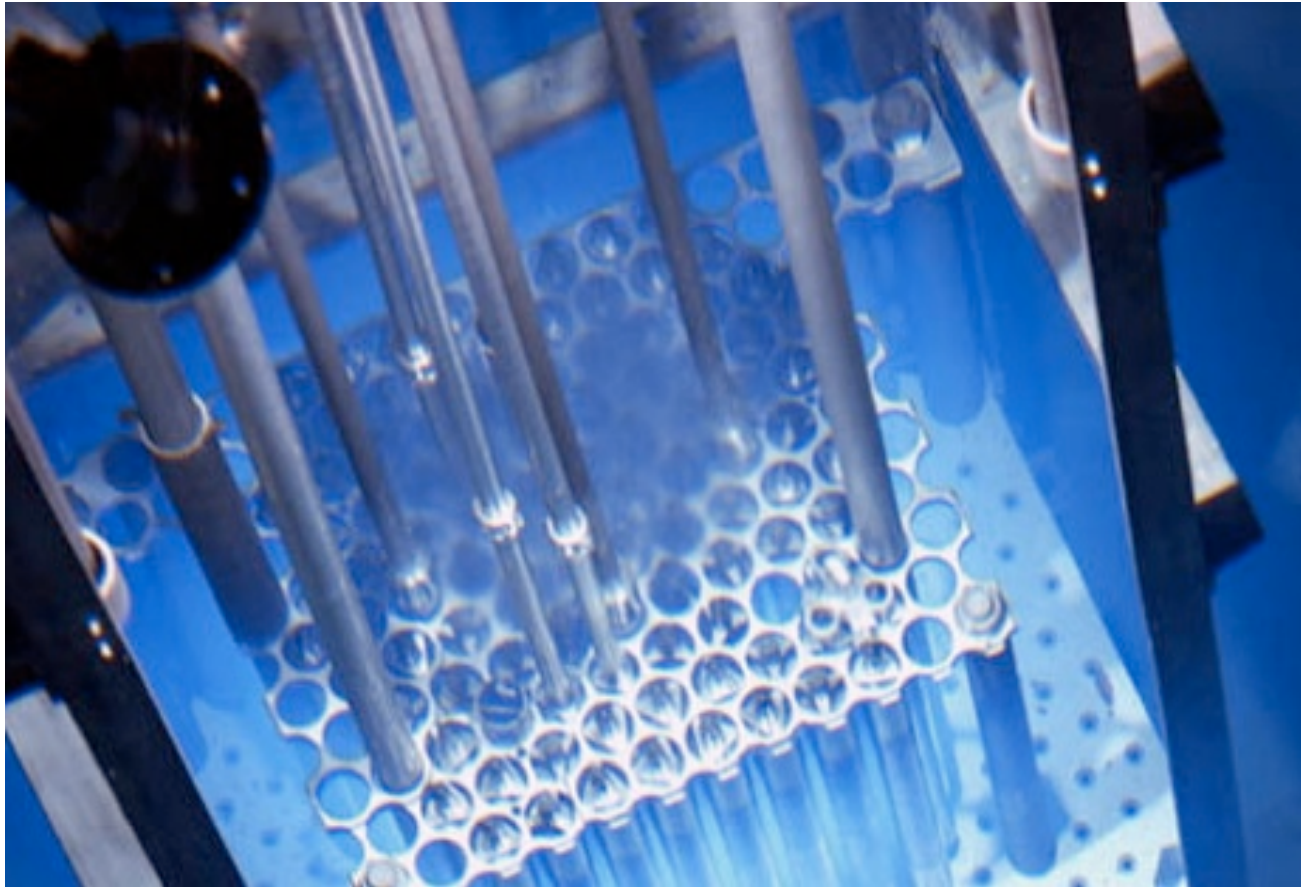


Φυσική των Επιταχυντών και Αντιδραστήρων

Δ. Σαμψωνίδης

Διαλεξη 2η

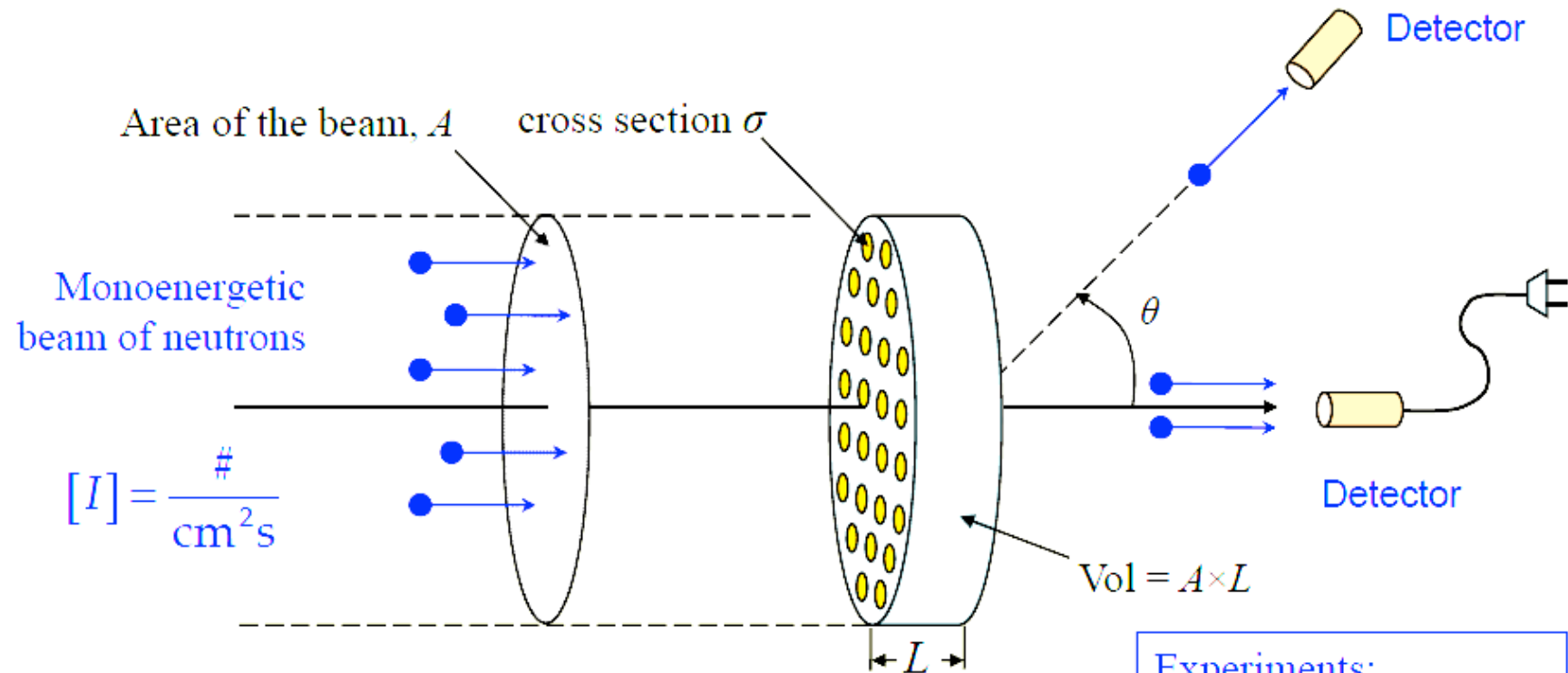
Αντιδραστήρας



Παραγωγή ενέργειας ~ 200 MeV/σχάση

Χημική αντίδραση \sim eV

Ενεργός διατομή σ



Experiments:

$$R_{\text{coll}}(\text{Vol}) = \sigma \times I \times N \times \text{Vol}$$

$$[\sigma] = \text{cm}^2$$

Ενεργός διατομή σ

Μία σημαντική ιδιότητα ενός υλικού είναι η ατομική πυκνότητα. Είναι ο αριθμός των ατόμων ανά μονάδα όγκου του υλικού.

$$N = \frac{\rho N_A}{M}$$

N = atom density (atoms/cm³)

ρ = density (g/cm³)

N_A = Avogadro's number (6.022 x 10²³ atoms/mole)

M = gram atomic weight

ασκηση

Ένα μπλοκ αλουμινίου έχει πυκνότητα $2,699 \text{ g/cm}^3$. Εάν το ατομικό βάρος του αλουμινίου είναι $26,9815 \text{ g}$, υπολογίστε την ατομική πυκνότητα του αλουμινίου.

$$\begin{aligned} N &= \frac{\rho N_A}{M} \\ &= \frac{2.699 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \left(6.022 \times 10^{23} \frac{\text{atoms}}{\text{mole}} \right)}{26.9815 \frac{\text{g}}{\text{mole}}} \\ &= 6.024 \times 10^{22} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

Μικροσκοπική ενεργός διατομή σ

Η πιθανότητα ένα νετρόνιο να αλληλεπιδράσει με ένα πυρήνα για μια συγκεκριμένη αντίδραση εξαρτάται από το είδος του πυρήνα που εμπλέκεται και την ενέργεια του νετρονίου.

Η πιθανότητα μιας συγκεκριμένης αντίδρασης που λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός νετρονίου και ένα πυρήνα ονομάζεται μικροσκοπική ενεργός διατομή σ για τη συγκεκριμένη αντίδραση.

