

Σχάση - Σύντηξη

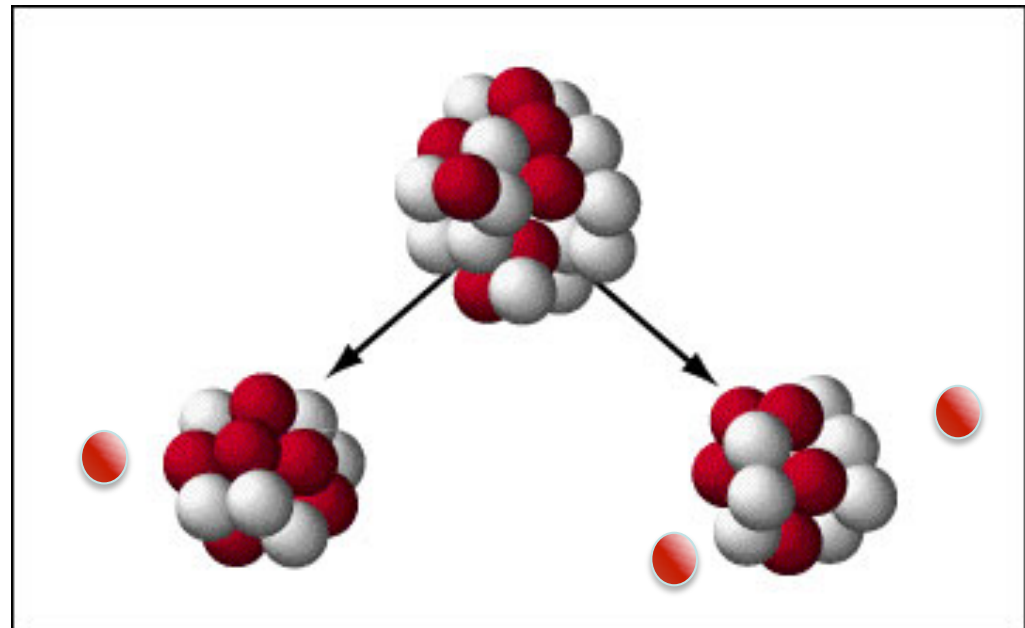
Δήμος Σαμψωνίδης

(18-11-2014)

Πυρηνική σχάση (nuclear fission)

Πυρηνική σχάση (nuclear fission) : διαδικασία πυρηνικής διάσπασης κατά την οποία ένας ασταθής πυρήνας χωρίζεται σε δύο τμήματα συγκρίσιμης μάζας.

Από κάθε σχάση ενός πυρήνα παράγονται δύο μεγάλα **θραύσματα σχάσης** και 2-3 **νετρόνια** (ίσως και κάποιος ελαφρύς πυρήνας, όπως τρίτιο).



Ιστορία

1934 Ida Noddack αναφέρει τη σχάση ως υπόθεση για την μη ύπαρξη πυρήνων με $Z > 92$ (μεγάλης διάρκειας ζωής).

1934 Η ομάδα **Fermi** παράγει πυρηνική μεταστοιχείωση με βομβαρδισμό νετρονίων, μέσω (n, γ) και $n(\alpha)$ αντιδράσεων. Όταν U βομβαρδίστηκε, πήραν σχάση, αλλά παρερμηνεύτηκε.

1938 Hahn και Strassman βομβάρδισαν U και ανακάλυψαν Ba στα προϊόντα της αντίδρασης. **Lise Meitner** (πρώην βοηθός του Hahn, πέταξε στη Σουηδία για να διαφύγει από τους ρατσιστικούς νόμους της ναζιστικής Γερμανίας) εξήγησε τα πειραματικά αποτελέσματα ως σχάση. Το 1944 ο Hahn πήρε το Νόμπελ.

() Η ομάδα **Joliot-Curie** στο Παρίσι ανακάλυψαν ότι τα δευτερεύοντα νετρόνια που απελευθερώνονται κατά τη σχάση του ουρανίου, καθιστώντας έτσι εφικτή μια αλυσιδωτή αντίδραση.

1942 Fermi και Szilard δημιούργησαν τον πρώτο αντιδραστήρα, **Chicago Pile 1**

1945 Η πρώτη «ατομική» (σχάση) εξερράγη βόμβα στο Alamogordo, και σύντομα στη Χιροσίμα και το Ναγκασάκι

1951 Παραγωγή ηλεκτρισμού από έναν πυρηνικό αντιδραστήρα (100 kW) σε Arco, Αϊντάχο

1954 Στο Ομπνίνσκ της ΕΣΣΔ έγινε το πρώτο εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας του κόσμου για την παραγωγή ηλεκτρισμού για ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, και παρήγαγε περίπου 5 MW μεγαβάτ ηλεκτρικής ενέργειας.

1957 Το πρώτο πυρηνοκίνητο υποβρύχιο.

Ανακάλυψη της σχάσης

Η σχάση ανακαλύφθηκε με πειράματα βομβαρδισμού ουρανίου με νετρόνια.

Otto Hahn (1879-1968)

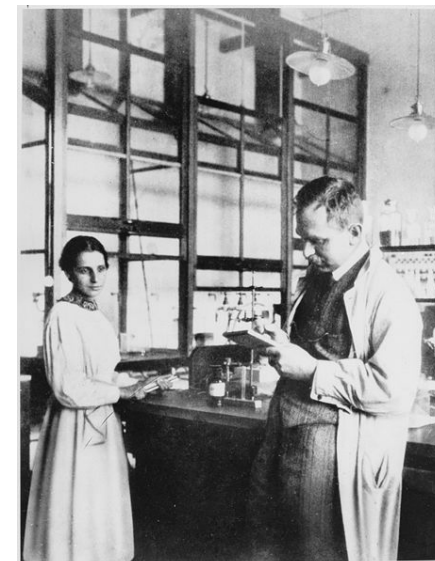
Γερμανός πυρηνικός χημικός με Νόμπελ Χημείας (1944) για τη σχάση βαρέων πυρήνων. Εργάστηκε σε Γερμανία και Αμερική και ανακάλυψε πολλά ραδιο-ισότοπα. Θεωρείται ότι **ανακάλυψε την πυρηνική σχάση**. Εργαζόμενος για τη δημιουργία υπερ-ουράνιων στοιχείων ($Z > 92$) με βομβαρδισμό ουρανίου με νετρόνια, παρατήρησε να παράγονται ισότοπα που έμοιαζαν π.χ. με το βάριο. Καθοριστικό ρόλο στην ορθή ερμηνεία και δημοσίευση των αποτελεσμάτων, το **1938**, έπαιξαν οι βοηθοί και συνεργάτες του, **Lise Meitner** και **Fritz Strassmann**, καθώς και ο **Otto Robert Frisch**.



Otto Hahn

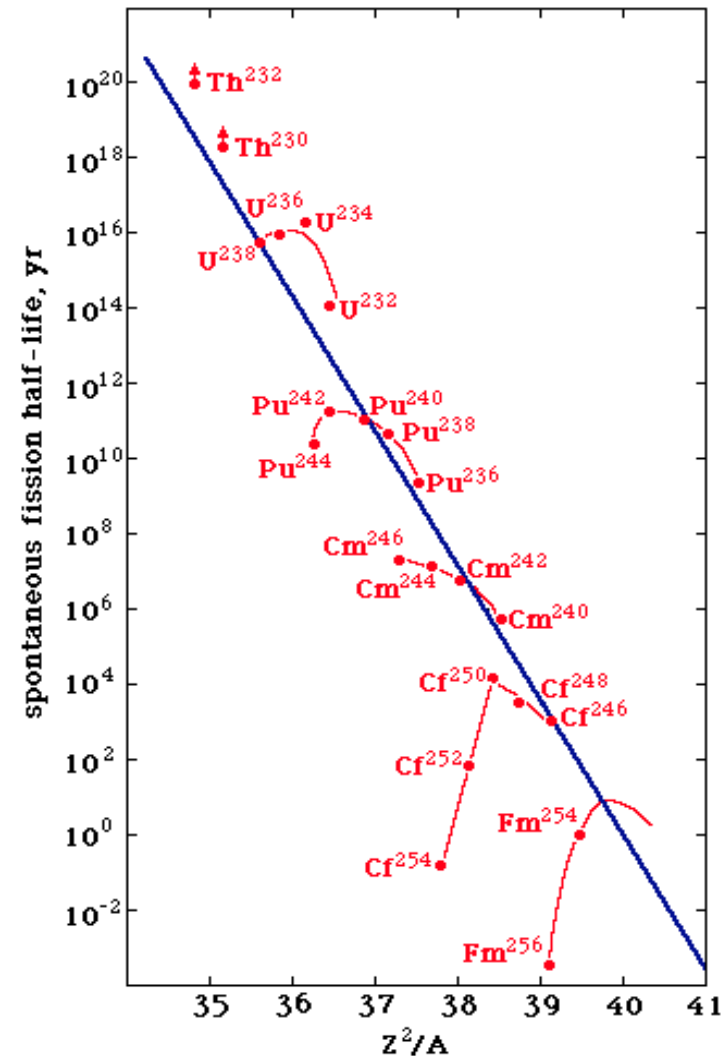


Για την ιστορία, η Γερμανίδα χημικός **Ida Noddack** πρότεινε για πρώτη φορά (*Angewandte Chemie*, **1934**), ότι: «...όταν βαρείς πυρήνες βομβαρδίζονται με νετρόνια οι πυρήνες αυτοί μπορεί να διασπαστούν σε αρκετά μεγάλα θραύσματα." Κανένας όμως δεν έλαβε σοβαρά τη θέση αυτή ή επιχείρησε πειράματα επ' αυτού, ούτε και η ίδια η Ι. Νόντακ. Η ιδέα ότι βαρείς πυρήνες θα μπορούσαν να διασπαστούν σε ελαφρύτερα στοιχεία θεωρήθηκε τότε από όλους ως εντελώς απαράδεκτη.



Χρόνοι ζωής αυθόρμητης σχάσης

- Κυμαίνονται από 10^{16} ετη για ^{238}U μέχρι 10^{-2} ετη για ^{256}Fm .
- Μοιάζει πολύ με την α -διάσπαση,
- Η διαδικασία της σχάσης καταστέλλεται από την παρουσία ενός φράγματος δυναμικού.
- Η α -διάσπαση είναι μια οριακή περίπτωση της σχάσης



Σχάση – σε ίσα μέρη (παρ. 6.3)

Παραμόρφωση μητρικού πυρήνα:

- αύξηση επιφάνειας → μείωση ενέργειας σύνδεσης
- μείωση ενέργειας Coulomb → αύξηση ενέργειας σύνδεσης

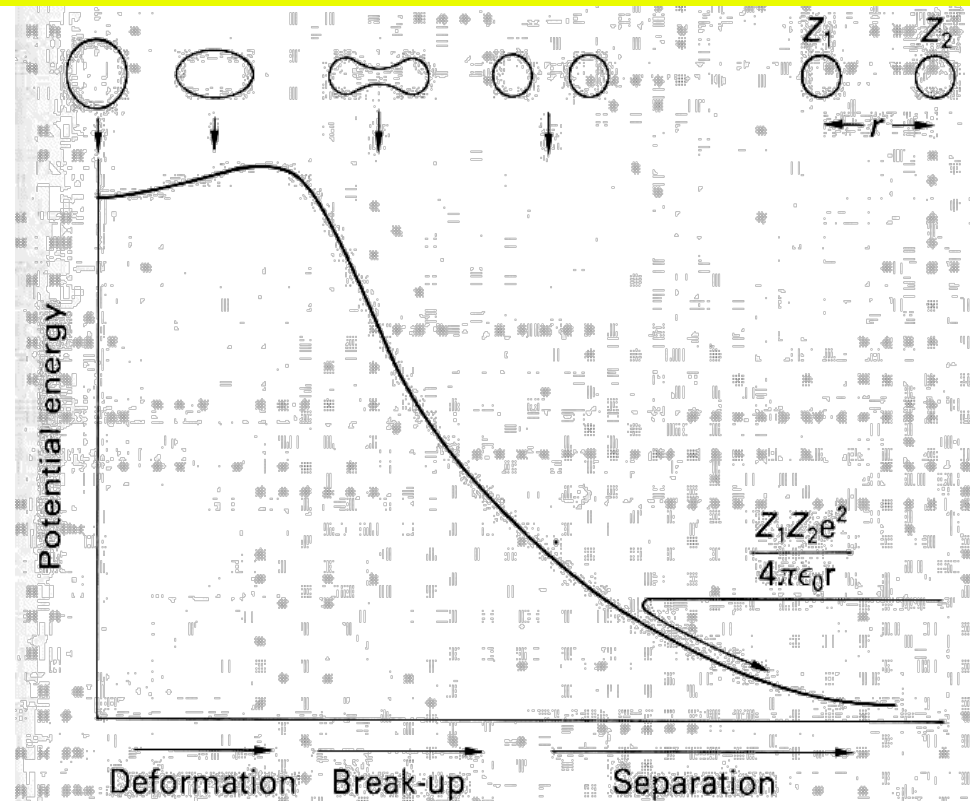
$$M(A,Z) \rightarrow 2 * M(A/2, Z/2) + Q$$

Φαινόμενο σχάσης υγρής σταγόνας

$$B(Z,N) =$$

- $a A$ (όγκου)
- $- b A^{2/3}$ (επιφάνειας)
- $- s (N-Z)^2 / A$ (ασυμμ.)
- $- d Z^2 / A^{1/3}$ (Coulomb)
- $- \delta / A^{1/2}$ (ζευγαρ.)

Σημείωση: για σφαιρικό πυρήνα



1. Παραμόρφωση
μητρικού πυρήνα

2. Δημιουργία των
θυγατρικών
σχηματισμών

3. Οριστικός
διαχωρισμός τους

Σχάση – είναι ενεργειακά προτιμητέα μια μικρή παραμόρφωση;

$M(A,Z)$ σφαιρικός $\rightarrow M(A,Z)$ ελλειψοειδής, με ίσους όγκους:

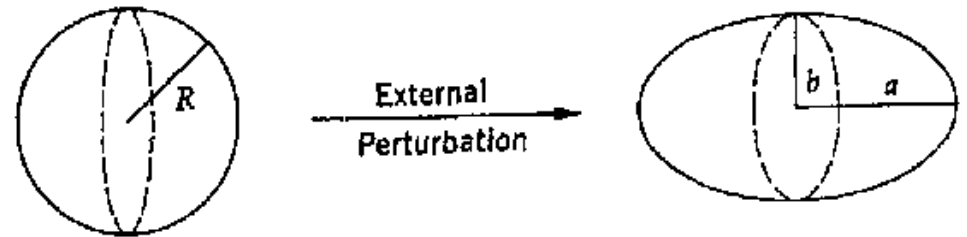
- Όρος επιφανείας:

$$bA^{2/3} \rightarrow bA^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2 \right)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi a b^2.$$

- Όρος Coulomb:

$$d \frac{Z^2}{A^{1/3}} \rightarrow d \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{1}{5} \varepsilon^2 \right)$$



$$a = R(1 + \epsilon)$$

$$b = \frac{R}{(1 + \epsilon)^{1/2}}$$

- Η σχάση είναι προτιμητέα όταν:

$M(A,Z)$ ελλειψ. $< M(A,Z)$ σφαιρ.

