

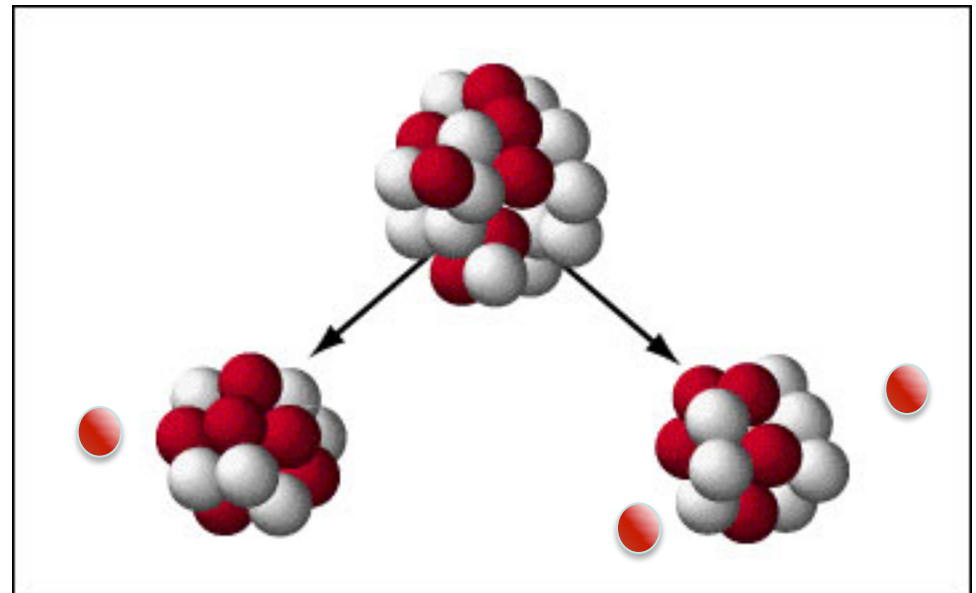
Σχάση - Σύντηξη

Δήμος Σαμψωνίδης
(28-11-2017)

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 καθυστερημένα 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) βόμβα εξερράγη 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



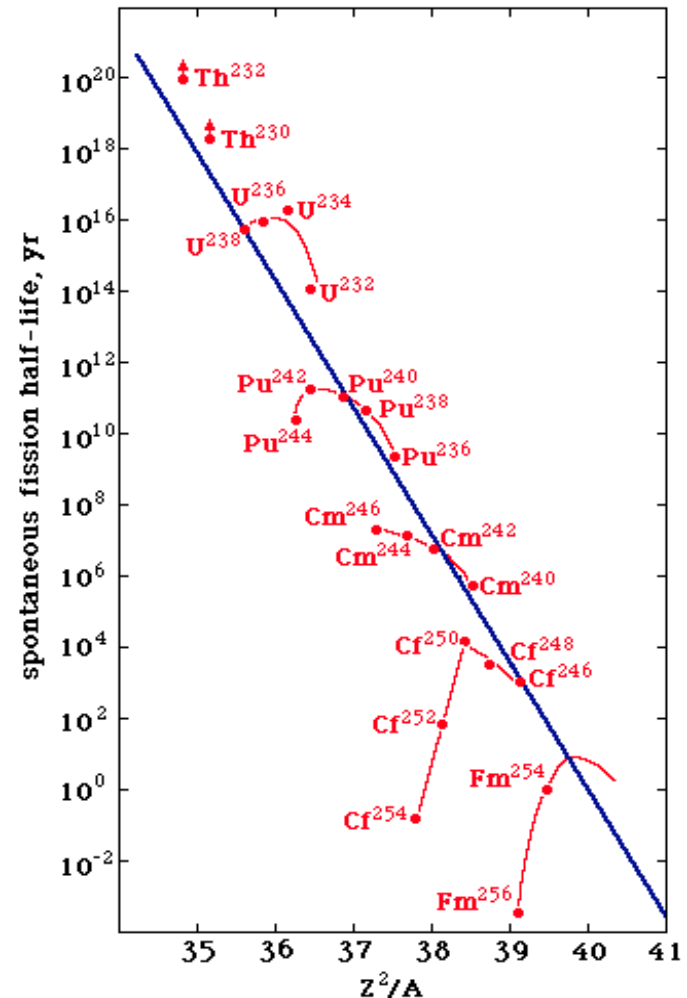
Για την ιστορία, η Γερμανίδα χημικός **Ida Noddack** πρότεινε για πρώτη φορά (*Angewandte Chemie*, **1934**), ότι: «...όταν βαρείς πυρήνες βομβαρδίζονται με νετρόνια οι πυρήνες αυτοί μπορεί να διασπαστούν σε αρκετά μεγάλα θραύσματα." Κανένας όμως δεν έλαβε σοβαρά τη θέση αυτή ή επιχείρησε πειράματα επ'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

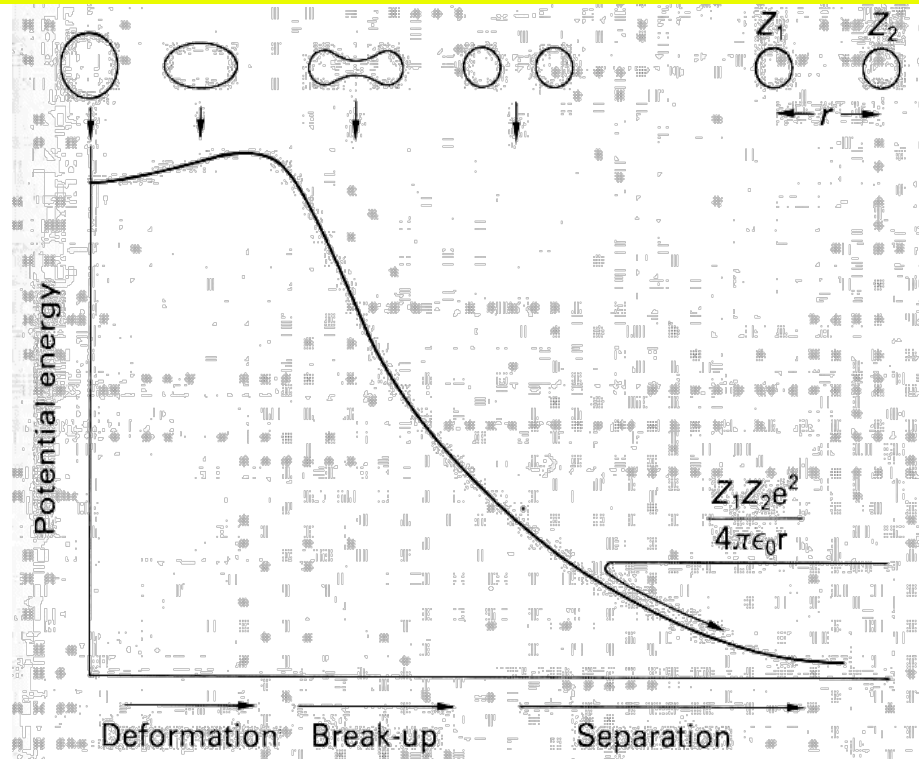
$$M(A,Z) \rightarrow 2 * M(A/2, Z/2) + Q$$

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:

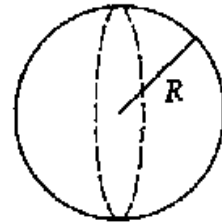
- Όρος επιφανείας:

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

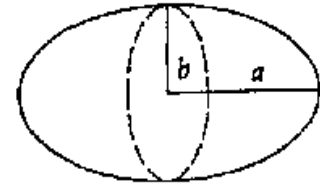
$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi a b^2.$$

- Όρος Coulomb:

