

# Φυσική των Επιταχυντών και Αντιδραστήρων

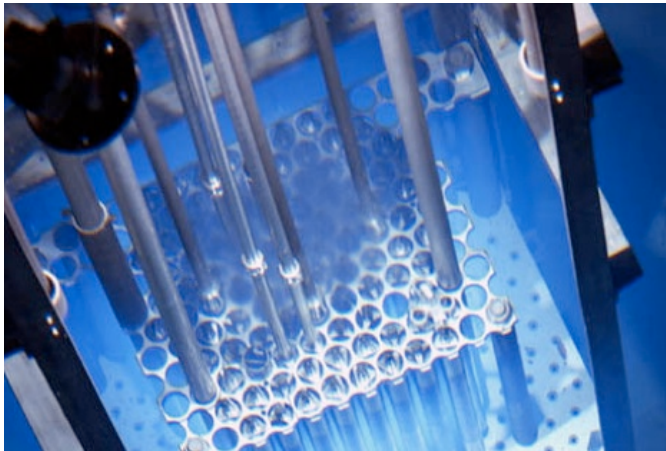
Δ. Σαμψωνίδης

Διαλεξη 1η

# Το μάθημα

## Πυρηνικοί Αντιδραστήρες

- Φυσική Αντιδραστήρων (Σχάση)
- Νετρόνια (Αλληλεπιδράσεις)
- Τύποι αντιδραστήρων
- Διαδικασίες παραγωγής ενέργειας

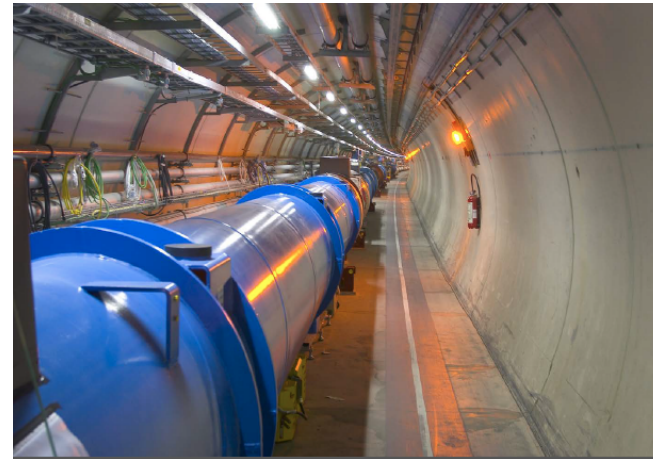


<http://accelerator.physics.auth.gr/>

- Σημειώσεις,
- Παρουσιάσεις μαθημάτων,
- χρήσιμο υλικό

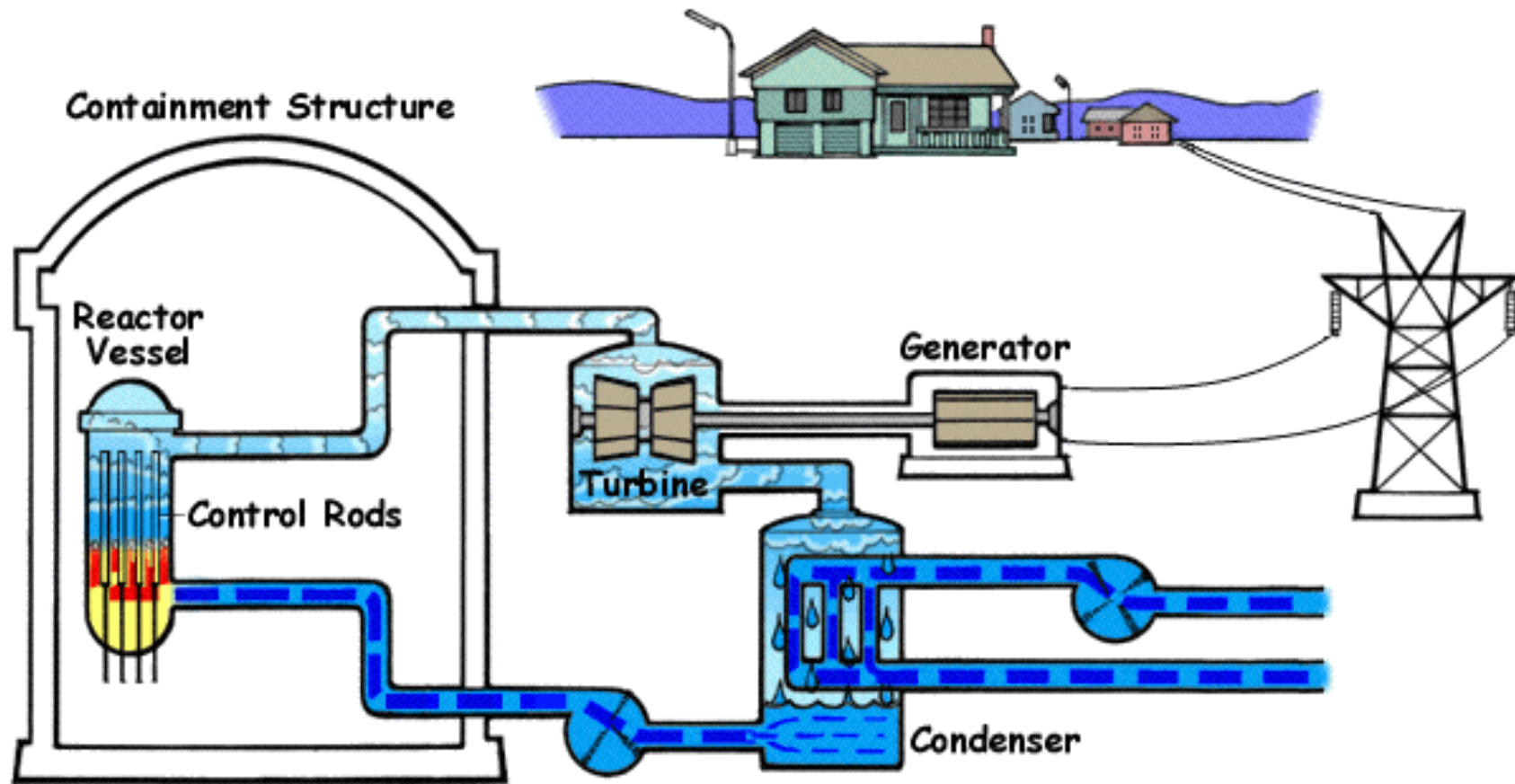
## Επιταχυντές

- Φυσική των επιταχυντών
- Τύποι επιταχυντών
- Διαδικασίες (επιτάχυνση, εστίαση....)
- Πειράματα στους επιταχυντές
- Εφαρμογές

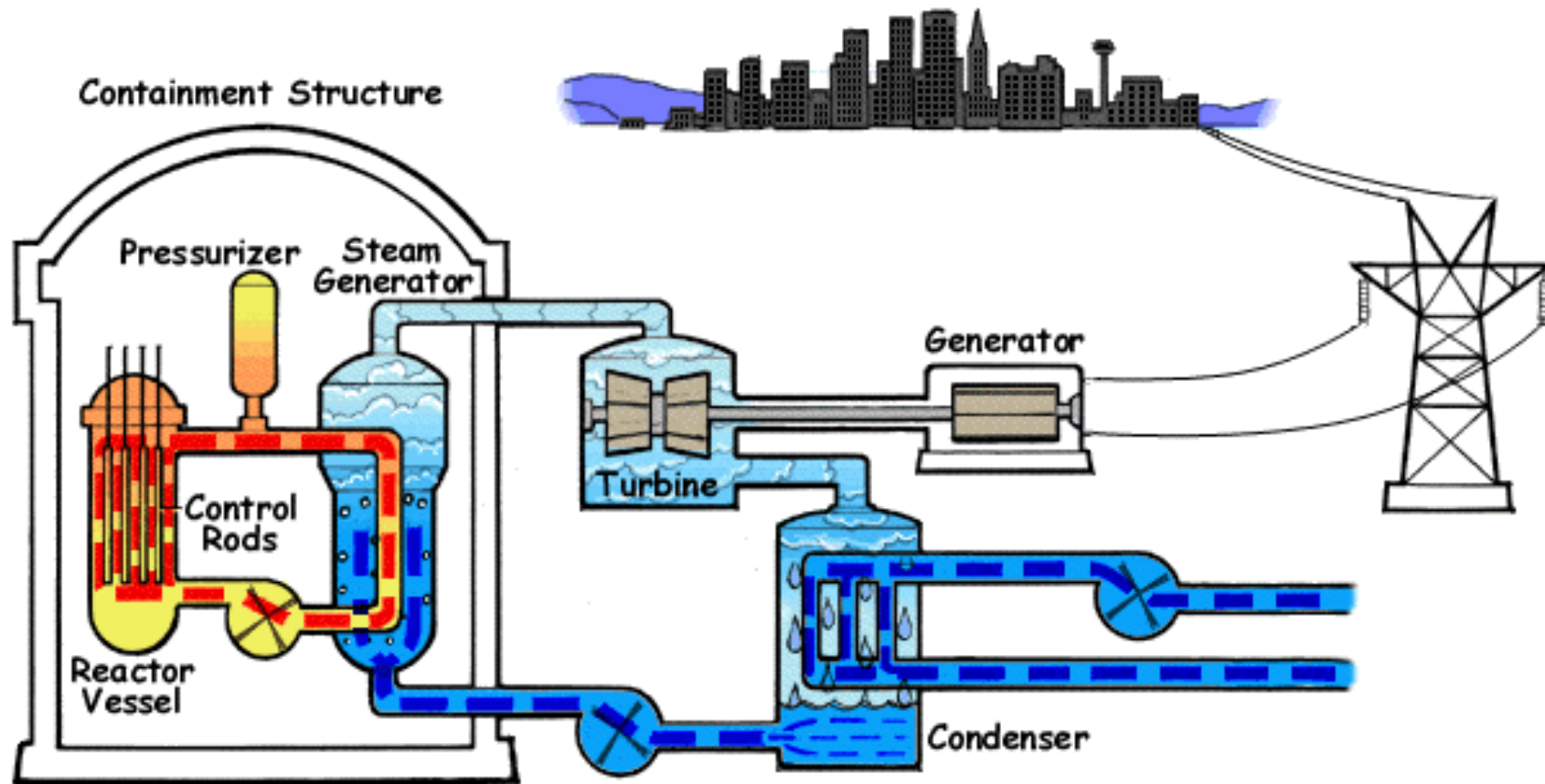


- Εξετάσεις
- Εργασίες – Παρουσιάσεις

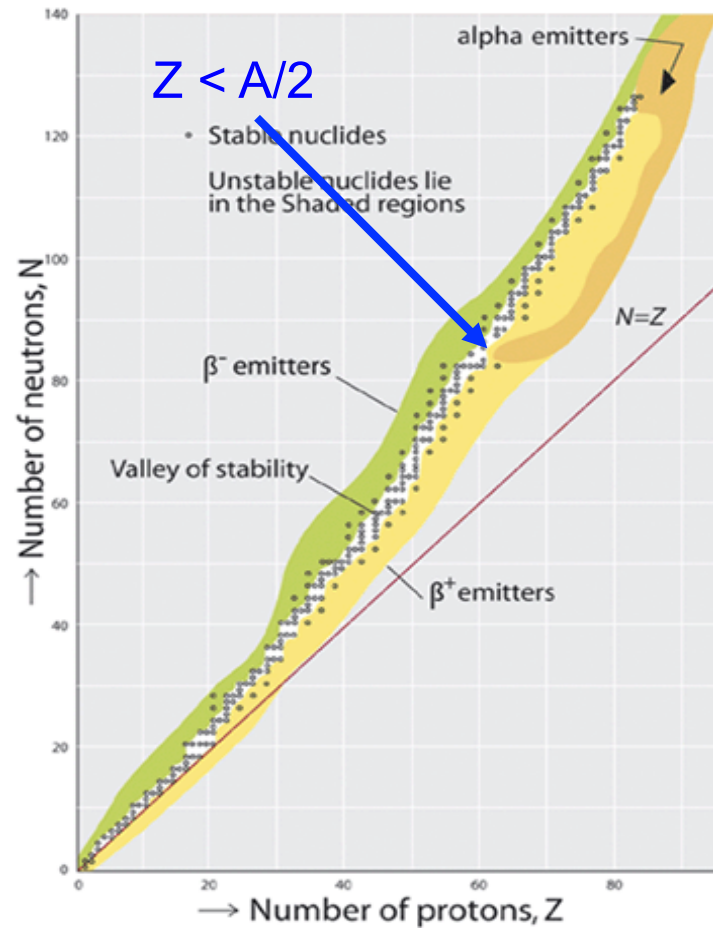
# Αντιδραστήρας (Θερμικός)



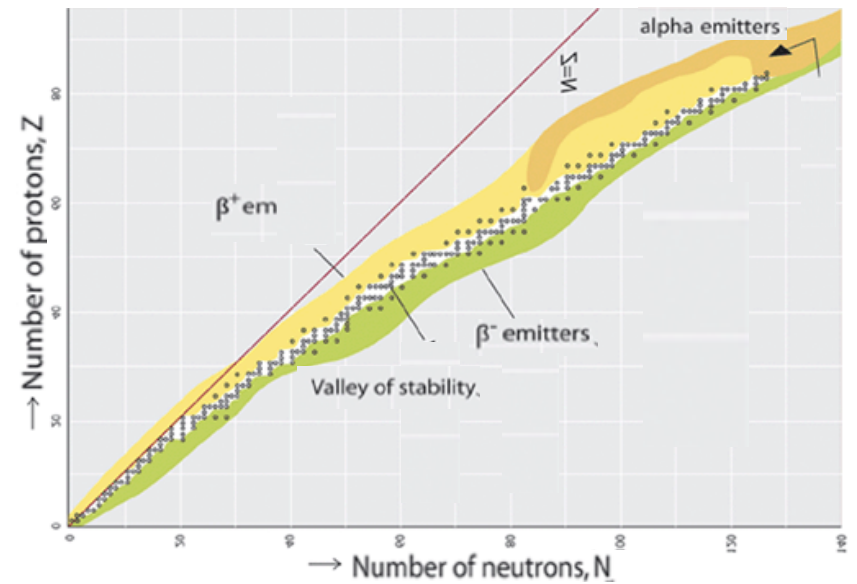
# Αντιδραστήρας (πεπιεσμένου υδατος)