$\rightarrow B(A,Z)$ ελειψ $> B(A,Z)$ σφαιρ $\rightarrow B(A,Z)$ ελειψ $- B(A,Z)$ σφαιρ > 0

$$\varepsilon^2 \left(\frac{2}{5} b A^{2/3} - \frac{1}{5} d \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) < 0 \rightarrow \frac{Z^2}{A} > \frac{2b}{d} = 51 \rightarrow Z > 144$$

$Z > 144$ ασταθή ως προς τη σχάση

$Z > 92$ γίνεται αν περάσουν το φράγμα δυναμικού

Σχάση – χρόνοι ζωής στην πράξη

- $M(A,Z) \rightarrow 2 * M(A/2, Z/2) + Q$

- $Q > 0$ όταν:

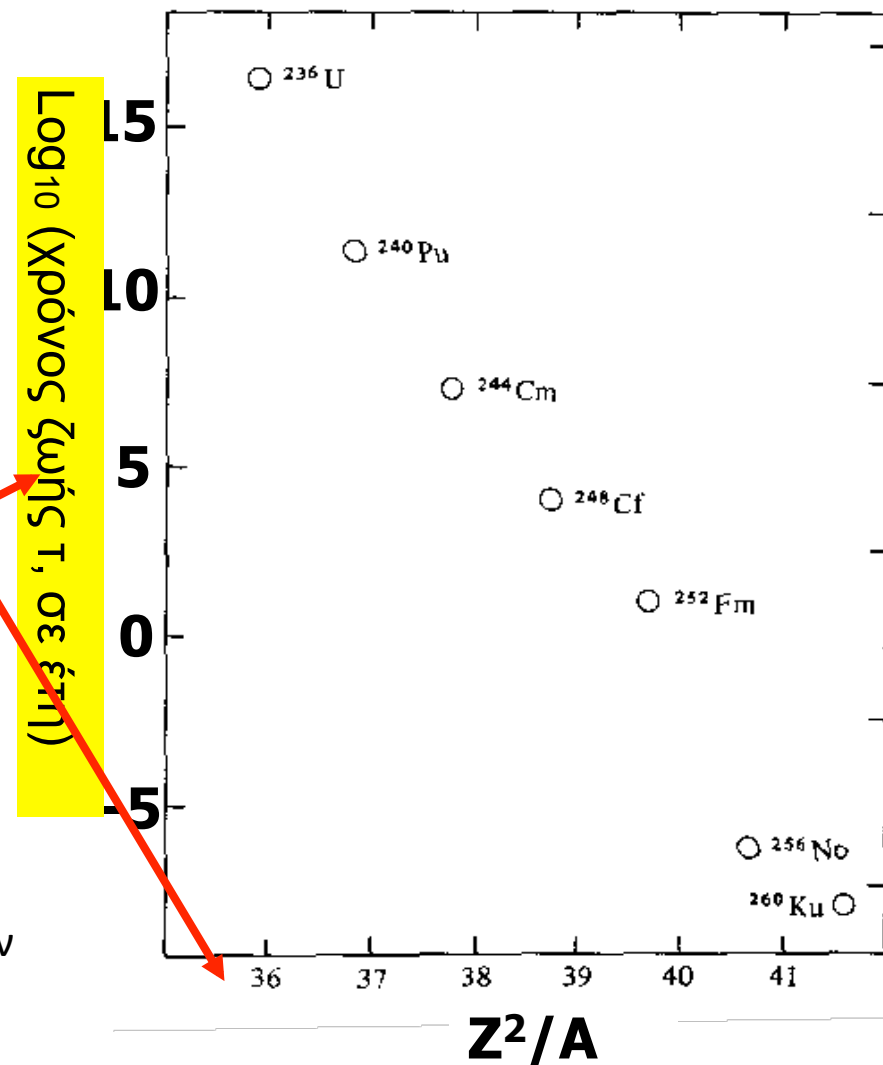
$$Z^2 / A > 18 \quad (^{98}_{42}\text{Mo})$$

- Αλλά δεν γίνεται τόσο εύκολα: φαινόμενο σύραγγας με φράγμα δυναμικού $\sim 5\text{-}6 \text{ MeV}$

→ Στην πράξη γίνεται μόνο όταν $Z^2 / A > 36$

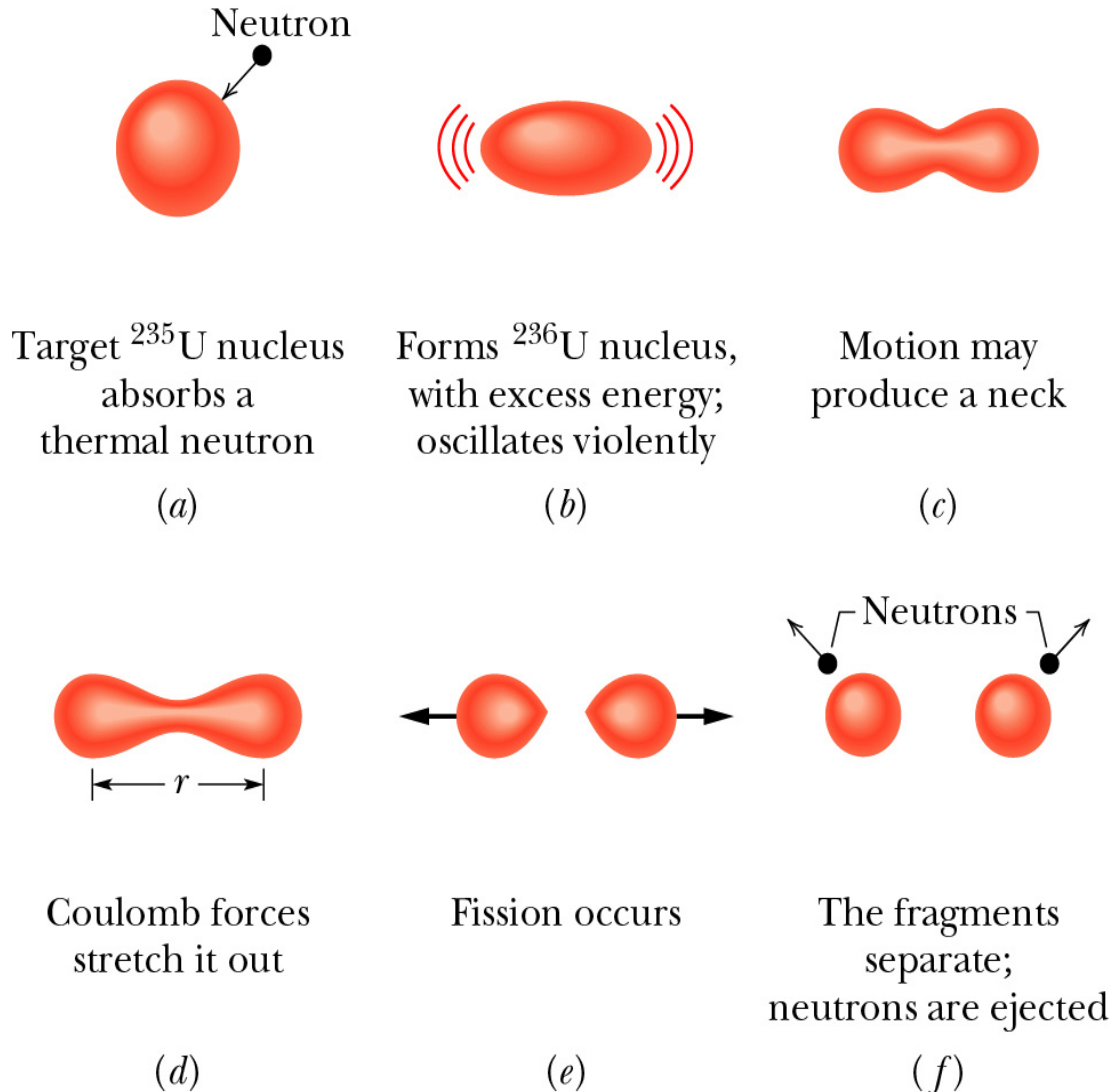
[Κάτι ανάλογο είδαμε και στην α -διάσπαση:

Οτι $Q > 0$ για τα στοιχεία με $Z > 63$ (ή ισοδύναμα, για $A > 151$), αλλά μόνο αυτά που δίνουν $Q > 4 \text{ MeV}$ έχουν χρόνους ζωής που δεν είναι τεράστιοι σε σχέση με την ηλικία της Γής (4.5 δισ χρόνια)! Αυτά έχουν $Z > 83$].



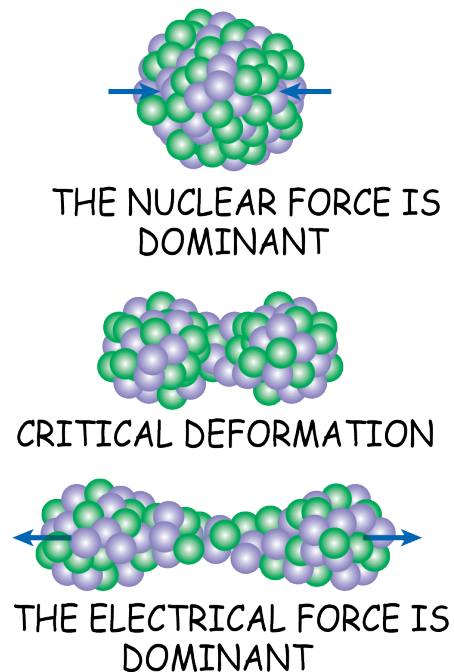
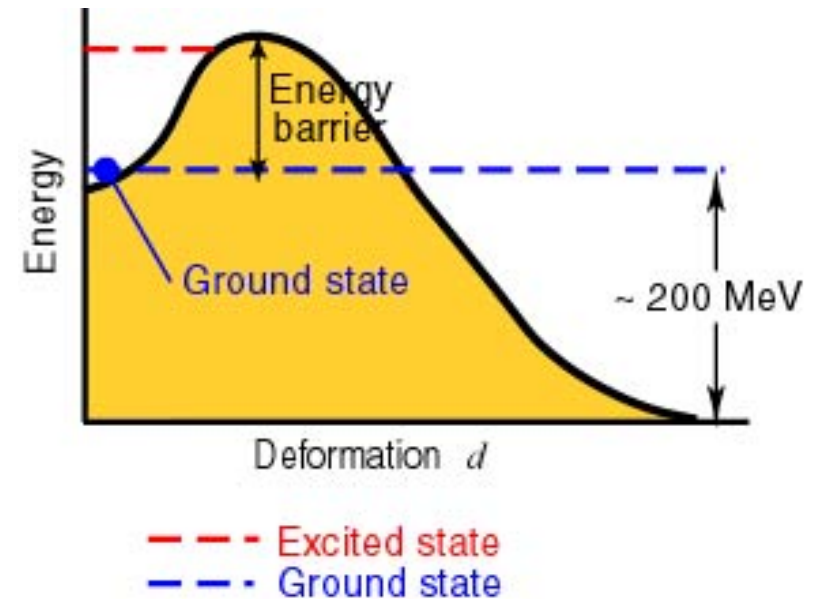
Θεώρηση της σχάσης με το μοντέλο της υγρής σταγόνας

Το αρχικά σφαιρικό σχήμα του πυρήνα επιμηκύνεται στα διάφορα βήματα της σχάσης, μέχρι τον διαχωρισμό του σε δύο κομμάτια.



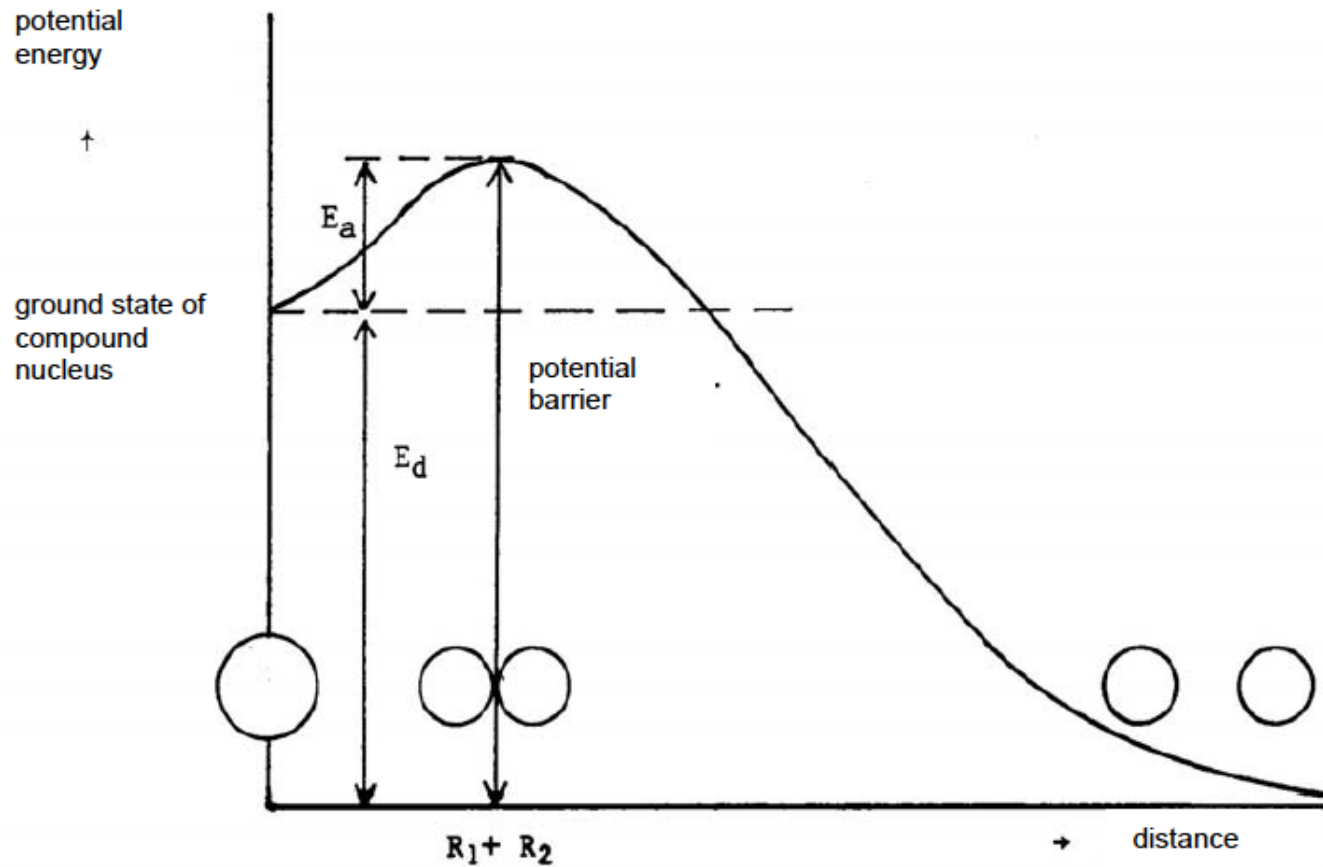
Τι προκαλεί τη σχάση του πυρήνα

Τη σχάση προκαλεί η παραμόρφωση του ασταθούς πυρήνα, η οποία μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη ώστε οι απωστικές δυνάμεις Coulomb να υπερισχύσουν έναντι των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων.

