

Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό 2016-17)

Τμήμα Τ2: Κ. Κορδάς & Δ. Σαμψωνίδης

Μάθημα 17-18
Σχάση, σύντηξη.

Δ. Σαμψωνίδης

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πυρηνική & Στοιχειώδη, Αριστοτέλειο Παν. Θ/νίκης, 28 Νοεμβρίου 2017

Εδώ

- **Αυθόρμητη σχάση**

- Βιβλίο C&G, Κεφ. 6, παρ. 6.3, Ενέγεια από σχάση κεφ. 9.
- Σημειώσεις Πυρηνικής, Κεφ. 7

- **Σύντηξη**

- Βιβλίο C&G, Κεφ. 10, παρ. 10.1, 10.5

- **Παραγωγή Βαρέων Στοιχείων**

- Βιβλίο C&G, Κεφ. 11, παρ. 11.4

- **Ιστοσελίδα:** <http://www.physics.auth.gr/course/show/125>

1α. Αυθόρμητη Σχάση

Κεφ. 6 (παρ. 6.3)

Σχάση – σε ίσα μέρη (παρ. 6.3)

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

- 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

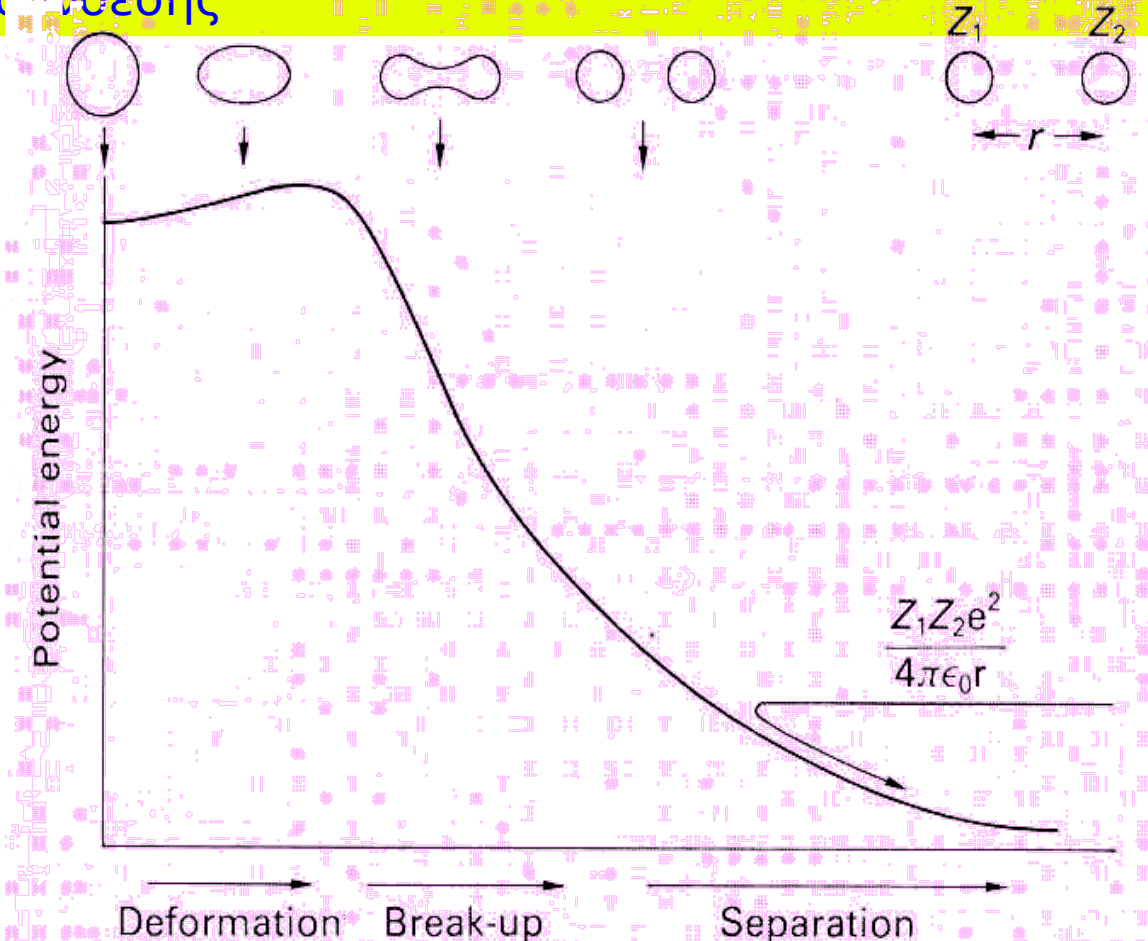
1. Παραμόρφωση μητρικού πυρήνα

2. Δημιουργία των θυγατρικών σχηματισμών

3. Οριστικός διαχωρισμός τους

Παραμόρφωση μητρικού πυρήνα:

- αύξηση επιφάνειας $\rightarrow$ μείωση ενέργειας σύνδεσης
- μείωση ενέργειας Coulomb $\rightarrow$ αύξηση ενέργειας σύνδεσης



Σχάση - χρόνοι ζωής στην πράξη

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

- $Q > 0$ όταν:

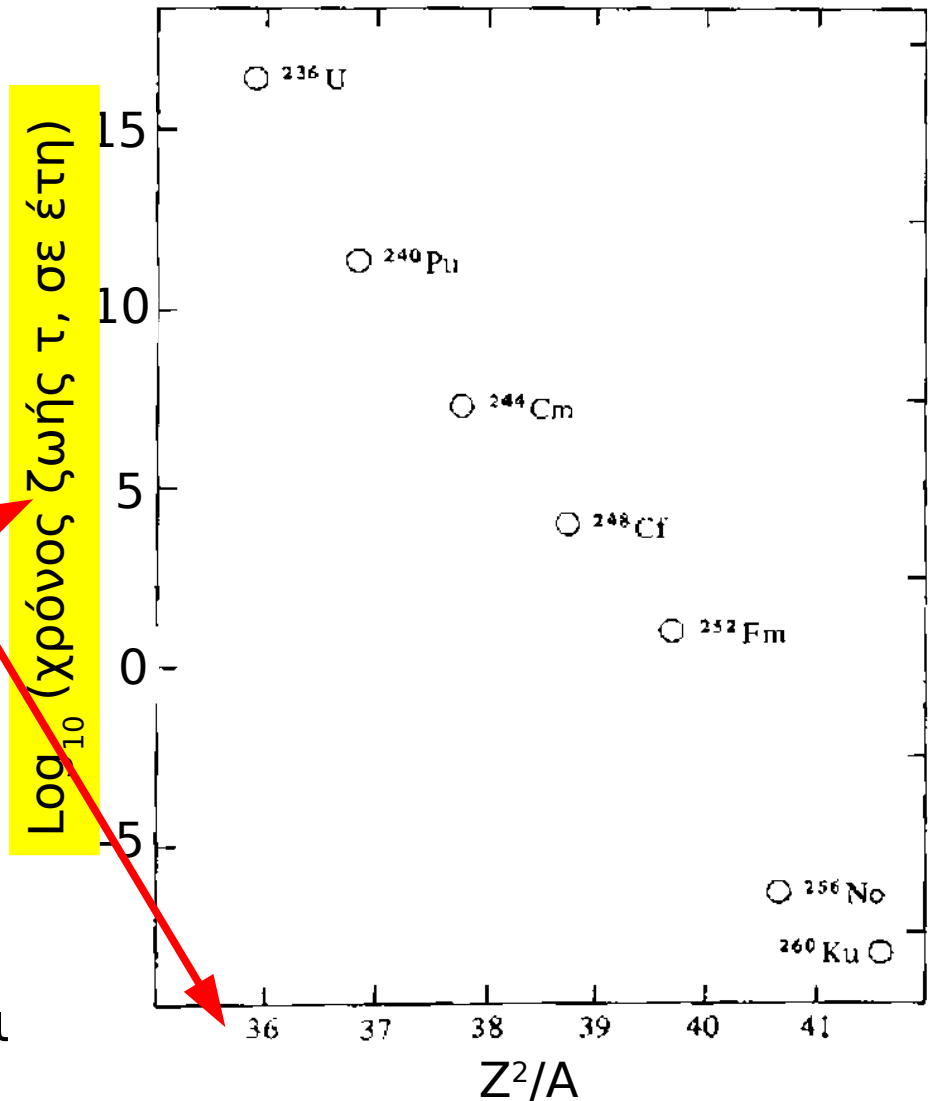
$$Z^2 / A > 18 \quad ({}^{98}_{42}\text{Mo})$$

- 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:

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 $Z > 83$].



Σχάση – είναι ενεργειακά προτιμητέα μια μικρή παραμόρφωση;

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

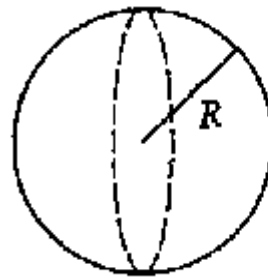
$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi a b^2.$$

- Όρος επιφανείας:

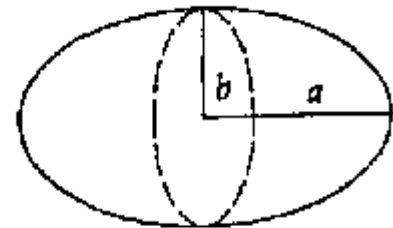
$$b A^{2/3} \rightarrow b A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2\right)$$

- Όρος Coulomb:

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



External
Perturbation $\rightarrow$



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

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

- **Η παραμόρφωση αυτή είναι προτιμητέα (οπότε, μη αντιστρέψιμη πιά) όταν:**

$M(A,Z)$ ελλειψ. $< M(A,Z)$ σφαιρ. $\rightarrow B(A,Z)$ ελλειψ $> B(A,Z)$ σφαιρ $\rightarrow B(A,Z)$ ελλειψ $- B(A,Z)$ σφαιρ > 0

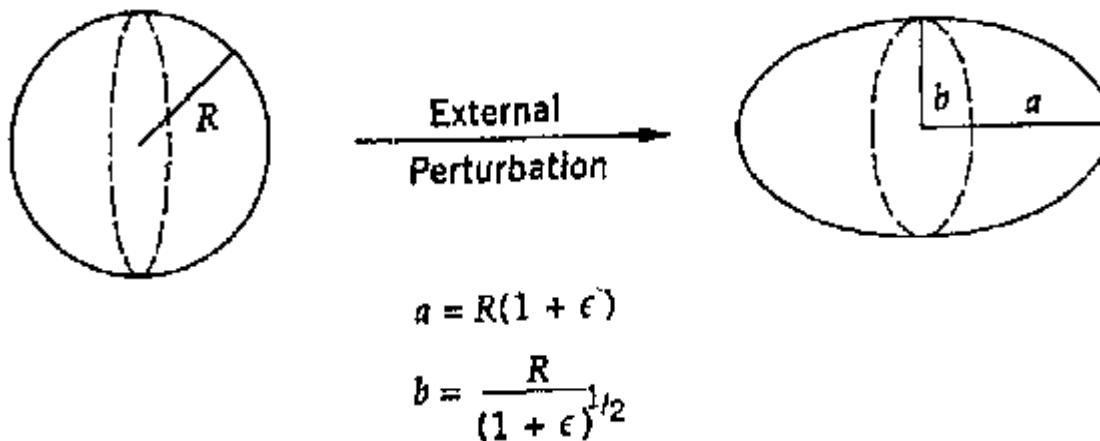
$$\left(-b A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2\right) - d \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{1}{5} \varepsilon^2\right)\right) - \left(-b A^{2/3} - d \frac{Z^2}{A^{1/3}}\right) > 0$$

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

Σχάση – είναι ενεργειακά προτιμητέα μια μικρή παραμόρφωση;