Η μικροσκοπική ενεργός διατομή μπορεί να θεωρηθεί ως η γεωμετρική περιοχή που βλέπει το νετρόνιο για τη συγκεκριμένη αντίδραση.
Όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα για την αντίδραση.

Μακροσκοπική ενεργός διατομή Σ

- Εάν ένα νετρόνιο θα αλληλεπιδράσει με ένα ορισμένο όγκο υλικού δεν εξαρτάται μόνο από τη μικροσκοπική ενεργό διατομή, αλλά επίσης και από τον αριθμό των πυρήνων μέσα σε αυτό τον όγκο του υλικού.
- Γιαυτό ορίζεται η μακροσκοπική ενεργός διατομή Σ .
- Η μακροσκοπική ενεργός διατομή είναι η πιθανότητα μια αντίδραση να συμβεί ανά μονάδα διαδρομής του νετρονίου.
- Δίνεται από τη σχέση
- $\Sigma = N \sigma$

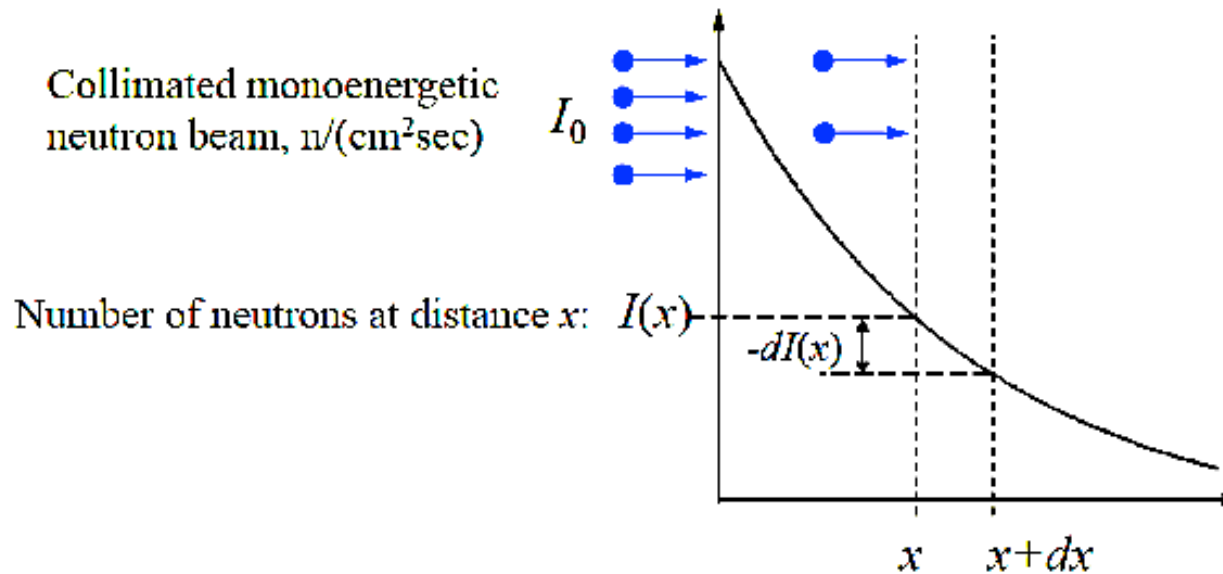
Όπου

- Σ : μακροσκοπική ενεργός διατομή (cm^{-1})
- N : το ατομικό βάρος
- σ : μικροσκοπική ενεργός διατομή (cm^2)

Η μικροσκοπική ενεργός διατομή σ παριστάνει την πραγματική περιοχή του στόχου που βλέπει ένα νετρόνιο. Οι μονάδες δίνονται σε barns ή cm^2 .

Η μακροσκοπική διατομή Σ αντιπροσωπεύει την πραγματική περιοχή του στόχου που βλέπει ένα νετρόνιο από το σύνολο των πυρήνων που περιέχονται σε 1 cm^3 του υλικού. Οι μονάδες δίνονται ως $1 / \text{cm}$ ή cm^{-1} .

Μακροσκοπική ενεργός διατομή



Βρέθηκε πειραματικά ότι το μέρος των νετρονίων που έχουν την πρώτη τους σύγκρουση σε dx γύρω από το x είναι σταθερό

$$-\frac{dI(x)}{I(x)} = dx \cdot \Sigma \quad [cm^{-1}]$$

Επίσης βρέθηκε ότι είναι ανάλογο της πυκνότητας του μέσου

$$\Sigma = \sigma N$$

$$\sigma [cm^2]$$

$\Sigma \rightarrow \Sigma_t$ (total cross-section)

$\sigma \rightarrow \sigma_t$

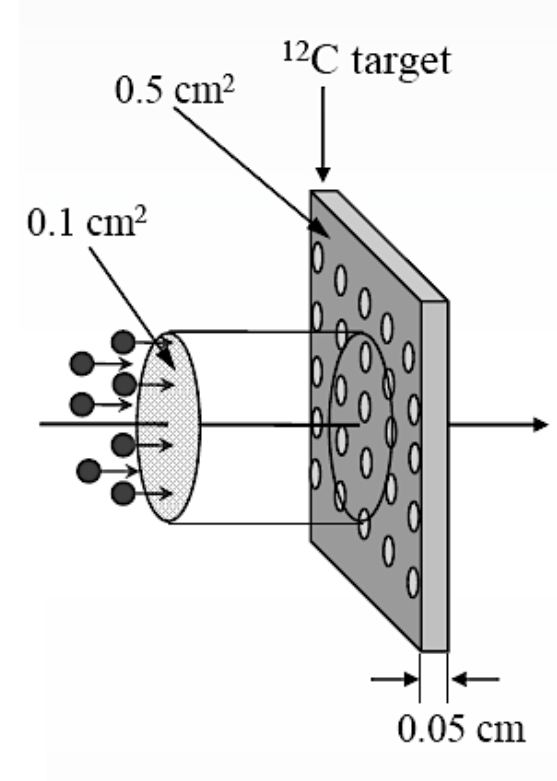
Παράδειγμα

Δέσμη νετρονίων 1 MeV και έντασης $5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$ χτυπά σε λεπτό στόχο ^{12}C . Η επιφάνεια του στόχου είναι 0.5 cm^2 το πάχος 0.05 cm . Η επιφάνεια της δέσμης 0.1 cm^2 . Στα 1 MeV η ολική ενεργός διατομή του ^{12}C είναι 2.6 b και η πυκνότητα 1.6 g/cm^3 .

- Ο ρυθμός αλληλεπίδρασης στο στόχο
- Ποια η πιθανότητα ένα νετρόνιο της δέσμης να συγκρουστεί στο στόχο.

$$R_{coll}(\text{Vol}) = \sigma \times I \times N \times \text{Vol}$$

↑
Ατομική πυκνότητα του υλικού (atoms/cm^3)



Λύση

$$R_{coll}(Vol) = \sigma \times I \times N \times Vol$$

$$N = \frac{\rho \cdot N_A}{M} = \frac{1.6 \times 6.02 \cdot 10^{23}}{12} \approx 8 \times 10^{22}$$

$$R_{coll}(Vol) = 2.6 \times 10^{-24} \times 5 \times 10^5 \times 8 \times 10^{22} \times 0.1 \times 0.05 = 5.2 \times 10^5 \frac{\#}{s}$$

$$\Pr\{\text{neutron interacts}\} = \frac{R_{coll}}{I \times A} = \frac{5.2 \times 10^5}{5 \times 10^8 \times 0.1} = 1.04 \times 10^{-2}$$

Μειωση Ροής νετρονίων

Number of neutrons survived
traveling distance x .

$$-\frac{dI(x)/I(x)}{dx} = \Sigma_t \quad \begin{array}{c} \downarrow \\ I(x) = I(0)e^{-\Sigma_t x} \end{array} \quad \Pr\{\text{No collision}\} = \frac{I(x)}{I(0)} = e^{-\Sigma_t x}$$

$-dI(x)$ Number of neutrons that survived penetrating the distance x and made their first collision within dx .

$$-\frac{dI(x)}{I(x)} = \text{Probability of the first collision within } dx = \Sigma_t dx$$

Σ_t = Probability of some interaction per unit path length

Μέσος χρόνος

Collision probability
per unit path length is

$$\Sigma_t \Rightarrow \frac{1}{\Sigma_t} = \lambda_t$$

Mean free path

Collision probability
per unit time is

$$v\Sigma_t \Rightarrow \frac{1}{v\Sigma_t} = \tau_t$$

Mean time

Alternatively

$$\frac{\lambda_t}{v} = \frac{1}{v\Sigma_t} = \tau_t$$

Ρυθμός Αντίδρασης

Reaction rate, R_x = number of interaction of kind x per unit volume in unit time

Probability per unit path length

Distance per unit time

$$R_x(\mathbf{r}, t) = \underbrace{\sum_x v n(\mathbf{r}, t)}_{\text{Probability per unit time}} = \sum_x \phi(\mathbf{r}, t)$$

Probability per unit time

Number of neutrons in unit volume

Παράδειγμα

Ενας ερευνητικός αντιδραστήρας κυβικού σχήματος με μια ροή νετρονίων 10^{13} n/cm²s μέσα στον όγκο του και μήκος πλευράς (ακμής) 0.8 m.