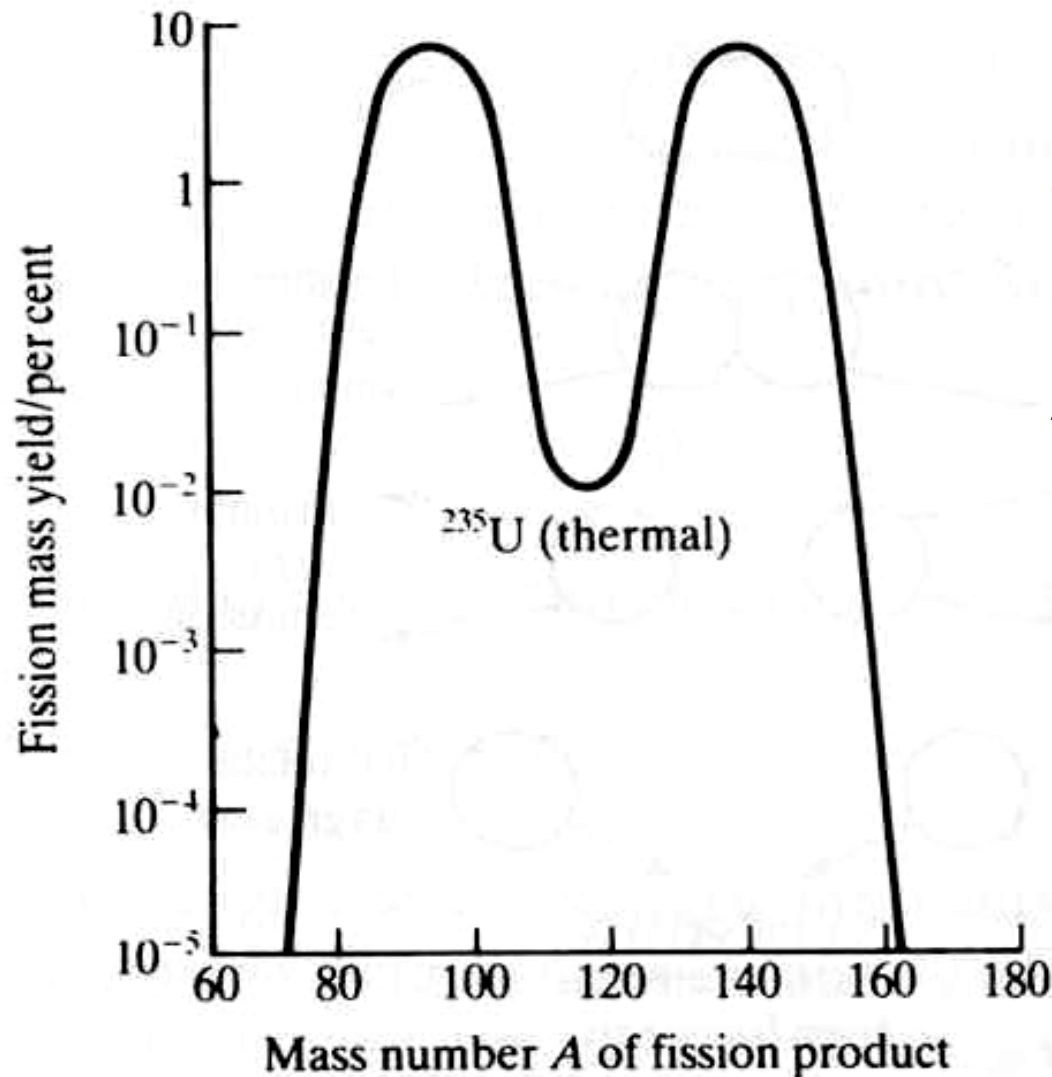


Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας κατά την πυρηνική σχάση, συναρτήσει του βαθμού παραμόρφωσης του πυρήνα. Στη βασική κατάσταση ο πυρήνας βρίσκεται σταθερά στην κοιλάδα του δυναμικού. Όταν διεγερθεί ανεβαίνει σχεδόν στην κορυφή του φράγματος, από όπου μπορεί να ξεφύγει με το φαινόμενο σήραγγος προς την απότομη κάθοδο του δυναμικού, η οποία οδηγεί στη σχάση.

Δυναμικό Coulomb στη σχάση



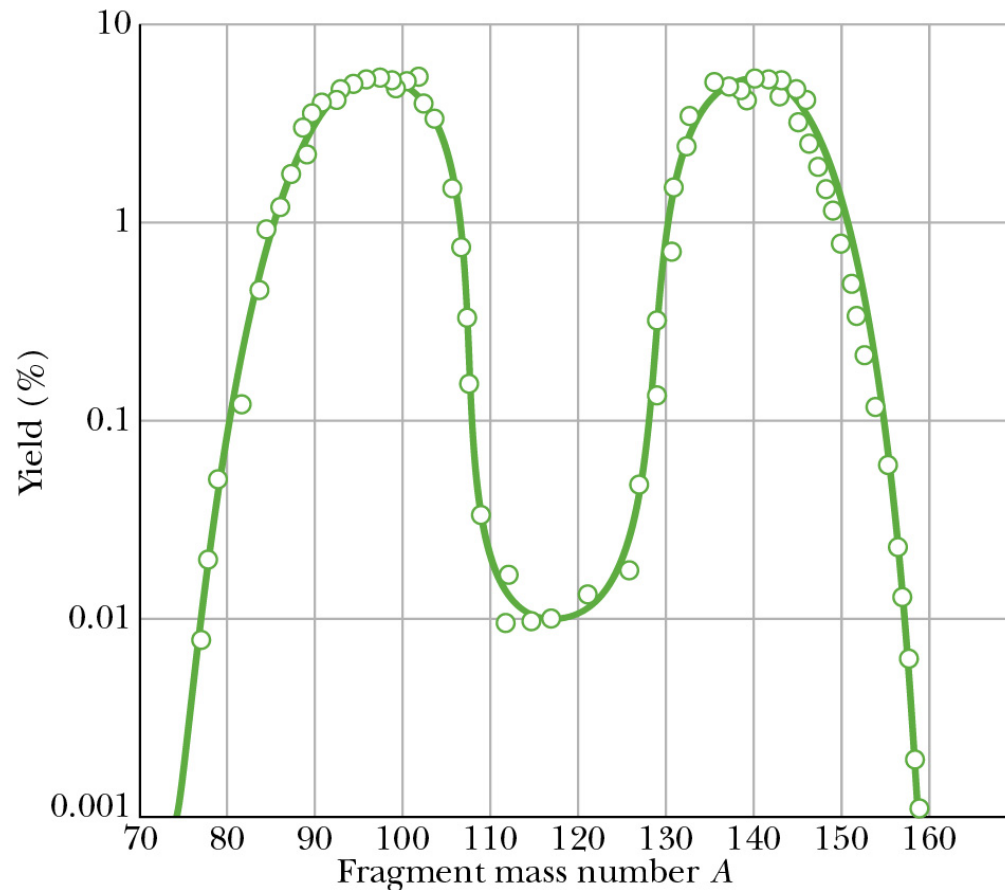
Σχάση – στην πράξη ασυμμετρικοί θυγατρικοί



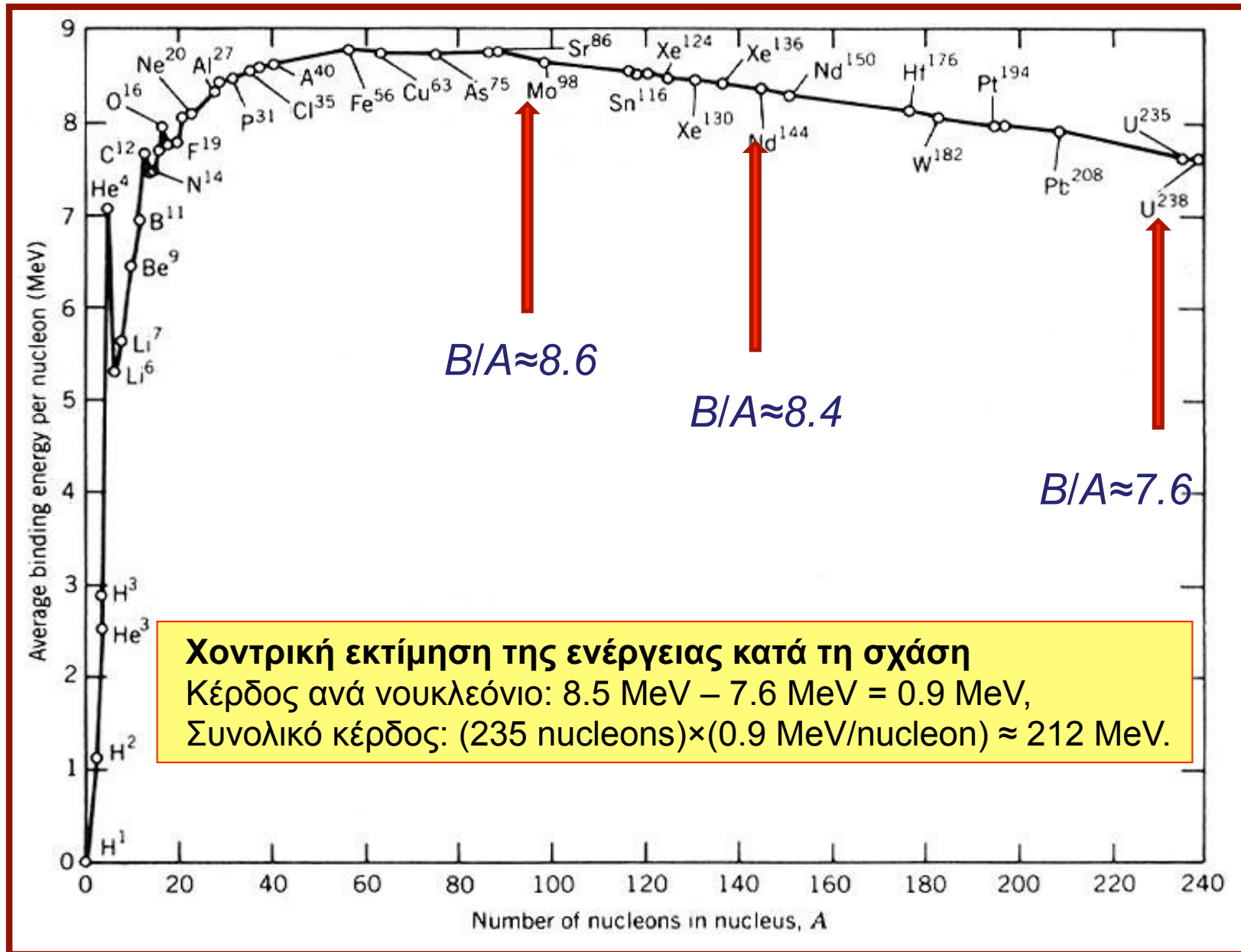
Π.χ., στη σχάση του μητρικού ^{235}U , το πιο πιθανό για τους θυγατρικούς πυρήνες είναι να έχουν, ο ένας $A \sim 90$ και ο άλλος το υπόλοιπο ($A \sim 140$)

Κατανομή των θραυσμάτων σχάσης του ^{235}U

- Πάνω από 100 διαφορετικά νουκλίδια, από περισσότερα από 20 χημικά στοιχεία έχουν βρεθεί μεταξύ των θραυσμάτων σχάσης.
- Η σχάση σε δύο θραύσματα ίσης μάζας είναι απίθανη.
- Τα περισσότερα από τα θραύσματα έχουν μαζικό αριθμό από 90 έως 100 και από 135 έως 145.



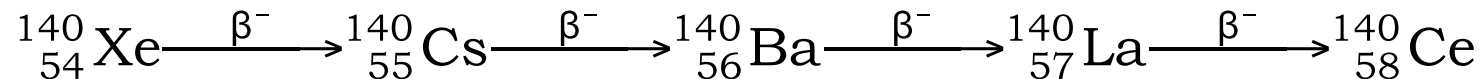
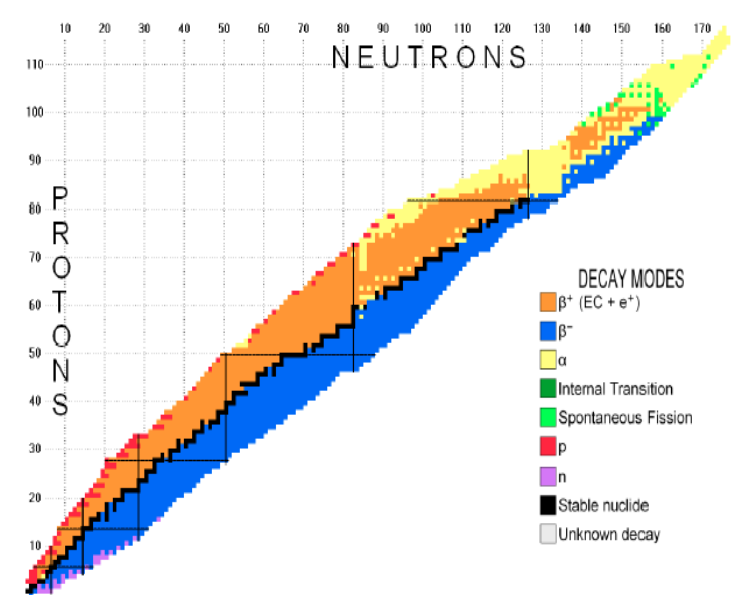
Ενέργεια / σχάση



Θραύσματα τής σχάσης

Τα θραύσματα σχάσης είναι πάντα πολύ **πλούσια σε νετρόνια** και γι' αυτό είναι ασταθή.

- Η αναλογία neutron/proton, για μεγάλα A φθάνει στην τιμή 1.6.
- Ο λόγος neutron/proton των θραυσμάτων σχάσης είναι περίπου 1.3 με 1.4 (για $A = 100$ με 150), ενώ για το U-235, είναι περίπου 1.55.
- Τα θραύσματα $\rightarrow$ **β^- διασπάσεις** $\rightarrow$ σταθερά

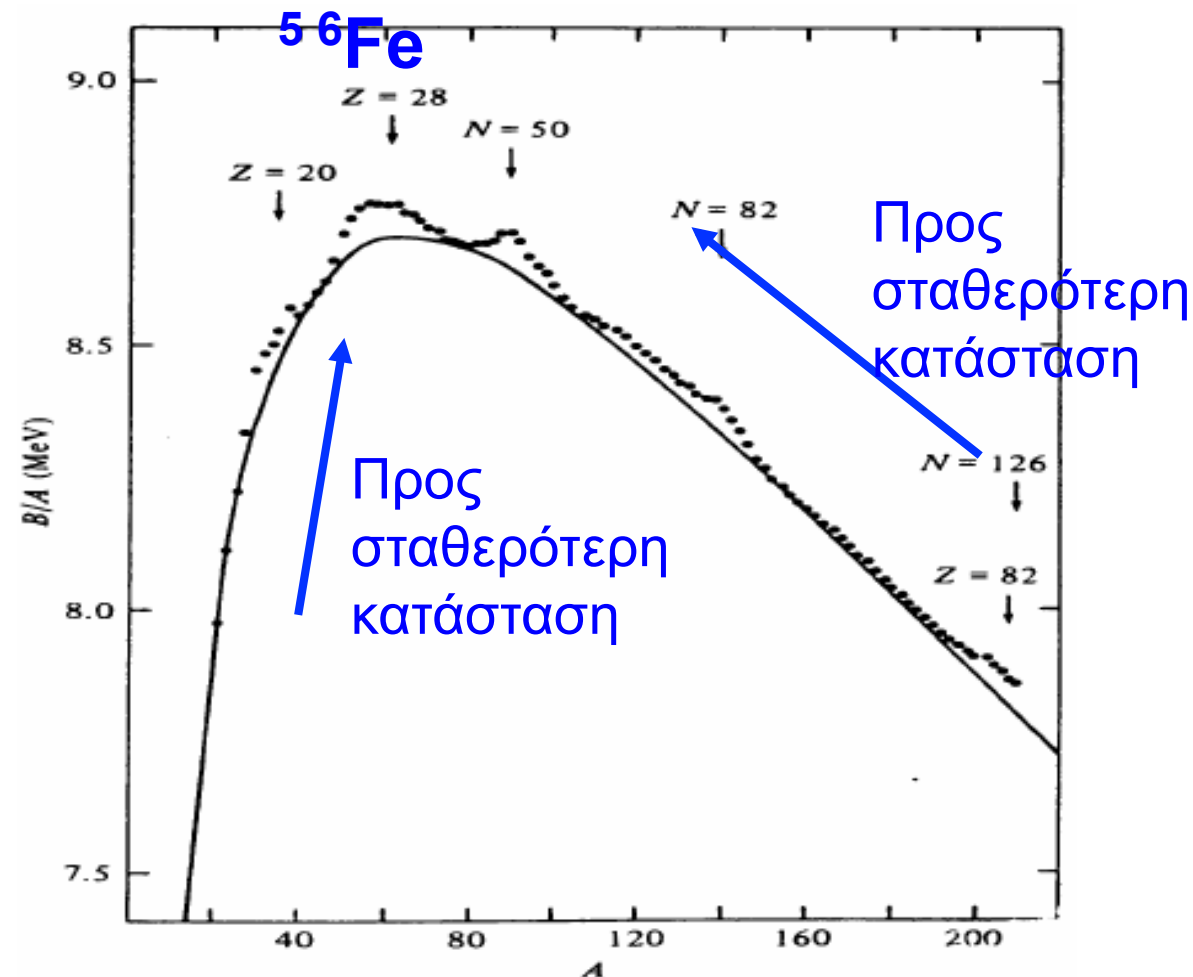


- Το νουκλίδιο Ce-140 είναι σταθερό.
- Αυτή η σειρά των β διασπάσεων παράγει περί τα 15 MeV **πρόσθετης ενέργειας**.

Σχάση – απελευθέρωση ενέργειας

Τι κερδίζουμε αποσυνθέτοντας πυρήνες?