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

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

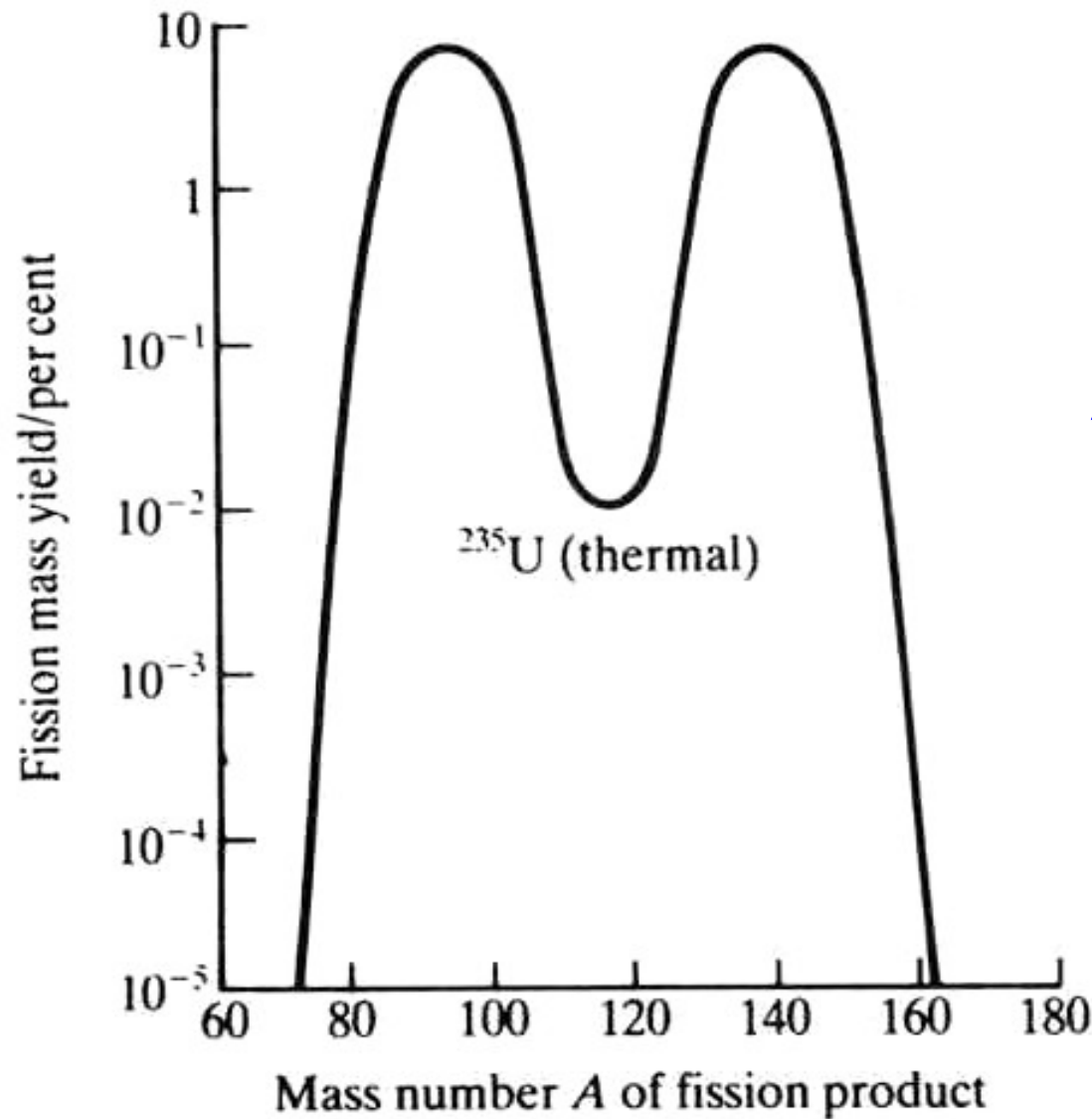


$$\frac{Z^2}{A} > 51 \rightarrow Z > 144 \text{ είναι ασταθή σε μικρές παραμορφώσεις}$$

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

**$Z > 144$ ασταθή ως προς τη σχάση
 $Z > 92$ γίνεται αν περάσουν το φράγμα δυναμικού**

Σχάση – στην πράξη ασυμμετρικοί θυγατρικοί

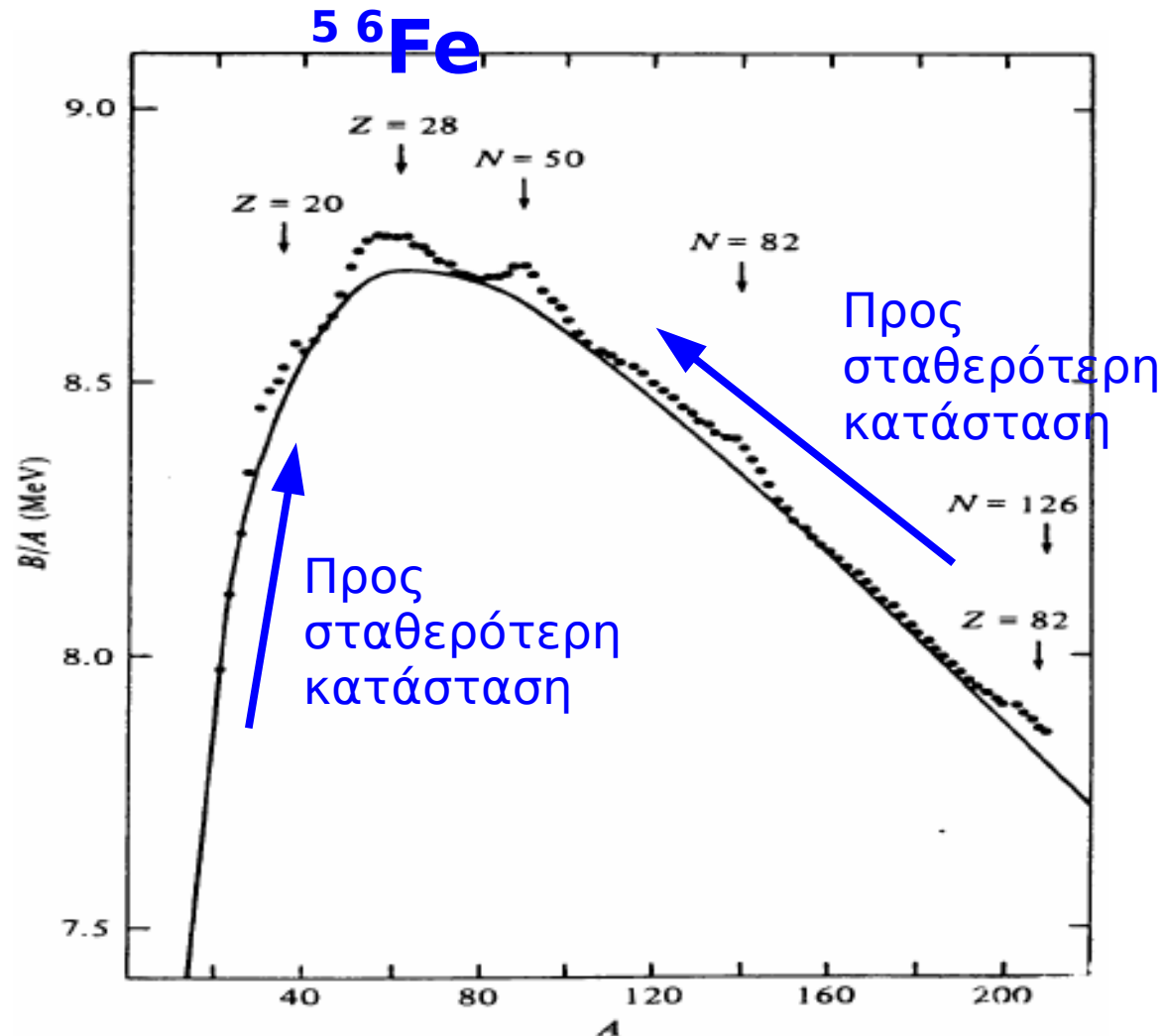


Π.χ., στη σχάση του
μητρικού ^{235}U , το πιο
πιθανό για τους
θυγατρικούς πυρήνες
είναι να έχουν, ο ένας
 $A \sim 90$ και ο άλλος το
υπόλοιπο ($A \sim 140$)