Αν η πιθανότητα σχάσης ανά μονάδα μήκους, $\Sigma_f=0.1$ cm⁻¹, ποια η ισχύς του αντιδραστήρα?

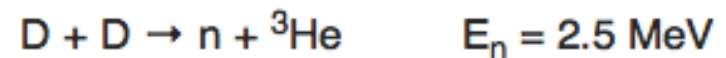
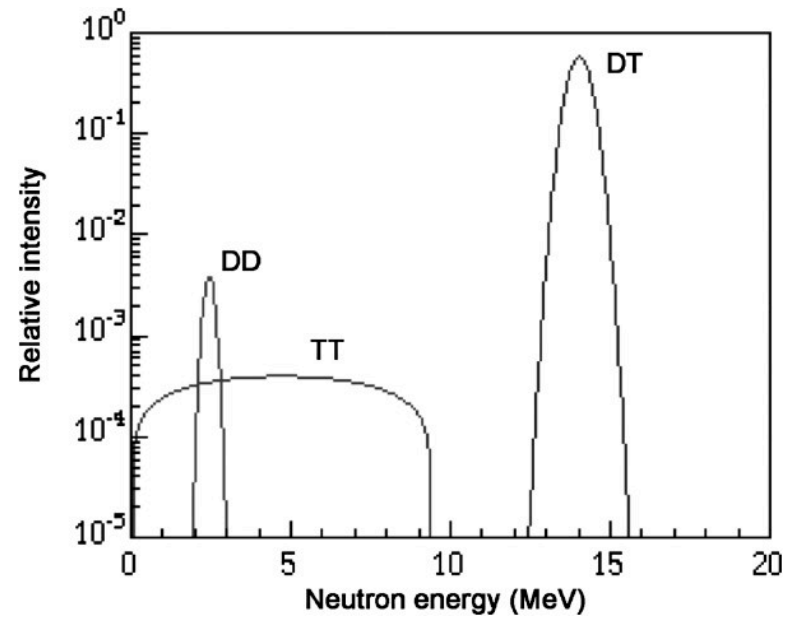
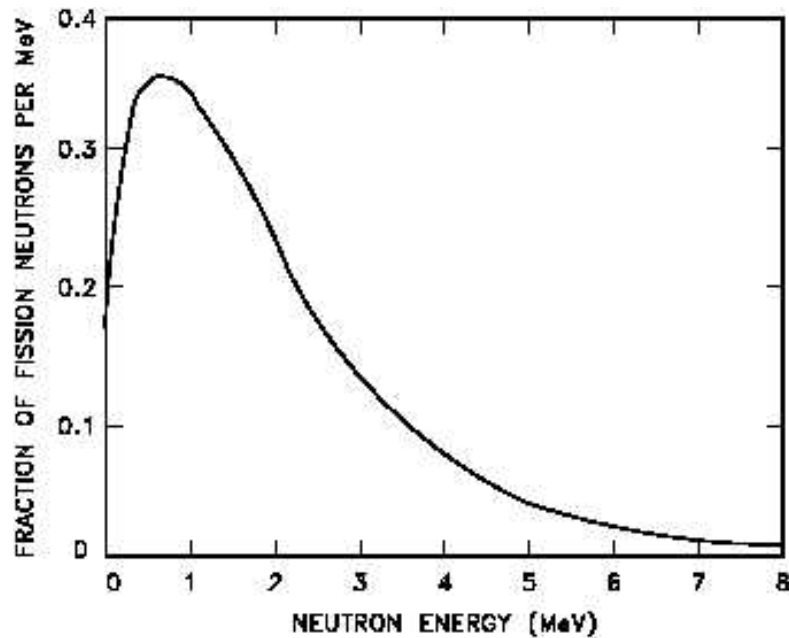
Θεωρείστε <ενέργεια/σχάση> ~ 200MeV

$$P = \varepsilon_f R_f V = \varepsilon_f \Sigma_f \phi V$$

$$P = 200 \frac{\text{MeV}}{\#} 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} \times 0.1 \frac{1}{\text{cm}} \times 10^{13} \frac{\#}{\text{cm}^2 \text{s}} \times (80 \text{cm})^3 = 16.4 \text{ MW}$$

Ενέργειες νετρονίων

- Υπάρχουν πολλές πηγές νετρονίων. Τα περισσότερα νετρόνια που παράγονται έχουν ενέργειες του 2-5 MeV. Υπάρχουν πολλές άλλες αντιδράσεις που μπορεί να παράγουν νετρόνια με πολύ υψηλότερη ενέργεια.



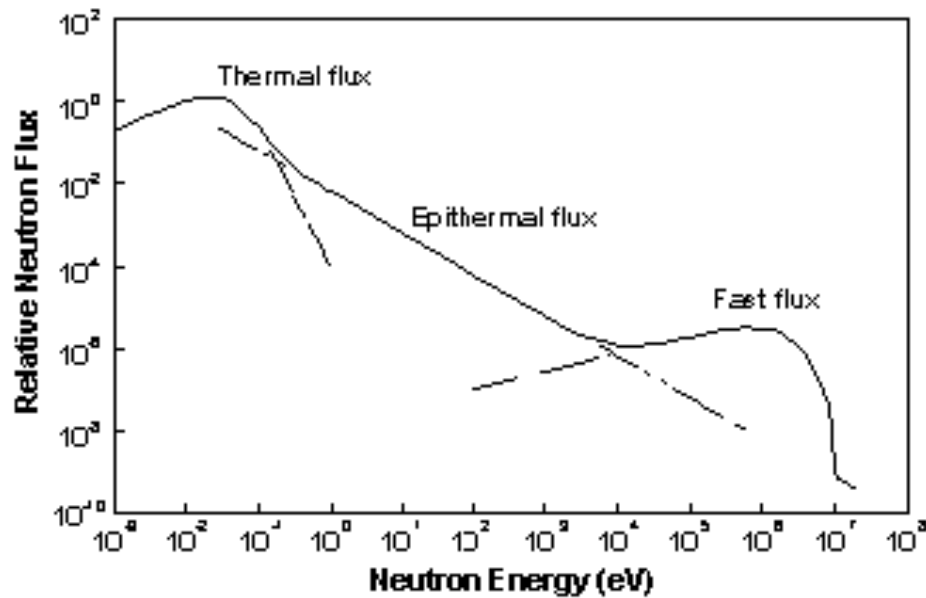
Επιβράδυνση των νετρονίων

- Δεν μπορούμε να ελέγξουμε εύκολα τις ενέργειές τους, όπως κάνουμε με τα φορτισμένα σωματίδια. Μπορούμε όμως να επιβραδύνει τα νετρόνια μέχρι την ενέργεια που θέλουμε.
- Αυτό γίνεται σε συγκρούσεις με άτομα διαφόρων υλικών. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται "επιβράδυνση" της ενέργειας των νετρονίων και το υλικό που χρησιμοποιείται ονομάζεται [επιβραδυντής](#).
- Τα νετρόνια που προκύπτουν κατατάσσονται σε ευρείες κλίμακες ενέργειας

Θερμικά	$E \approx 0.025\text{eV}$
Επιθερμικά	$E \sim 1\text{ eV}$
Αργά	$E \sim 1\text{ keV}$
Ταχέα	$E \sim 100\text{ keV} - 10\text{ MeV}$
- Η επιβράδυνση των νετρονίων είναι ένα πολύ σημαντικό μέρος του αντιδραστήρα στο σχεδιασμό και τη λειτουργία.

Επιβράδυνση των νετρονίων

Θερμικά	$E \approx 0.025\text{eV}$
Επιθερμικά	$E \sim 1\text{ eV}$
Αργά	$E \sim 1\text{ keV}$
Ταχέα	$E \sim 100\text{ keV} - 10\text{ MeV}$

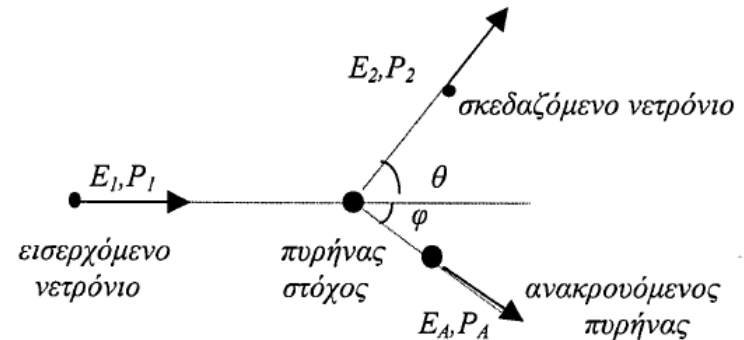


Τυπικό φάσμα της ενέργειας νετρονίων αντιδραστήρα με τις διάφορες ενεργειακές.