# Κοιλιάδα σταθερότητας



$\dot{n} \rightarrow Z, N$



# Σταθερότητα των πυρήνων

---

## Σταθερός πυρήνας : δέσμιο σύστημα

*Η μάζα του είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των συστατικών του.*

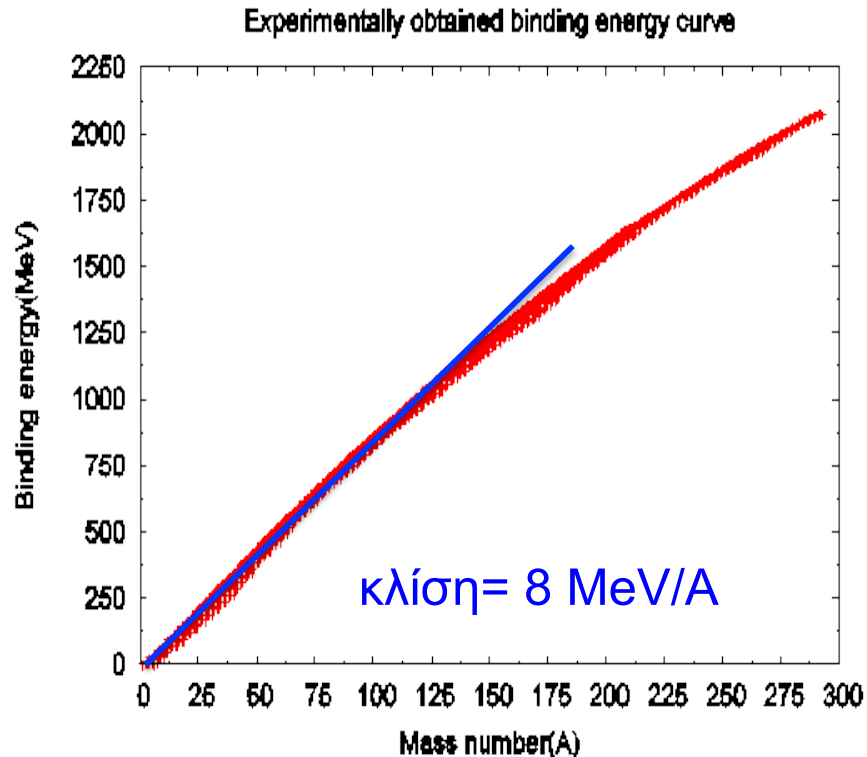
Μάζα πυρήνα :  $m_{nuc}(Z,N) = Zm_p + Nm_n - B(Z,N)/c^2$

Ενέργεια σύνδεσης:  $B(Z,N)$

Για  $B(Z,N) > 0$  δέσμιο σύστημα

Ενέργεια σύνδεσης ανα νουκλεόνιο  $B(Z,N)/A \approx 8 \text{ MeV} / n$

# Ολική Ενέργεια σύνδεσης



$B(Z, A) \approx 8 \times A \text{ MeV} \Rightarrow$  μέσω ισχυρών πυρηνικών (μικρής εμβέλειας)

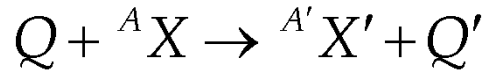
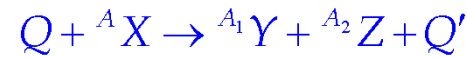
Απόκλιση από την “σταθερά” κλίση  $8 \text{ MeV/A} \Rightarrow$  σύντηξη & σχάση  
μπορεί να απελευθερωθεί ενέργεια

# Ενέργεια σύνδεσης

Fusion:

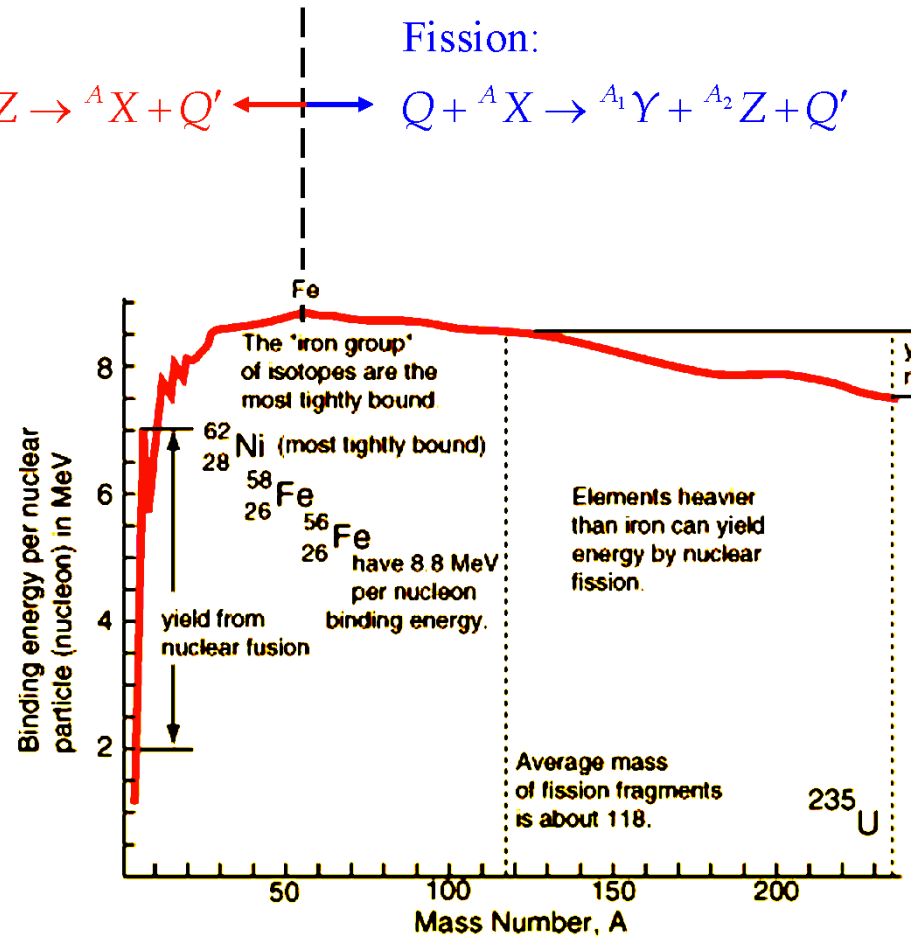
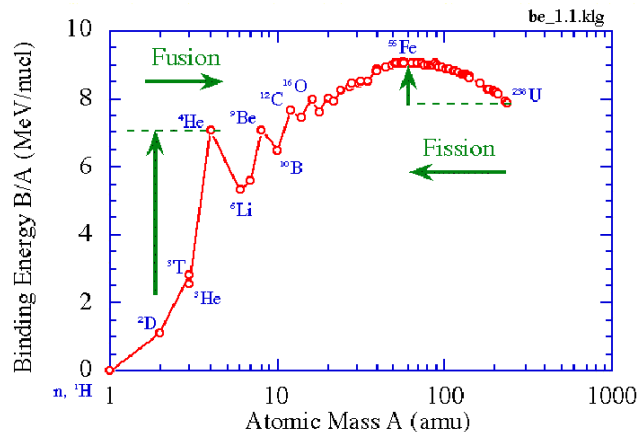


Fission:



$$1) \quad Q' > 0 \leftrightarrow \frac{E_b^{(tot)}}{A'} > \frac{E_b^{(tot)}}{A}$$

$$2) \quad Q' > Q$$



$$E_b(\text{MeV}) = 15.76 A - 17.81 A^{2/3} - 0.711 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 23.702 \frac{(N - Z)^2}{A} \pm 34 A^{-3/4}$$

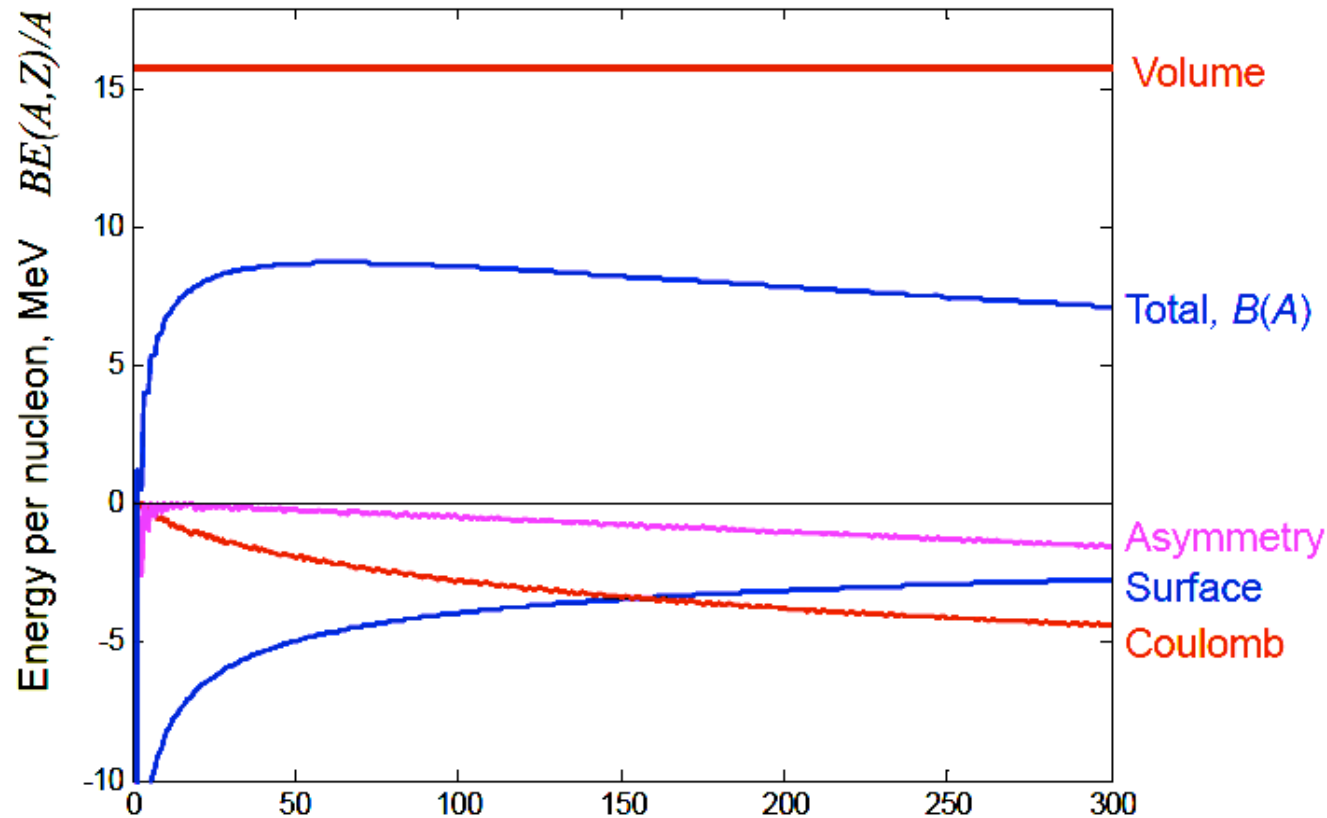


# Ημ εμπειρικός τύπος

Terms:      Volume      Surface      Coulomb      Asymmetry      Pairing

                 ↓                   ↓                   ↓                   ↓                   ↓

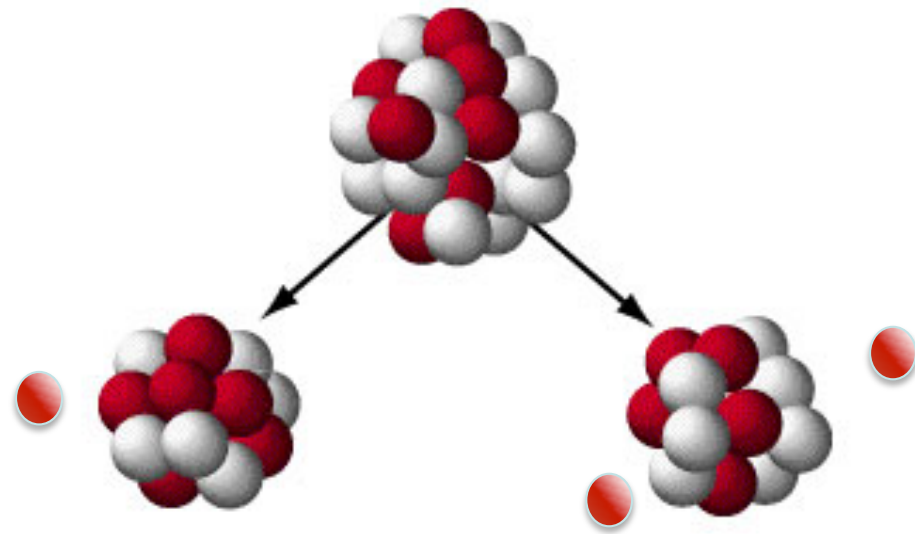
$$BE(A, Z) = \alpha_V A - \alpha_S A^{2/3} - \alpha_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \alpha_A \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(A, Z)$$



# 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

---

**1932** Ανακάλυψη του νετρονίου από τον **Chadwick**.

**1934** Η **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(α) 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, έφυγε 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)

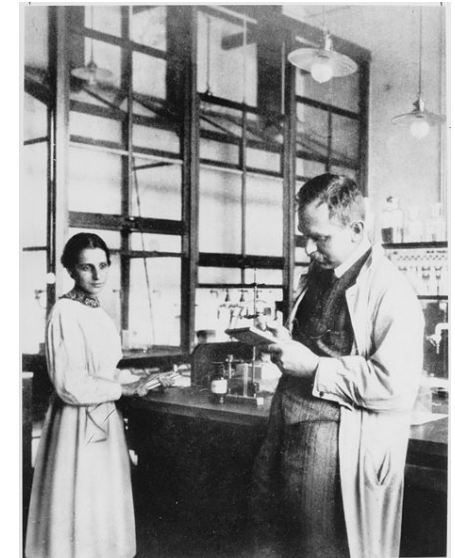
Γερμανός πυρηνικός χημικός με Νόμπελ Χημείας (1944) για τη σχάση βαρέων πυρήνων. Εργάστηκε σε Γερμανία και Αμερική και ανακάλυψε πολλά ραδιο-ισότοπα. Θεωρείται ότι **ανακάλυψε την πυρηνική σχάση**. Εργαζόμενος για τη δημιουργία υπερ-ουράνιων στοιχείων ( $Z > 92$ ) με βομβαρδισμό ουρανίου με νετρόνια, 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