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



External
Perturbation $\rightarrow$



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

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

- 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

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

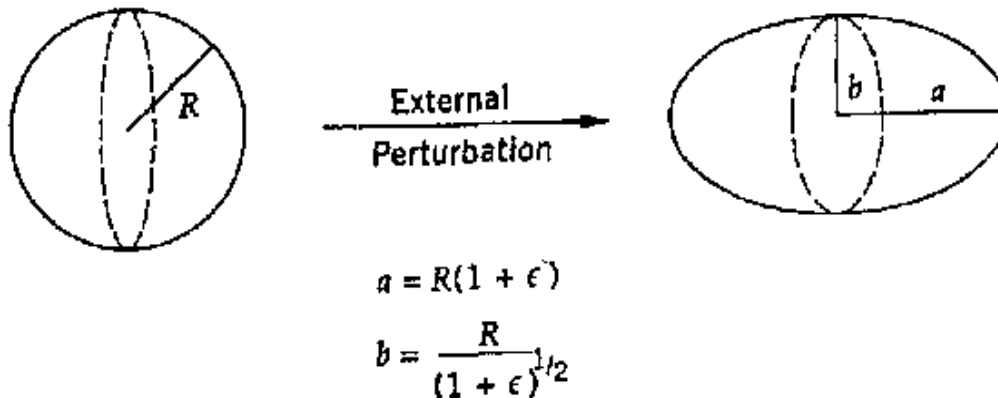
$Z > 144$ ασταθή ως προς τη σχάση

$Z > 92$ γίνεται αν περάσουν το φράγμα δυναμικού

Σχάση – είναι ενεργειακά προτιμητέα μια μικρή παραμόρφωση;

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

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



$$\frac{Z^2}{A} > 51 \rightarrow Z > 144 \quad \text{είναι ασταθής σε μικρές παραμορφώσεις}$$

$Z > 144$ ασταθής ως προς τη σχάση

$Z > 92$ γίνεται αν περάσουν το φράγμα δυναμικού

Και άρα δεν μένουν
για πολύ ως τέτοιοι
πυρήνες $\rightarrow$
δεν υπάρχουν
τέτοιοι πυρήνες

Σχάση – χρόνοι ζωής στην πράξη

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

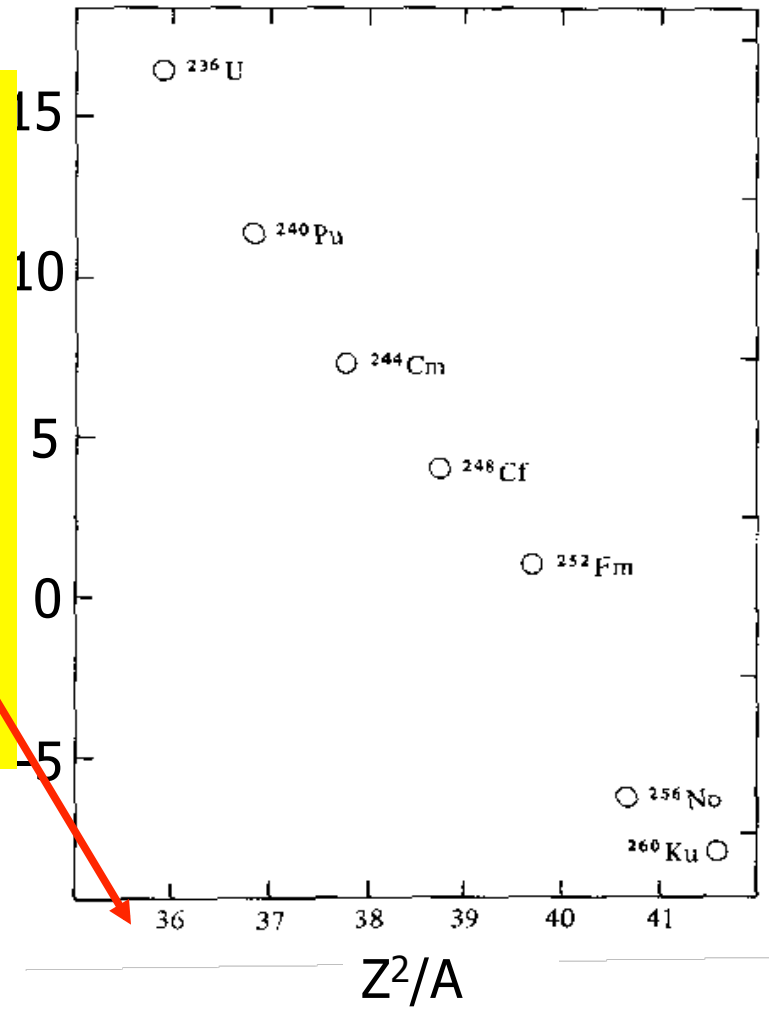
- $Q > 0$ όταν:

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

- 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:
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 T, σε έτη)



Άσκηση 1: Σχάση ουρανίου-235 ($^{235}_{92}\text{U}$)

Άσκηση:

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



b) 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)

c) 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 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

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

Άσκηση 1α): Σχάση ουρανίου-235 (^{235}U)

- Αρχή διατήρησης της ενέργειας
 - Ενέργεια πριν = Ενέργεια μετά , Η μάζα είναι μιά μορφή ενέργειας
 - $\Sigma M(\text{αρχικά}) = \Sigma M(\text{τελικά}) + Q$, για αυθόρμητη σχάση πρέπει $Q \geq 0$
- Η μάζα κάθε πυρήνα δίνεται σε amu. Μπορώ να τις κάνω MeV αμέσως, ή να τις αφήσω σε amu, να βρω το Q σε amu και να το κάνω σε MeV στο τέλος.
- $M(^{235}\text{U}) + M(n) = M(^{141}\text{Ba}) + M(^{92}\text{Kr}) + 3 \cdot M(n) + Q$
 $\rightarrow Q = M(^{235}\text{U}) - M(^{141}\text{Ba}) - M(^{92}\text{Kr}) - 2 \cdot M(n) = 0.2153 \text{ amu} \rightarrow$
 $Q = 0.2153 \cdot 931.49 \text{ MeV} = \mathbf{234.1 \text{ MeV}}$ (δηλ. $Q > 0$: άρα γίνεται αυθόρμητα)
- Οπότε κατά την αντίδραση αυτή (δηλ., για ENAN μόνο πυρήνα ^{235}U), εκλύεται ενέργεια **234.1 MeV**.

Άσκηση 1β): Σχάση ουρανίου-235 (^{235}U) - Λύση

- Υπολογίσαμε πριν ότι κατά την αντίδραση αυτή (δηλ., για ENAN μόνο πυρήνα ^{235}U), εκλύεται ενέργεια **234.1 MeV**
- Οι ενέργειες που εκλύονται κατά τις χημικές αντιδράσεις είναι της τάξης των διαφορών στις ενεργειακές στάθμες των ατόμων, δηλαδή της τάξης των eV-keV, δηλαδή χοντρικά κατά 10^9 (1 δις) έως 10^{12} (1 τρις) φορές μικρότερες!
- 1 MW = 1 MJ/s (θυμνάστε ότι η ισχύς είναι ενέργεια ανά μονάδα χρόνου)
1 χρόνος = 1γ = $365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 31536000 \text{ s} = 3.15 \cdot 10^7 \text{ s}$
Οπότε: **1 MW = $3.15 \cdot 10^7 \text{ MJ/γ}$**
- Οπότε μπορούμε να βρούμε πόσους πυρήνες χρειαζόμαστε για να πάρουμε τόση ενέργεια σε ένα χρόνο

Αριθμός σχάσεων ^{235}U σε ένα έτος = αριθμός πυρήνων ^{235}U που χρειαζόμαστε σε ένα έτος = $3.15 \cdot 10^7 \text{ MJ} / 234.1 \text{ MeV} =$

$$3.15 \cdot 10^7 \cdot 10^6 \text{ J} / (234.1 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}) = 0.84 \cdot 10^{24}$$