Ελαστική σκέδαση νετρονίου

Αρχή διατήρησης Ενέργειας $E_1 = E_2 + E_A$

Αρχή διατήρησης ορμής $\vec{P}_1 = \vec{P}_2 + \vec{P}_A$



$$P_A^2 = P_1^2 + P_2^2 - 2P_1P_2\cos\theta$$

$$ME_A = mE_1 + mE_2 - 2m\sqrt{E_1E_2}\cos\theta$$

Επειδή $\frac{M}{m} = A$ $AE_A = E_1 + E_2 - \sqrt{E_1E_2}\cos\theta$

$$E_2 = \frac{E_1}{(A+1)^2} \left[\cos\theta + \sqrt{A^2 - \eta\mu^2\theta} \right]^2$$

Αν $\theta=0 \rightarrow E_2=E_1$

Αν $\theta=\pi \rightarrow (E_2)_{\min} = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 E_1$

Παράμετρος κρούσης $\alpha \equiv \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 \rightarrow E_2=\alpha E_1$

Ελαστική σκέδαση νετρονίου

Η μέγιστη απώλεια ενέργειας σε μια κεντρική σύγκρουση δίνεται για $\theta=180^\circ$

$$\left. \frac{T_0 - T_1}{T_0} \right|_{MAX, \theta=0} = 1 - \frac{(A^2 + 1 - 2A)}{(A+1)^2} = \frac{A^2 + 2A + 1 - A^2 - 1 + 2A}{(A+1)^2} = \frac{4A}{(A+1)^2}$$

Θεωρώντας μια ισότροπη κατανομή νετρονίων στο κέντρο μάζας η ΜΕΣΗ απώλεια ενέργειας σε κάθε σύγκρουση δίνεται από τη μέση τιμή του $\cos\theta$ μεταξύ $[0, 180]$, $\langle \cos\theta \rangle = 0$

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{(A^2 + 1 + 2A \cos\theta)}{(A+1)^2} \quad \rightarrow \quad \boxed{T_1|_{AVE} = \frac{(A^2 + 1)}{(A+1)^2} T_0}$$

Για το ^1H ($A=1$)

$$\left. \frac{T_1}{T_0} \right|_{AVE} = \frac{(1^2 + 1)}{(1+1)^2} = \frac{1}{2} = 0.5$$

Για τον ^{12}C ($A=12$)

$$\left. \frac{T_1}{T_0} \right|_{AVE} = \frac{(12^2 + 1)}{(12+1)^2} = \frac{145}{169} = 0.86$$

Ελαστική σκέδαση νετρονίου

Πόσες συγκρούσεις κατα μέσο όρο χρειάζονται για ένα νετρόνιο με αρχική ενέργεια 2 MeV για να γίνει θερμικό (0,025 eV) σε περιβάλλον επιβραδυντή ^1H ή ^{12}C .

Για το ^1H ($A=1$)

$$\therefore \left. \frac{T_1}{T_0} \right|_{AVE} = \frac{(1^2 + 1)}{(1 + 1)^2} = \frac{1}{2} = 0.5$$

$$\therefore \left(\frac{1}{2} \right)^x = \frac{0.025 \text{ eV}}{2 \times 10^6 \text{ eV}} = 1.25 \times 10^{-8}$$

$$\therefore x \ln \left(\frac{1}{2} \right) = \ln(1.25 \times 10^{-8})$$

$$\therefore x = 26.$$

Για τον ^{12}C ($A=12$)

$$\therefore \left. \frac{T_1}{T_0} \right|_{AVE} = \frac{(12^2 + 1)}{(12 + 1)^2} = \frac{145}{169} = 0.86$$

$$\therefore (0.86)^x = \frac{0.025 \text{ eV}}{2 \times 10^6 \text{ eV}} = 1.25 \times 10^{-8}$$

$$\therefore x \ln(0.86) = \ln(1.25 \times 10^{-8})$$

$$\therefore x = 121$$

Μέση λογαριθμική μείωση

Μέση λογαριθμική μείωση της ενέργειας νετρονίων

$$\xi \equiv \overline{\Delta \ln E} = \overline{\ln E_1 - \ln E_2} = \overline{\ln \frac{E_1}{E_2}}$$

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}$$

$$\xi = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha$$

υλικό	A	α	ξ	αριθμός συγκρούσεων μέχρι την θερμοποίηση
H	1	0	1.000	18.2
H ₂ O	-	-	0.920	19.8
D	2	0.111	0.725	25.1
D ₂ O	-	-	0.509	35.8
Be	9	0.640	0.209	86
C	12	0.716	0.158	114
O	16	0.779	0.120	152
Na	23	0.840	0.0825	221
Fe	56	0.931	0.0357	510
U	238	0.983	0.00838	2172

Ληθαργία

Ληθαργία

$$u \equiv \ln \frac{E_0}{E}$$

Η ληθαργία νετρονίου αυξάνει καθώς επιβραδύνεται.