Σχάση - απελευθέρωση ενέργειας

Τι κερδίζουμε αποσυνθέτοντας πυρήνες;

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



Άσκηση 1: Σχάση ουρανίου-235 (^{235}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 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

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

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!
- $1 \text{ MW} = 1 \text{ MJ/s}$ (θυμνάστε ότι η ισχύς είναι ενέργεια ανά μονάδα χρόνου)
 $1 \text{ χρόνος} = 1 \text{ y} = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 31536000 \text{ s} = 3.15 \cdot 10^7 \text{ s}$
Οπότε: **$1 \text{ MW} = 3.15 \cdot 10^7 \text{ MJ/y}$**
- 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:

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

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

1β. Επαγόμενη Σχάση, αλλησιδωτές αντιδράσεις και αντιδρασθήρες

Κεφ. 9

Επαγόμενη Σχάση

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



- Ουσιαστικά, το νετρόνιο απορροφήθηκε από το ${}^{235}_{92}\text{U}$ και δημιουργήθηκε το ${}^{236}_{92}\text{U}$, 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: ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, ${}^{241}_{94}\text{Pu}$

Ενέργειες προϊόντων στη σχάση

Table 9.1. *Distribution of energy release on the induced fission of a nucleus of ^{235}U*

			MeV
Άμεσα: 10^{-14} sec	{	Kinetic energy of fission fragments	167
		Kinetic energy of fission neutrons	5
		Energy of prompt γ -rays	6
			—
		Sub-total of 'immediate' energy	178
Καθυστερημένα: ~ 13 sec	{	Electrons from subsequent β -decays	8
		γ -rays following β -decays	7
			—
		Sub-total of 'delayed' energy	15
		Neutrino energy	12
			—
			205

Κινητική ενέργεια
άμεσων νετρονίων

Αλυσιδωτή αντίδραση

- Αν τουλάχιστον ένα από τα παραγόμενα νετρόνια προκαλεί τη σχάση ενός ίδιου πυρήνα, έχουμε αλυσιδωτή αντίδραση.
- Αν **για κάθε ένα νετρόνιο** που πέφτει πάνω σ' έναν μητρικό πυρήνα,
 - παράγονται κατά μέσο όρο ν νετρόνια,
 - και το καθένα έχει πιθανότητα q να προκαλέσει με τη σειρά του σχάση,
 - τότε: νq = τα παραγόμενα νετρόνια για κάθε 1 που προκαλεί σχάση

$\nu q - 1$ = η μεταβολή του πληθυσμού των νετρονίων από 1 τέτοιο νετρόνιο
- α) αν $\nu q - 1 > 0 \rightarrow$ **αύξηση πληθυσμού:**
 - η αντίδραση έχει ξεφύγει (υπερκρίσιμη),
- β) αν $\nu q - 1 < 0 \rightarrow$ **μείωση πληθυσμού:**
 - η αντίδραση σβήνει εκθετικά (υποκρίσιμη),
- γ) αν $\nu q - 1 = 0 \rightarrow$ **σταθερότητα:**
 - η αντίδραση είναι ελέγξιμη (κρίσιμη)

Αλυσιδωτή αντίδραση

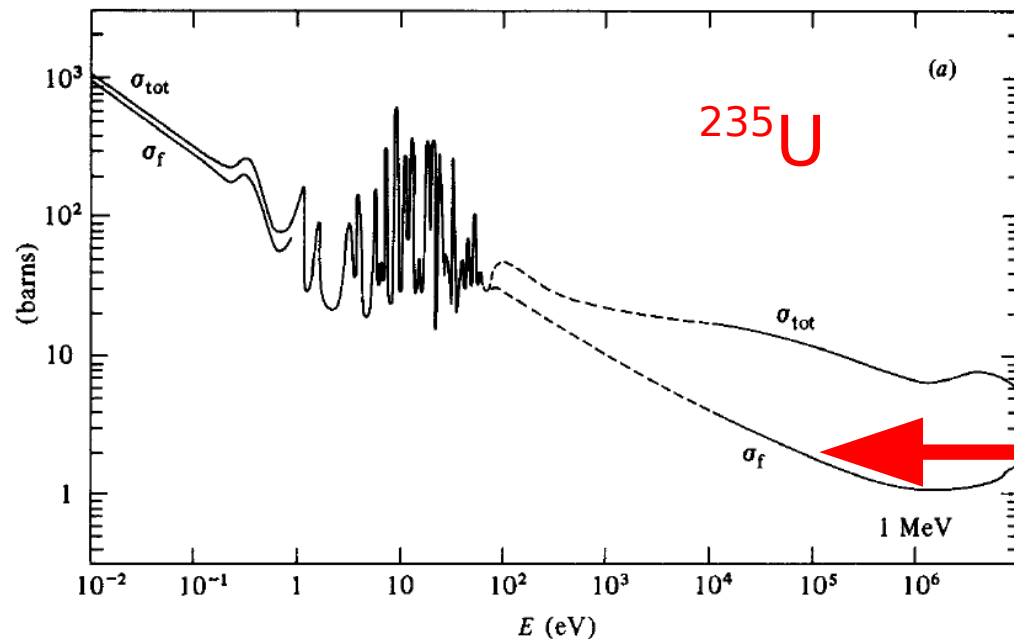
- t_p = μέσος χρόνος που χρειάζεται ένα νετρόνιο να αλληλεπιδράσει και να προκαλέσει σχάση
- $n(t)$ = πληθυσμός νετρονίων στο δείγμα
- Ο πληθυσμός νετρονίων μετά από χρόνο dt θα είναι:

$$n(t+dt) = n(t) + (vq-1)n(t)(dt/t_p) \rightarrow \frac{dn}{dt} = \frac{(vq-1)}{t_p} n(t) \rightarrow n(t) = n(0) e^{(vq-1)t/t_p}$$