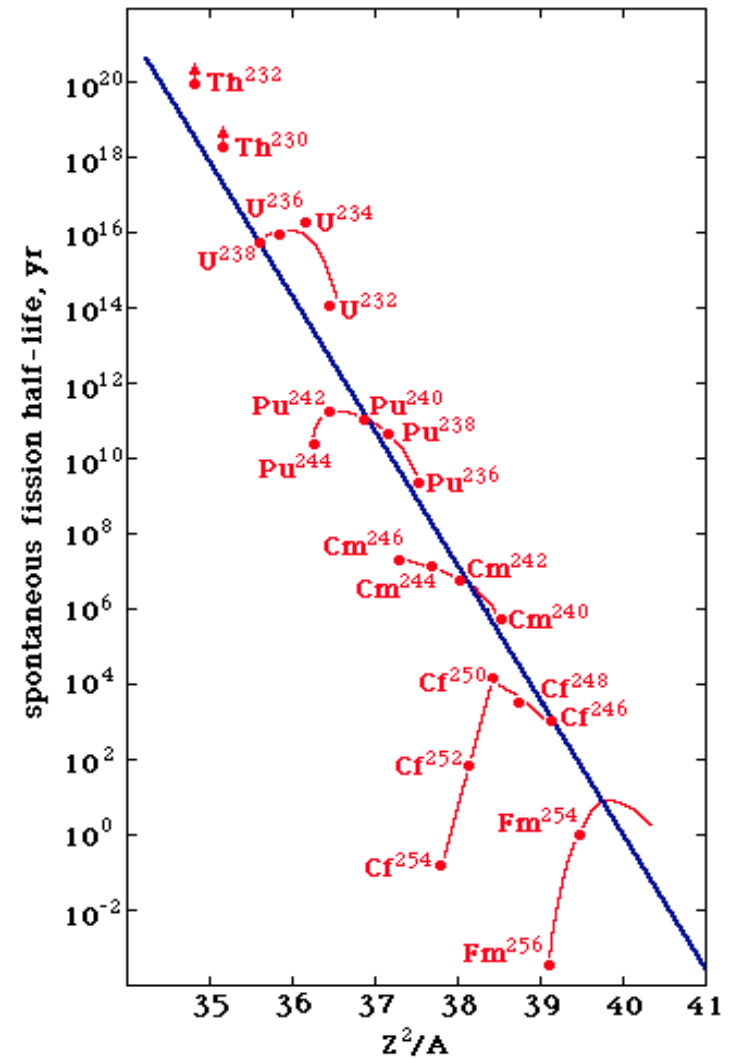
Για την ιστορία, η Γερμανίδα χημικός **Ida Noddack** πρότεινε για πρώτη φορά (*Angewandte Chemie*, **1934**), ότι: «...όταν βαρείς πυρήνες βομβαρδίζονται με νετρόνια οι πυρήνες αυτοί μπορεί να διασπαστούν σε αρκετά μεγάλα θραύσματα." Κανένας όμως δεν έλαβε σοβαρά τη θέση αυτή ή επιχείρησε πειράματα επ' 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.



Meitner και Hahn

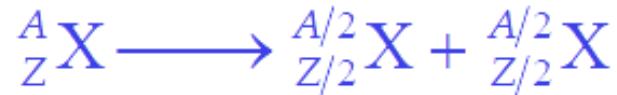
# Χρόνοι ζωής αυθόρμητης σχάσης

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

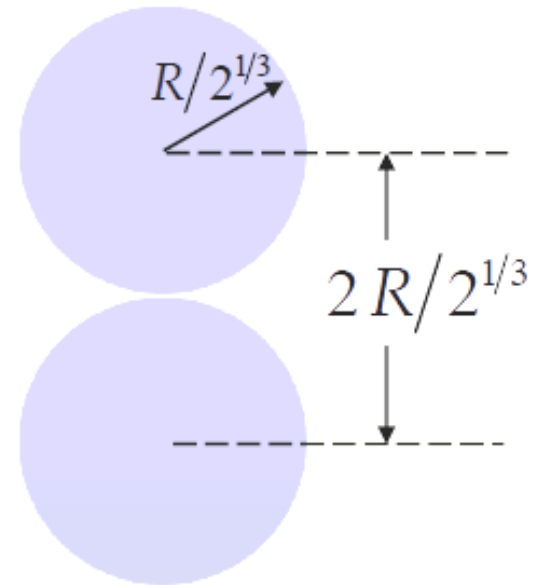
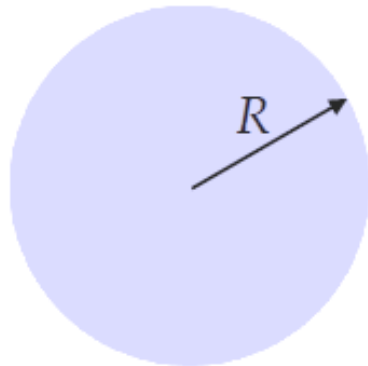


# Ένα “απλοϊκό” μοντέλο σχάσης

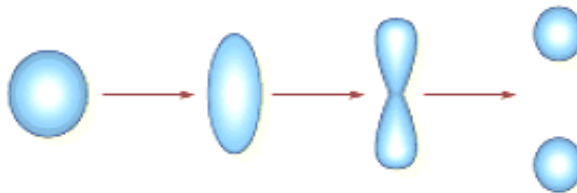
Συμμετρική



Σφαιρικός πυρήνας



Πιο ρεαλιστικό ...



$$E_c = \frac{Ze/2 \times Ze/2}{2R/2^{1/3}}$$

# Ενέργεια σχάσης

---

Ορισμός της  $BE$

$$\frac{A}{Z}Mc^2 = (Zm_p + Nm_n)c^2 - BE(A, Z)$$

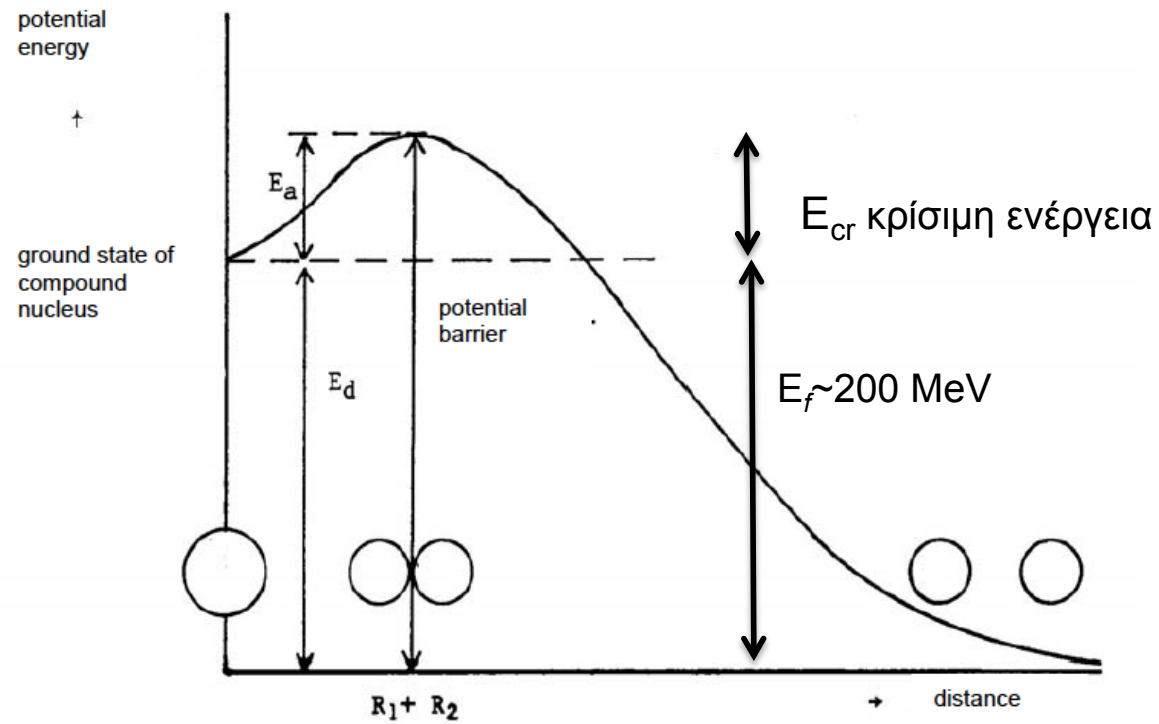
Διατήρηση ενέργειας

$$\frac{A}{Z}Mc^2 = 2\frac{A/2}{Z/2}Mc^2 + E_f$$

Ενέργεια στη  
συμμετρική σχάση

$$E_f = 2BE(A/2, Z/2) - BE(A, Z)$$

# Δυναμικό Coulomb στη σχάση



Υπάρχει ένα φράγμα δυναμικού που πρέπει να ξεπεραστεί για να γίνει η σχάση.



# Η σχάση ως υγρή σταγόνα

---

- Στη σχάση ένας πυρήνας χωρίζεται σε δύο κομμάτια σχάσης. Το ένα θραύσμα είναι συνήθως μεγαλύτερο από το άλλο.
- Η σχάση συμβαίνει για βαρείς πυρήνες, λόγω των αυξημένων δυνάμεων Coulomb μεταξύ των πρωτονίων.
- Μπορούμε να κατανοήσουμε τη σχάση με τη χρήση του ημι-εμπειρικού τύπου της μάζας με βάση το μοντέλο της υγρής σταγόνας.
  - Για ένα σφαιρικό πυρήνα με μαζικό αριθμό  $A \sim 240$ , οι ελκτικές πυρηνικές δυνάμεις μικρής εμβέλειας αντισταθμίζονται με τις απωστικές δυνάμεις Coulomb.
  - Καθώς ένας πυρήνας γίνεται μη-σφαιρικός, η επιφανειακή ενέργεια αυξάνει, και η επίδραση των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων μικρής εμβέλειας μειώνεται.
- Τα νουκλεόνια στην επιφάνεια δεν περιβάλλονται από άλλα νουκλεόνια, και η πυρηνική δύναμη, μειώνει τη συνολική πυρηνική έλξη. Για μια ορισμένη παραμόρφωση, η ενέργεια φτάνει σε μια κρίσιμη τιμή και υπερβαίνεται το φράγμα δυναμικού.

# Σχάση – σε ίσα μέρη

Παραμόρφωση μητρικού πυρήνα:

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

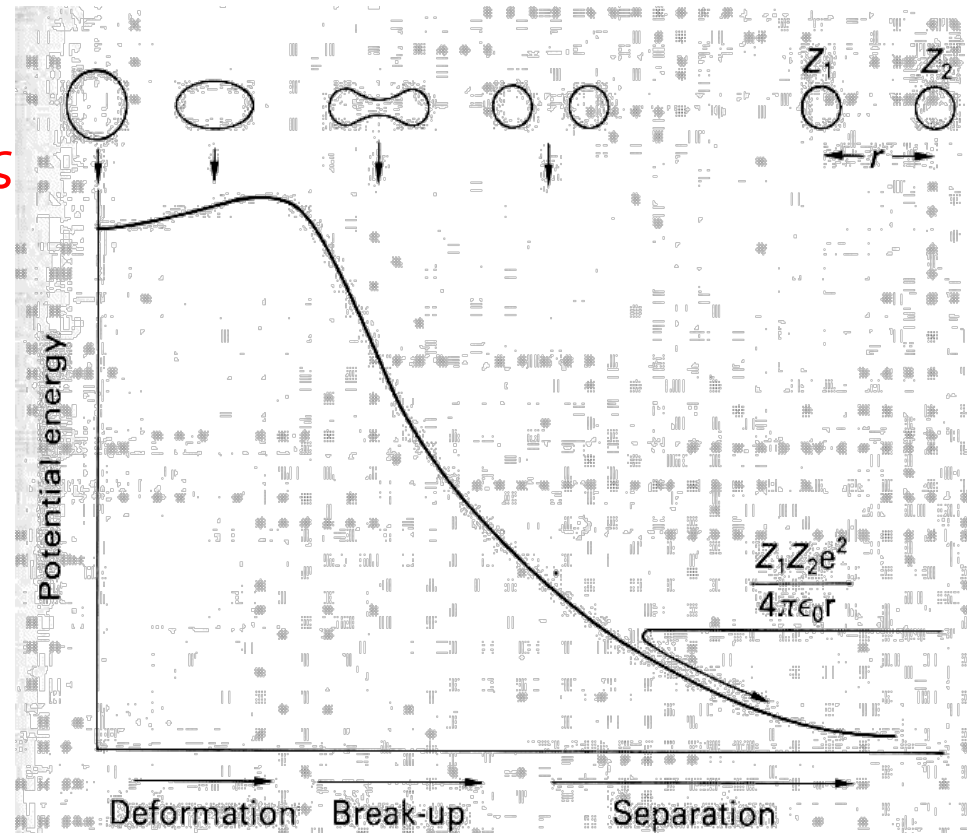
$$M(A,Z) \rightarrow 2 * M(A/2, Z/2) + Q$$

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 – χρόνοι ζωής στην πράξη

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

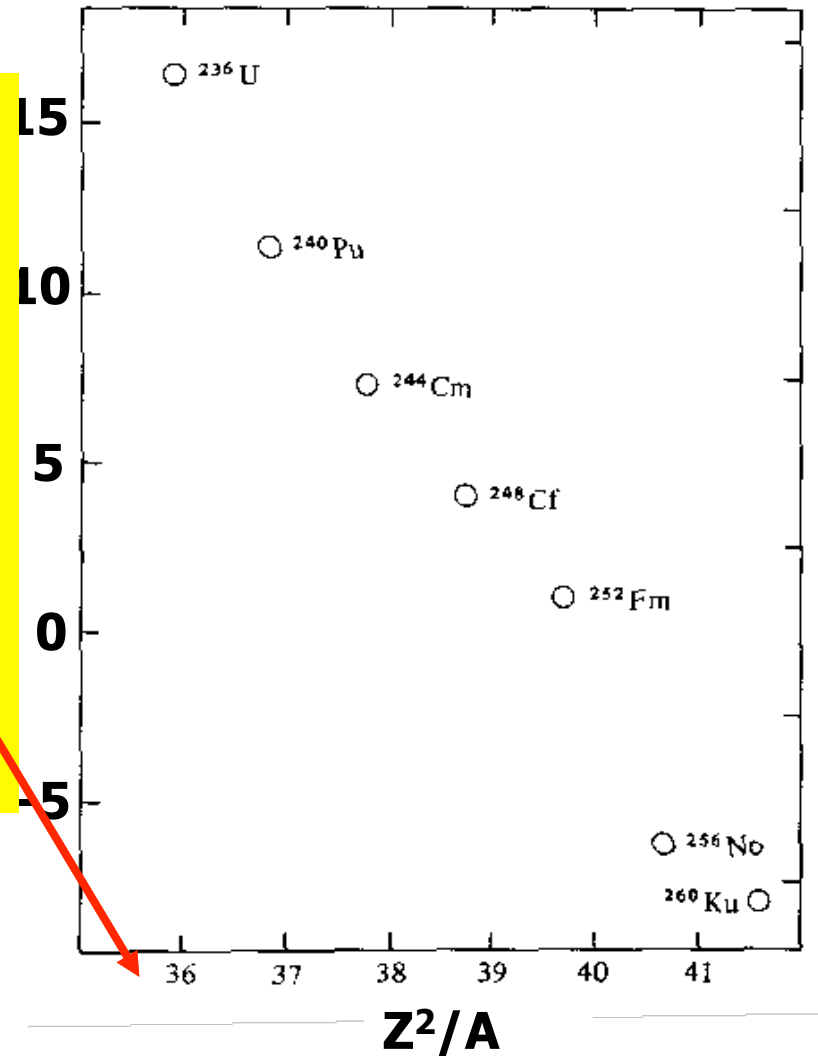
- $Q > 0$  όταν:

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

- Αλλά δεν γίνεται τόσο εύκολα: φαινόμενο σύραγγας με φράγμα δυναμικού  $\sim 5\text{-}6 \text{ MeV}$   
→ Στην πράξη γίνεται μόνο όταν  $Z^2 / A > 36$

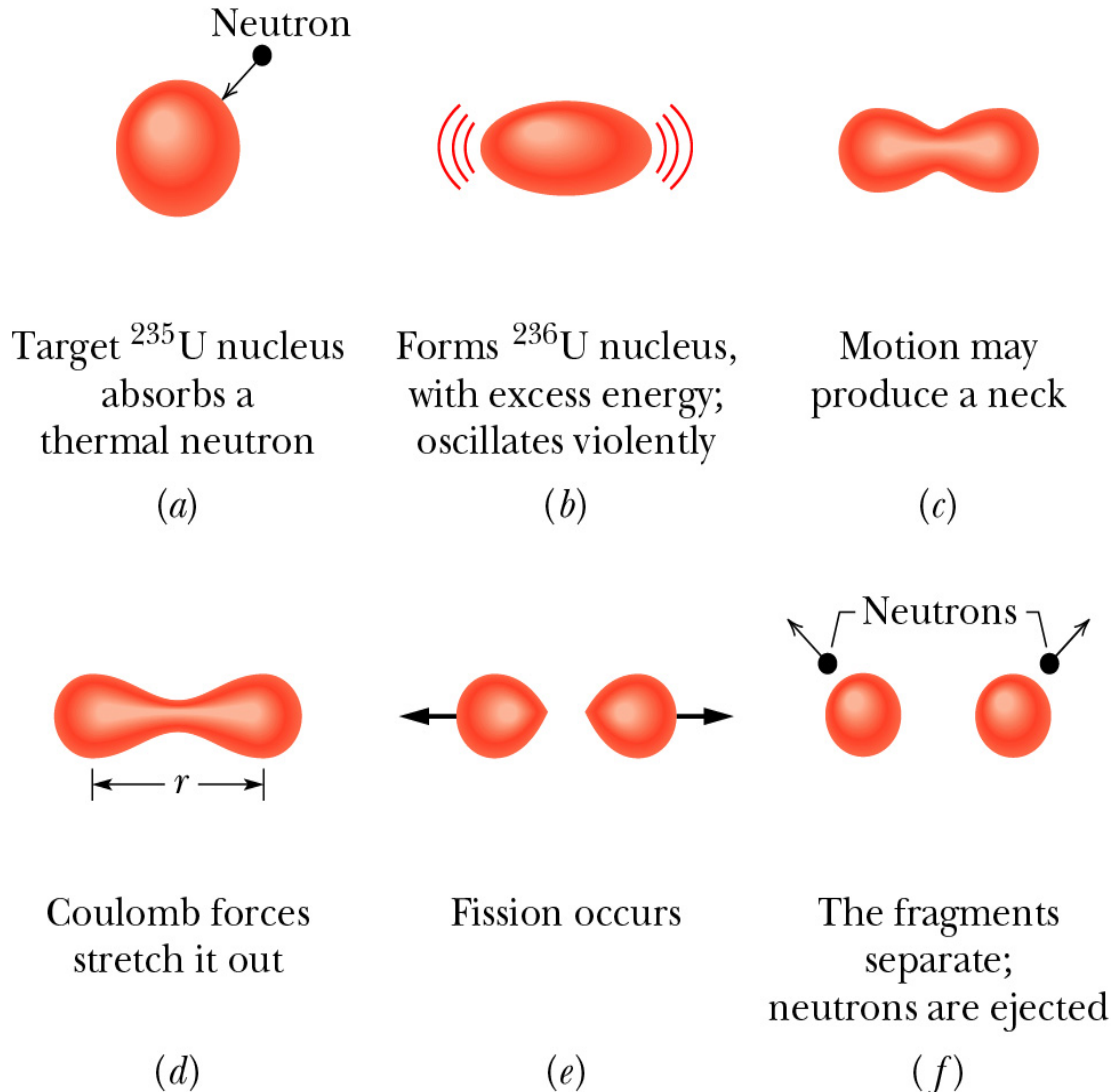
[ Κάτι ανάλογο είδαμε και στην  $\alpha$ -διάσπαση: Ότι  $Q > 0$  για τα στοιχεία με  $Z > 63$  (ή ισοδύναμα, για  $A > 151$ ), αλλά μόνο αυτά που δίνουν  $Q > 4 \text{ MeV}$  έχουν χρόνους ζωής που δεν είναι τεράστιοι σε σχέση με την ηλικία της Γής (4.5 δισ χρόνια)! Αυτά έχουν  $Z > 83$  ].

Log10 (Χρόνος ζωής τ, σε έτη)  
(για  $30 < Z < 42$ )



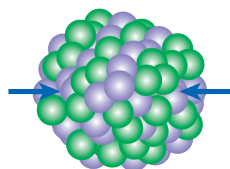
# Η σχάση με το μοντέλο της υγρής σταγόνας

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

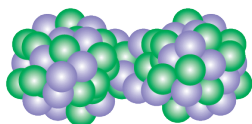


# Τι προκαλεί τη σχάση του πυρήνα

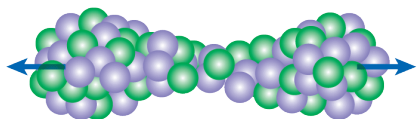
Τη σχάση προκαλεί η παραμόρφωση του ασταθούς πυρήνα, η οποία μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη ώστε οι απωστικές δυνάμεις Coulomb να υπερισχύσουν έναντι των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων.



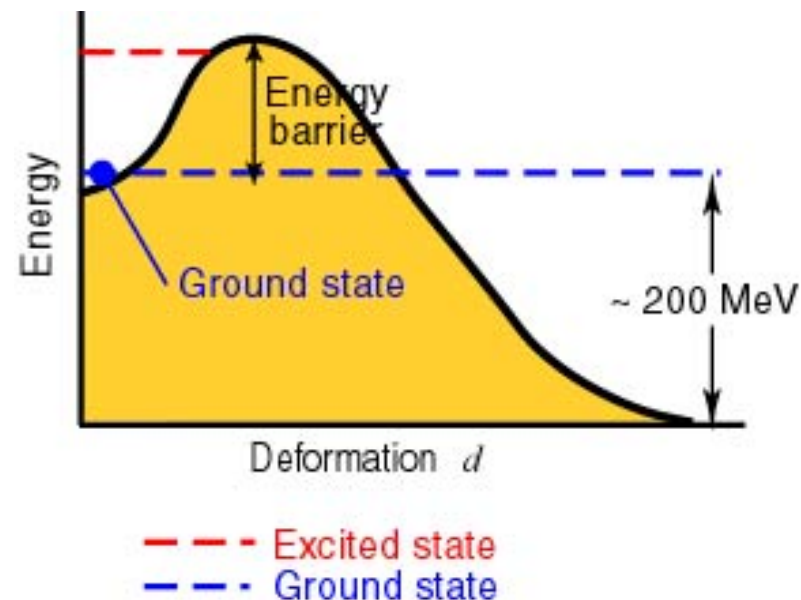
THE NUCLEAR FORCE IS  
DOMINANT



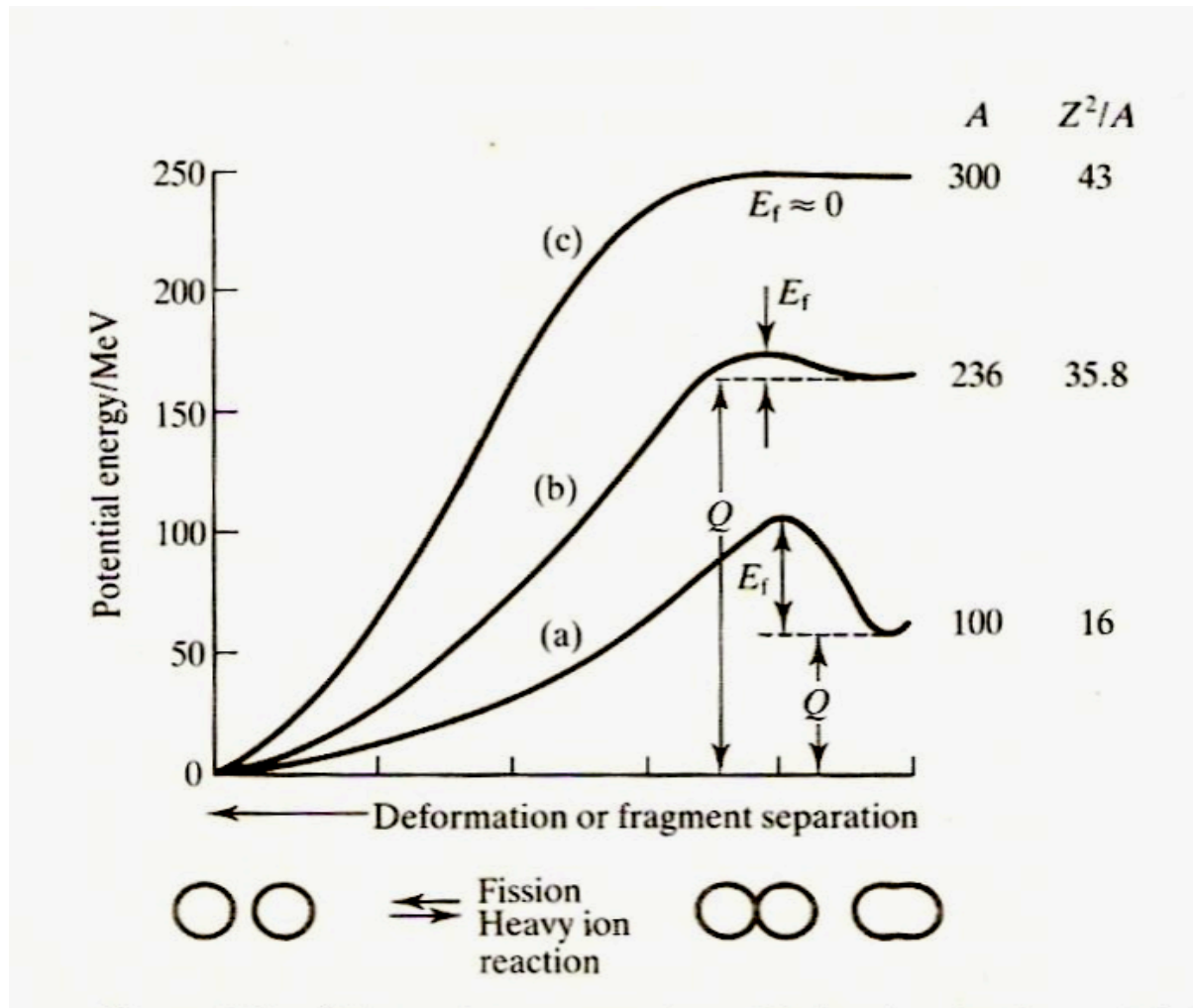
CRITICAL DEFORMATION



THE ELECTRICAL FORCE IS  
DOMINANT



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 μπορεί να ανεβεί στην κορυφή του φράγματος και να ξεφύγει προς την απότομη κάθοδο του δυναμικού, η οποία οδηγεί στη σχάση.