Αν έχει u_1 πριν την σκέδαση και u_2 μετά τη σκέδαση

$$u_2 - u_1 = \ln \frac{E_1}{E_2}$$

Εστω νετρόνι αρχικής E_0 το οποίο μετά από K_i κρούσεις έχει ενέργεια E_i

$$u_i = K_i \overline{\Delta u}$$

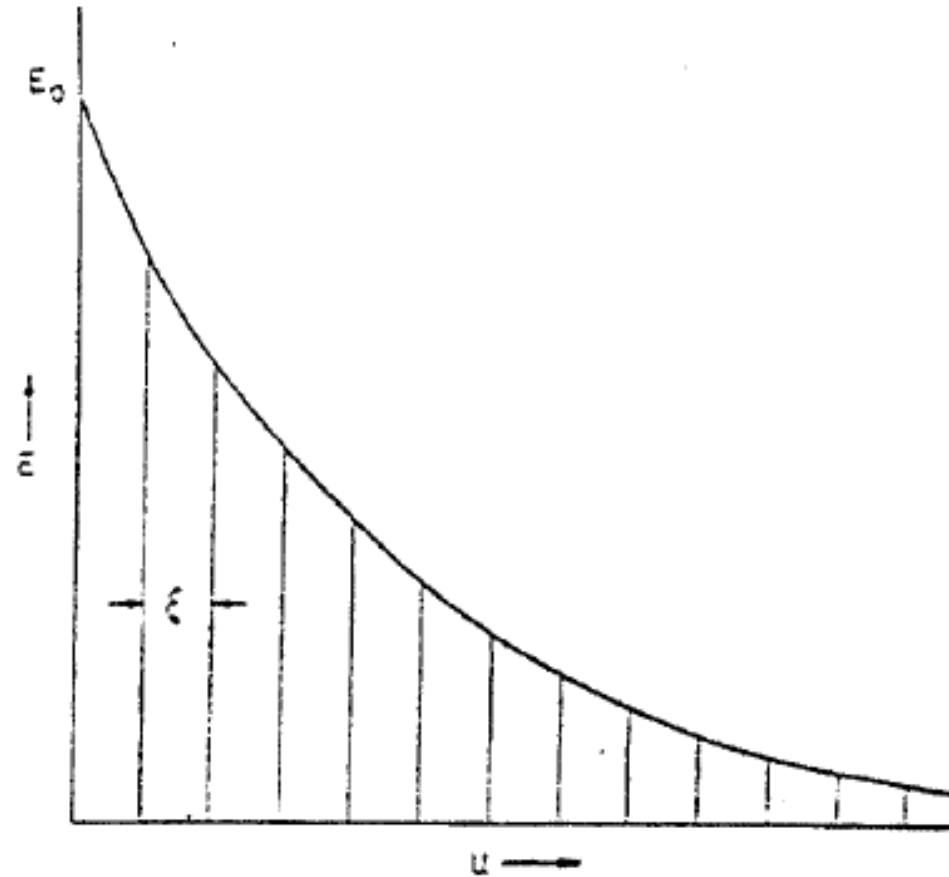
$$u_i = K_i \xi$$

Ληθαργία

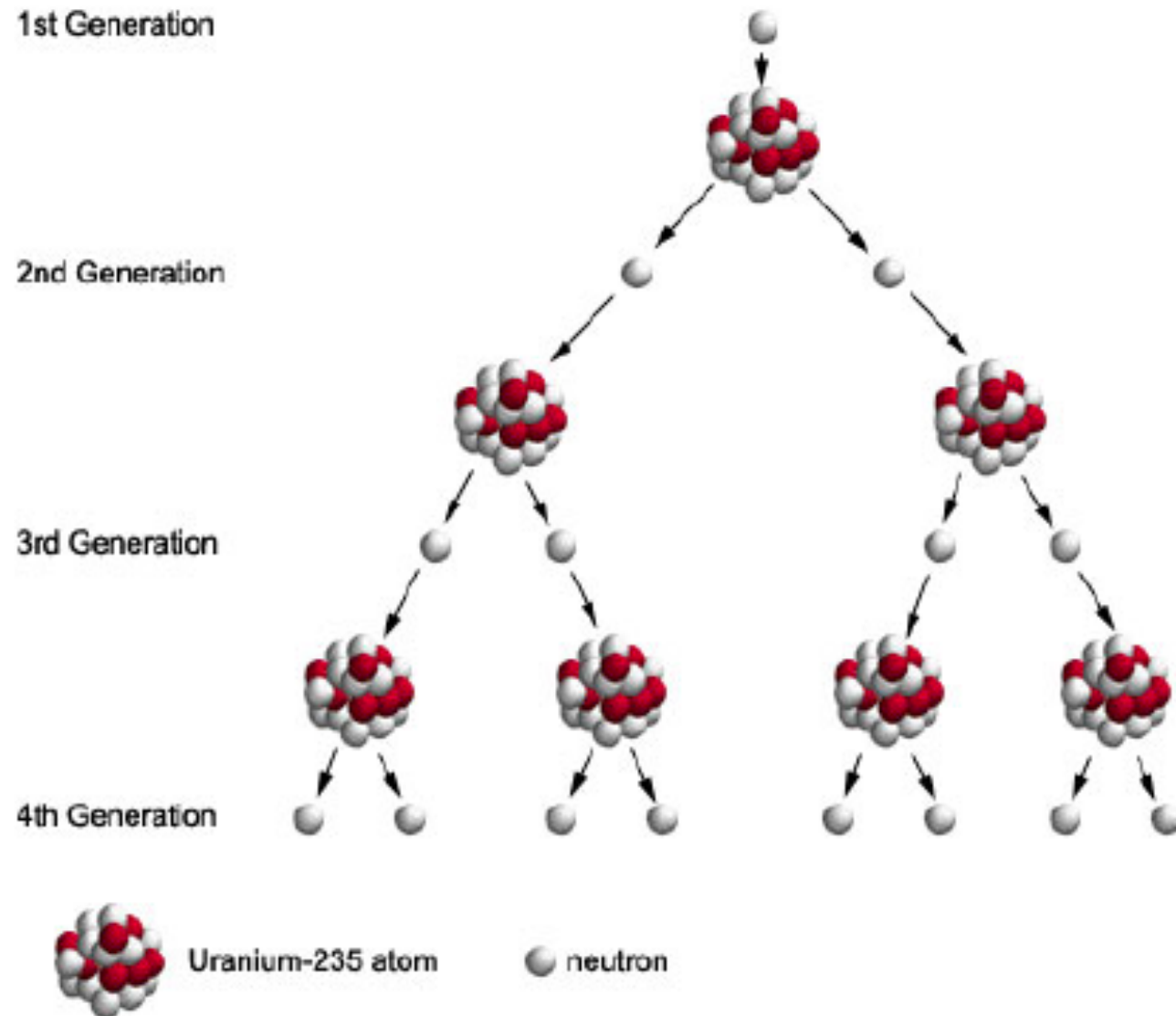
$$K_i \xi = \ln \frac{E_0}{E_i}$$

$$K_i = \frac{\ln \frac{E_0}{E_i}}{\xi}$$

$$E_i = E_0 e^{-K_i \xi}$$



Αλυσιδωτή αντίδραση



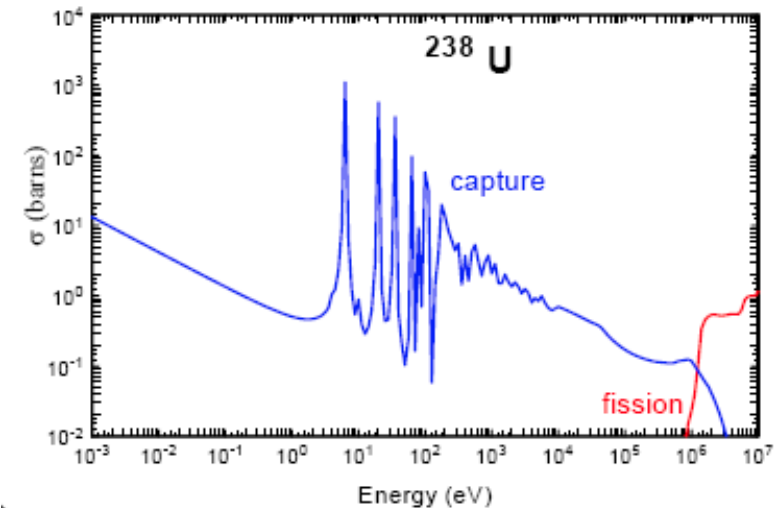
Αλυσιδωτή αντίδραση

Κάθε νετρόνιο που προκαλεί σχάση έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή πολλών νετρονίων, ~ 2.5 . Καθένα από αυτά τα νετρόνια είναι ικανό να ξεκινήσει σχάση σε ένα άλλο πυρήνα με την εκπομπή και άλλων 2,5 νετρόνια κατά μέσο όρο.

- Αν αυτό συνεχιστεί, ο αριθμός των σχάσεων και των νετρονίων θα αυξηθεί πολύ γρήγορα. Αυτή η διαδικασία περιγράφεται ως μια **αλυσιδωτή αντίδραση**.
- Η αλυσιδωτή αντίδραση χαρακτηρίζεται από τον **συντελεστή πολλαπλασιασμού των νετρονίων k** , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των νετρονίων σε μία γενεά με τον αριθμό στην προηγούμενη γενιά.
- Εάν $k < 1$, τότε ο αριθμός των νετρονίων μειώνεται με το χρόνο και η διαδικασία σταματά. Ένας αντιδραστήρας λέγεται ότι είναι **υπο-κρίσιμος**.
- Αν $k > 1$ τότε ο αριθμός των νετρονίων αυξάνεται με το χρόνο και η αλυσιδωτή αντίδραση αποκλίνει. Ένας αντιδραστήρας θα μπορούσε να λέγεται ότι είναι **υπερκρίσιμος**. Ουσιαστικά έχουμε μια βόμβα.
- Αν $k = 1$ όλα προχωρούν με σταθερό ρυθμό. Ένας αντιδραστήρας σε αυτή την κατάσταση θα μπορούσε να λεχθεί ότι είναι **κρίσιμος**.

Αλυσιδωτή αντίδραση

Αν προσπαθήσουμε να χρησιμοποιήσουμε φυσικό ουράνιο (0,7% ^{235}U) δεν μπορούμε να έχουμε $k > 1$ επειδή το κυρίως συστατικό ^{238}U απορροφά πάρα πολλά νετρόνια.



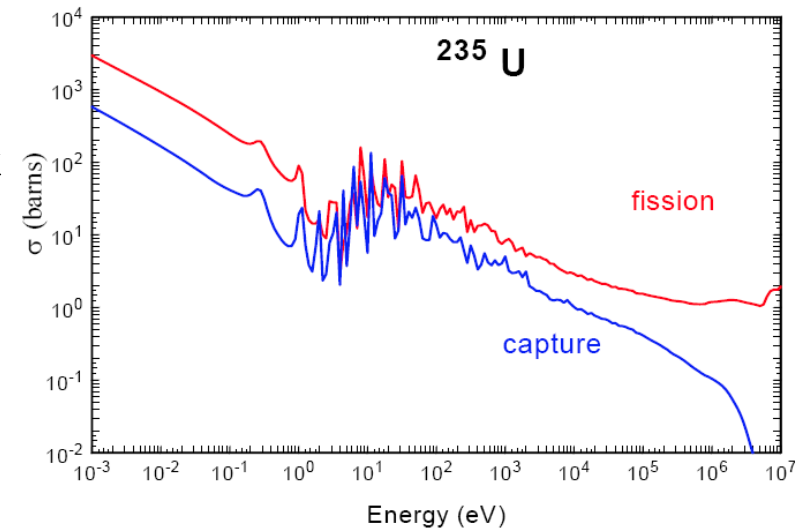
- Όπως φαίνεται στην ενεργό διατομή ως συνάρτηση της ενέργειας τα περισσότερα νετρόνια καταλήγουν να συλλαμβάνονται.

- Ωστόσο, αν μπορούμε να εμπλουτίσουμε το δείγμα ιδιαίτερα σε ^{235}U τότε μπορούμε να πάρουμε $k > 1$ και η αλυσιδωτή αντίδραση μπορεί να διατηρηθεί. Αυτή είναι η βάση του ταχέων αντιδραστήρων, δηλαδή αντιδραστήρα που λειτουργεί με σχάση που ξεκίνησε από τα νετρόνια που δεν έχουν επιβραδύνθηκε πολύ μετά την παραγωγή τους. Αν ο εμπλουτισμός είναι αρκετά υψηλός είναι επίσης και η βάση των πυρηνικών όπλων.