Π.χ., $^{240}_{92}\text{X} \rightarrow ^{120}_{46}\text{Y} + ^{120}_{46}\text{Y} + Q$ (όπου $Q \sim 200 \text{ MeV}$)

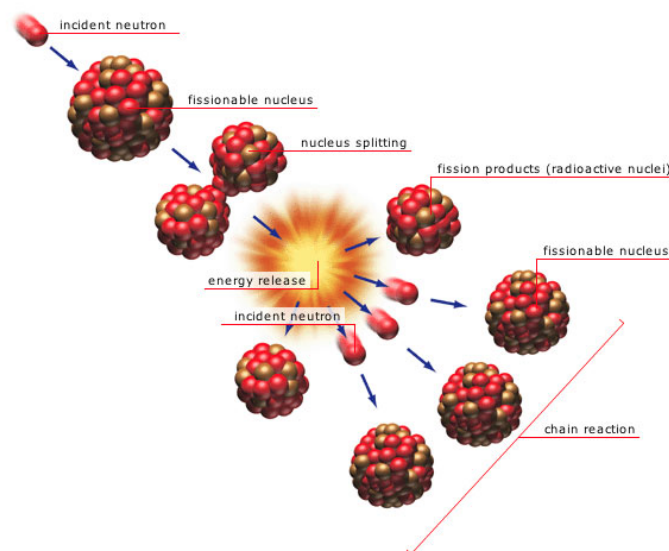


Επαγόμενη Σχάση (παρ. 9.1 βιβλίου)

- Μπορούμε να βοηθήσουμε έναν βαρύ πυρήνα να σχασθεί αν ρίξουμε πάνω του ένα νετρόνιο.Π.χ:



- Ουσιαστικά, το νετρόνιο απορροφήθηκε από το ${}^{235}\text{U}$ και δημιουργήθηκε το ${}^{236}\text{U}$, το οποίο όμως είναι ασταθές και σχάζεται.
- Ανάλογα τον μητρικό πυρήνα, η ενέργεια του νετρονίου που θα προκαλέσει σχάση μπορεί να είναι ακόμα και ~μηδενικής ενέργειας!
- Τέτοιοι πυρήνες είναι: ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, ${}^{241}_{94}\text{Pu}$



Επαγόμενη Σχάση (παρ. 9.1 βιβλίου)

- Μπορούμε να βοηθήσουμε έναν βαρύ πυρήνα να σχασθεί αν ρίξουμε πάνω του ένα νετρόνιο.Π.χ:



- Ουσιαστικά, το νετρόνιο απορροφήθηκε από το ${}^{235}\text{U}$ και δημιουργήθηκε το ${}^{236}\text{U}$, το οποίο όμως είναι ασταθές και σχάζεται.
- Ανάλογα τον μητρικό πυρήνα, η ενέργεια του νετρονίου που θα προκαλέσει σχάση μπορεί να είναι ακόμα και ~μηδενικής ενέργειας!
- Τέτοιοι πυρήνες είναι: ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, ${}^{241}_{94}\text{Pu}$
- Αν τουλάχιστον ένα από τα παραγόμενα νετρόνια μπορεί να προκαλέσει τη σχάση ενός ίδιου πυρήνα, έχουμε αλυσιδωτή αντίδραση. Αν για κάθε νετρόνιο που πέφτει πάνω σ' έναν μητρικό πυρήνα, παράγονται κατά μέσο όρο k νετρόνια που προκαλούν με τη σειρά τους σχάση, τότε
 - α) αν $k > 1$ η αντίδραση μας έχει ξεφύγει (υπερκρίσιμη),
 - β) Αν $k < 1$ τότε η αντίδραση σβήνει εκθετικά με το χρόνο (υποκρίσιμη),
 - γ) αν $k = 1$ τότε η αντίδραση είναι ελέγξιμη (κρίσιμη)

Επαγόμενη Σχάση

- Για την επαγόμενη σχάση, κάποιος πρέπει να παρέχει ενέργεια στον πυρήνα, έτσι ώστε να ξεπεράσει το φράγμα σχάσης, ή να σχηματιστεί ένα σύνθετος πυρήνας όπου το φράγμα μειώνεται ή εξαλείφεται.

- Μπορεί να επάγει σχάση με:

-photofission

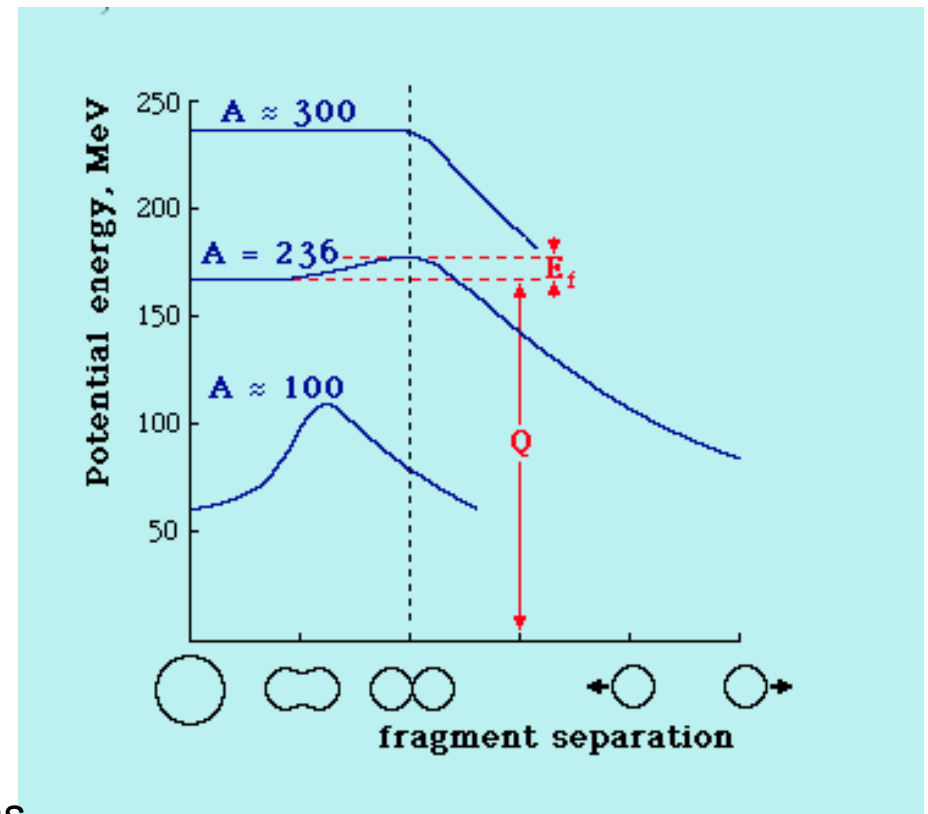
$\gamma + (Z,A) \rightarrow (Z,A)^* \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + \text{neutrons}$

-proton induced fission

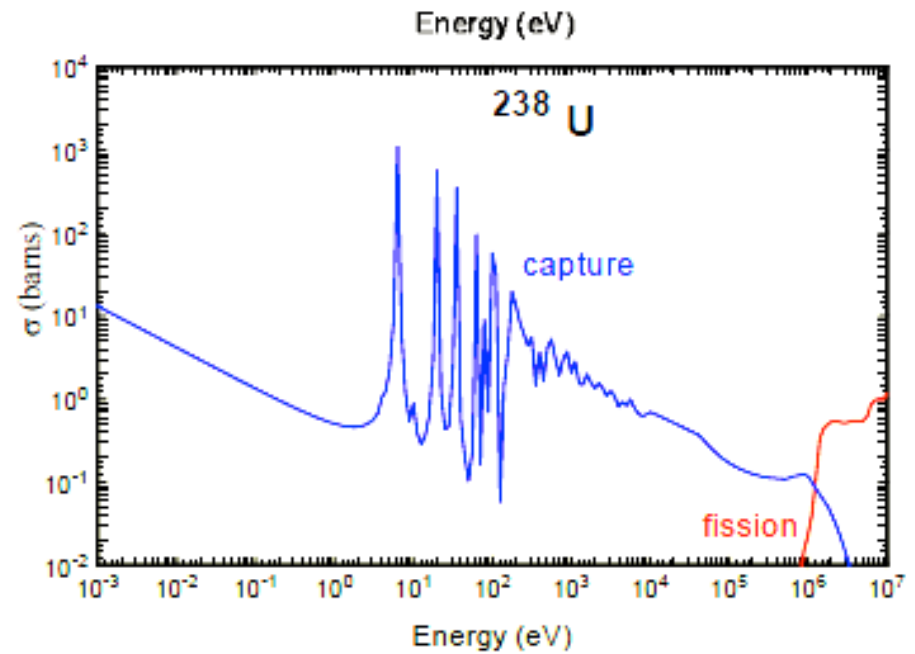
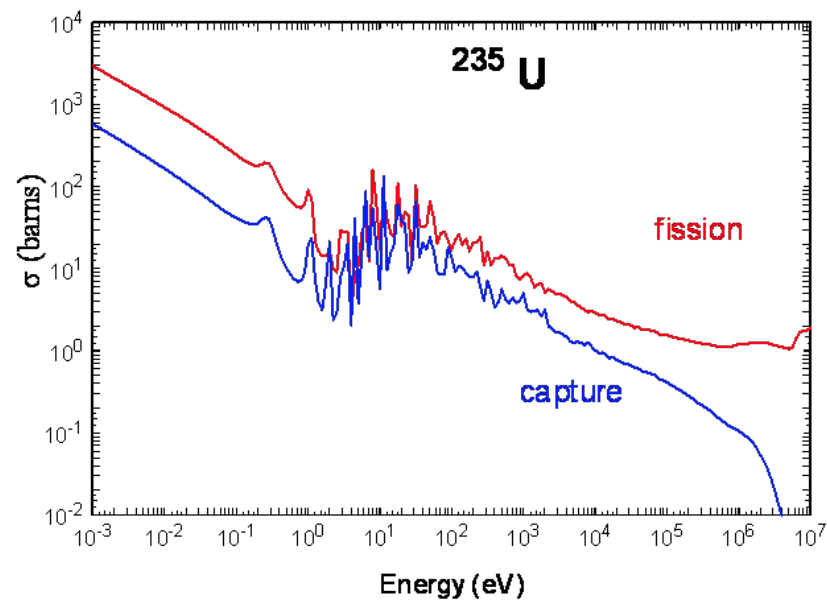
$p + (Z,A) \rightarrow p + (Z,A)^* \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + \text{neutrons}$

-neutron induced fission

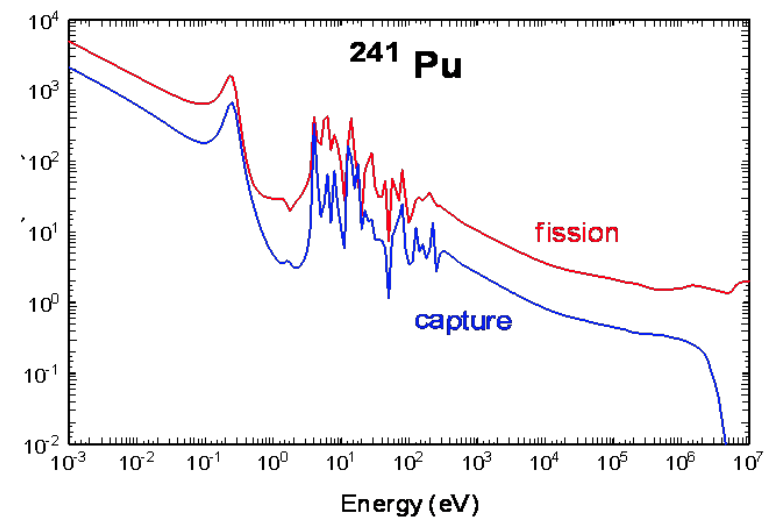
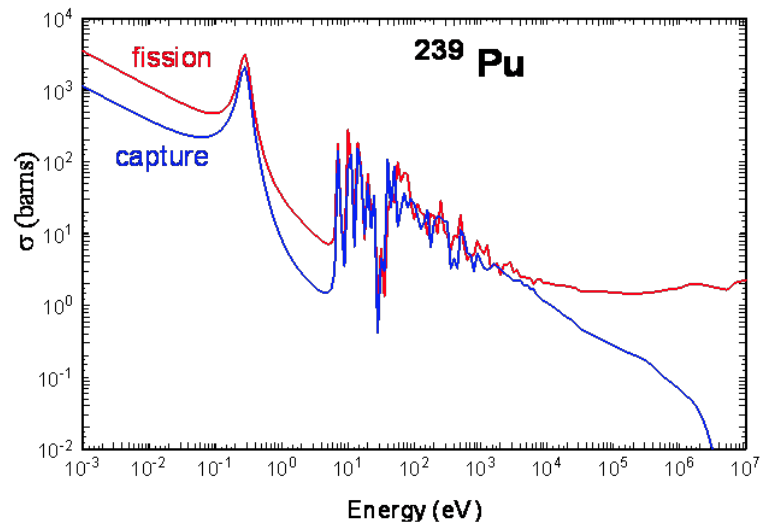
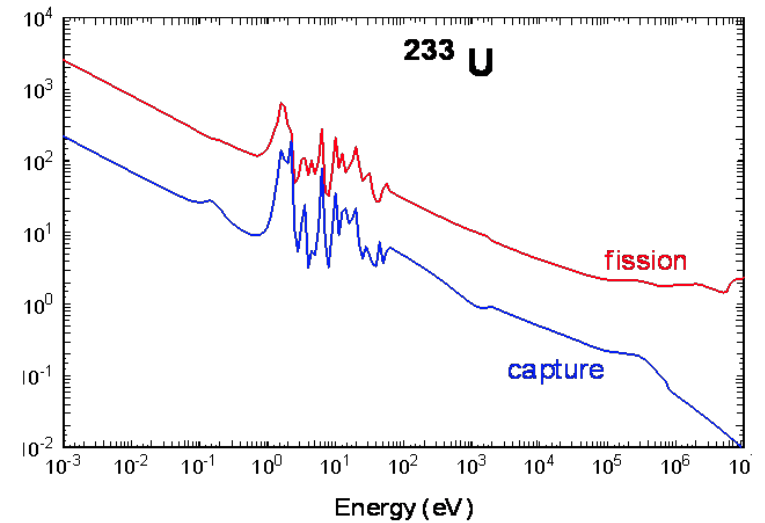
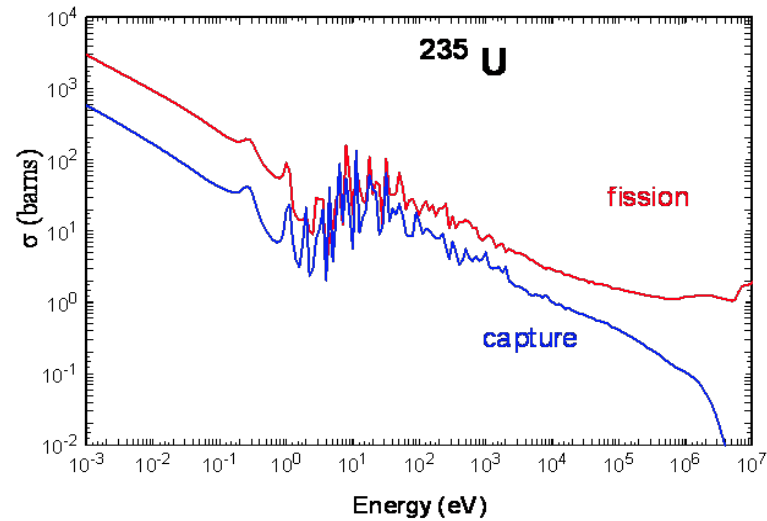
$n + (Z,A) \rightarrow (Z,A+1)^* \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + \text{neutrons}$