- Για ^{235}U : $v \sim 2.5$ νετρόνια,
οπότε όταν $(vq-1) > 0 \rightarrow q > 0.4$, μας έχει ξεφύγει:
ο πληθυσμός των νετρίνων που προκαλούν σχάσεις,
δηλ. ο αριθμός σχάσεων, αυξάνεται ανεξέλεγκτα

Εκθετική
αύξηση
ή
μείωση

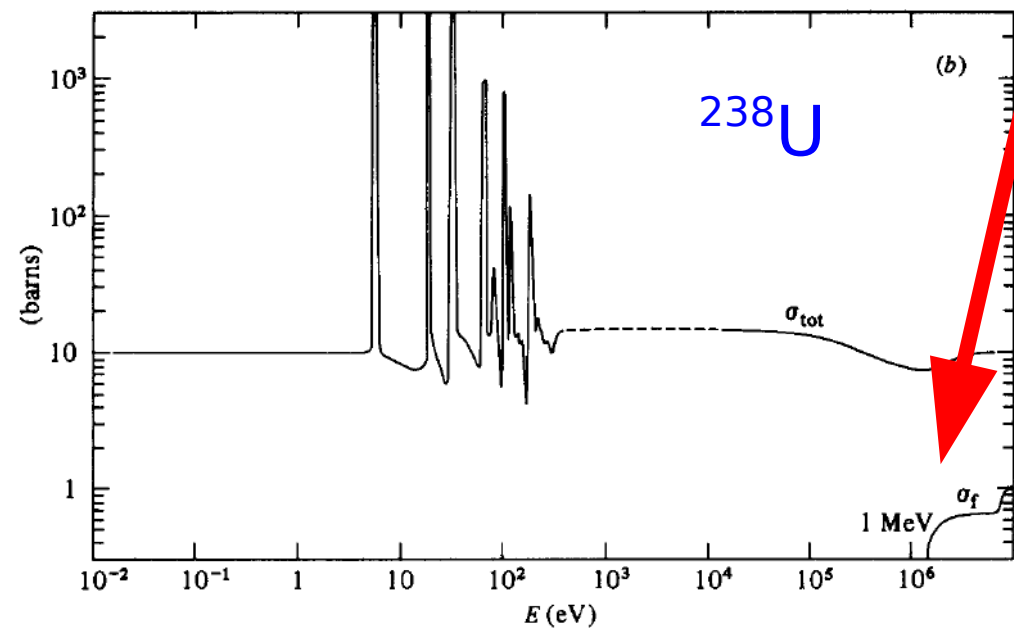
Ενεργές διατομές $n + {}^{235}\text{U}$, $n + {}^{238}\text{U}$



Στη φύση:

0.7% ${}^{235}\text{U}$ και 99.3% ${}^{238}\text{U}$

σχάση



${}^{235}\text{U}$: ευκολότατη σχάση!

- σε πολύ μικρές ενέργειες νετρονίων σχάση ~ 84%
- σε $E \sim 2$ MeV, σχάση ~ 18%

${}^{238}\text{U}$

- σχάση MONO για $E > 1.4$ MeV, σε ποσοστό ~ 5-10%

Αλλησιδωτές αντιδράσεις

- Μέση τιμή της ενεργού διατομής αλληλεπίδρασης νετρονίου με δείγμα ουρανίου, φτιαγμένο με ^{235}U και ^{238}U :

$$c = \text{ποσοστό } ^{235}\text{U}, \quad 1-c = \text{ποσοστό } ^{238}\text{U} \quad \bar{\sigma}_{\text{tot}} = c\sigma_{\text{tot}}^{235} + (1-c)\sigma_{\text{tot}}^{238}$$

- Μέση ελεύθερη διαδρομή ενός νετρονίου (μάθημα 3):

$$l = \frac{1}{\rho_{\text{πυρήνων}}} \bar{\sigma}_{\text{tot}}$$

- Π.χ., ξέροντας τη μαζική πυκνότητα (g/cm^3) του ουρανίου, βρίσκω την αριθμητική πυκνότητα ($\rho = \text{πόσοι ανά cm}^3$), και βάζοντας μέση ενέργεια των άμεσων νετρονίων της σχάσης $E=2 \text{ MeV}$, έχουμε:

$$\sigma_{\text{tot}}^{235} \simeq \sigma_{\text{tot}}^{238} \simeq 7 \text{ barns} \rightarrow l \simeq 3 \text{ cm}$$

$$t = \frac{l}{u} = \frac{l}{\sqrt{2 \frac{E}{m}}} \simeq \frac{l}{c} * \sqrt{\frac{mc^2}{2E}} \simeq \frac{3 \text{ cm}}{0.3 \text{ cm/ns}} * \sqrt{\frac{1000 \text{ MeV}}{2 * 2 \text{ MeV}}} \simeq 1.5 * 10^{-9} \text{ s}$$

Αλλησιδωτές αντιδράσεις σε καθαρό ^{235}U

- Για τη μέση ενέργεια των άμεσων νετρονίων της σχάσης (2 MeV) έχουμε πιθανότητα σχάσης ανά αλληλεπίδραση $\sigma_f / \sigma_{\text{tot}} \sim 18\%$ (σχ.9.1)
- Αν στη σκέδαση δεν κάνει σχάση, το νετρόνιο θα χάσει μέρος της ενέργειάς του και έτσι θα έχει τώρα μεγαλύτερη πιθανότητα να κάνει σχάση στην επόμενη σύγκρουση
 - κατά μέσο όρο χρειάζονται 6 συγκρούσεις για να κάνει σχάση. Μέχρι τότε θα έχει κάνει απόσταση και χρόνο:

$$\sqrt{6} * 3 \text{ cm} \simeq 7 \text{ cm} \rightarrow t_p \simeq 10^{-8} \text{ s}$$