Αλυσιδωτή αντίδραση

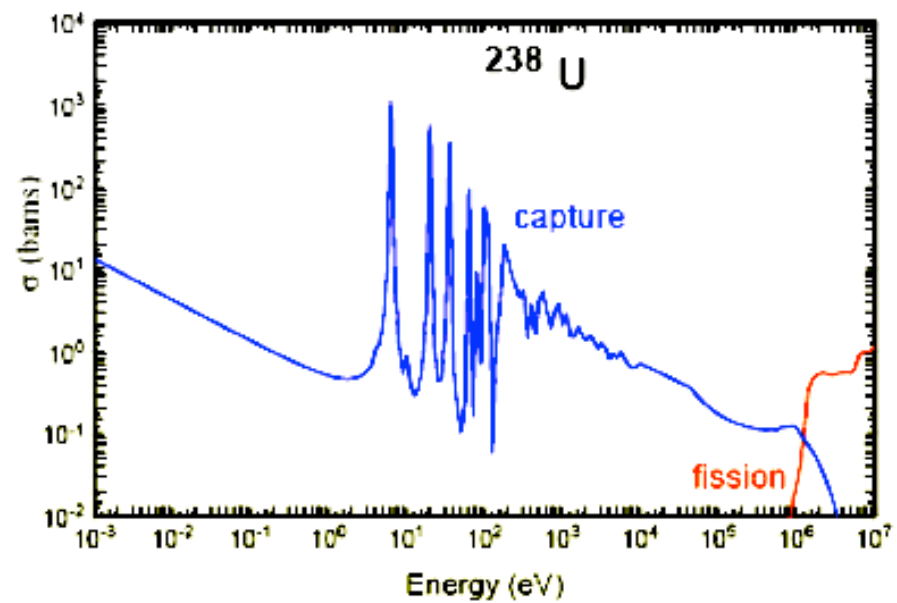
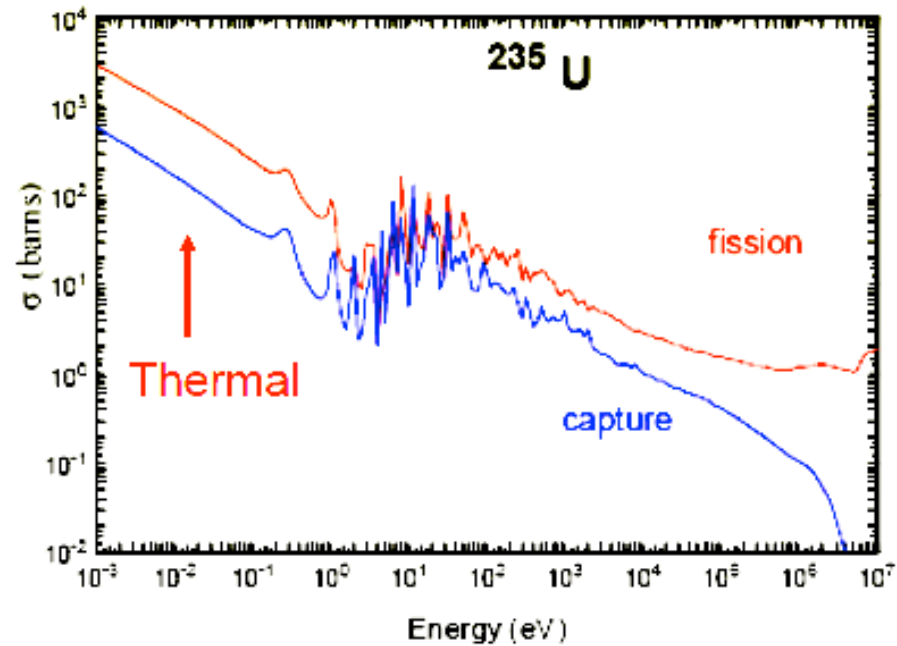
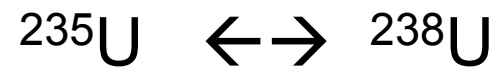
- Ωστόσο, κοιτάζοντας την ενεργό διατομή του ^{235}U βλέπουμε ότι είναι τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερη σε θερμικές ενέργειες νετρονίων απ' ό τι στο 1 MeV.

Αν μπορούμε αποτελεσματικά να επιβραδύνουμε τα νετρόνια σε θερμικές τιμές, τότε μπορούμε να έχουμε $k > 1$ για το φυσικό ουράνιο.



Έτσι, είναι δυνατόν να έχουμε ένα αντιδραστήρα χρησιμοποιώντας φυσικό ουράνιο, αλλά απαιτεί αποτελεσματική επιβράδυνση ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα νετρόνια έχουν θερμικές ενέργειες.

- ένας τέτοιος αντιδραστήρας αναφέρεται ως **θερμικός αντιδραστήρας**.



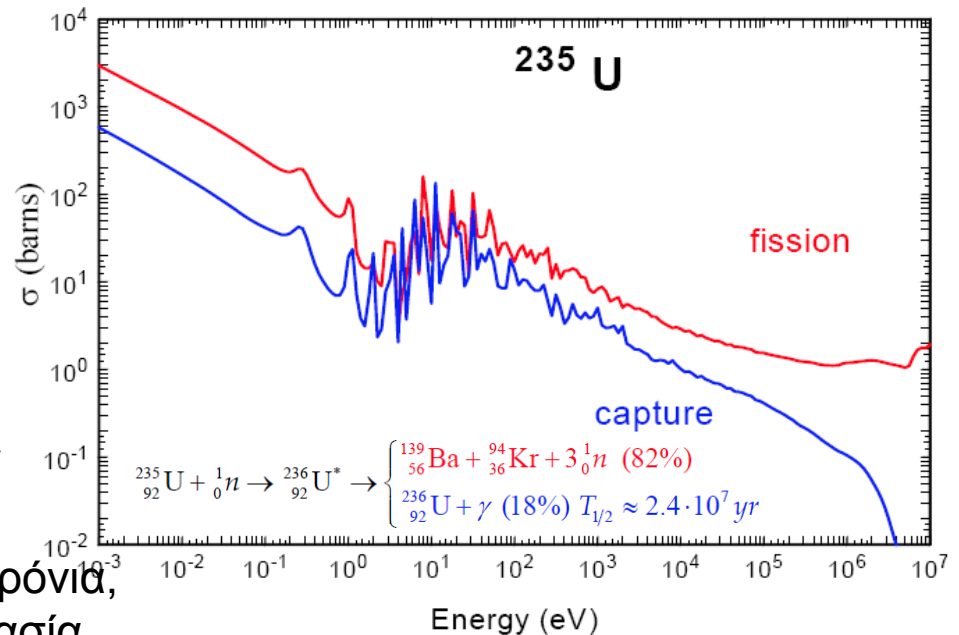
Σχέση τεσσάρων παραγόντων

- Γιατί τα ταχεία νετρόνια είναι "κακό" σε αυτό το πλαίσιο;

Καμπύλη ενεργού διατομής: Η ενεργός διατομή σχάσης είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη για θερμικά νετρόνια σε σύγκριση με τα ταχεία νετρόνια που δημιουργούνται στη σχάση. Αυξάνει από λίγα barns έως 580 b

- Είναι απαραίτητο να μειωθεί η αρχική ενέργεια των νετρονίων, έτσι ώστε ο μέσος όρος της ενέργειας να πέσει από μερικά MeV στα 0.025eV. Φυσικά, υπάρχει κόστος. Στη διαδικασία επιβράδυνσης θα χάσουμε τα νετρόνια, είτε με απορρόφηση ή με κάποια άλλη διαδικασία.

- Η ενέργεια μπορεί να μειωθεί με ελαστικές συγκρούσεις με πυρήνες. Η καλύτερη επιλογή για μια επιβραδυντικό υλικό είναι ένα ελαφρύ στοιχείο, διότι τότε το νετρόνιο μεταφέρει τη μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια σε μια ελαστική σύγκρουση με ένα ελαφρύ πυρήνα.



Σχέση τεσσάρων παραγόντων

Από την άποψη της απώλειας ενέργειας και μόνο, το υδρογόνο είναι σαφώς η καλύτερη επιλογή , αλλά υπάρχουν άλλα θέματα.

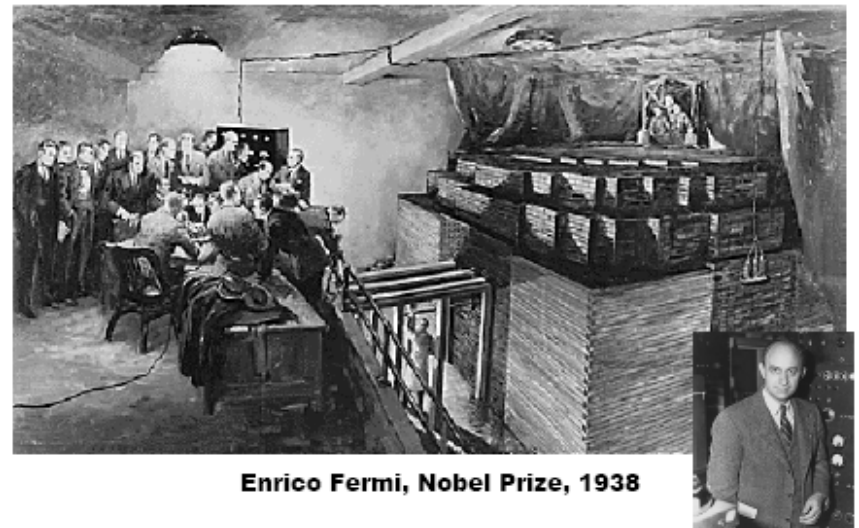
- Θα πρέπει να είναι ελαφρύ
- Καλύτερα να είναι στερεό, από την άποψη της κατασκευής ενός αντιδραστήρα και την υψηλή πυκνότητα των ατόμων.
- Θα πρέπει να είναι φτηνό.
- Θα πρέπει να είναι εύκολα διαχειρίσιμο.
- Θα πρέπει να έχει μικρή ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίου

Ο **Άνθρακας** υπό μορφή γραφίτη πληροί όλα αυτά τα κριτήρια.

- Ο απλούστερος τρόπος για να κατασκευάσουμε έναν αντιδραστήρα ή μια στίβα αλυσιδωτής-αντίδρασης, (όπως ονομαζόταν αρχικά) είναι να κάνουμε ένα πλέγμα εναλλασσόμενων μπλοκ ουρανίου και γραφίτη. Τα νετρόνια παράγονται στο U και μπαίνουν στο γραφίτη όπου οι ενέργειές τους μειώνονται.

- Η εικόνα δείχνει Enrico Fermi και το πρώτο σωρό χτισμένο σε ένα γήπεδο σκουός στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο το 1942.