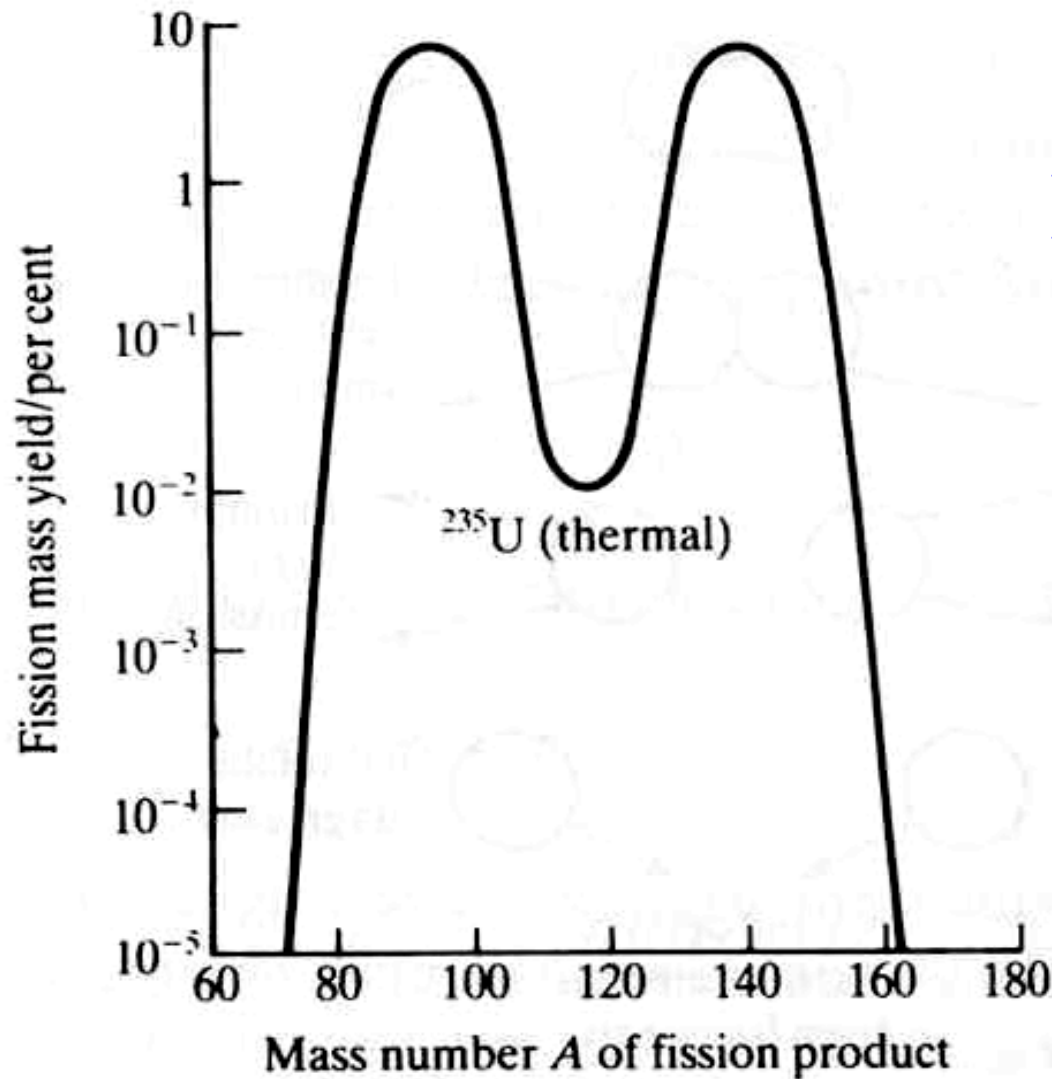


# Κρίσιμες ενέργειες – Ενέργεια σύνδεσης τελευταίου n

Target Nucleus	Critical Energy $E_{\text{crit}}$	Binding Energy of Last Neutron $BE_n$	$BE_n - E_{\text{crit}}$
$^{232}_{90}\text{Th}$	7.5 MeV	5.4 MeV	-2.1 MeV
$^{238}_{92}\text{U}$	7.0 MeV	5.5 MeV	-1.5 MeV
$^{235}_{92}\text{U}$	6.5 MeV	6.8 MeV	+0.3 MeV
$^{233}_{92}\text{U}$	6.0 MeV	7.0 MeV	+1.0 MeV
$^{239}_{94}\text{Pu}$	5.0 MeV	6.6 MeV	+1.6 MeV

Με την απορρόφηση ενός νετρονίου ο πυρήνας “κερδίζει”  $BE_n$  και μπορεί να υπερβεί την  $E_{\text{crit}}$  και να σχασθεί

# Σχάση – στην πράξη ασυμμετρικοί θυγατρικοί

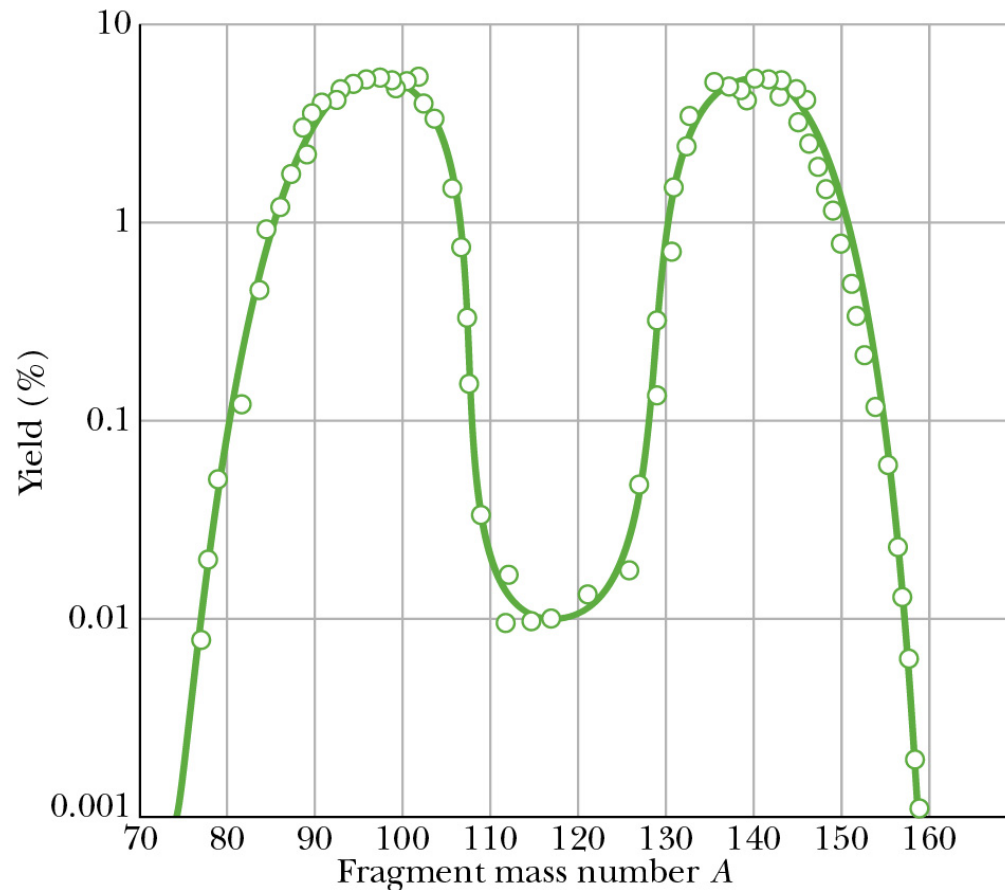


Π.χ., στη σχάση του μητρικού  $^{235}\text{U}$ , το πιο πιθανό για τους θυγατρικούς πυρήνες είναι να έχουν, ο ένας  $A \sim 90$  και ο άλλος το υπόλοιπο ( $A \sim 140$ )

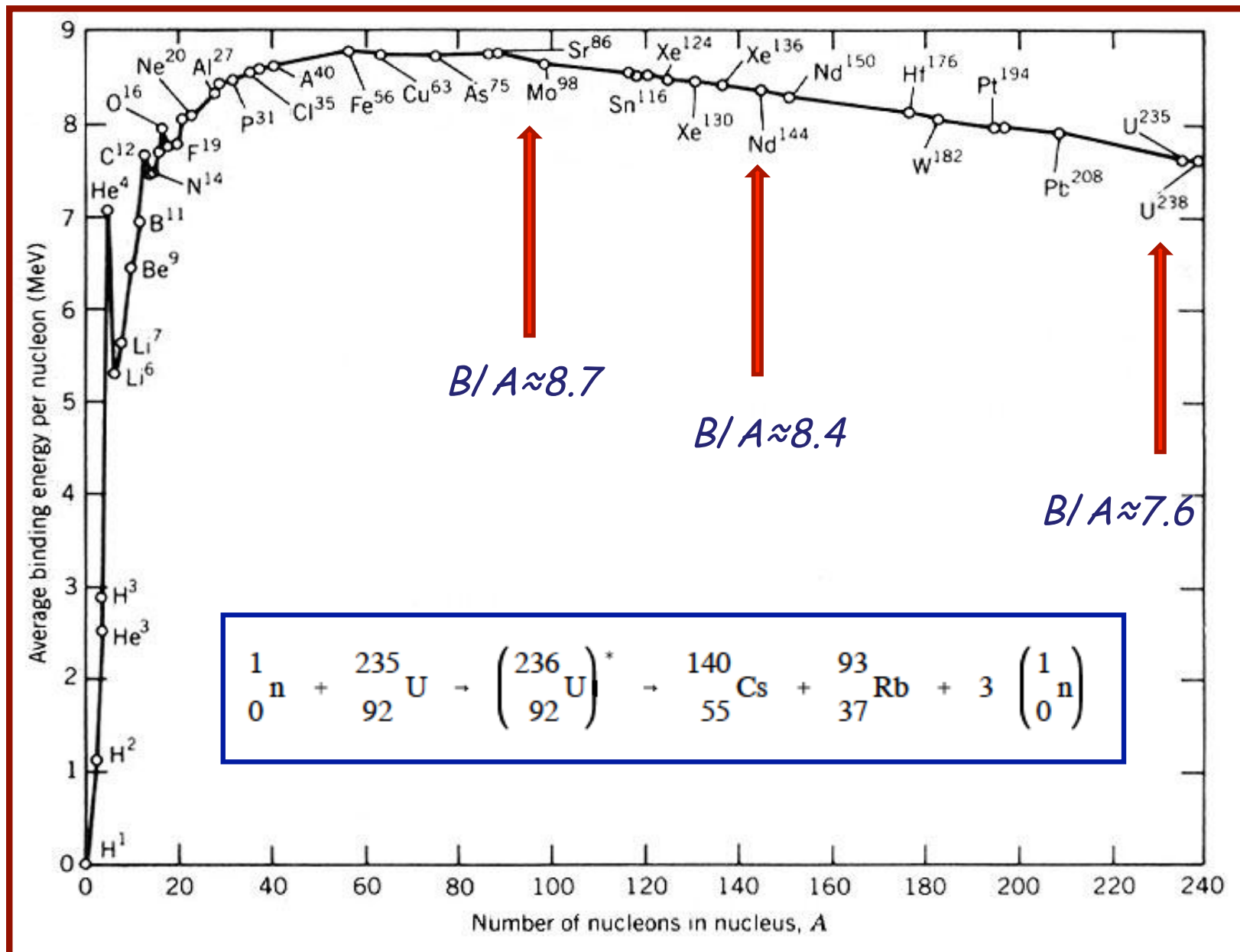


# Κατανομή των θραυσμάτων σχάσης του $^{235}\text{U}$

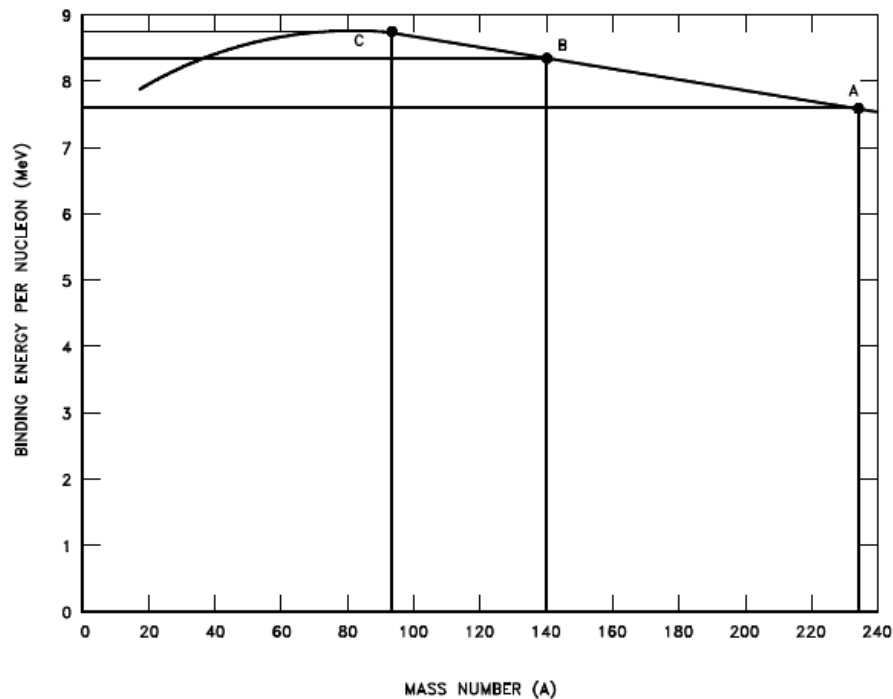
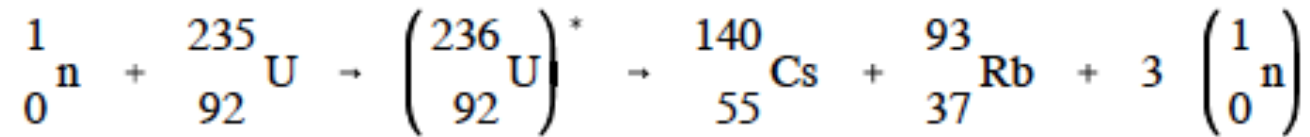
- Πάνω από 100 διαφορετικά νουκλίδια, από περισσότερα από 20 χημικά στοιχεία έχουν βρεθεί μεταξύ των θραυσμάτων σχάσης.
- Η σχάση σε δύο θραύσματα ίσης μάζας είναι απίθανη.
- Τα περισσότερα από τα θραύσματα έχουν μαζικό αριθμό από 90 έως 100 και από 135 έως 145.