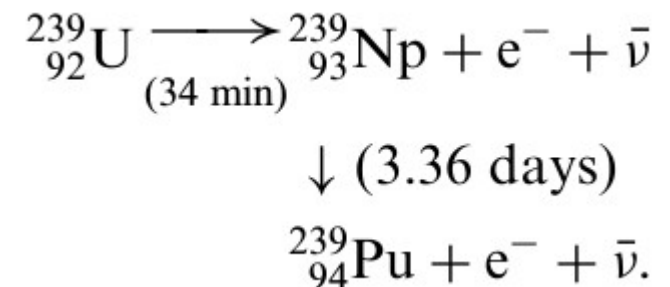
- άρα κάθε 10^{-8} s ένα νετρόνιο από σχάση αντικαθίσταται από ~ 2.5 νέα νετρόνια σχάσης των 2 MeV έκαστο
- **Αν το υλικό είναι λίγο**, τότε κάθε νετρόνιο σχάσης έχει μεγάλη πιθανότητα διαφυγής πριν προλάβει να κάνει σχάση σε μία από τις συγκρούσεις του, οπότε **q μικρό $\rightarrow (vq-1) < 0$: η αντίδραση σβήνει**
 - Σίγουρα θέλουμε υλικό διαστάσεων πάνω από 7 cm :
υπολογίζεται ότι **$q > 0.4$** για σφαίρα με **ακτίνα $> 8.7 \text{ cm}$** $\rightarrow$ **$> 52 \text{ kg } ^{235}\text{U}$** : τότε ανεξέλεγκτη αντίδραση $\rightarrow$ βόμβα!

Ελεγχόμενη αλλησιδωτή αντίδραση → αντιδραστήρες

- Σε φυσικό ουράνιο: **0.7%** ^{235}U και **99.3%** ^{238}U
- Μετά από ~ 2 συγκρούσεις το νετρόνιο έχει κάτω από 1.4 MeV, οπότε δεν κάνει πιά σχάση με το $^{238}\text{U} \rightarrow$ μόνη ελπίδα το ^{235}U .
- Αφού το ^{235}U είναι ~ 100 φορές λιγότερο από το ^{238}U , χρειάζεται να πάμε σε ενέργειες όπου η ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης με το ^{235}U να είναι > 100 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι η αλληλεπίδραση με το ^{238}U . Από το σχήμα 9.1:
 - Ενέργειες ~ 0.1 eV (θερμική ενέργεια για $T=1160$ K)
- **“Θερμικός αντιδραστήρας”**: Χρήση επιβραδυντικού υλικού → κάνουμε τα νετρόνια “θερμικά” μέσα στο επιβραδυντικό υλικό, π.χ., νερό, και έτσι περνάνε την επικίνδυνη περιοχή 1-1000 eV (όπου πιθανότατα θα συλλαμβάνονταν από κάποιο συντονισμό του ^{238}U) και έρχονται στο ουράνιο με **ενέργειες ~ 0.1 eV**, όπου η πιθανότητα σχάσης ανά αλληλεπίδραση με ^{235}U είναι: **$\sigma_f / \sigma_{\text{tot}} \sim 84\%$** (σχ. 9.1, πρίν)

Ελεγχόμενη αλλησιδωτή αντίδραση → αντιδραστήρες

- Σε φυσικό ουράνιο: **0.7% ^{235}U** και **99.3% ^{238}U**
- Μετά από ~2 συγκρούσεις το νετρόνιο έχει κάτω από 1.4 MeV, οπότε δεν κάνει πιά σχάση με το $^{238}\text{U} \rightarrow$ μόνη ελπίδα το ^{235}U .
- Αφού το ^{235}U είναι ~100 φορές λιγότερο από το ^{238}U , στο φυσικό ουράνιο, κρατώντας αυτή την αναλογία, χρειάζεται να πάμε σε ενέργειες όπου η ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης με το ^{235}U να είναι >100 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι η αλληλεπίδραση με το ^{238}U . Από το σχήμα 9.1:
 - Ενέργειες ~0.1 eV (θερμική ενέργεια για T=1160 K) ή
 - Με αύξηση του ποσοστού ^{235}U στο υλικό, μπορούμε να έχουμε σημαντική πιθανότητα σχάσης ακόμα και με πιο ταχέα νετρόνια
- **"ταχύς αντιδραστήρας": εμπλουτισμός σε σχάσιμο υλικό (^{239}Pu με $\nu \sim 2.96$, αντί για ^{235}U με $\nu \sim 2.5$) : ~20% του συνόλου.**



Έλεγχος ρυθμού αντιδράσεων (1)

- **Πρέπει** να πάρουμε υπ' όψιν μας και τα **καθυστερημένα νετρόνια** ($\delta\nu$), στην αύξηση του πληθυσμού των νετρονίων:

$$(\nu + \delta\nu)q - 1 = 0, \text{ για ελεγχόμενη κατάσταση σταθερής ισχύος}$$

- Όταν πάει να γίνει >0 , **μειώνω το q με τη μηχανική εισαγωγή ράβδων ελέγχου** (πχ., Βόριο που έχει μεγάλη ενεργό διατομή για απορρόφηση θερμικών νετρονίων).



- Για να έχω αρκετό **χρόνο αντίδρασης για να καταβάσω τις ράβδους**, θέλω να το κάνω αυτό με τα **καθυστερημένα νετρόνια** ($\tau \sim 10 \text{ sec}$), και όχι με τα άμεσα νετρόνια ($\tau \sim 10^{-8} \text{ sec}$)

- **Οπότε για τα άμεσα νετρόνια, κρατάω πάντα:**

$$\nu q - 1 < 0$$

και είναι τα καθυστερημένα νετρόνια που κάνουν:

$$(\nu + \delta\nu)q - 1 = 0$$

Έλεγχος ρυθμού αντιδράσεων (2)

- Επίσης η συμπεριφορά με τη θερμοκρασία T πρέπει να είναι: $\frac{dq}{dT} < 0$

για να επανέρχεται η σταθερή κατάσταση όταν ανεβαίνει η θερμοκρασία:

- αύξηση θερμοκρασίας $\rightarrow$ αύξηση των πλατών των συντονισμών του ^{238}U λόγω Doppler $\rightarrow$ αυξημένη απορρόφηση νετρονίων

In thermal reactors, Doppler broadening leads to an increase in the neutron absorption in ^{238}U resonances in the fuel rods and gives a significant negative contribution to dq/dT . Since the resonant cross-sections are large, neutrons which impinge upon fuel rods and whose energies lie near to resonances are absorbed close to the surface of the rod. The broadening of the resonance increases the energy band absorbed and hence increases the neutron absorption rate.

Parts of the No. 4 RBMK reactor at Chernobyl had $dq/dT > 0$ under low power operation. This 'design flaw' contributed to the catastrophic accident in 1986. (All other RBMK type reactors have subsequently been corrected.)