Chicago Pile 1, December 2, 1942,
First Successful Nuclear Reactor



Enrico Fermi, Nobel Prize, 1938

Σχέση τεσσάρων παραγόντων

Αν θέλουμε να έχουμε μια αντίδραση αυτοσυντηρούμενη στο σωρό ο παράγοντας αναπαραγωγής k πρέπει να ισούται με 1. Με άλλα λόγια, για να έχουμε μια σταθερή σταθερή ροή της ενέργειας ο σωρός πρέπει να είναι κρίσιμος.

- Ακόμη και αν υποθεθεί ο σωρός είναι απείρως μεγάλος μπορούμε να υπολογίσουμε το k ακολουθώντας αυτό που συμβαίνει στα νετρόνια καθώς πηγαίνουν από τη μια γενιά στην επόμενη.
- Θα ξεκινήσουμε με N θερμικά νετρόνια
- Κάθε ένα από αυτά θα πρέπει να παράγει $\nu \approx 2.5$ ταχέα νετρόνια ανά σχάση. Ωστόσο, δεν θα προκαλέσουν όλα σχάση. Συγκεκριμένα, κάποια θα συλληφθούν.
- Ορίζουμε $\eta = \text{Μέσος Αριθμός νετρονίων σχάσης} / \text{αρχικό θερμικό νετρόνιο}$.
Σημείωση $\eta < \nu$ δεδομένου ότι ορισμένα από τα αρχικά νετρόνια δεν προκαλούν σχάση.
- Αν σ_f = ενεργός διατομή σχάσης για θερμικά νετρόνια
 σ_a = ενεργός διατομή για όλες διαδικασίες απορρόφησης

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a}$$

Σχέση τεσσάρων παραγόντων

- Για το ^{235}U $\sigma_f = 584 \text{ b}$ και $\sigma_a = 97 \text{ b} \rightarrow \eta=2.08$ ταχεία νετρόνια/ θερμικό νετρόνιο
- Για το ^{238}U $\sigma_f = 0 \text{ b}$ για τα θερμικά και $\sigma_a = 2.75 \text{ b}$
- Το φυσικό ουράνιο περιέχει 0.72% ^{235}U .
- Για το φυσικό ουράνιο έχουμε μια ενεργό διατομή για σχάση και σύλληψη

$$\sigma_f = \frac{0.72}{100} \sigma_f(235) + \frac{99.28}{100} \sigma_f(238) = 4.20 \text{ b}$$

$$\sigma_a = \frac{0.72}{100} \sigma_a(235) + \frac{99.28}{100} \sigma_a(238) = 3.43 \text{ b}$$

- Οπότε η “αποτελεσματική” τιμή του $\eta = 1.33$ για το φυσικό ουράνιο.
(κοντά στο 1 και πρέπει να κάνουμε κάτι για να είμαστε σίγουροι ότι ότι έχουμε κρίσιμο σύστημα).
- Εμπλουτισμός του U στο 3% σε $^{235}\text{U} \rightarrow \eta=1.84$

Σχέση τεσσάρων παραγόντων

- Επιβράδυνση : N αρχικά νετρόνια $\rightarrow \eta N$ ταχέα πρέπει να γίνουν θερμικά
- Στη διαδικασία επιβράδυνσης μπορεί να απορροφηθεί από ^{238}U και να δώσει σχάση (“ταχέα”). Αυτό σημαίνει απώλεια νετρονίων **ϵ - fast fission factor**.
- Ο αριθμός των ταχέων νετρονίων **$N\eta\epsilon$** .
- Για το φυσικό U $\epsilon \sim 1.03$

Σχέση τεσσάρων παραγόντων

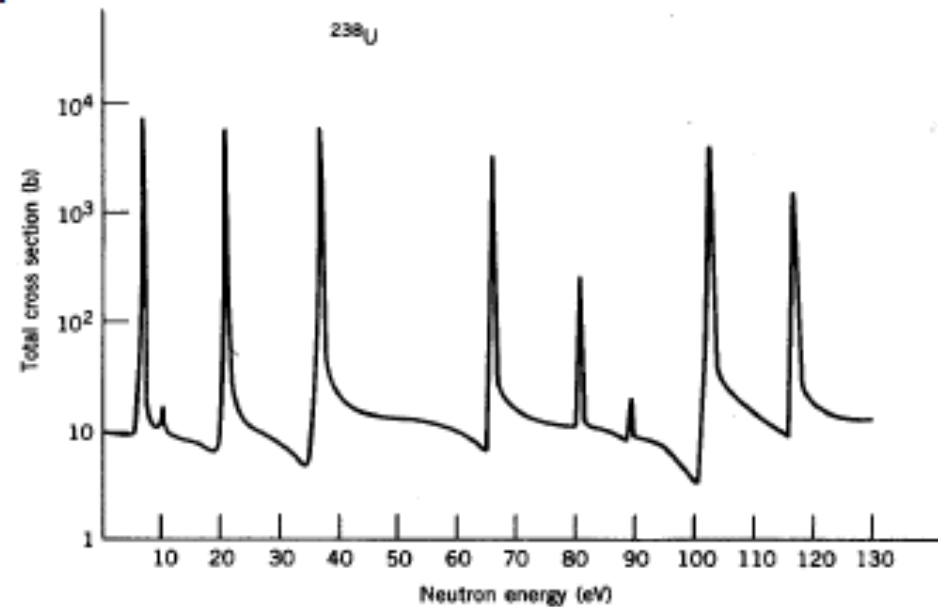
Πυρήνας

H
2H
4He
12C
238U

#συγκρούσεων για θερμοποίηση

18
25
43
110
2200

Στη διαδικασία θερμοποίησης η ενέργεια των νετρονίων θα πάρει τιμές μεταξύ 10 και 100 eV. Σ' αυτή την περιοχή το ^{238}U έχει πολλούς συντονισμούς (~1000 b) σύλληψης.



Σχέση τεσσάρων παραγόντων

- Θα πρέπει τα νετρόνια να αποφύγουν τους συντονισμούς.
- Πώς?
- Η απάντηση είναι στο να κάνουμε τα κομμάτια του γραφίτη μεγάλα ώστε τα νετρόνια να θερμοποιηθούν πλήρως μέσα στο γραφίτη.
- Η μέση απόσταση στο γραφίτη είναι ~ 19 cm.
- Αυτό δεν λύνει το πρόβλημα της απορρόφησης. Κάποια νετρόνια κοντά στην επιφάνεια του γραφίτη θα διαφύγουν στο U.
- Εισάγουμε την **πιθανότητα διαφυγής συντονισμού p** .

Σχέση τεσσάρων παραγόντων

Τώρα ο αριθμός των νετρονίων που μας έχουν απομείνει μετά τη θερμοποίηση είναι

$$N_{\eta \epsilon p}$$

- Μια τυπική τιμή του p είναι περίπου 0.9
- Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του γραφίτη δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλο. Μόλις τα νετρόνια θερμοποιηθούν θα πρέπει να είναι στο U για να επάγουν σχάση. Ένας από τους λόγους που επιλέξαμε **γραφίτη** ήταν η **χαμηλή ενεργός διατομή σύλληψης**, αλλά τα νετρόνια παρόλα αυτά έχουν κάποιες απώλειες με σύλληψη από διαφορα εξαρτήματα του αντιδραστήρα.
- Εισάγουμε τον **συντελεστή θερμοτικής αξιοποίησης f** που δίνει το κλάσμα των θερμικών νετρονίων που είναι πραγματικά διαθέσιμα στο U .
- Συνήθως f είναι περίπου 0.9.

Σχέση τεσσάρων παραγόντων

Συνολικά ο αριθμός των νετρονίων που επιβιώνουν την διαδικασία της επιβράδυνσης είναι

$$N \eta \epsilon_{pf}$$

Κατά πόσο αυτός ο αριθμός είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος, από τον αρχικό αριθμό N καθορίζει εάν ένας αντιδραστήρας είναι κρίσιμος ή όχι.

- Ο συντελεστής αναπαραγωγής νετρονίων είναι

$$k_{\infty} = N \eta \epsilon_{pf} / N = \eta \epsilon_{pf}$$

Αυτό ονομάζεται **σχέση τεσσάρων παραγόντων**

Ένας πραγματικός αντιδραστήρας

- Υπάρχει ένας αριθμός από παράγοντες που μπορούμε να ελέγξουμε.

A. Ο εμπλουτισμός του καυσίμου.

B. Η επιλογή του επιβραδυντή.

Γ. Η γεωμετρία του σωρού.

Σε αυτή την τρίτη περίπτωση υπάρχουν τρεις παράγοντες που εμπλέκονται, δηλαδή ϵ , ρ και f

Κάποιος πρέπει να εξετάσει τη σχετική γεωμετρία του U και του γραφίτη.

Νετρόνια ενέργειας 10-100 eV **δεν** ταξιδεύουν πολύ μέσα στο U πριν από την απορρόφηση κι έτσι η σύλληψη βασικά λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του U .

Το U πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου επιφάνειας, αλλά όχι τόσο μεγάλο ώστε να λαμβάνει χώρα όλη η θερμική διάσπαση στην επιφάνεια.

Το κέντρο του καυσίμου U βλέπει λιγότερα νετρόνια.