Fission Cross Section



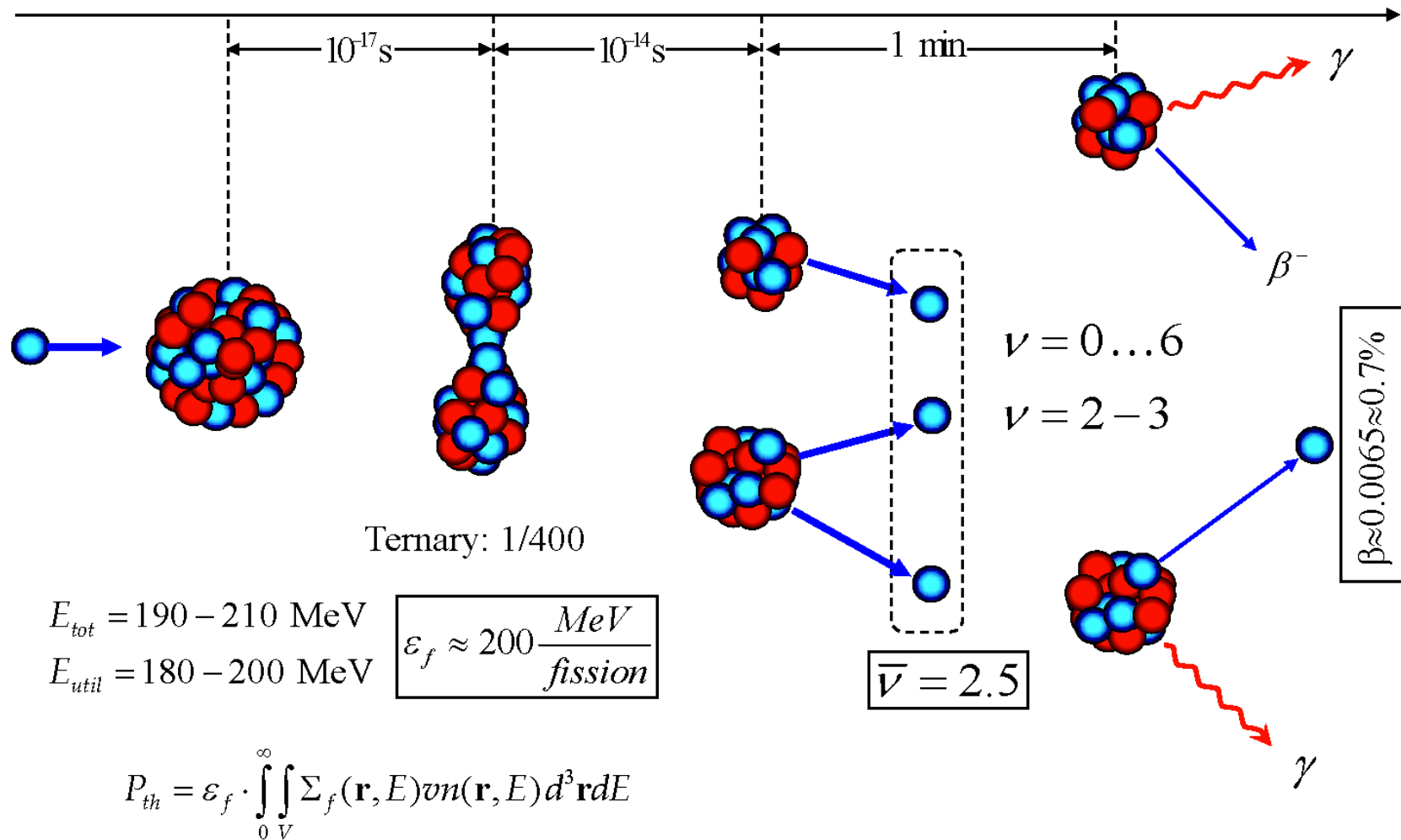
Fission Cross Section

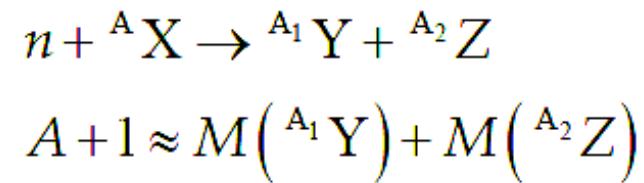


Σύσταση του φυσικού ουρανίου

Isotope	weight percentage	mass number	radioactive half-life
$^{234}_{92}\text{U}$	0.006	234.0409	$2.4 \cdot 10^5 \text{ a}$
$^{235}_{92}\text{U}$	0.712	235.0439	$7.0 \cdot 10^8 \text{ a}$
$^{238}_{92}\text{U}$	99.282	238.0508	$4.5 \cdot 10^9 \text{ a}$

Σχάση ^{235}U

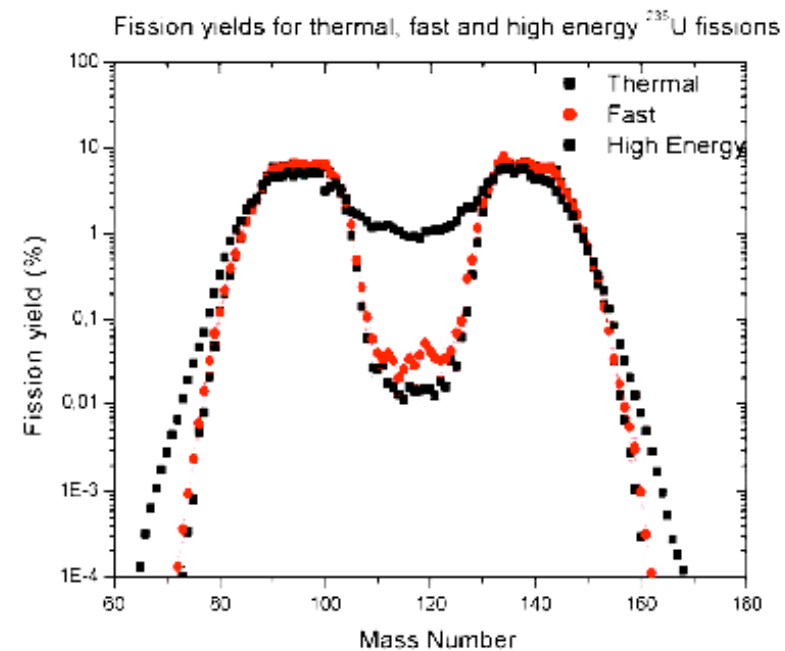
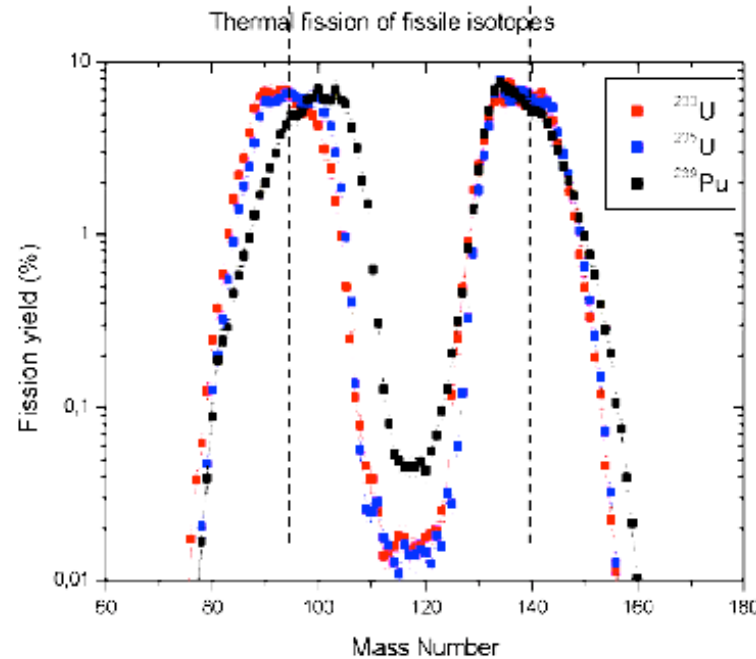




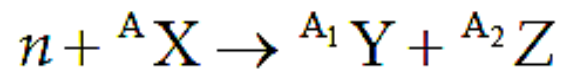
80 different nuclides (prime)

Lighter: ${}^{87}_{35}\text{Br}$, ${}^{94}_{38}\text{Sr}$, ${}^{99}_{40}\text{Zr}$, ${}^{85}_{32}\text{Gd}$

Heavier: ${}^{147}_{57}\text{La}$, ${}^{140}_{54}\text{Xe}$, ${}^{135}_{52}\text{Te}$, ${}^{149}_{60}\text{Nd}$



Κινητική Ενέργεια

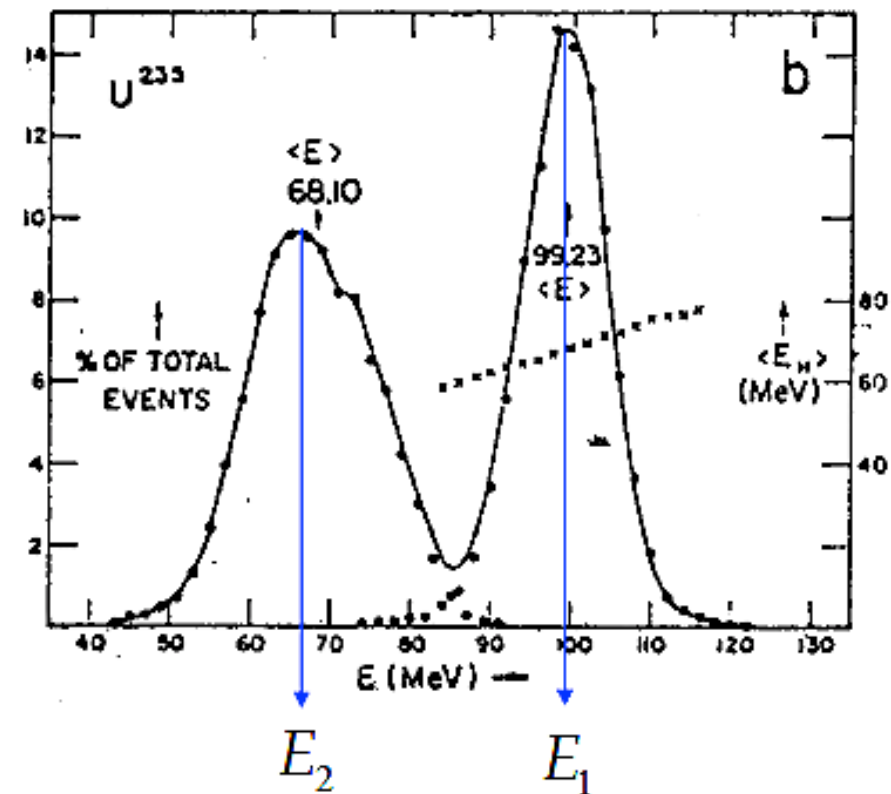


$$E_1 = \frac{M_1 v_1^2}{2}; \quad E_2 = \frac{M_2 v_2^2}{2}$$

$$M_1 v_1 = M_2 v_2 \Rightarrow \frac{E_2}{E_1} = \frac{M_1}{M_2}$$

$$M_1 < M_2 \Rightarrow E_2 < E_1$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{95}{140}$$

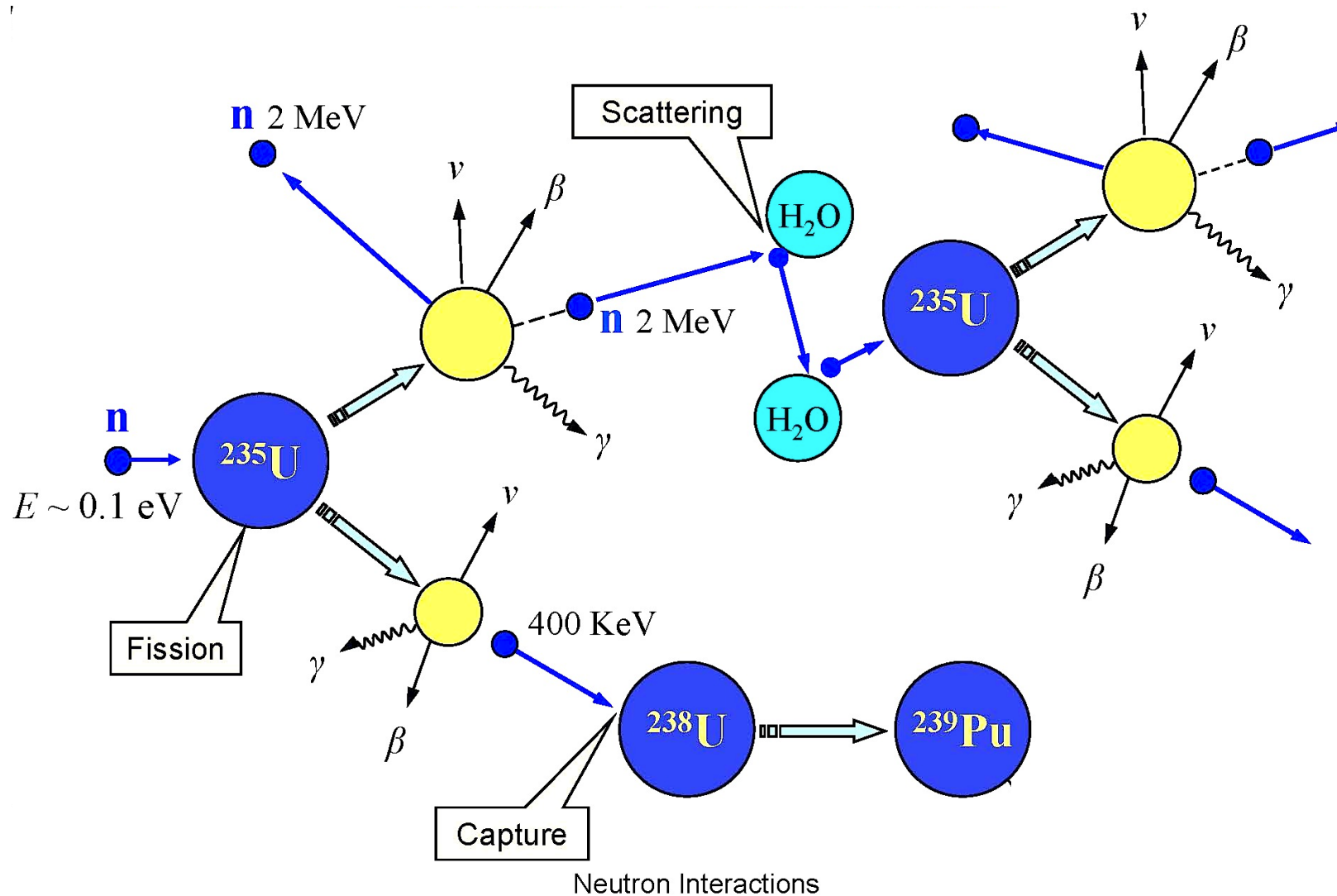


$$A = 140 \quad A = 95$$

Κατανομή ενέργειας στη σχάση ^{235}U

		MeV
Kinetic energy of fission fragments		167
Kinetic energy of fission neutrons		5
Energy of prompt γ -rays		6
Sub-total of 'immediate' energy		178
Electrons from subsequent β -decays	8	
γ -rays following β -decays	7	
Sub-total of 'delayed' energy		15
Neutrino energy		12
		205

Αλληλεπιδράσεις νετρονίων



Αντιδραστήρας Σχάσης

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

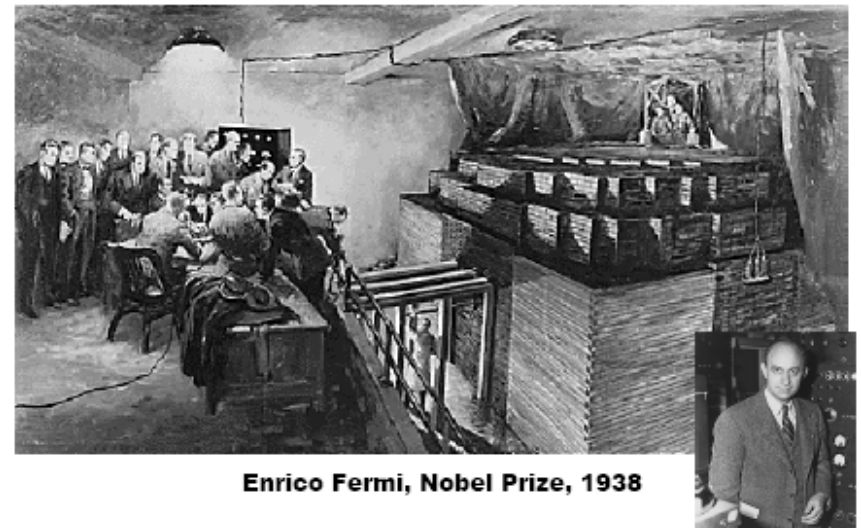
- Θα πρέπει να είναι ελαφρύ
- Καλύτερα να είναι στερεό, από την άποψη της κατασκευής ενός αντιδραστήρα και την υψηλή πυκνότητα των ατόμων.
- Θα πρέπει να είναι φτηνό.
- Θα πρέπει να είναι εύκολα διαχειρίσιμο.
- Θα πρέπει να έχει μικρή ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίου