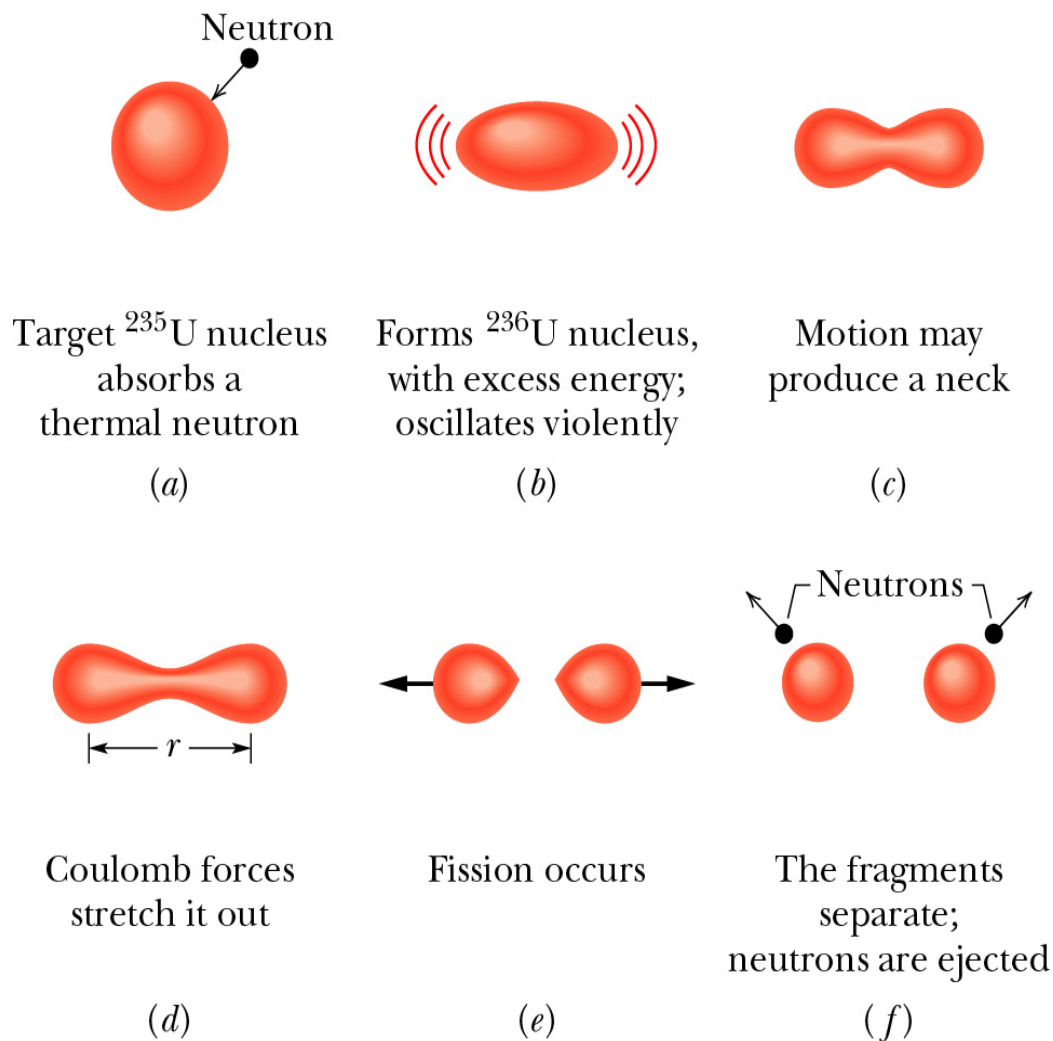
→ **οπότε χρειαζόμαστε:**

$$0.84 \cdot 10^{24} / (6.02 \cdot 10^{23}) \text{ mol} = 1.4 \text{ mol} = 1.4 \cdot 235 \text{ gr}$$

$$= \mathbf{329 \text{ gr ουρανίου } ^{235}\text{U}}$$

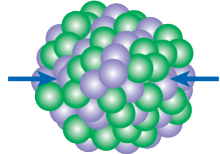
Θεώρηση της σχάσης με το μοντέλο της υγρής σταγόνας

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

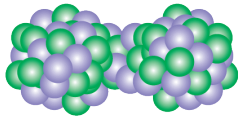


Τι προκαλεί τη σχάση του πυρήνα

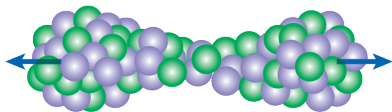
Τη σχάση προκαλεί η παραμόρφωση του ασταθούς πυρήνα, η οποία μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη ώστε οι απωστικές δυνάμεις Coulomb να υπερισχύσουν έναντι των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων.