Ένας πραγματικός αντιδραστήρας

Αν πάρουμε λογικές τιμές για τους παράγοντες μπορούμε να υπολογίσουμε το k

Για το φυσικό U $\eta = 1.33$

$$\varepsilon = 1.03$$

$$p = 0.9$$

$$f = 0.9$$

$$k_{\infty} = 1.33 \times 1.03 \times 0.9 \times 0.9$$

$$= 1.11$$

Σχέση έξι παραγόντων

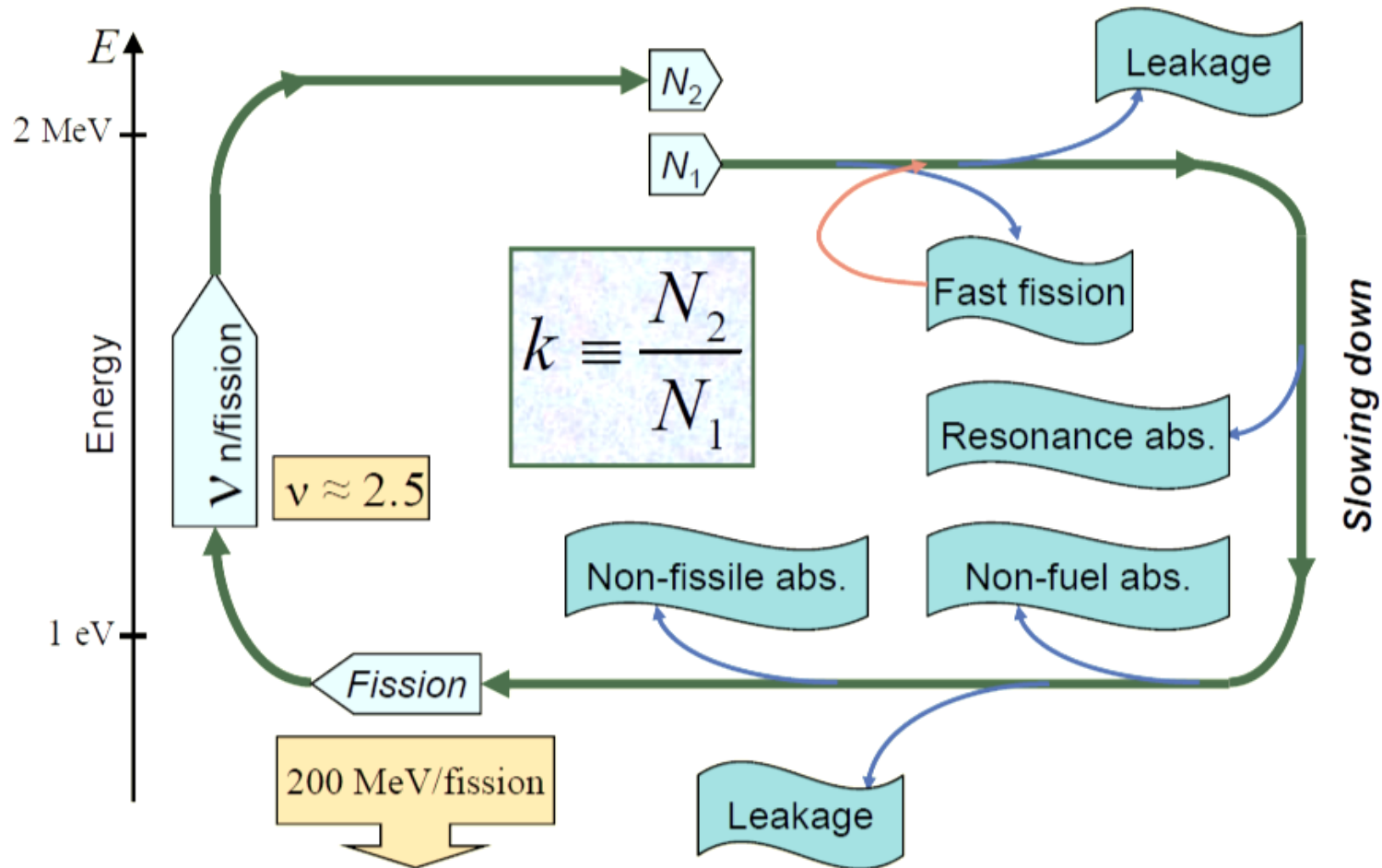
Ωστόσο, έχουμε συζητήσει ένα απείρως μεγάλο αντιδραστήρα. Οι πραγματικοί αντιδραστήρες είναι με πεπερασμένο μέγεθος. Οι τέσσερις παράγοντες που έχουμε συζητήσει ισχύουν, αλλά τώρα πρέπει να πάρουμε υπόψη το γεγονός ότι θα χάσουμε νετρόνια από την επιφάνεια. Σε ένα πραγματικό αντιδραστήρα υπάρχει διαρροή όλων των νετρονίων.

- Αν τώρα εισαγάγει L_F και L_S ως κλάσματα των ταχέων και βραδέων νετρονίων που χάνονται στον αντιδραστήρα, στη συνέχεια, η πλήρης σχέση για τον παράγοντα αναπαραγωγής είναι

$$k = \eta \epsilon p f (1 - L_F)(1 - L_S)$$

SIX FACTOR FORMULA

Πλήρης κύκλος στον αντιδραστήρα



Έλεγχος του αντιδραστήρα

A. Υπάρχει μια λεπτή ισορροπία μεταξύ της παραγωγής νετρονίων και απορρόφησης.

Μπορούμε να πούμε ότι το επίπεδο ισχύος είναι ανάλογο προς τον αριθμό των νετρονίων που είναι διαθέσιμα στον αντιδραστήρα.

B. Δεν είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε ένα αντιδραστήρα στον οποίο ο αριθμός των νετρονίων σε διαδοχικές γενιές είναι ακριβώς σταθερός.

Γ. Μπορούμε να προσθέσουμε έξτρα σχάσιμο υλικό για τα καύσιμα και να χρησιμοποιήσουμε τις λεγόμενες "ράβδους ελέγχου» για να απορροφήσουν κάποια από τα νετρόνια. Αυτές οι ράβδοι μπορούν να μπαίνουν και να βγαίνουν για τον έλεγχο της "δραστηριότητας".

Οι ράβδοι ελέγχου αποτελούνται από υλικά με καλή απορρόφηση νετρονίων όπως κάδμιο (με ασήμι και το ίνδιο), το βόριο και το άφνιο.

Έλεγχος του αντιδραστήρα

Δ. Χρειαζόμαστε το επιπλέον σχάσιμο υλικό ούτως ή άλλως δεδομένου ότι για μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας αρκετό σχάσιμο υλικό καταστρέφεται και ο αντιδραστήρας θα σβήσει.

Ε. Επιπλέον, παράγει πολλά προϊόντα σχάσης που απορροφούν νετρόνια και αυτό θα μειώσει επίσης τον k .

Μπορούμε να το κάνουμε πραγματικότητα??

Ράβδοι ελέγχου

Χρειαζόμαστε ράβδους ελέγχου, αλλά μπορεί να λειτουργήσει?

Θυμηθείτε τις χρονικές κλίμακες. Αν είχαμε μόνο τα άμεσα νετρόνια θα συνέβαιναν όλα τόσο γρήγορα που δεν θα ήταν δυνατό (βλέπε παρακάτω).

- Ωστόσο, το μικρό κλάσμα των **καθυστερημένων νετρονίων** επιμηκύνει το χρονικό διάστημα και αυτό μεταβάλλει το ρυθμό με τον οποίο ο πληθυσμός νετρονίων αλλάζει και μας δίνει χρόνο να εισάγουμε ή να αποσύρουμε τις ράβδους ελέγχου.
- Χαρακτηριστικοί ράβδοι ελέγχου χρησιμοποιούν στοιχεία όπως το κάδμιο ή βορίου που απορροφούν νετρόνια. Οι ράβδοι μπορούν να μετακινηθούν μέσα ή έξω από τον πυρήνα για τη σταθεροποίηση της τον αριθμό των νετρονίων.
- Μπορεί να υπάρχουν "burnable δηλητήρια», ως μέρος του πυρήνα τα οποία μόλις συλλάβουν νετρόνια εξουδετερώνονται.
- Μερικές φορές ως μέτρο ασφαλείας τα δηλητήρια προστίθενται στο υγρό ψύξης. Για παράδειγμα σε διακοπές λειτουργίας έκτακτης ανάγκης (SCRAM) οι χειριστές μπορούν να ενχύσουν διαλύματα που περιέχουν δηλητήρια στο ψυκτικό π.χ. νιτρικό γαδολίνιο

Ψυκτικό: για την απαγωγή της θερμότητας απο την καρδιά

Πρέπει να αφαιρέσετε τη θερμότητα από τον πυρήνα η οποία θα χρησιμοποιηθεί.

Οι επιθυμητές ιδιότητες του "απαγωγέα θερμότητας"

- Μπορεί να κυκλοφορεί (αέρια, υγρά)
- Χαμηλή ικανότητα σύλληψης νετρονίων (για να εξοικονομήσει νετρόνια και για την πρόληψη ενεργοποίησης)
- Χημικά σταθερό
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα

H₂O, D₂O, He, υγρό νάτριο

Στη συνέχεια, η θερμότητα ανταλλάσσεται σε ένα λέβητα ατμού για την περιστροφή στροβίλων