# Ενέργεια / σχάση



# Ενέργεια / σχάση



Nuclide	B.E. per Nucleon (BE/A)	Mass Number (A)	Binding Energy (BE/A) x (A)
${}^{93}_{37}\text{Rb}$	8.7 MeV	93	809 MeV
${}^{140}_{55}\text{Cs}$	8.4 MeV	140	1176 MeV
${}^{235}_{92}\text{U}$	7.6 MeV	235	1786 MeV

$$\begin{aligned} \Delta BE &= BE_{\text{products}} - BE_{\text{reactants}} \\ &= (BE_{\text{Rb-93}} + BE_{\text{Cs-140}}) - (BE_{\text{U-235}}) \\ &= (809 \text{ MeV} + 1176 \text{ MeV}) - 1786 \text{ MeV} \\ &= 199 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Η διαθέσιμη ενέργεια στη σχάση (σ' αυτή)

# Ενεργεια / σχέση

Μάζα των αντιδρόντων

$${}_{92}^{235}\text{U} \quad 235.043924 \text{ amu}$$

$${}_{0}^1\text{n} \quad 1.008665 \text{ amu}$$

---

$$236.052589 \text{ amu}$$

Μάζα των προϊόντων

$${}_{37}^{93}\text{Rb} \quad 92.91699 \text{ amu}$$

$${}_{55}^{140}\text{Cs} \quad 139.90910 \text{ amu}$$

$$3 ({}_{0}^1\text{n}) \quad 3.02599 \text{ amu}$$

---

$$235.85208 \text{ amu}$$

$$\begin{aligned} \text{Mass difference} &= \text{Mass of Reactants} - \text{Mass of Products} \\ &= 236.052589 \text{ amu} - 235.85208 \text{ amu} \\ &= 0.200509 \text{ amu} \end{aligned}$$

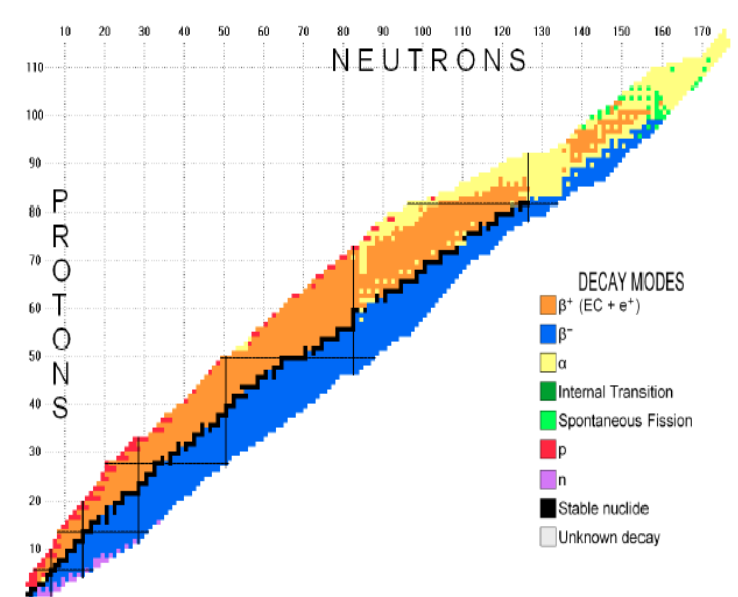
Αυτή η διαφορά μαζών μπορεί να μετατραπεί σε οποιαδήποτε μορφή ενέργειας

$$\begin{aligned} E_{\text{Inst}} &= 0.20059 \text{ amu} \left( \frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{amu}} \right) \\ &= 186.8 \text{ MeV} \end{aligned}$$

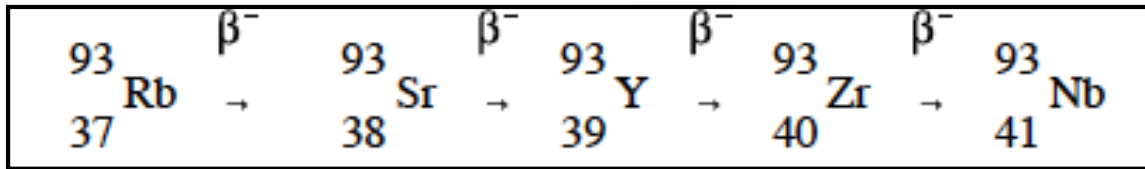
# Θραύσματα τής σχάσης

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

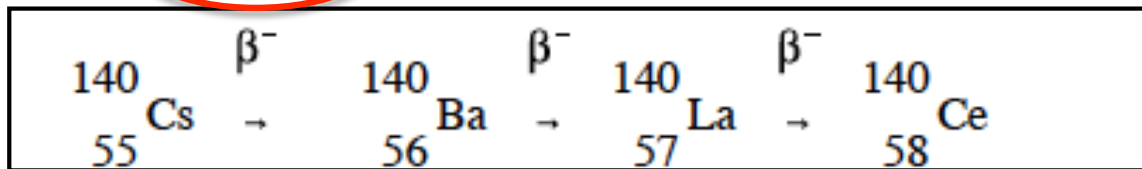
- Η αναλογία neutron/proton, για μεγάλα  $A$  φθάνει στην τιμή 1.6.
- Ο λόγος neutron/proton των θραυσμάτων σχάσης είναι περίπου 1.3 με 1.4 (για  $A = 100$  με 150), ενώ για το U-235, είναι περίπου 1.55.
- Τα θραύσματα  $\rightarrow$   **$\beta^-$  διασπάσεις**  $\rightarrow$  σταθερά



# Θραύσματα τής σχάσης ( $\beta^-$ )



$$\begin{aligned}
 E_{\text{Decay}} &= [m_{\text{Rb-93}} - (m_{\text{Nb-93}} + 4 m_{\text{electron}})] \left( \frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{amu}} \right) \\
 &= [92.91699 \text{ amu} - (92.90638 \text{ amu} + 4 (0.0005486 \text{ amu}))] \left( \frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{amu}} \right) \\
 &= 0.008416 \text{ amu} \left( \frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{amu}} \right) \\
 &= 7.84 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 E_{\text{Decay}} &= [m_{\text{Rb-93}} - (m_{\text{Nb-93}} + 3 m_{\text{electron}})] \left( \frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{amu}} \right) \\
 &= [139.90910 \text{ amu} - (139.90543 \text{ amu} + 3 (0.0005486 \text{ amu}))] \left( \frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{amu}} \right) \\
 &= 0.000202 \text{ amu} \left( \frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{amu}} \right) \\
 &= 1.89 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

Συνολικά  
 $E_{\text{decay}} = 9.73 \text{ MeV}$

# Ενέργεια / σχάση

Μέση κατανομή της ενέργειας που απελευθερώνεται ανα σχάση  $^{235}\text{U}$  με θερμικό νετρόνιο

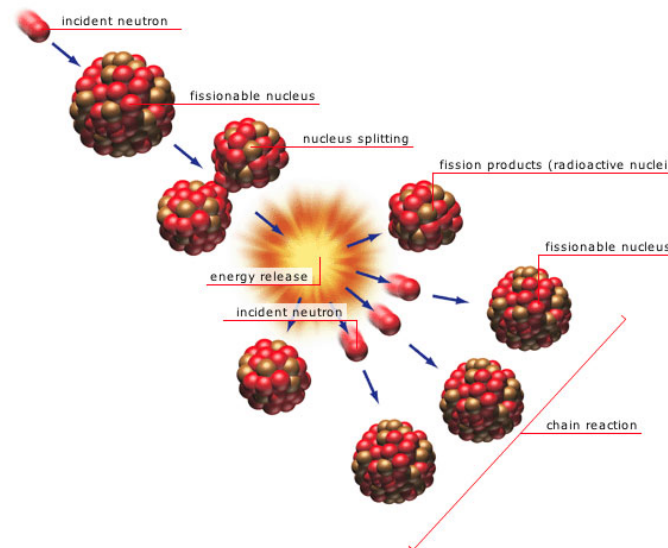
<b>Instantaneous Energy from Fission</b>	
Kinetic Energy of Fission Products	167 Mev
Energy of Fission Neutrons	5 MeV
Instantaneous Gamma-ray Energy	5 MeV
Capture Gamma-ray Energy	10 MeV
Total Instantaneous Energy	187 MeV
<b>Delayed Energy from Fission</b>	
Beta Particles From Fission Products	7 Mev
Gamma-rays from Fission Products	6 MeV
Neutrinos	10 MeV
Total Delayed Energy	23 MeV

# Επαγόμενη Σχάση

- 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

---

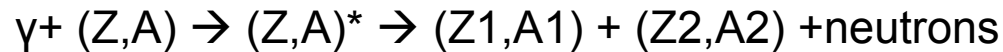
- Αν τουλάχιστον ένα από τα παραγόμενα νετρόνια μπορεί να προκαλέσει τη σχάση ενός ίδιου πυρήνα, έχουμε αλυσιδωτή αντίδραση. Αν για κάθε νετρόνιο που πέφτει πάνω σ' έναν μητρικό πυρήνα, παράγονται κατά μέσο όρο  $k$  νετρόνια που προκαλούν με τη σειρά τους σχάση, τότε
  - α) αν  $k > 1$  η αντίδραση 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

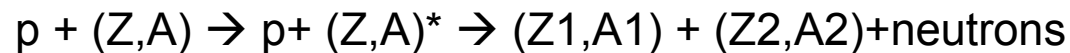
- Για την επαγόμενη σχάση, κάποιος πρέπει να παρέχει ενέργεια στον πυρήνα, έτσι ώστε να ξεπεράσει το φράγμα σχάσης, ή να σχηματιστεί ένα σύνθετος πυρήνας όπου το φράγμα μειώνεται ή εξαλείφεται.

- Μπορεί να επάγει σχάση :

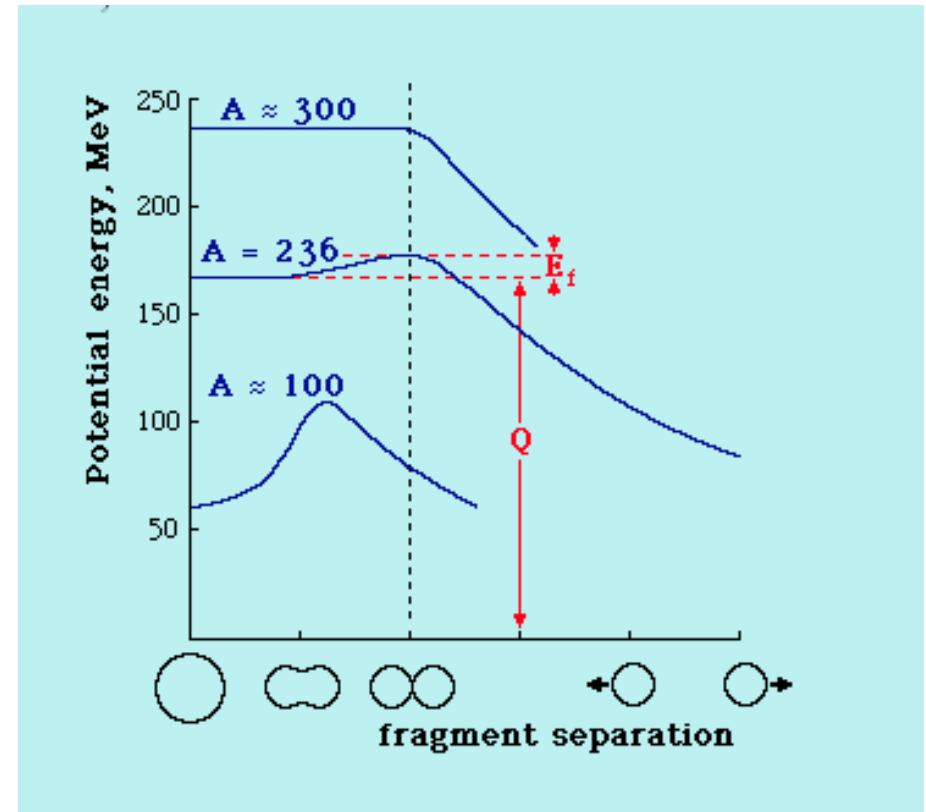
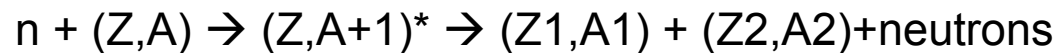
-photofission



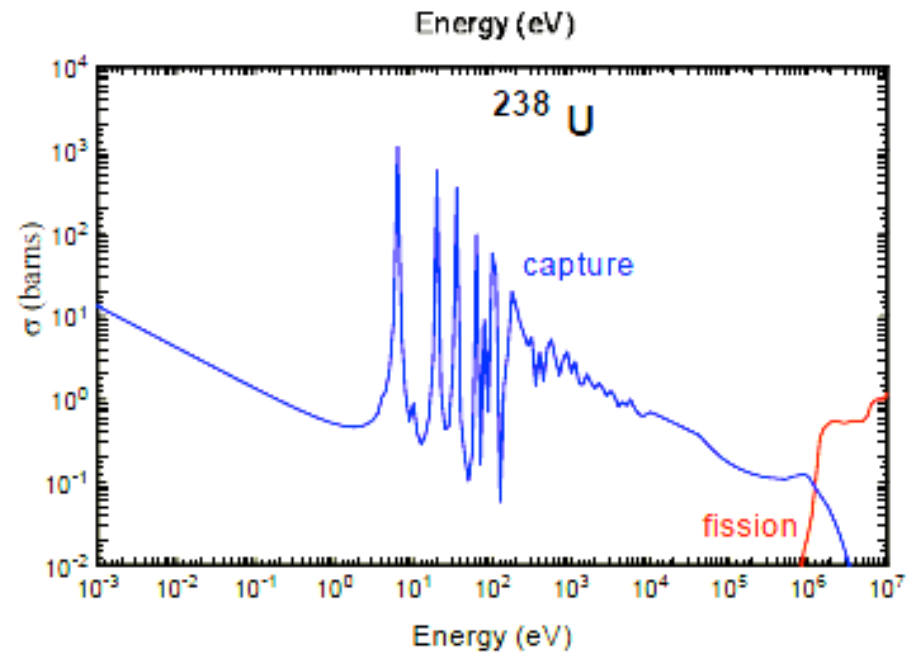
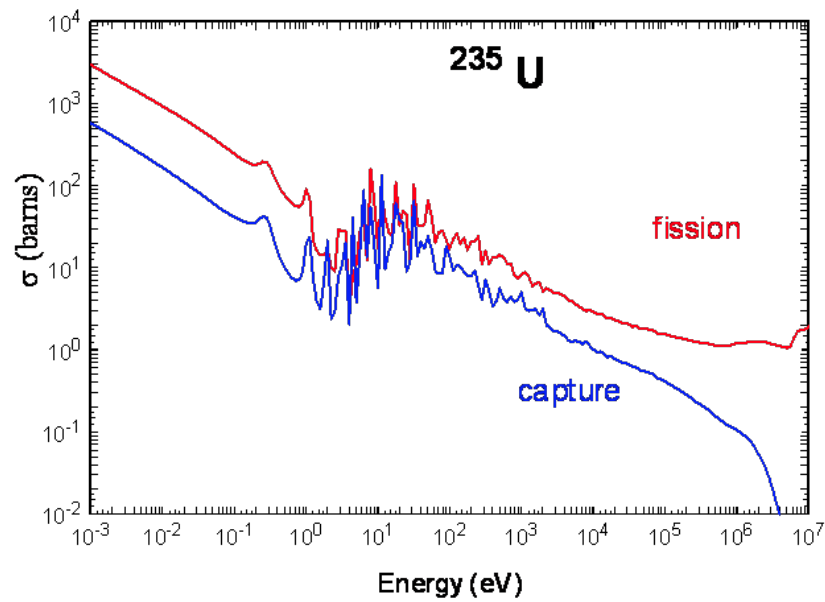
-proton induced fission