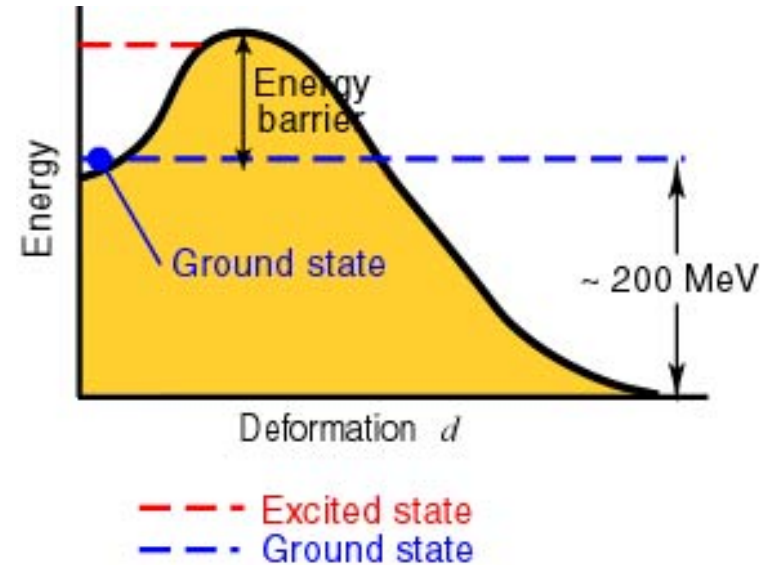
THE NUCLEAR FORCE IS
DOMINANT



CRITICAL DEFORMATION



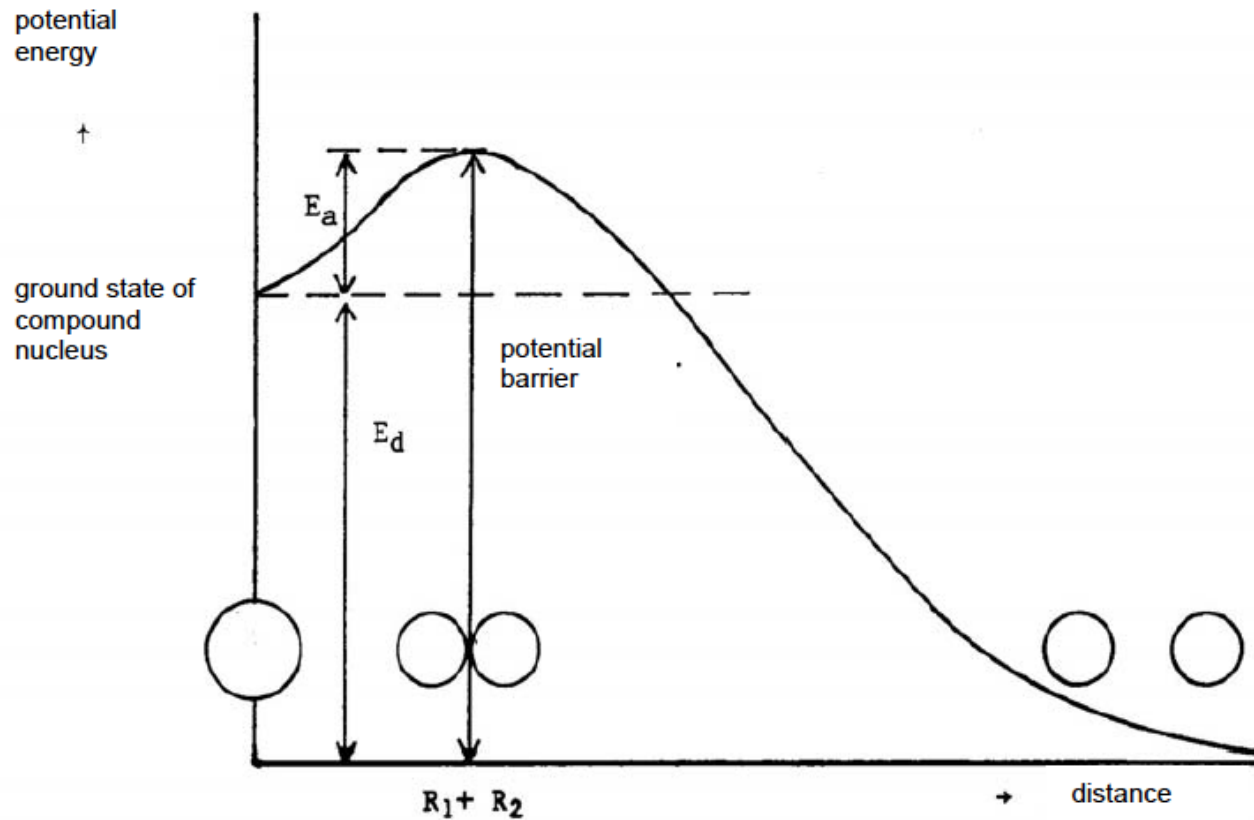
THE ELECTRICAL FORCE IS
DOMINANT



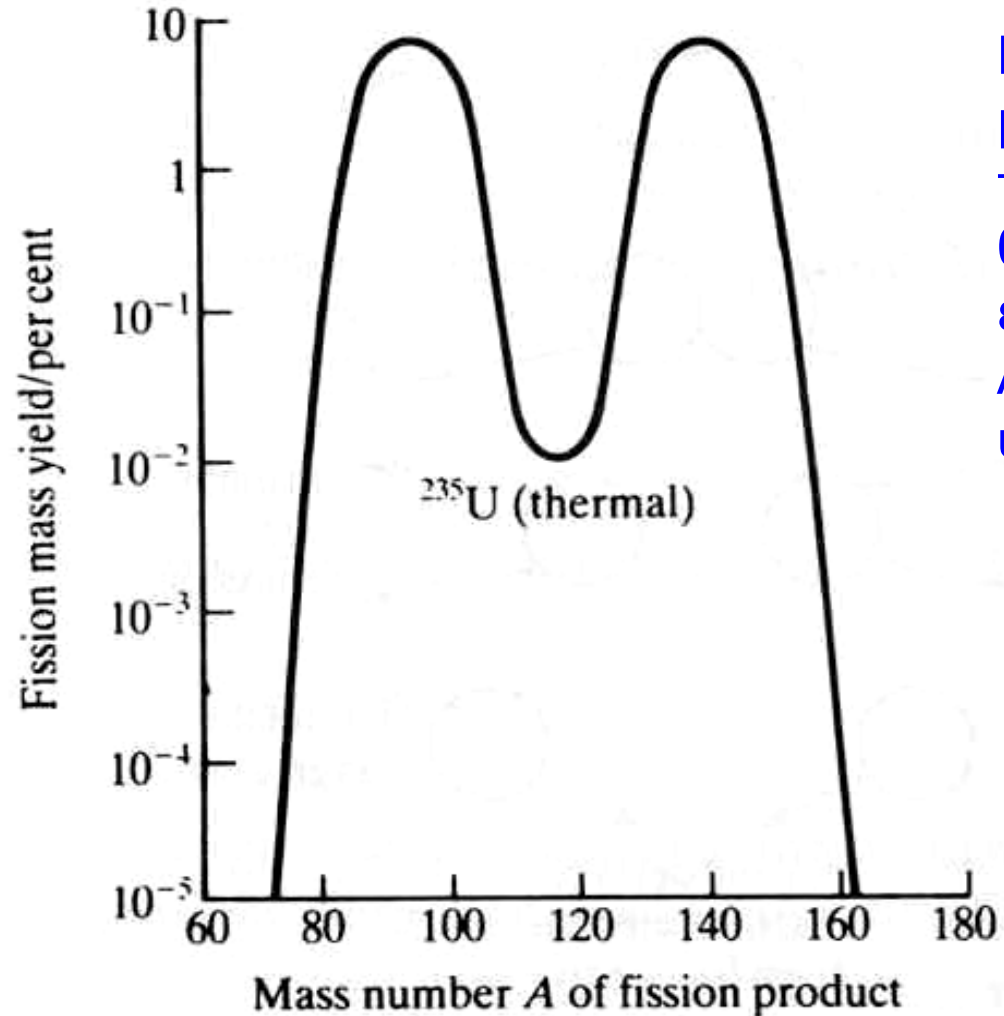
Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας κατά την πυρηνική σχάση, συναρτήσει του βαθμού παραμόρφωσης του πυρήνα. Στη βασική κατάσταση ο πυρήνας βρίσκεται σταθερά στην κοιλάδα του δυναμικού.

Όταν διεγερθεί 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



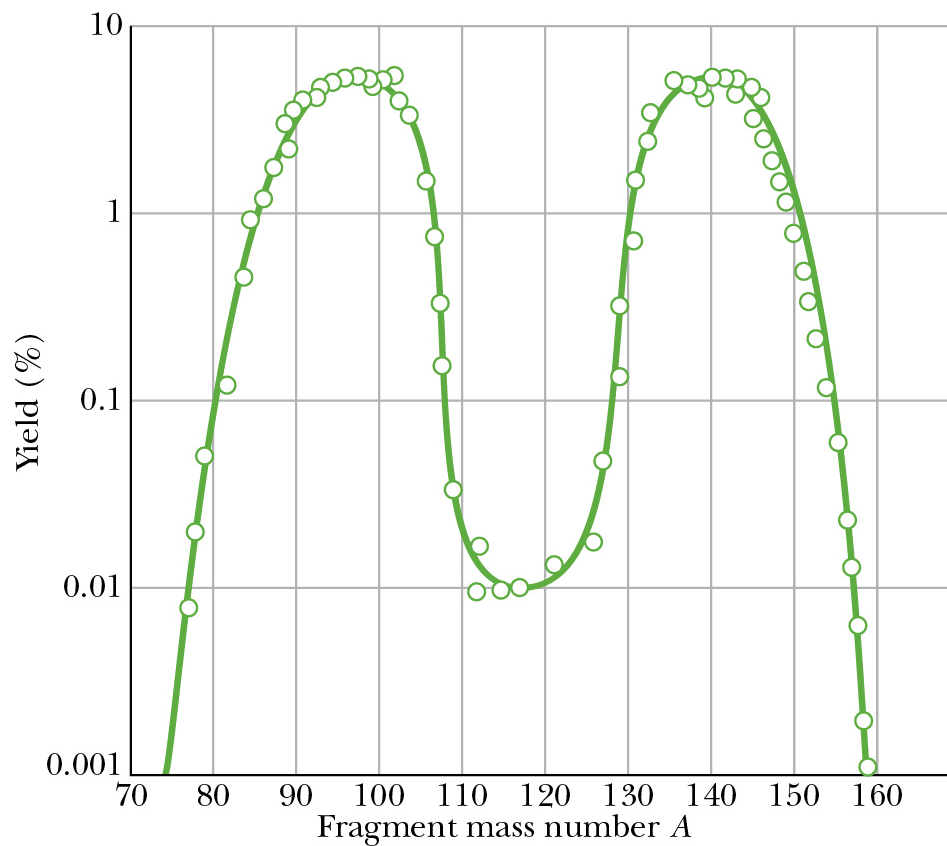
Σχάση – στην πράξη ασυμμετρικοί θυγατρικοί