Ραδιενεργά απόβλητα

- Άμεσα προϊόντα σχάσης: πλούσα σε νετρόνια
→ β-διασπάσεις για να έρθουν στην κοιλάδα σταθερότητας.
- Συχνά οι ενδιάμεσες καταστάσεις είναι διεγερμένες, οπότε έχουμε και αποδιεγέρσεις γ
- Οι θυγατρικοί αυτοί πυρήνες έχουν διάφορους χρόνους ζωής
- Εμπειρικά:

για κάθε σχάση ο μέσος ρυθμός έκλυσης ενέργειας ιονισμού από τα προϊόντα της διάσπασης σε χρόνο t από τη στιγμή της σχάσης, είναι:

$$\frac{dE}{dt} = 2.66 \left(\frac{1 \text{ s}}{t} \right)^{1.2} \text{ MeV s}^{-1}. \quad (9.2)$$

Over this period the energy release is divided roughly equally between electrons and γ -rays. Energy lost to neutrinos is not included.

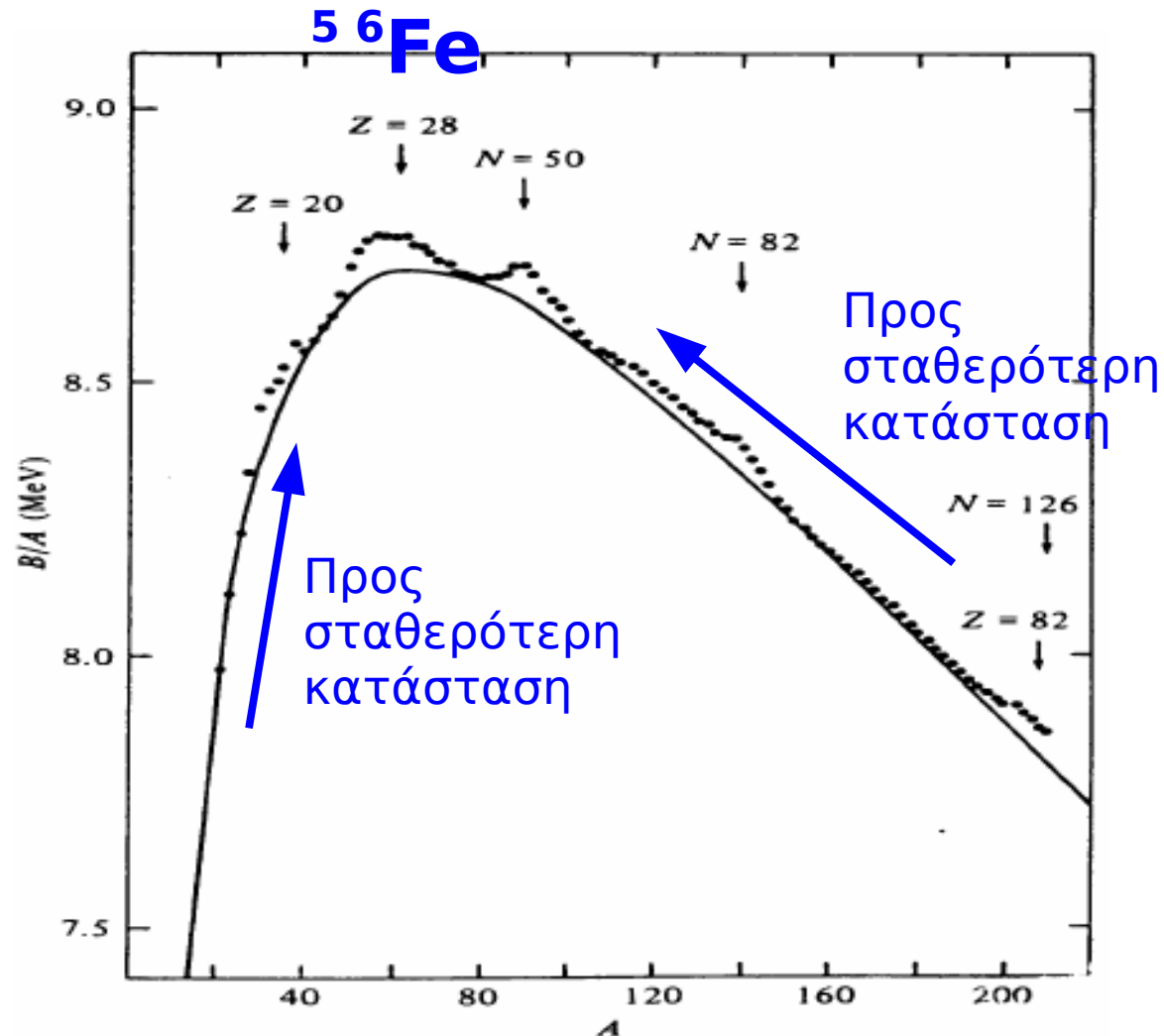
2. Σύντηξη

Παρ. 10.1, 10.5

Σύντηξη (παρ. 10.1 βιβλίο)

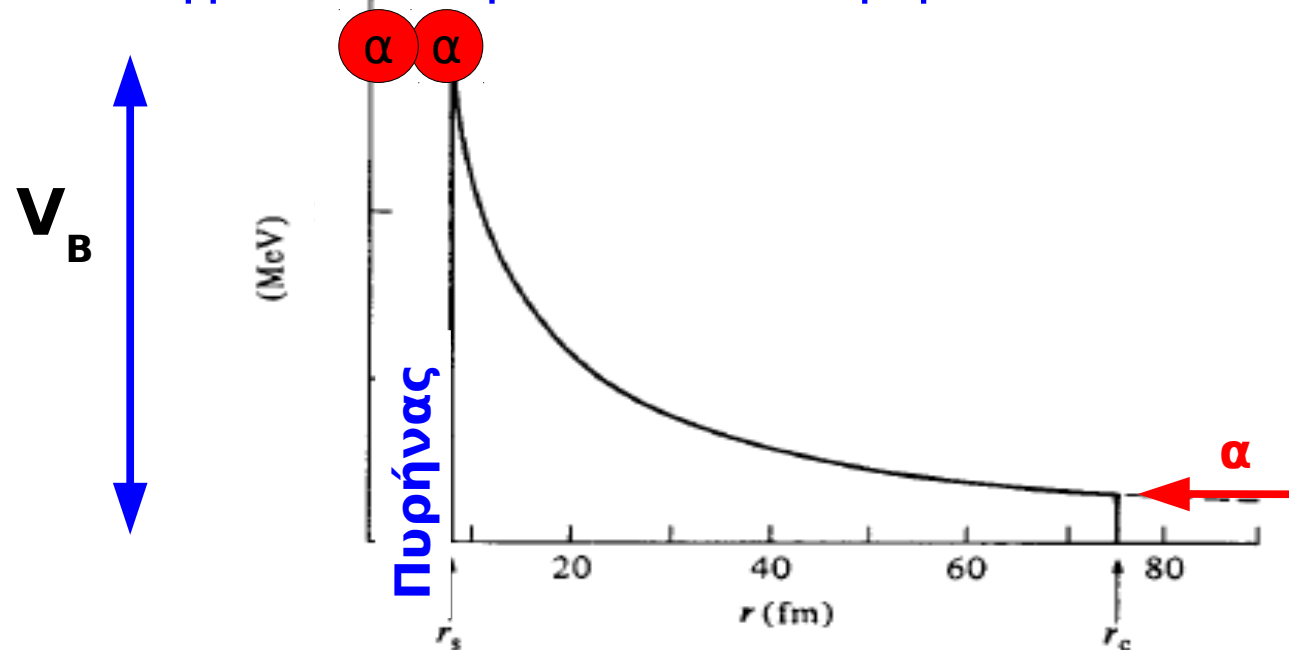
Τι κερδίζουμε συνθέτοντας πυρήνες;