Ο **Ανθρακας** 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

Αλυσιδωτές αντιδράσεις

- Αν τουλάχιστον ένα από τα παραγόμενα νετρόνια μπορεί να προκαλέσει τη σχάση ενός πυρήνα, έχουμε **αλυσιδωτή αντίδραση**. Το πρώτο νετρόνιο μπορεί να προέρχεται από αυθόρμητη σχάση ή από εξωτερική πηγή.
- Μια αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης παράγει **άμεσα νετρόνια** (prompt neutrons) και ενδιάμεσα βαρέα θραύσματα που είναι ραδιενεργά και παράγουν ενέργεια με τη διάσπασή τους. Κάποια παράγουν και νετρόνια, τα **καθυστερημένα νετρόνια**, τα οποία συνεισφέρουν στην αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης.
- Κατά μέσο όρο η κάθε σχάση πυρήνα U-235 παράγει 2.5 νετρόνια, επομένως το 40% των παραγόμενων νετρονίων χρειάζονται για να διατηρήσουν την αλυσιδωτή αντίδραση.
- Ένας πυρήνας U-235 είναι πιθανότερο να απορροφήσει ένα νετρόνιο όταν αυτό είναι χαμηλής ενέργειας (κάτω από 1 eV) και να υποστεί σχάση, από ένα νετρόνιο υψηλής ενέργειας (1 MeV) όπως αυτά που ελευθερώνονται από τη σχάση. Αντίθετα, το U-238 απορροφά ταχέα νετρόνια χωρίς να δίνει σχάση. Για να μην χάνονται τα νετρόνια μη παραγωγικά, επιδιώκεται η επιβράδυνσή τους με κατάλληλο υλικό, τον **επιβραδυντή**.

Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης

- Σε έναν **πυρηνικό αντιδραστήρα**, τα υψηλής ενέργειας νετρόνια επιβραδύνονται μέσω κρούσεων με πυρήνες του **επιβραδυντή (moderator)**, ενός υλικού εντός του οποίου είναι βυθισμένο το σχάσιμο υλικό, έτσι ώστε να αυξηθεί η πιθανότητα πρόκλησης περαιτέρω σχάσεων του U-235.
- Στους αντιδραστήρες ισχύος, ως επιβραδυντές χρησιμοποιούνται **υλικά μικρού Z**, συχνά νερό και γραφίτης.
- Ο ρυθμός της αντίδρασης και άρα η **κρισιμότητα του αντιδραστήρα**, ελέγχεται με την εισαγωγή ή εξαγωγή **ράβδων ελέγχου** που είναι κατασκευασμένες από στοιχεία (όπως B και Cd) οι πυρήνες των οποίων απορροφούν νετρόνια χωρίς να δημιουργούν κάποια περαιτέρω αντίδραση.

Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης

- Το ισότοπο U-238 μπορεί επίσης να απορροφήσει νετρόνια, δημιουργώντας $U^{*}-239$, αλλά με σχετικά χαμηλή πιθανότητα που δεν είναι αρκετή για να διατηρηθεί μια αλυσιδωτή αντίδραση.
- Το ουράνιο που χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες είναι συνήθως “**εμπλουτισμένο**” (enriched), δηλαδή έχει σε αυξημένη αναλογία το ισότοπο **U-235**, πάνω από την τιμή που υπάρχει στο φυσικό ουράνιο, 0.7%, και φθάνει συνήθως στο 3%.

Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης

Η πιο συχνή εφαρμογή των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι η **παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**.

Η ενέργεια της σχάσης εμφανίζεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων σχάσης, το ενδιαμέσο αποτέλεσμα της οποίας είναι να αυξήσει την εσωτερική ενέργεια του υλικού σχάσης και του επιβραδυντή που το περιβάλλει.

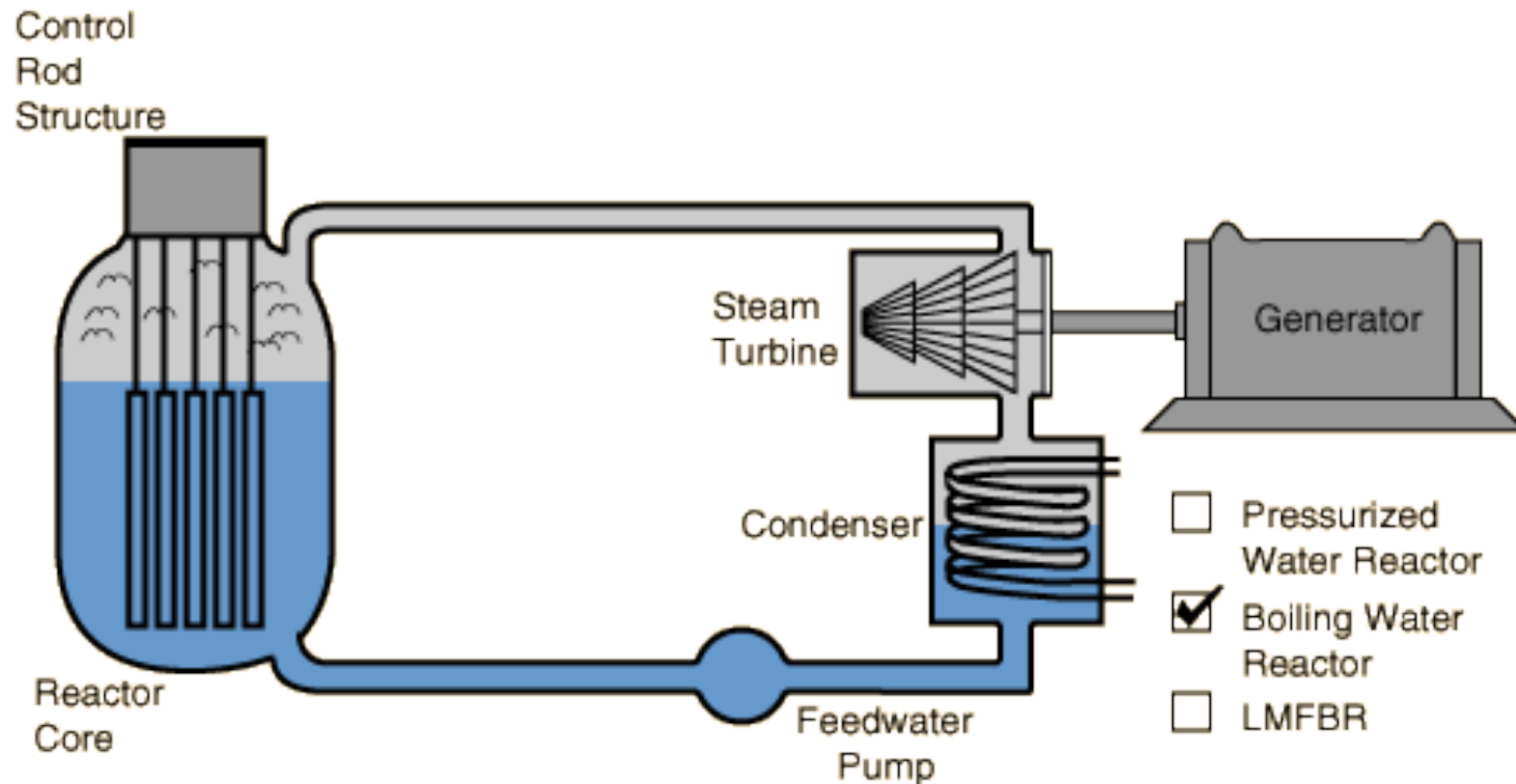
Η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας μεταδίδεται ως θερμότητα για βρασμό νερού → παραγωγή ατμού → περιστροφή της τουρμπίνας → λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας → παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η μετάδοση της ενέργειας των θραυσμάτων σχάσης γίνεται θερμαίνοντας το νερό που περιβάλλει την **καρδιά του αντιδραστήρα** (reactor core) και το οποίο είναι έντονα ραδιενεργό.

Χρησιμοποιείται λοιπόν μια γεννήτρια ατμού (steam generator) που είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας (heat exchanger) που παίρνει τη θερμότητα από το θερμό ραδιενεργό νερό και παράγει μη-ραδιενεργό ατμό, ο οποίος κινεί τις τουρμπίνες.

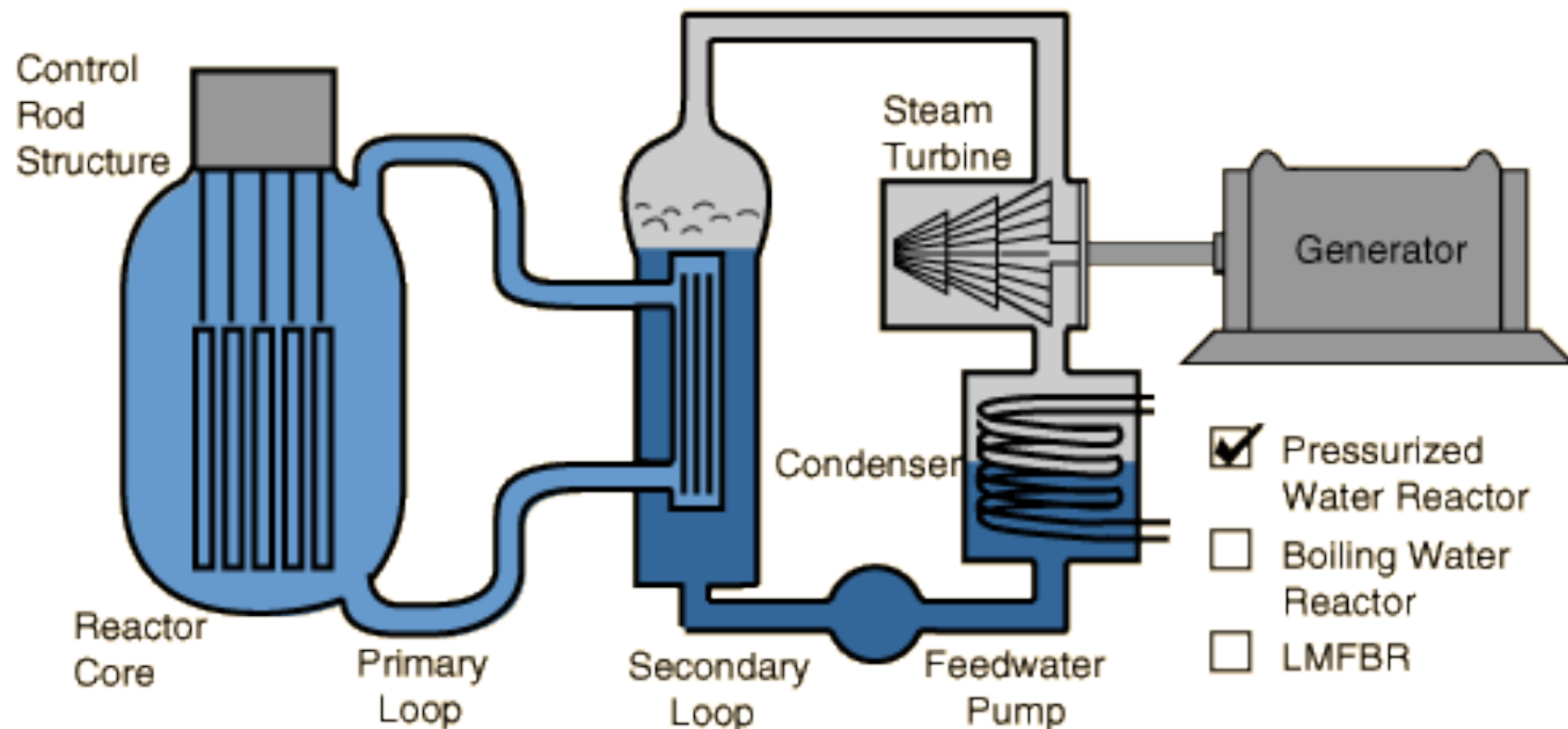
Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (boiling water reactor)

Στον BWR, το νερό που περνά από την καρδιά του αντιδραστήρα λειτουργώντας ως επιβραδυντής και ψυκτικό υλικό, λειτουργεί επίσης και ως πηγή του ατμού για τις τουρμπίνες (θερμοκρασία 285 °C, πίεση 70 atm). Μειονέκτημα, η μεγάλη πιθανότητα ραδιενεργού διαρροής και μόλυνσης του όλου συστήματος.



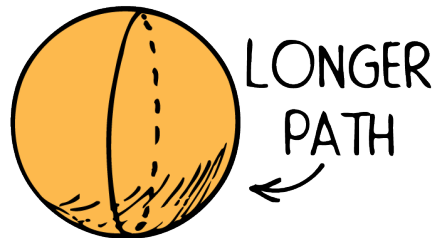
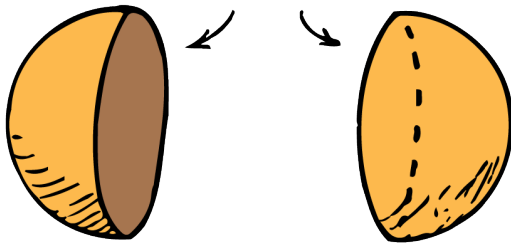
Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactor)

Στον PWR, το νερό που περνά από την καρδιά του αντιδραστήρα λειτουργώντας ως επιβραδυντής και ψυκτικό υλικό, δεν φτάνει στις τουρμπίνες αλλά μένει πεπιεσμένο (160 atm, 315 °C) σε ξεχωριστό κύκλωμα. Πλεονέκτημα, η αποφυγή πιθανότητας ραδιενεργού διαρροής και η υψηλότερη απόδοση λόγω μεγαλύτερης πίεσης και θερμοκρασίας



Πυρηνική βόμβα

SHORT PATH THROUGH
EACH PIECE

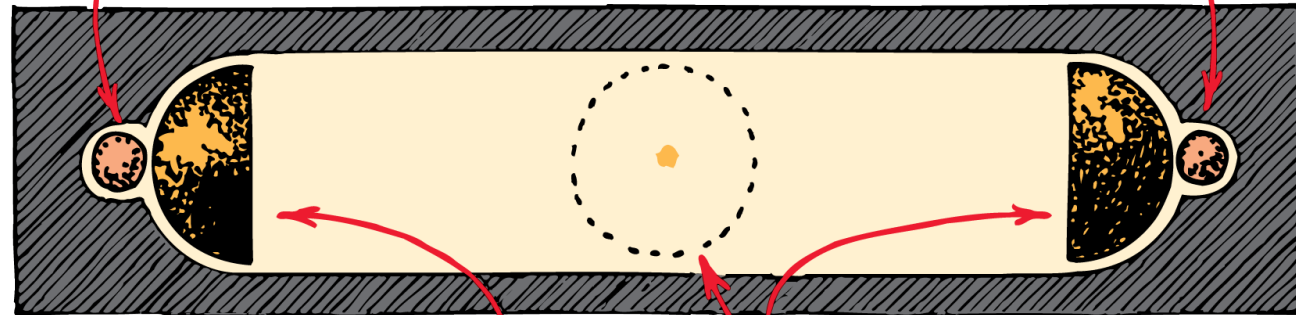


LONGER
PATH

Δημιουργία κρίσιμης μάζας
με συνένωση κομματιών που
δεν έχουν την κρίσιμη μάζα.

BOMBA !