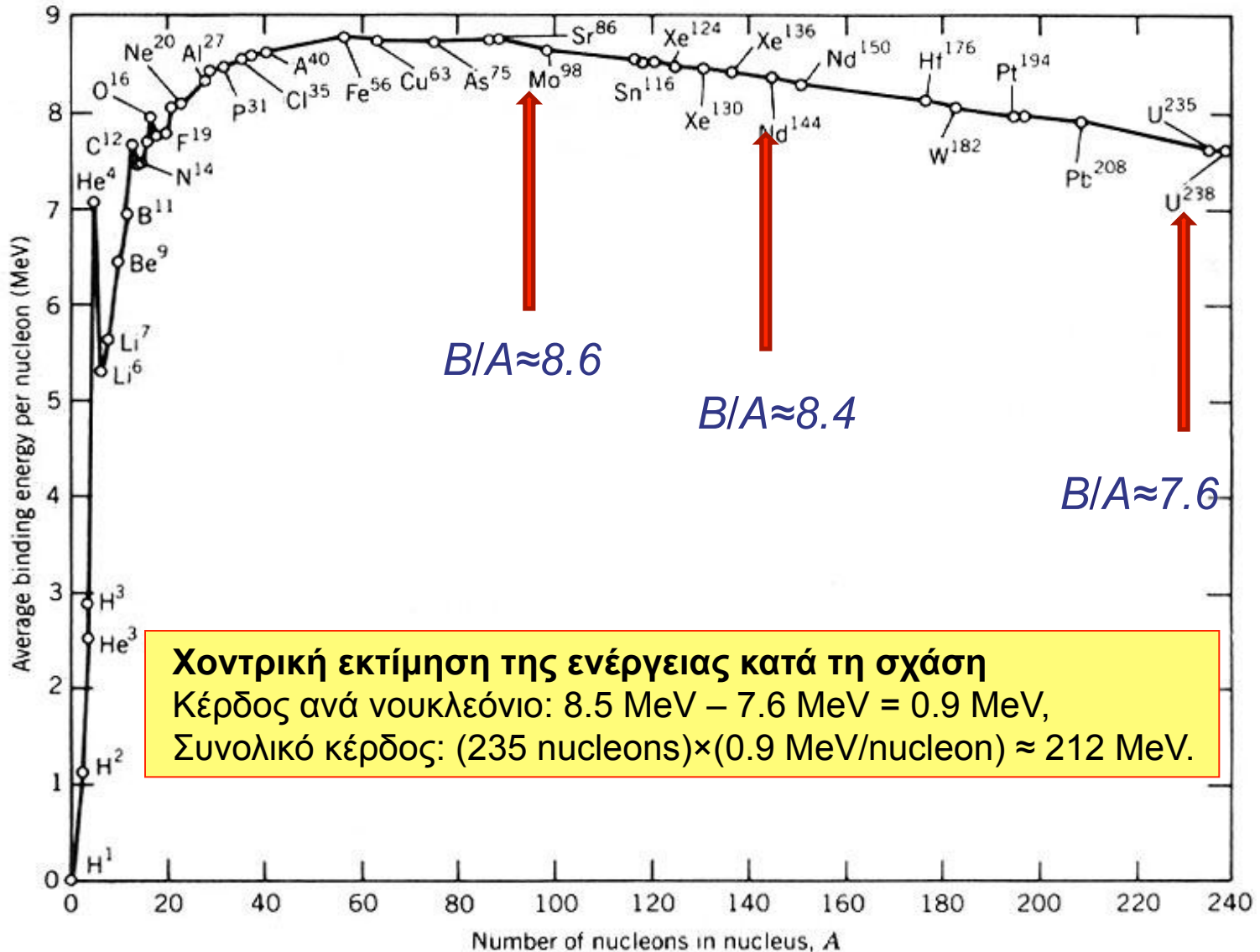
Π.χ., στη σχάση του μητρικού ^{235}U , το πιο πιθανό για τους θυγατρικούς πυρήνες είναι να έχουν, ο ένας $A \sim 90$ και ο άλλος το υπόλοιπο ($A \sim 140$)

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.



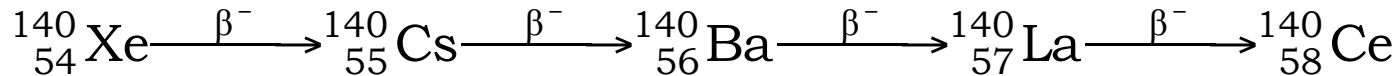
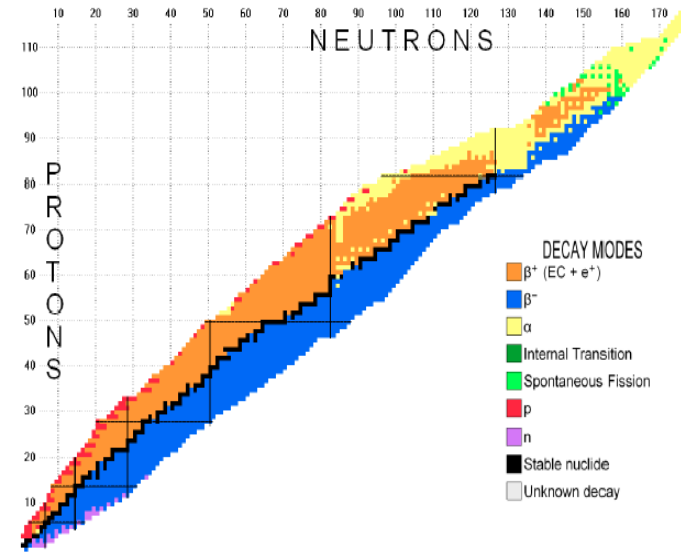
Ενέργεια / σχάση