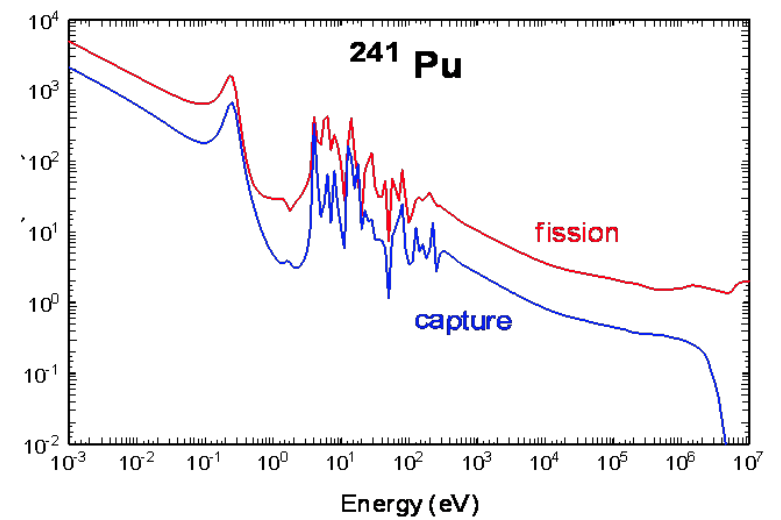
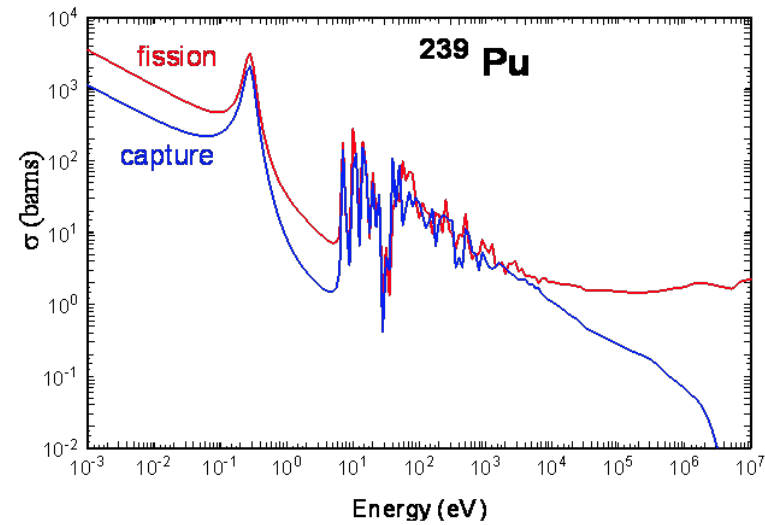
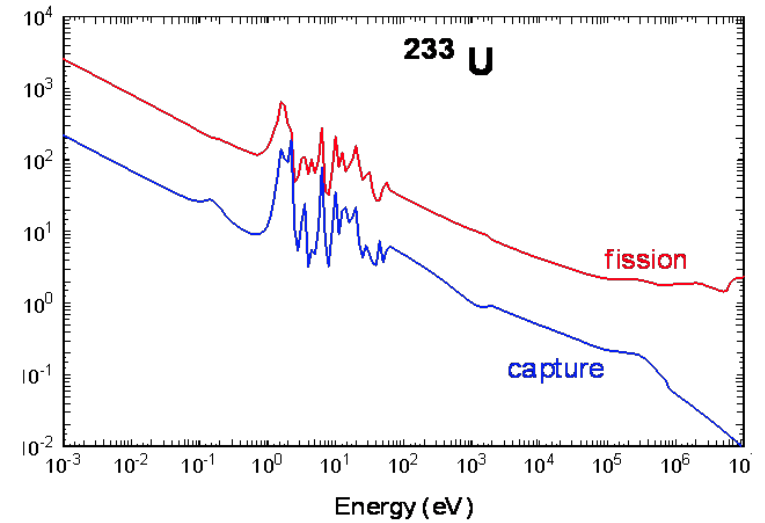
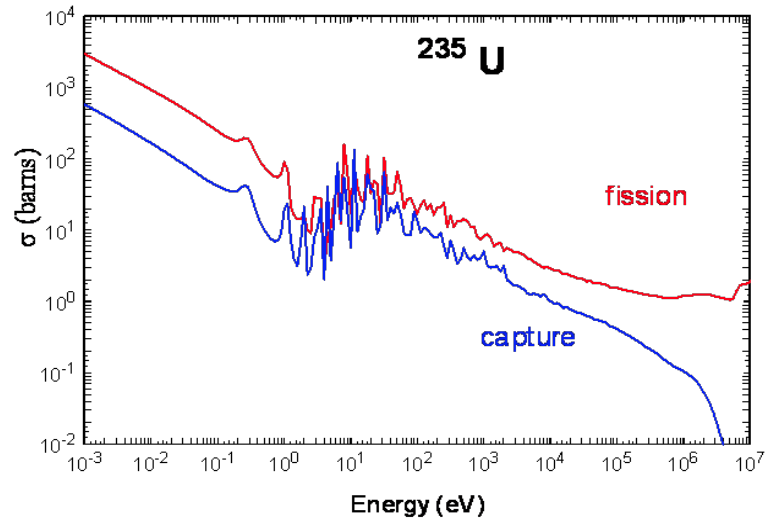
-neutron induced fission



# Fission Cross Section



# Fission Cross Section

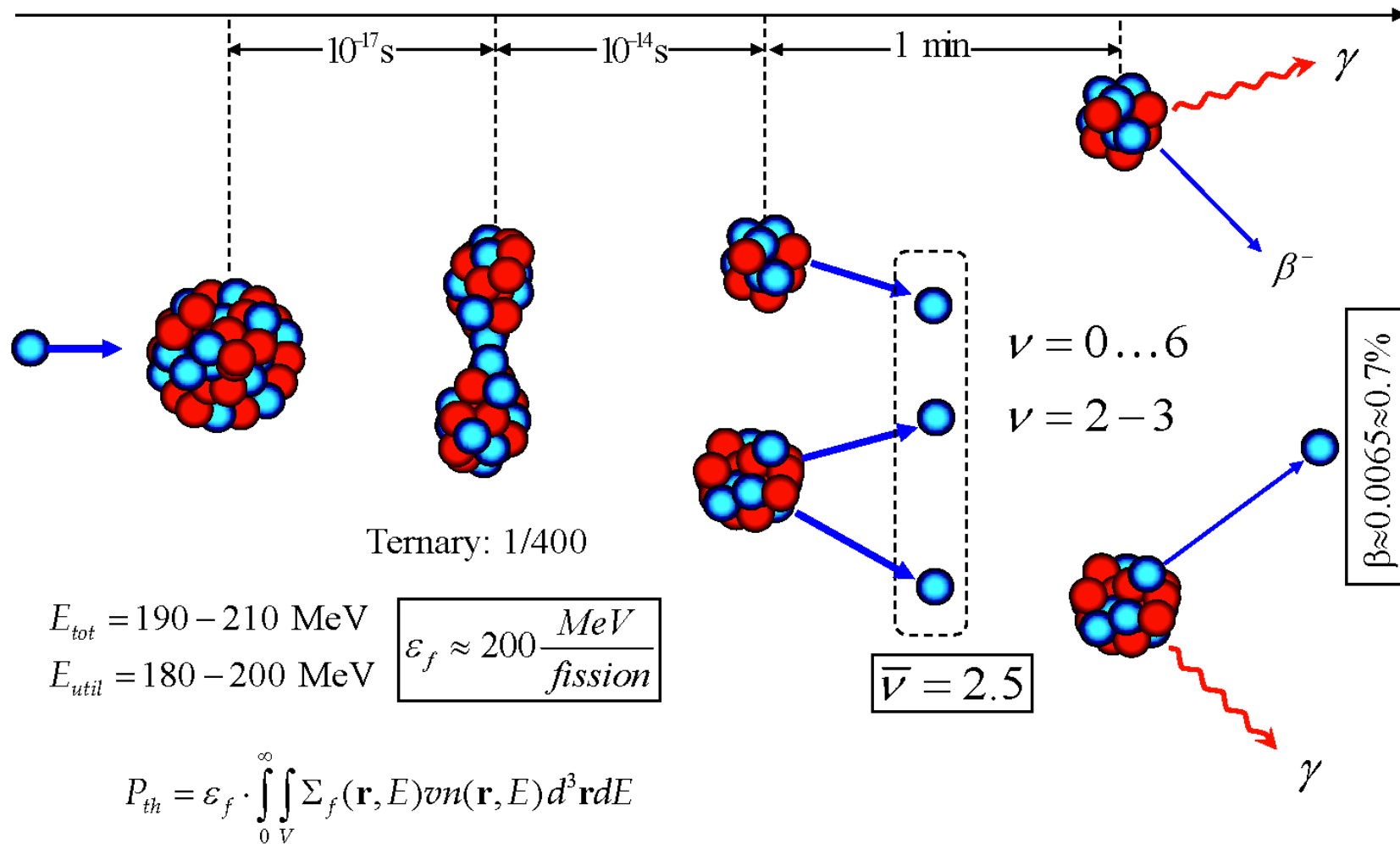


# Σύσταση του φυσικού ουρανίου

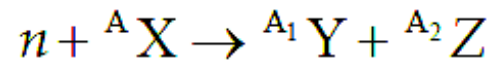
---

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

# Σχάση $^{235}\text{U}$



# Κατανομή θραυσμάτων σχάσης

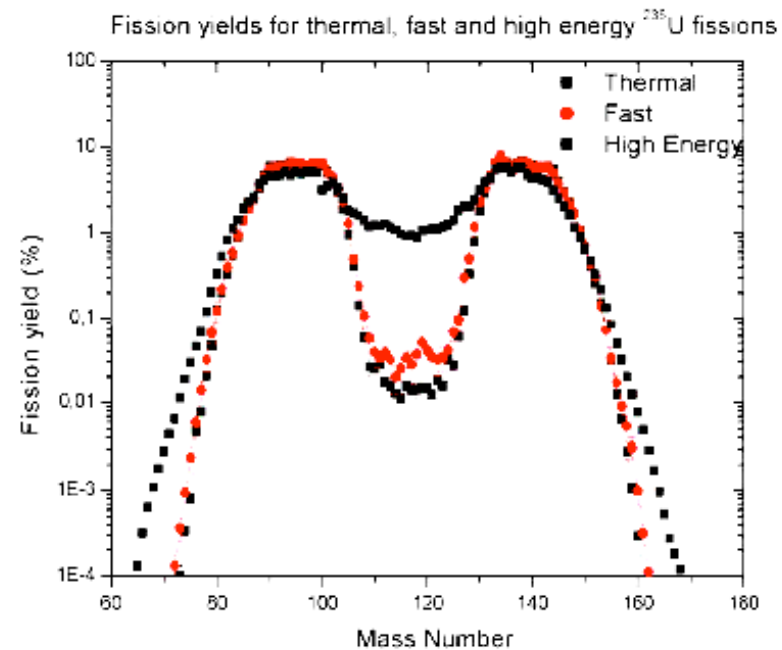
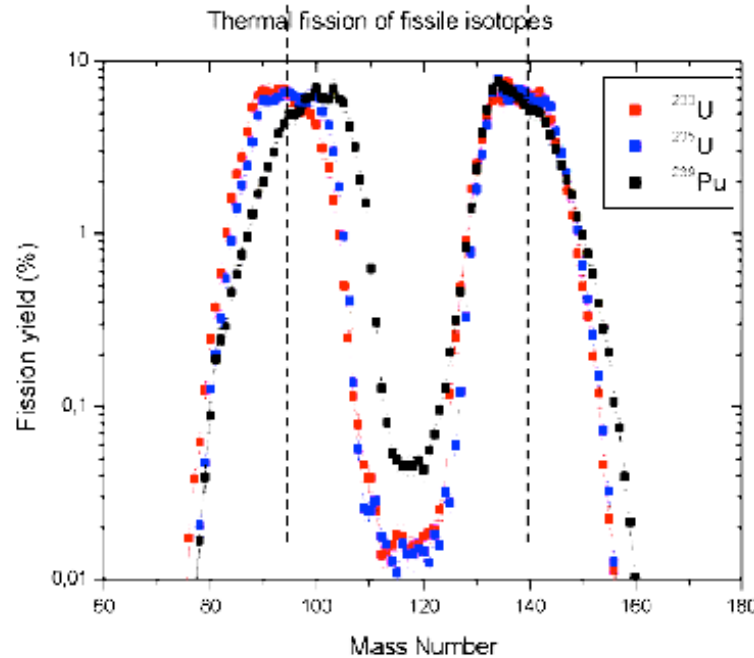


$$A + 1 \approx M({}^{A_1} Y) + M({}^{A_2} Z)$$

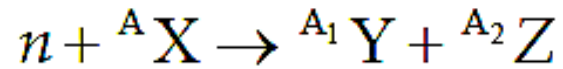
80 different nuclides (prime)