TNT TO DRIVE URANIUM PIECES
QUICKLY TOGETHER



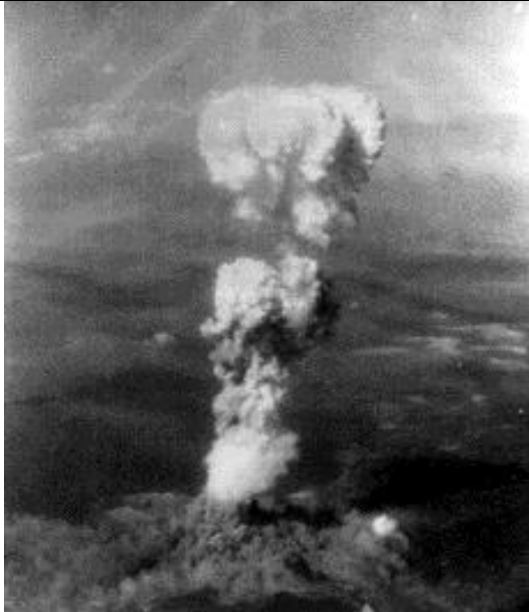
SUBCRITICAL PIECES
OF URANIUM

RADIOACTIVE SOURCE
THAT SUPPLIES FREE
NEUTRONS

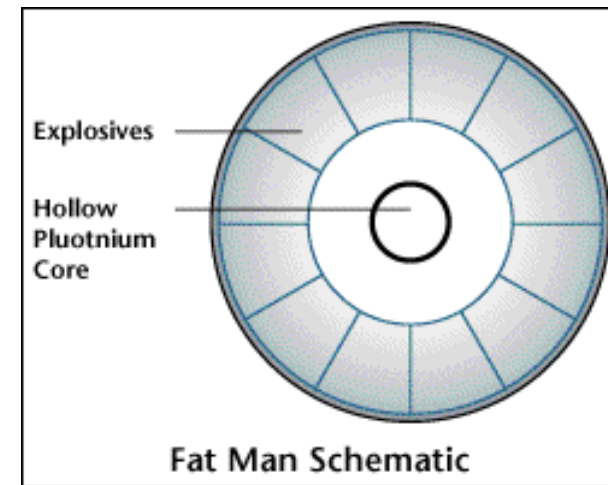
Little Boy Bomb



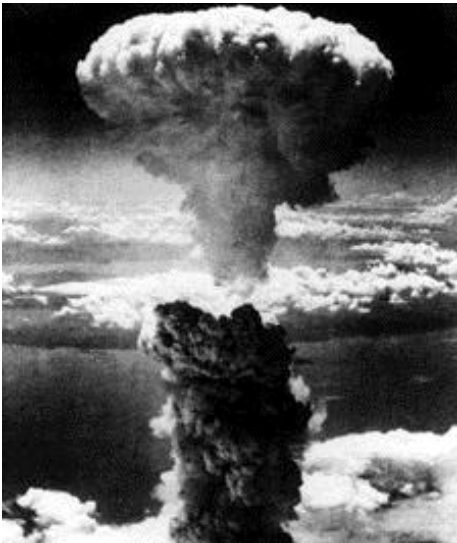
- Dropped on Hiroshima August 6, 1945
- U-235 gun-type bomb
- Between 80,000 and 140,000 people killed instantly



Fat Man



- Plutonium implosion-type bomb
- Dropped on Nagasaki August 9, 1945
- 74,000 killed and 75,000 severely injured



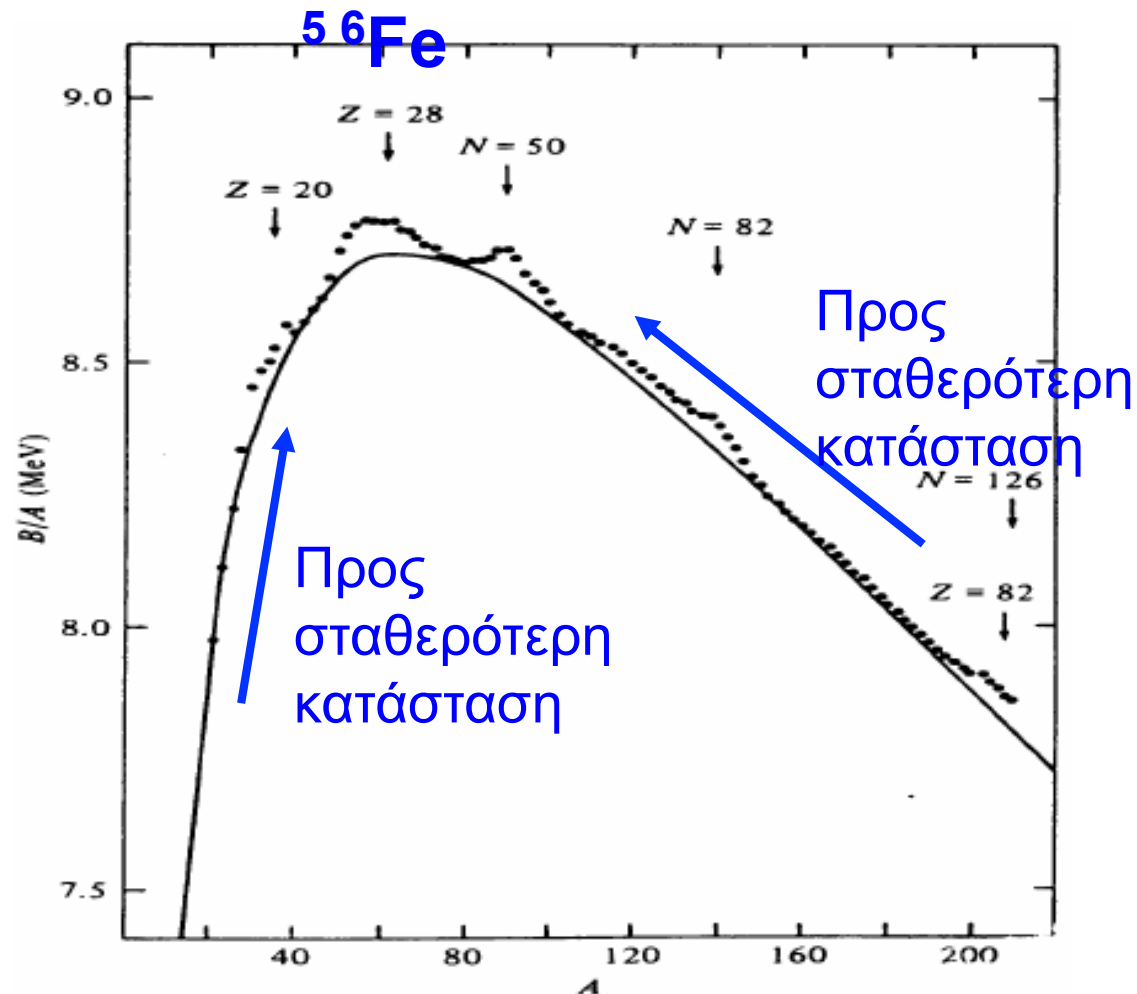
Trinity: η πρώτη πυρηνική δοκιμή



Trinity ήταν η κωδική ονομασία της πρώτης δοκιμής πυρηνικής βόμβας. Πραγματοποιήθηκε από τον Αμερικανικό Στρατό τον Ιούλιο του 1945, ως το αποτέλεσμα του Manhattan Project. Η έκρηξη έγινε σε μια έρημο, 56 km νοτιοανατολικά της πόλης Socorro του New Mexico. Στην Trinity χρησιμοποιήθηκε συσκευή πλουτωνίου (nicknamed "The Gadget"), ίδια με αυτή στο Ναγκασάκι. Η ισχύς της έκρηξης ήταν 20 kilotons TNT. Στην εικόνα, η έκρηξη μετά από 16 ms.

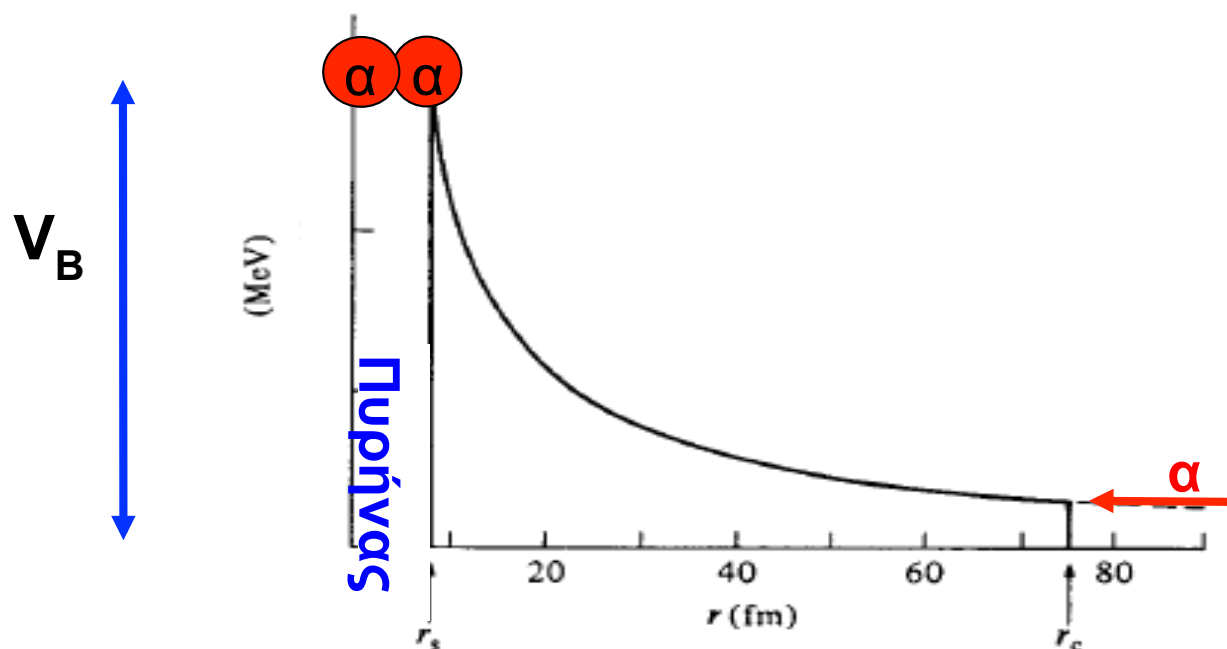
Σύντηξη (παρ. 10.1 βιβλίο)

Τι κερδίζουμε συνθέτοντας πυρήνες?



Σύντηξη: το “αντίστροφο” της α-διάσπασης

- Ένας πυρήνας να βρεθεί μέσα σε έναν άλλον και θα γίνουν ένας βαρύτερος πυρήνας.
- Π.χ., ένα σωματίδιο α έρχεται από δεξιά και συναντά την ηλεκρομαγνητική άπωση ενός άλλου πυρήνα α . Η δυναμική ενέργεια Coulomb γίνεται μέγιστη, με τιμή V_B , όταν οι δύο πυρήνες α “εφάπτονται” σε απόσταση r_s : από εκεί και μετά η ισχυρή αλληλεπίδραση γίνεται σημαντική και αν το α περνούσε θα βρισκόταν στο πηγάδι δυναμικού του πυρήνα



Σύντηξη: Φράγμα Coulomb α και α

- Πόσο μεγάλο είναι το φράγμα (V_B) σε ενέργεια? Μπορεί το α να το “σκαρφαλώσει” και να περάσει μέσα στον πυρήνα α?
- Το δυναμικό Coulomb είναι μέγιστο (“φράγμα” V_B) όταν το α “εφάπτεται” στον πυρήνα. Δηλαδή όταν η απόσταση από το κέντρο του α μέχρι το κέντρο του πυρήνα α είναι $R_\alpha + R_\alpha$, όπου R_α είναι οι ακτίνα των πυρήνων α αντίστοιχα.

$$R = 1.1 * A^{1/3} fm \rightarrow R_\alpha = 1.1 * 4^{1/3} fm = 1.7 fm \rightarrow r_s = 2 * R_\alpha = 3.4 fm$$

$$V_B = \frac{(2e)(2e)}{r_s} = a \frac{2Z\hbar c}{r_s} = \frac{1}{137} \frac{2 * 2 * 197 MeV fm}{3.4 fm} = 1.6 MeV$$

Σύντηξη: Φράγμα Coulomb α και α

- Κλασσικά:

όταν ένα σωματίδιο α έχει κινητική ενέργεια $T < V_B \rightarrow T < 1.6 \text{ MeV}$, τότε δεν μπορεί να μπει στον πυρήνα α

...όμως μπαίνει με το κβαντομηχανικό φαινόμενο σύραγγας

Φράγμα 1.6 MeV πολύ μεγαλύτερο από την κινητική ενέργεια των συγκρουόμενων πυρήνων:

~kT λόγω θερμοκρασίας του Ήλιου ($T \sim 10^7 \text{ Kelvin}$)

Σε 12000 K $\rightarrow kT = 1 \text{ eV}$

Σε 300 K $\rightarrow kT = 1/40 \text{ eV}$

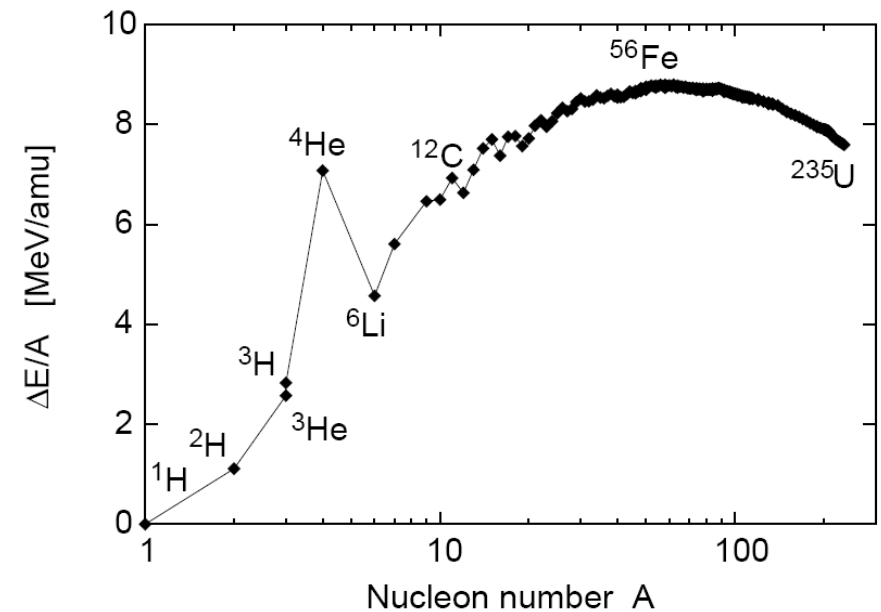
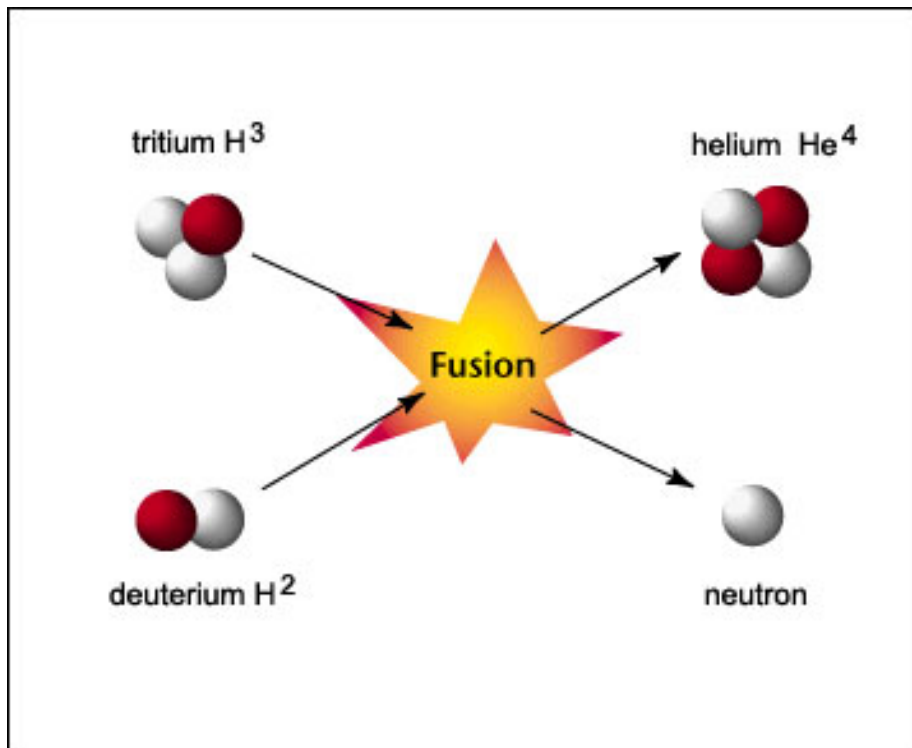
Σε $10^7 \text{ K} \rightarrow kT \sim 1 \text{ keV}$: λίγη σε σχέση με το φράγμα δυναμικού, όμως:

α) η κινητική ενέργεια λόγω θερμικής κίνησης “παίζει”
(κατανομή Boltzman)

β) έχουμε το κβαντομηχανικό φαινόμενο σύραγγας που βοηθάει το σωματίδιο να συντηχθεί με τον άλλον πυρήνα διασχίζοντας την κλασσικά απαγορευμένη περιοχή

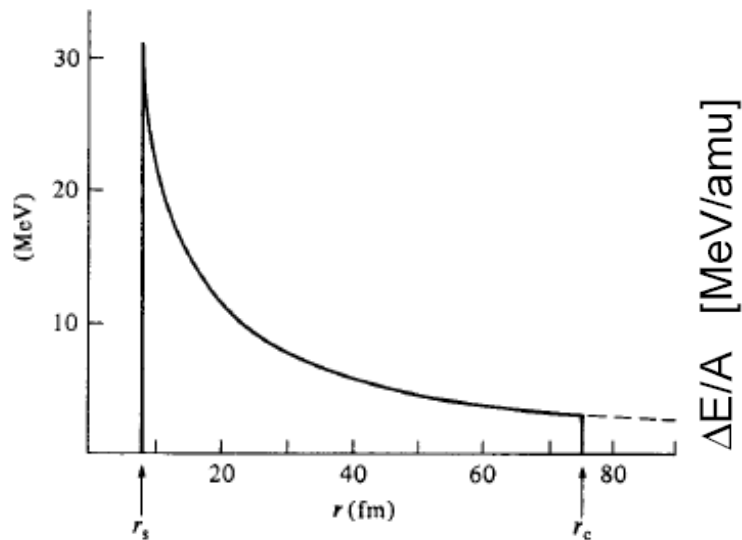
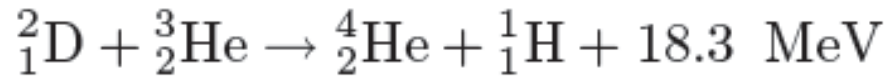
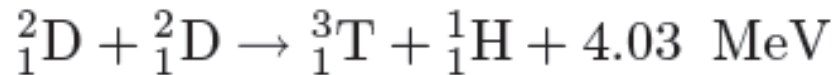
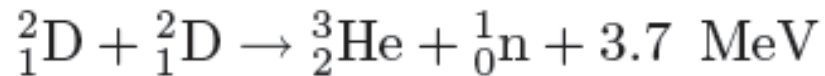
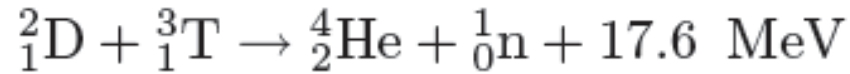
Πυρηνική σύντηξη

Πυρηνική σύντηξη είναι η διαδικασία (ελεγχόμενη ή μη) κατά την οποία δύο ελαφροί πυρήνες συντήκονται και σχηματίζουν έναν βαρύτερο πυρήνα, παράγοντας ενέργεια.

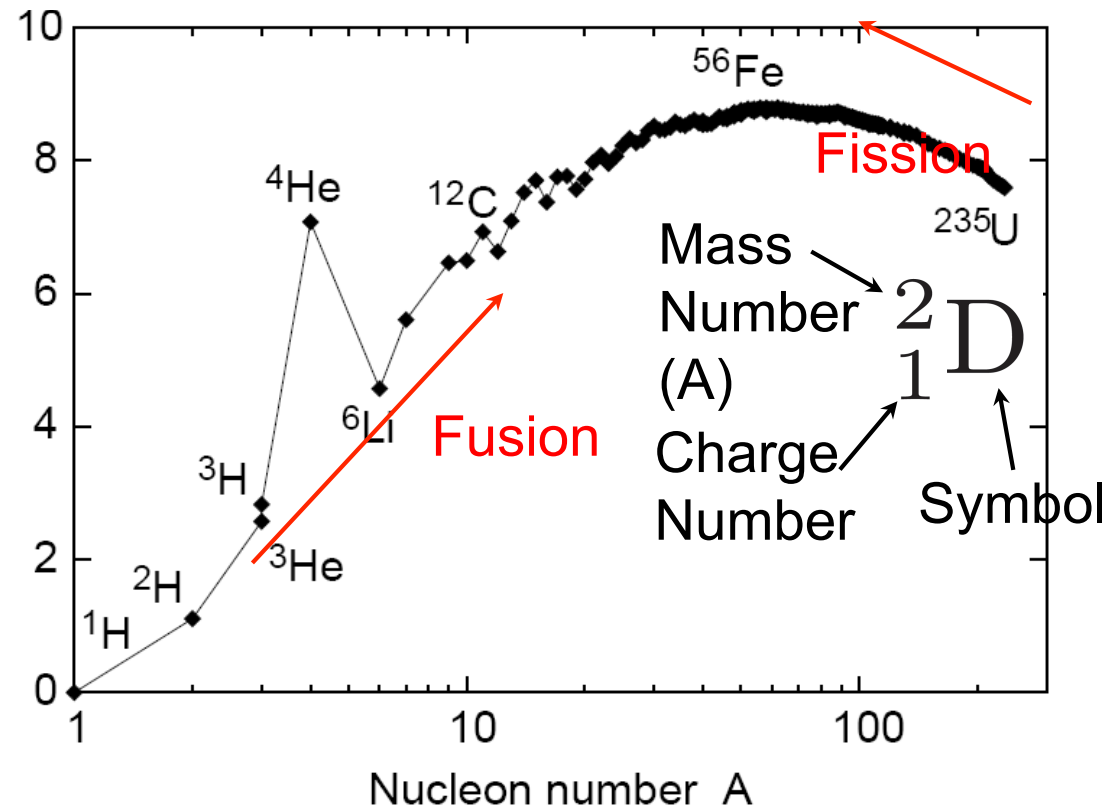


Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (σε MeV) συναρτήσει του μαζικού αριθμού (A) σε log κλίμακα.

Μερικές αντιδράσεις σύντηξης

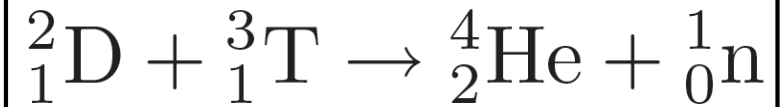


Φράγμα δυναμικού



Υπολογισμός της ελευθερούμενης ενέργειας

Π.χ. για την αντίδραση σύντηξης:



Μάζες αντιδρώντων και προϊόντων:

$$m_D = (2 - 0.000994)m_H \quad m_T = (3 - 0.006284)m_H$$

$$m_{He} = (4 - 0.027404)m_H \quad m_n = (1 + 0.001378)m_H$$

Έλλειμμα μάζας - ελευθερούμενη ενέργεια:

$$\Delta m = 0.0187m_H \quad m_H = 1.6727 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$E = mc^2 = 0.0187m_H c^2 = 2.8184 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$E = \frac{2.8184 \cdot 10^{-12}}{1.6022 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 17.56 \text{ MeV}$$

Κατανομή της ενέργειας στα προϊόντα

Από τις αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής:

$$\frac{1}{2}m_A v_A^2 + \frac{1}{2}m_B v_B^2 = E_{fus}$$

$$m_A v_A + m_B v_B = 0$$

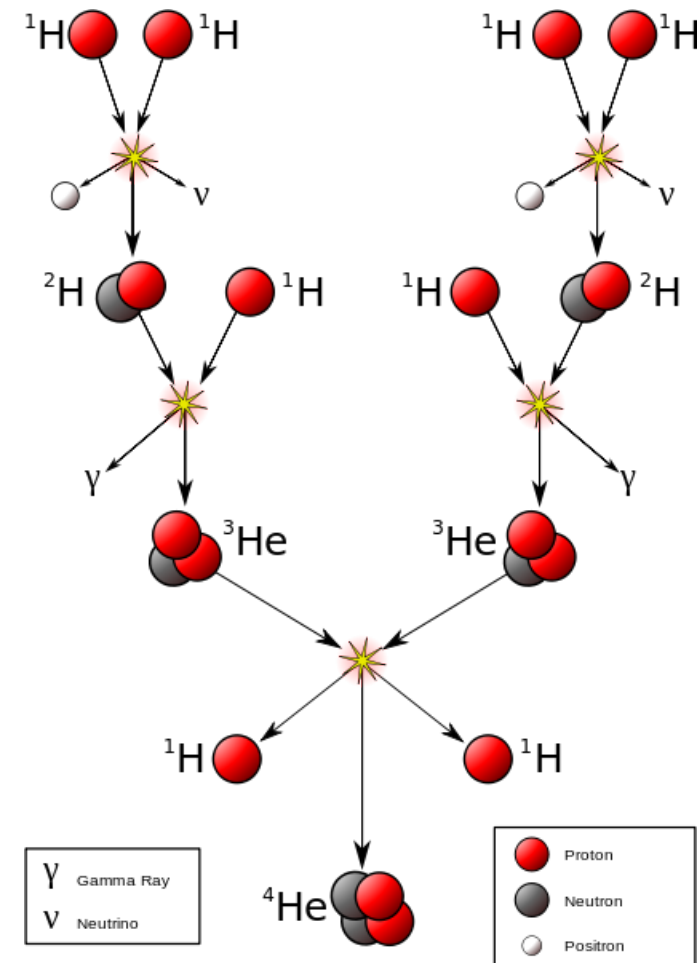
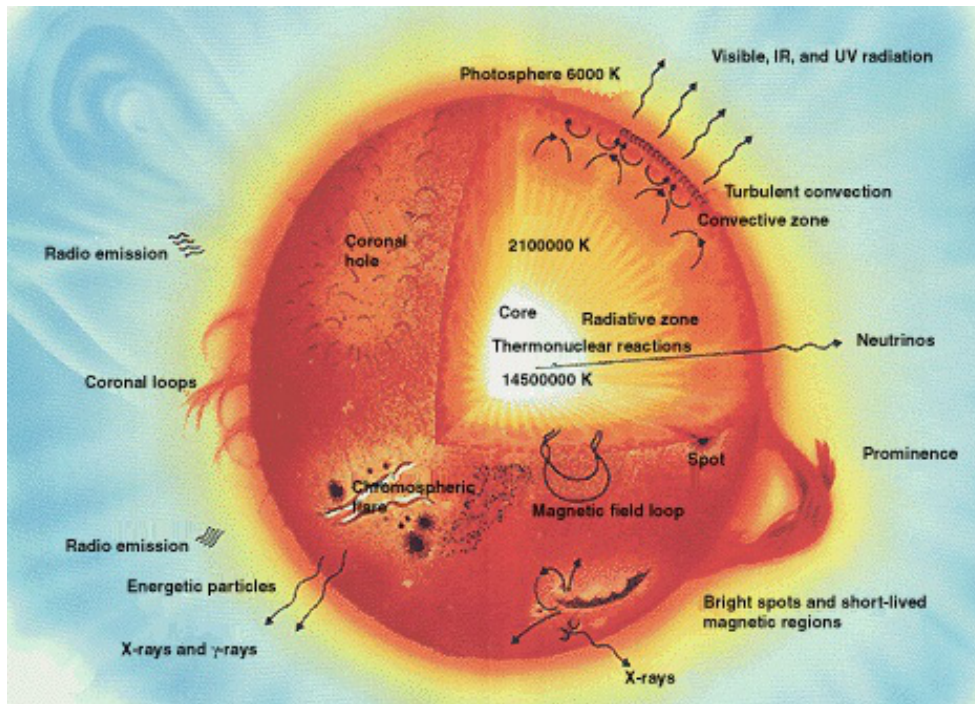
προκύπτει η κατανομή της ελευθερούμενης ενέργειας στα A & B:

$$E_A = \frac{1}{2}m_A v_A^2 = \frac{m_B}{m_A + m_B} E_{fus} \quad E_B = \frac{1}{2}m_B v_B^2 = \frac{m_A}{m_A + m_B} E_{fus}$$

Για την αντίδραση δευτερίου-τρίτιου που τα προϊόντα είναι He-4 και n, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις μάζες τους, προκύπτει ότι το **He-4** παίρνει περίπου το 20% της ενέργειας της αντίδρασης δηλ. **3.5 MeV**, ενώ το **νετρόνιο** παίρνει το υπόλοιπο 80% , δηλαδή **14.1 MeV**.

ΣΗΜ: η αντίδραση αυτή χρησιμοποιείται σε γεννήτριες νετρονίων για την παραγωγή ταχέων νετρονίων προς ακτινοβολήση στόχων (π.χ. ΕΑΠΦ)

Η σύντηξη τροφοδοτεί την ενέργεια των αστέρων



Η αλυσιδωτή αντίδραση σύντηξης πρωτονίου-πρωτονίου (proton–proton chain reaction) κυριαρχεί στην πλειοψηφία των αστέρων (και στον Ήλιο).

Ασκηση 2: Σχάση ουρανίου-235 (^{235}U)

Άσκηση 2:

α) Πόση ενέργεια εκλύεται κατά την παρακάτω αντίδραση σχάσης του ουρανίου?



β) Συγκρίνετε την ενέργεια αυτή με την ενέργεια που εκλύεται σε χημικές αντιδράσεις (όπου έχουμε ανταλλαγές ηλεκτρονίων των ατόμων, τα οποία έχουν ενέργειες της τάξης των eV, κι έτσι η τάξη μεγέθους για χημικές αντιδράσεις δύο ατόμων είναι eV)

γ) Αν ένας πυρηνικός αντιδραστήρας έχει σχεδιαστεί να δίνει 1 MW θερμότητας συνεχώς, πόσες σχάσεις ουρανίου σαν την παραπάνω πρέπει να συμβαίνουν κάθε δευτερόλεπτο για να συντηρούν την ισχύ αυτή? Πόσο ουράνιο-235 καταναλώνεται κάθε χρόνο στον αντιδραστήρα?

Δίνονται: το βιβλίο σας

- παρ. 9.1, 9.2, 9.3

- παρ. 4.4., σελ. 60: $1 \text{ amu} = 931.49 \text{ MeV}/c^2$ και $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

α) $m(n) = 1.0087 \text{ amu}$, $m(\text{U}) = 235.0439 \text{ amu}$, $m(\text{Ba}) = 140.9139 \text{ amu}$, $m(\text{Kr}) = 91.8973 \text{ amu}$

Ασκηση 3: Σύντηξη υδρογόνου για παραγωγή ηλίου στον Ήλιο

Άσκηση 3:

Πόσο υδρογόνο (^1H) πρέπει να μετατρέπεται σε ήλιο (^4He) κάθε δευτερόλεπτο στον Ήλιο, αν η ηλιακή σταθερά είναι $1.35 \text{ kW} / \text{m}^2$ στην επιφάνεια της Γης και η απόσταση Γης-Ηλίου είναι $1.5 \times 10^8 \text{ km}$?

(Υποθέστε εδώ ότι $4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{}^4\text{He}$, χωρίς άλλο προϊόν, πράγμα που δεν είναι σωστό, αλλά χάριν την άσκησης υποστείτε το: θα σας διδάξει κάτι)

Δίνονται:

$$1 \text{ amu} = 931.49 \text{ MeV}/c^2 \quad \text{και} \quad 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{- } M(n) = 939.57 \text{ MeV}, M(p) = 938.27 \text{ MeV}, M(e) = 0.511 \text{ MeV}, M(\nu)=0$$

- Ενέργειες Σύνδεσης (B):

$$B(^4\text{He}) = 28.30 \text{ MeV}$$