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

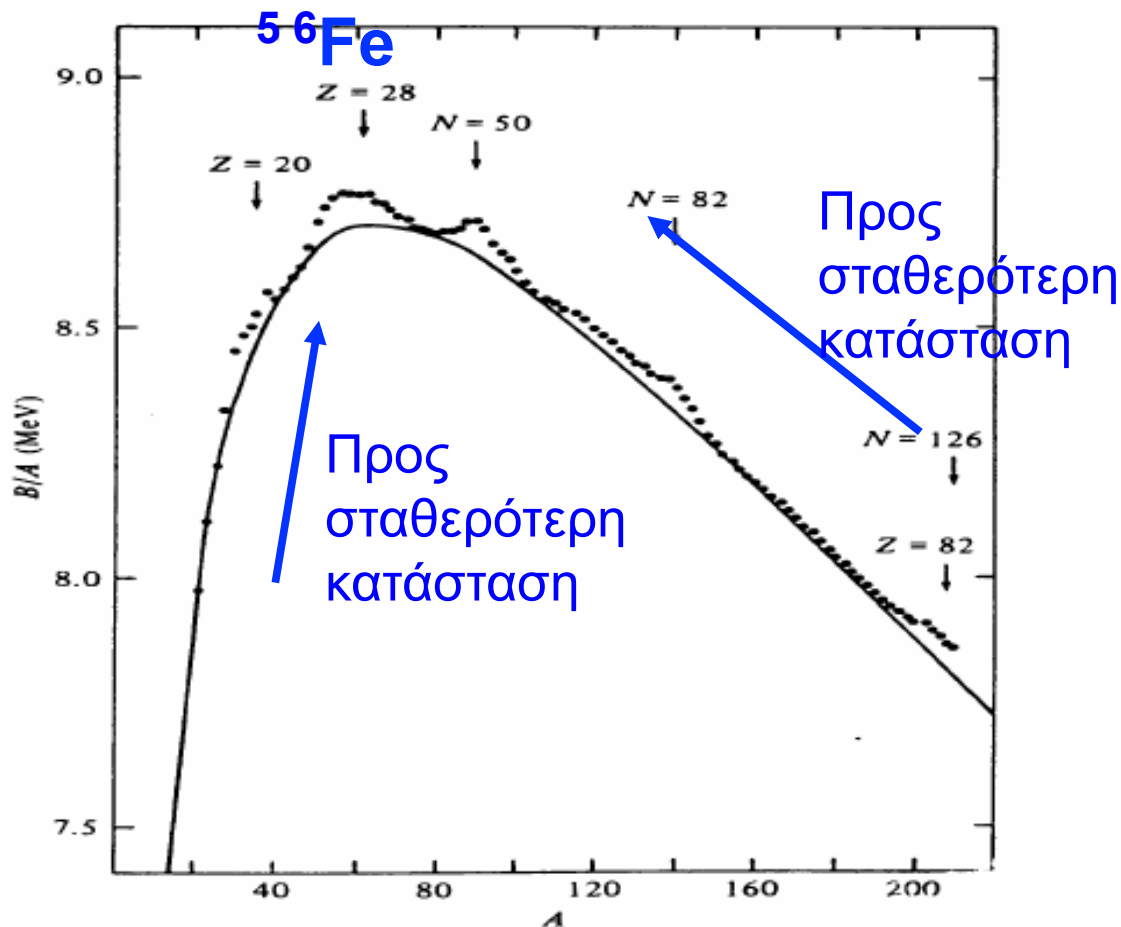


- Το νουκλίδιο Ce-140 είναι σταθερό.
- Αυτή η σειρά των β διασπάσεων παράγει περί τα 15 MeV **πρόσθετης ενέργειας**.

Σχάση – απελευθέρωση ενέργειας

Τι κερδίζουμε αποσυνθέτοντας πυρήνες?

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

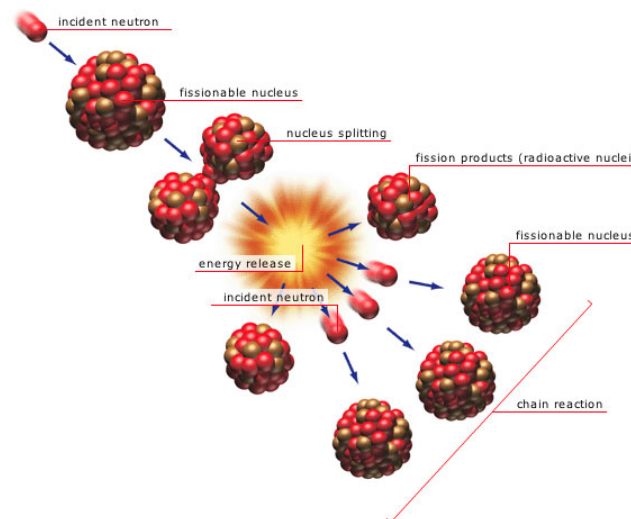


Επαγόμενη Σχάση (παρ. 9.1 βιβλίου)

- 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 επαγωγόμενη 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

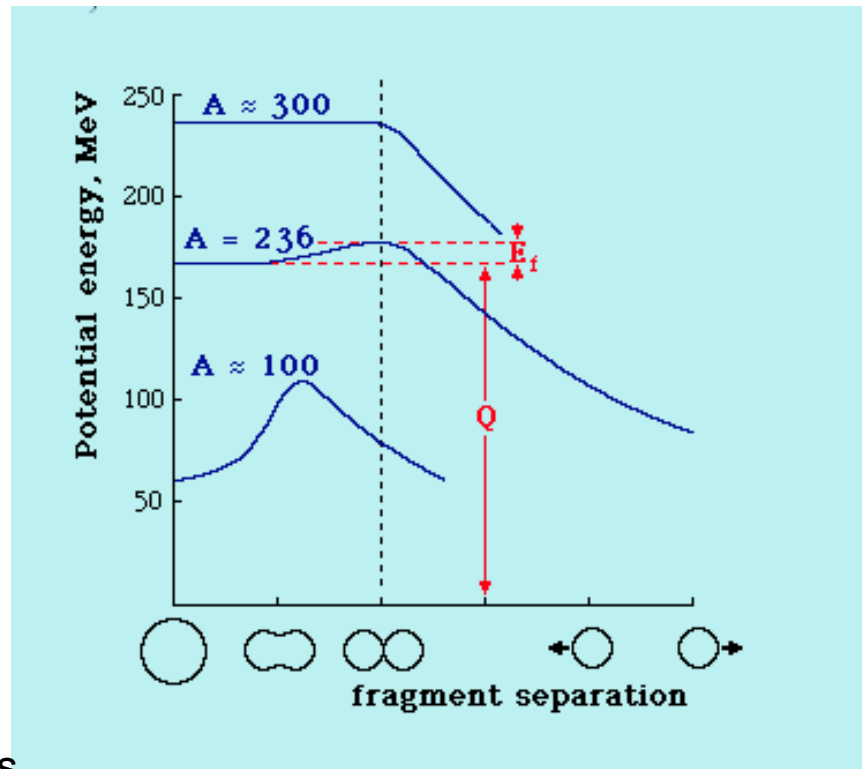
$\gamma + (Z,A) \rightarrow (Z,A)^* \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + \text{neutrons}$

-proton induced fission

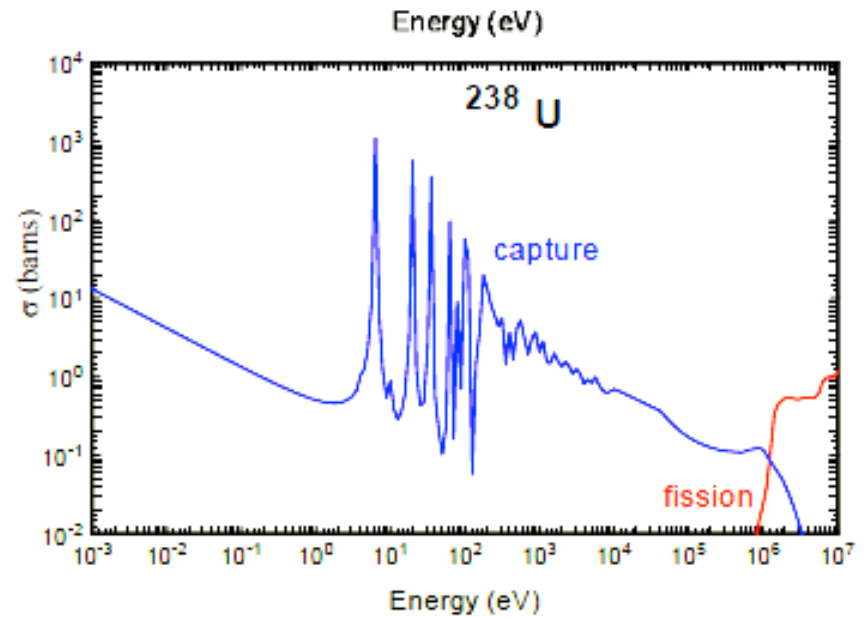
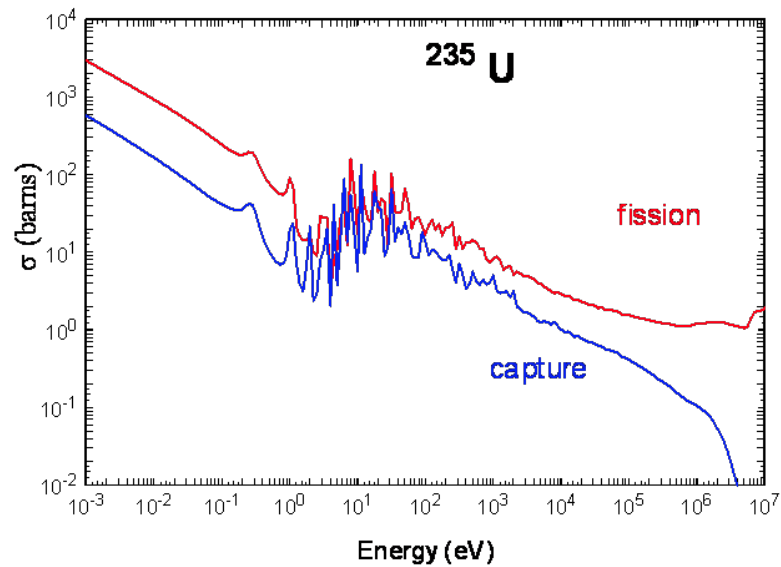
$p + (Z,A) \rightarrow p + (Z,A)^* \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + \text{neutrons}$