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

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



# Κινητική Ενέργεια

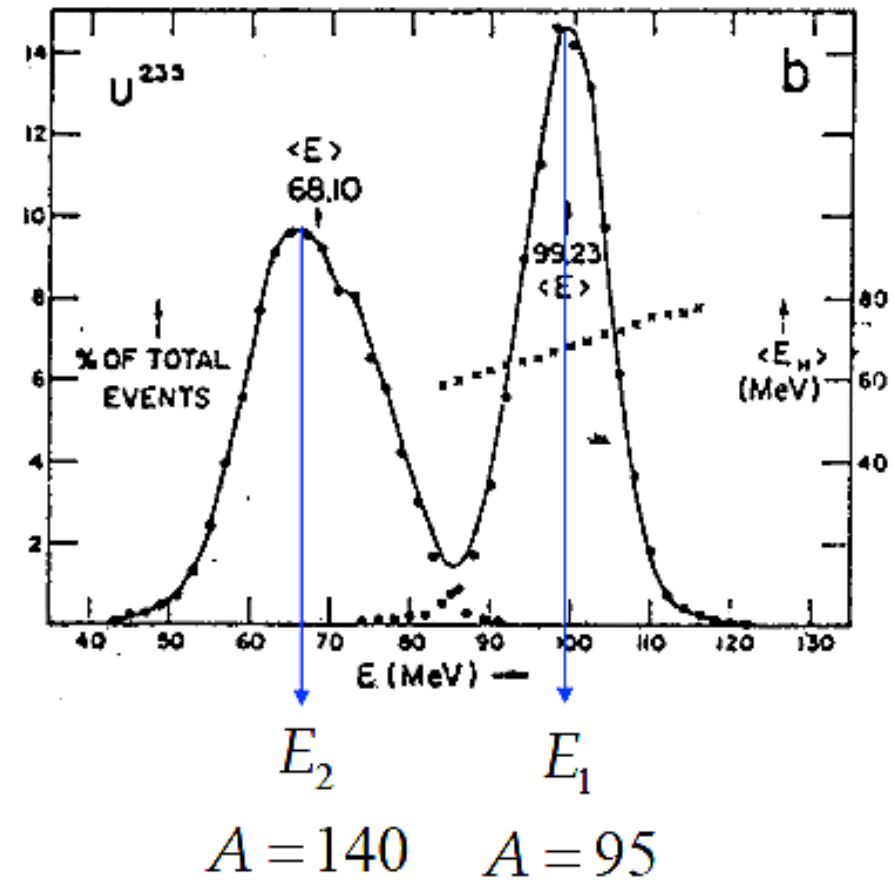


$$E_1 = \frac{M_1 v_1^2}{2}; \quad E_2 = \frac{M_2 v_2^2}{2}$$

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

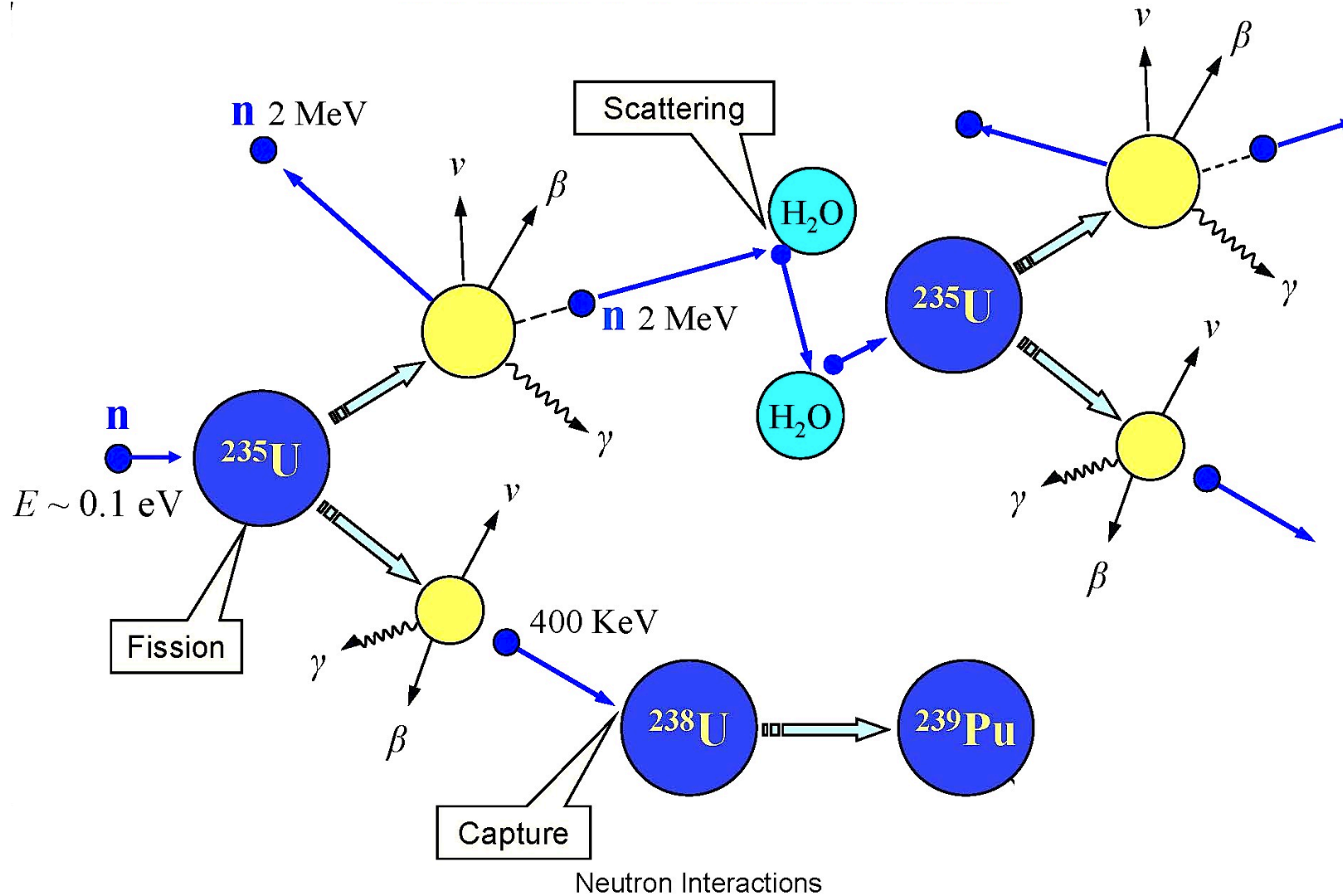
$$M_1 < M_2 \Rightarrow E_2 < E_1$$

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

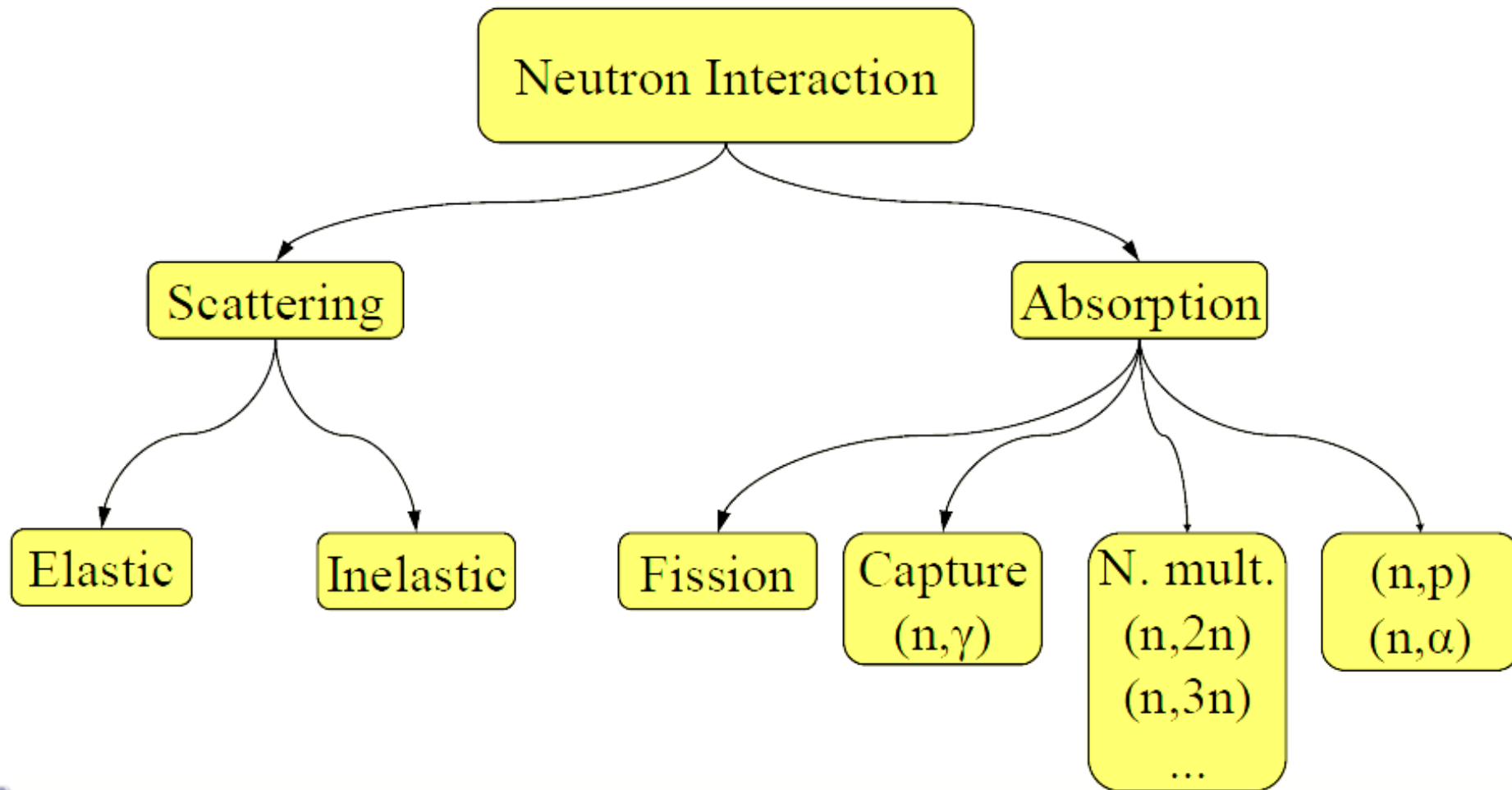




# Αλληλεπιδράσεις νετρονίων



# Αλληλεπιδράσεις νετρονίων



# Αλληλεπιδράσεις νετρονίων

Ελαστική σκέδαση:

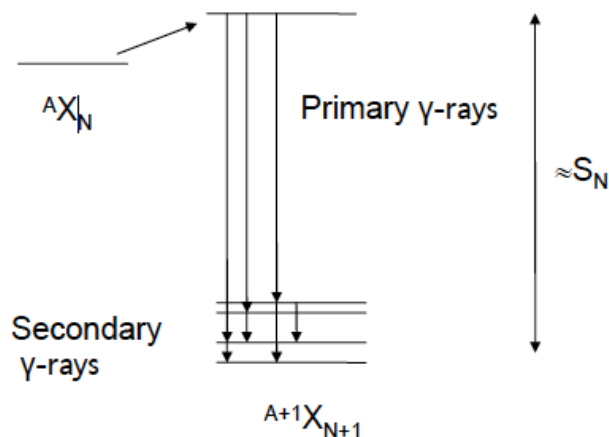
ουσιαστικά μια "μπάλα του μπιλιάρδου" σύγκρουση στην οποία δεν υπάρχει διεγερμένος πυρήνας. Διατήρηση ενέργειας και ορμής στη σύγκρουση.

Ανελαστική σκέδαση:

το νετρόνιο σκεδάζεται αλλά πυρήνας διεγείρεται με τη σύγκρουση.

Σύλληψη νετρονίου:

το νετρόνιο απορροφάται και σχηματίζεται ένας νέος πυρήνας. Η διεγερμένη κατάσταση που σχηματίζεται δεν έχει καμία μνήμη του σχηματισμού της, εκτός από τους νόμους διατήρησης.



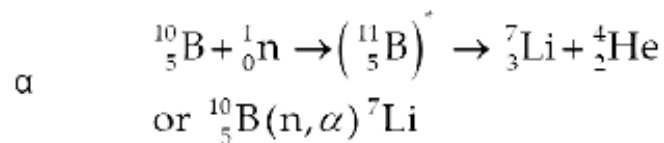
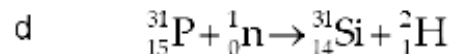
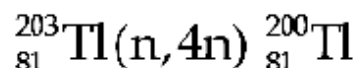
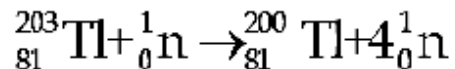
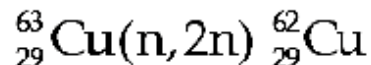
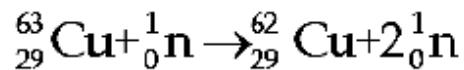
# Αλληλεπιδράσεις νετρονίων

Σε χαμηλές ενέργειες νετρονίων κυριαρχεί η σύλληψη νετρονίου.

Σε υψηλότερες ενέργειες άλλες αντιδράσεις όπως (n, p), (n, 2n) ή (n, α) κτλ γίνεο πιο σημαντικές.

Σε γενικές γραμμές, οι πυρήνες που δημιουργούνται με τη σύλληψη νετρονίου είναι ραδιενεργοί. Δεδομένου ότι είναι στην πλευρά της κοιλάδας σταθερότητας με περίσσεια νετρονίων διασπώνται στον πυρήνα με  $Z + 1$  ( $\beta^-$ ).

*Αυτό είναι σημαντικό για τη συζήτηση των αντιδραστήρων, δεδομένου ότι είναι ο λόγος που βαρύτεροι πυρήνες παράγονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα.*



# Αντιδραστήρας Σχάσης

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

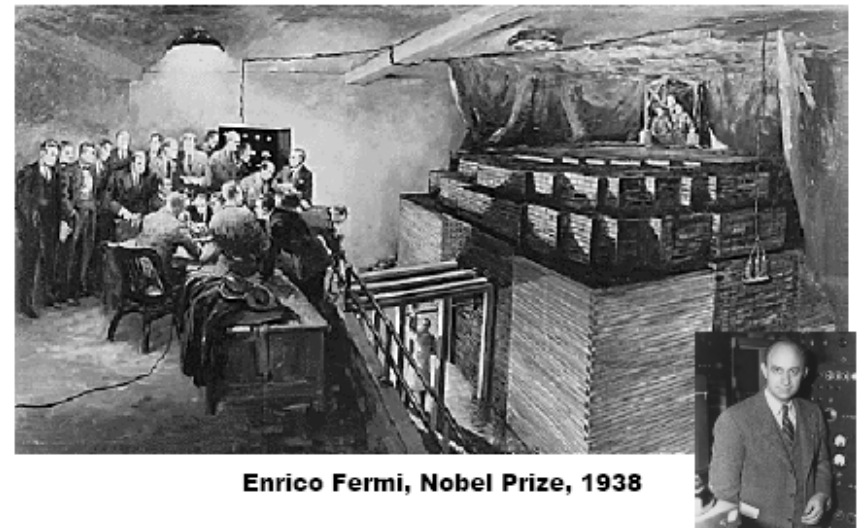
- Θα πρέπει να είναι ελαφρύ
- Καλύτερα να είναι στερεό, από την άποψη της κατασκευής ενός αντιδραστήρα και την υψηλή πυκνότητα των ατόμων.
- Θα πρέπει να είναι φτηνό.
- Θα πρέπει να είναι εύκολα διαχειρίσιμο.
- Θα πρέπει να έχει μικρή ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίου

Ο **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

# 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 επιβραδυνσή 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<sup>\*</sup>-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%.



# Σύσταση του φυσικού ουρανίου

---

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

# Χρήσιμα νουκλίδια

---

Z	Nuclide	Abundance a/o	Half-life
0	n		12 m
1	$^1\text{H}$	99.985	12.33 y
	$^2\text{H}$	0.015	
	$^3\text{H}$		
5	$^{10}\text{B}$	19.6	
	$^{11}\text{B}$	80.4	
6	$^{12}\text{C}$	98.89	5736 y
	$^{13}\text{C}$	1.11	
	$^{14}\text{C}$		
92	$^{234}\text{U}$	0.0025	$2.46 \times 10^5$ y
	$^{235}\text{U}$	0.72	$7.04 \times 10^8$ y
	$^{238}\text{U}$	99.27	$4.68 \times 10^9$ y

# 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.