-neutron induced fission

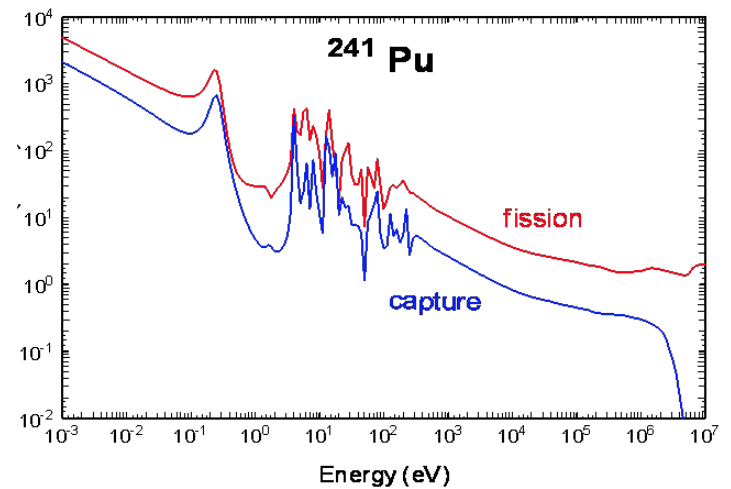
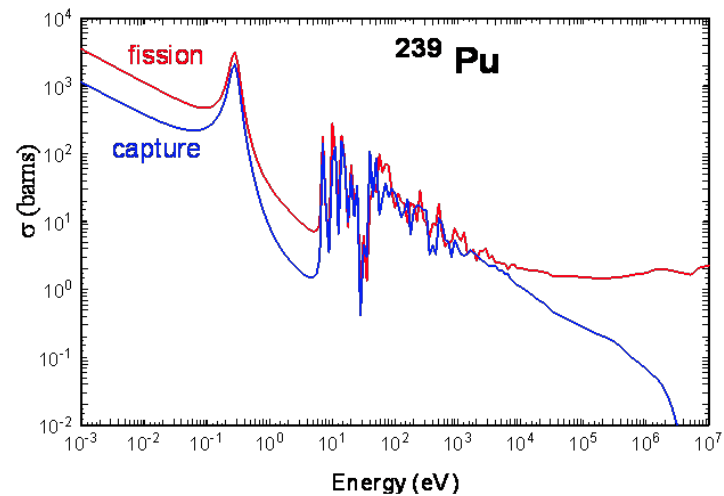
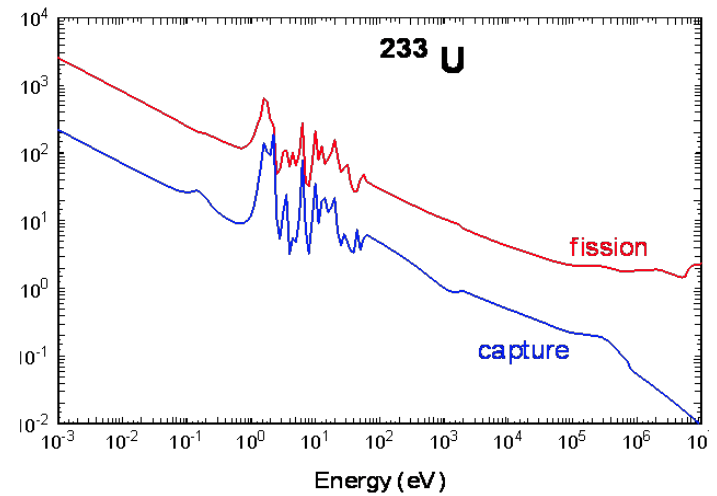
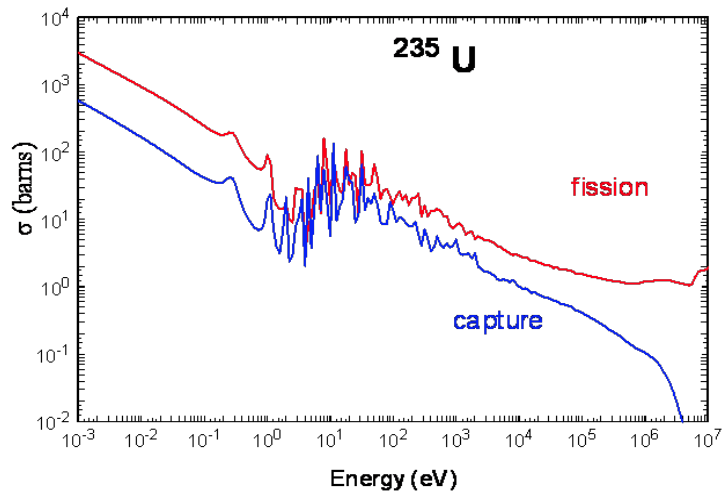
$n + (Z,A) \rightarrow (Z,A+1)^* \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + \text{neutrons}$



Fission Cross Section



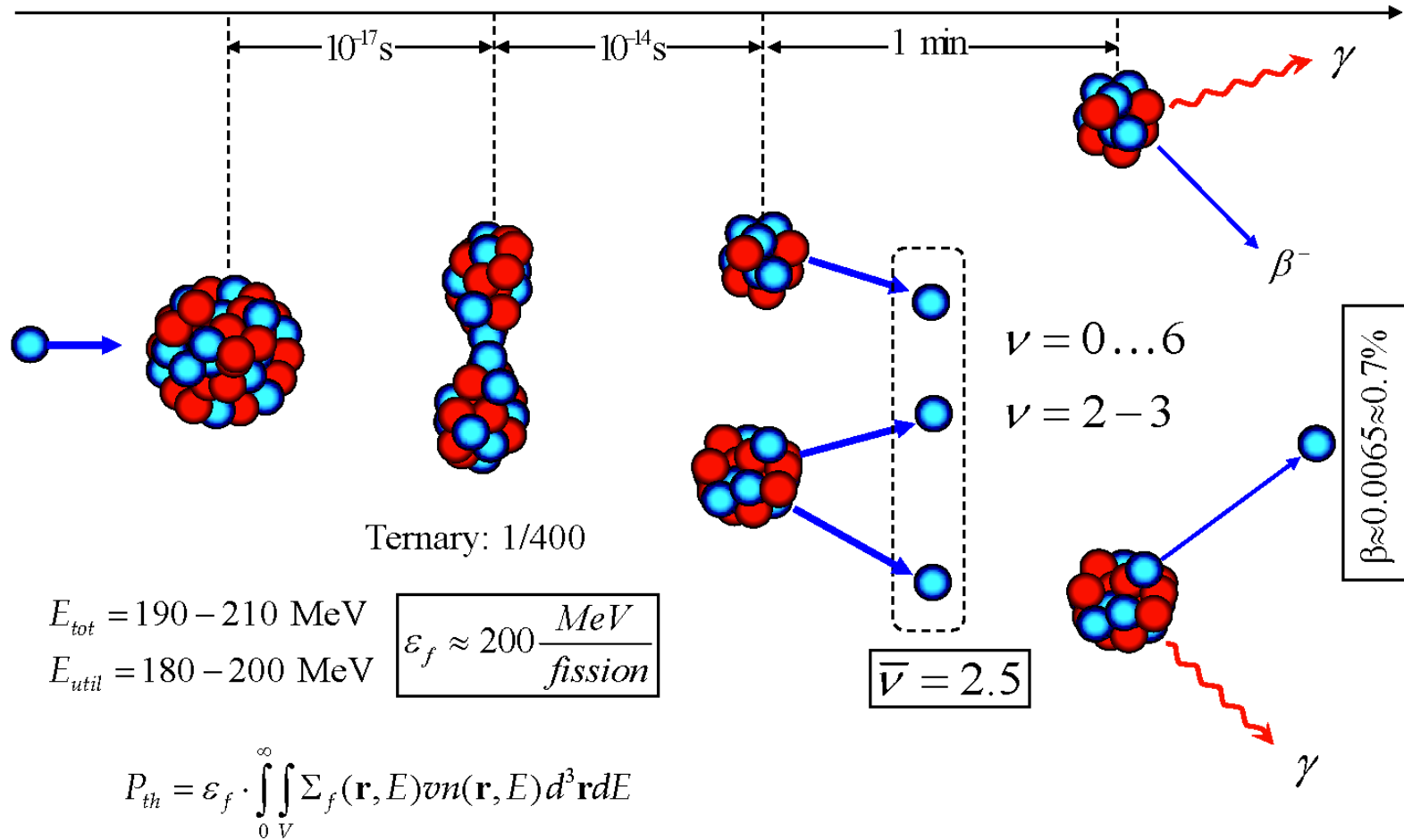
Fission Cross Section

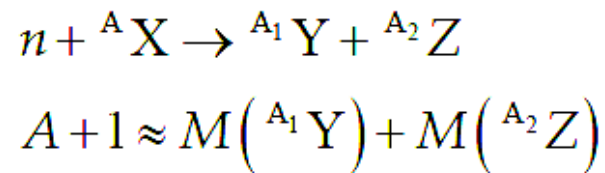


Σύσταση του φυσικού ουρανίου

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

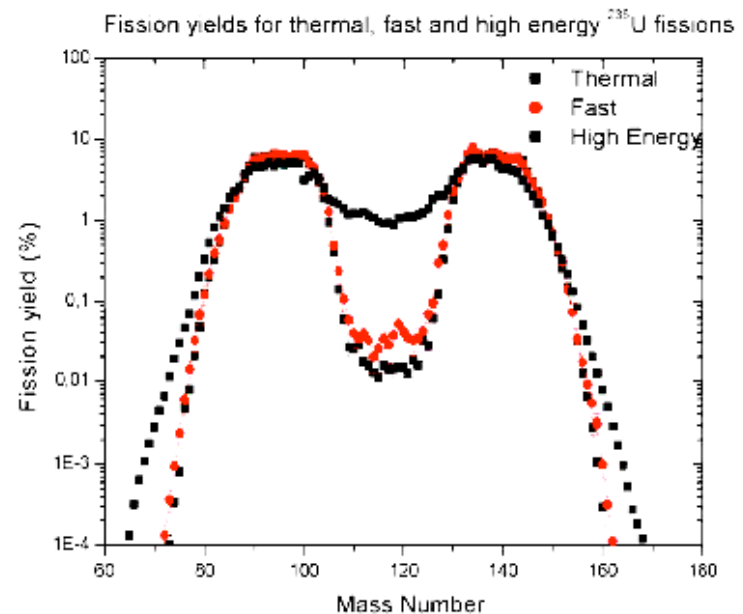
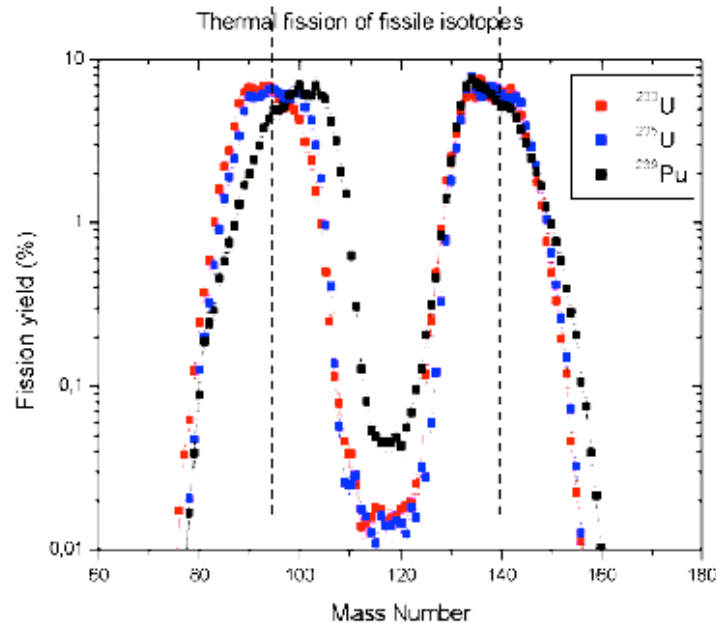




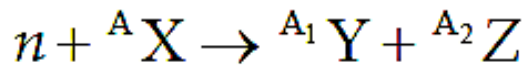
80 different nuclides (prime)

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

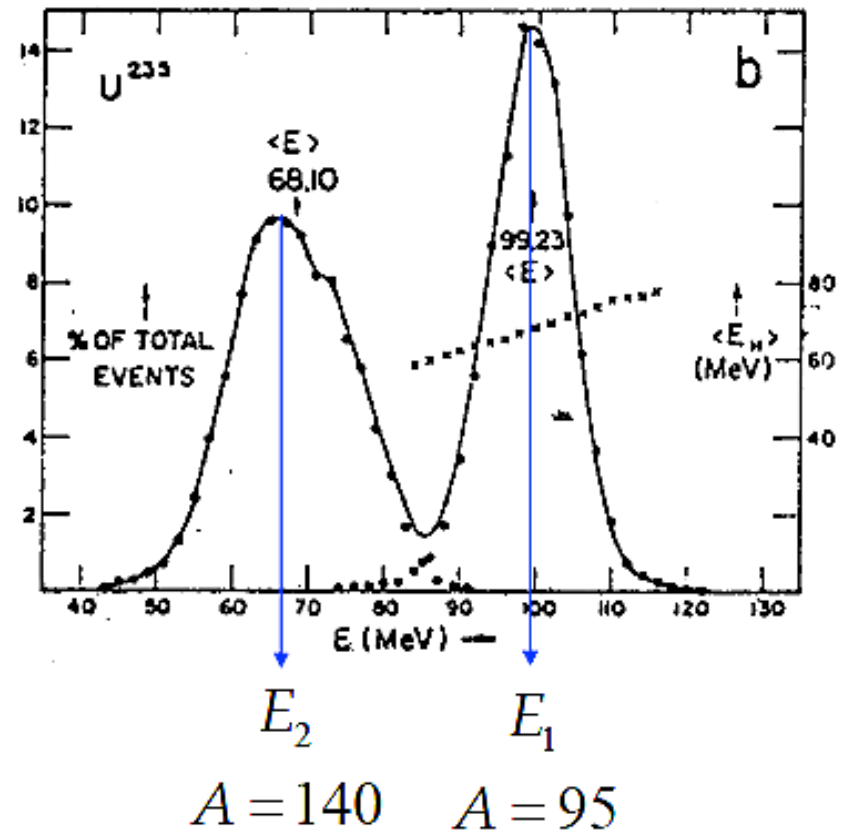


$$E_1 = \frac{M_1 v_1^2}{2}; \quad E_2 = \frac{M_2 v_2^2}{2}$$

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

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

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



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