Π.χ., ${}^{20}\text{X} + {}^{20}\text{X} \rightarrow {}^{40}\text{Y} + Q$



Σύντηξη: κατά κάποιον τρόπο, το ανάποδο 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 ηλερομαγνητική 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.

$$R = 1.1 * A^{1/3} \text{ fm} \rightarrow R_a = 1.1 * 4^{1/3} \text{ fm} = 1.7 \text{ fm}$$

$$\rightarrow r_s = 2 * R_a = 3.4 \text{ fm}$$

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

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:

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

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

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

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

Σύντηξη στον ήλιο

- Χαρακτηριστικά του ήλιου:

Mass	$M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
Radius	$R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$
Luminosity	$L_{\odot} = 3.86 \times 10^{26} \text{ W.}$

Λαμπρότητα (Luminosity) = ρυθμός εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας

- Συστολή λόγω βαρύτητας → Βαρυτική δυναμική ενέργεια γίνεται κινητική → αύξηση θερμοκρασίας του αερίου του εσωτερικού → όταν η θερμοκρασία είναι αρκετά μεγάλη γίνεται η αντίδραση καύσης του υδρογόνου → παράγεται ενέργεια ακτονοβολίας που κάνει το θερμό και πυκνό αέριο να εξισορροπεί τη βαρυτική κατάρρευση.

- Υλικά στο
- Table 10.1. *The proportion by number, relative to carbon, of the ten most abundant atoms in the Solar System at its birth*

ηλιακό σύστημα:	H	He	C	N	O	Ne	Mg	Si	S	Fe
κυρίως H	2400	162	1.0	0.21	1.66	0.23	0.10	0.09	0.05	0.08

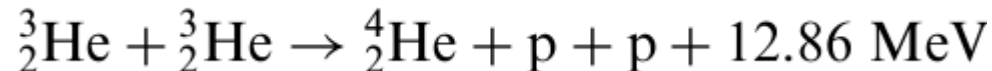
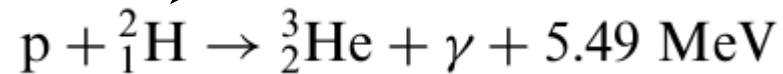
Data from Cameron, A. G. W. (1992), in *Essays in Nuclear Astrophysics*, ed. C. A. Barnes, D. D. Clayton & D. N. Schramm. Cambridge University Press, p. 23.

Σύντηξη στον ήλιο

- **Αλυσίδα PPI:** $H \rightarrow \dots \rightarrow He + 26.73 \text{ MeV}$ για κάθε He

Ιδού τα βήματα: $p + p \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e + 0.42 \text{ MeV}.$

$e^+ e^- \rightarrow \text{φωτόνια} + 1.02 \text{ MeV}$



- “Καταναλώθηκαν” 4 H για να παραχθεί ένα ${}^4_2\text{He}$ και παράχθηκαν 26.73 MeV ενέργειας, οπότε:
 $26.73 \text{ MeV} / 4 = 6.55 \text{ MeV}$ εκλυόμενη ενέργεια ανά H
(τα νετρίνα στην πρώτη αντίδραση παίρνουν μόνο 0.26 MeV).
- Για τη δεδομένη λαμπρότητα: $3.7 * 10^{38}$ H ανά sec (άσκηση)

Σύντηξη στον ήλιο

- Για τη δεδομένη λαμπρότητα: $3.7 * 10^{38}$ H ανά sec (άσκηση)
- Σε όλη τη ζωή του Ηλίου $\sim 5.5 * 10^{55}$ H έχει καεί
10% του ολικού υδρογόνου στον ήλιο (από μάζα ηλίου)
 - ακόμα νέος ο ήλιος!

- Βαρυτική ενέργεια: $\sim \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}} = 3.8 \times 10^{41} \text{ J}$

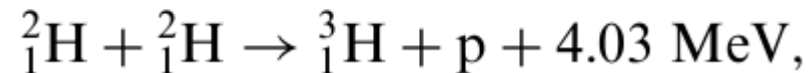
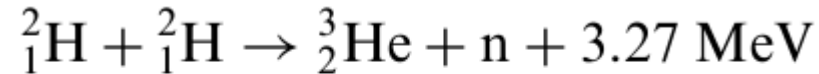
$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

- 1 keV σε κάθε σωματίο (πυρήνες, ηλεκτρόνια)
($\rightarrow T \sim 10^7 \text{ K}$) Όλα ιονισμένα $\rightarrow$ “πλάσμα”
- Κι έτσι μπορεί να υπάρχει ενέργεια ικανή να κάνει φαινόμενο σύραγγας και να έρθουν τόσο κοντά τα υδρογόνα (και τα ήλια) που να αρχίσει η ισχυρή αλληλεπίδραση – σύντηξη – να δουλεύει.

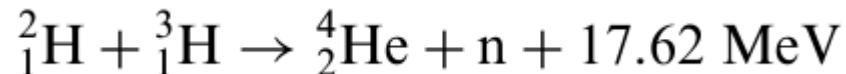
Σύντηξη για ενέργεια

Υποψήφιες αντιδράσεις:

- Άφθονο το **δευτέριο** στο φυσικό νερό (0.015% στο φυσικό υδρογόνο):



- Ενεργητικά πió συμφέρον το **τρίτιο** (που πρέπει όμως να παρασκευαστεί πρώτα):



Τεχνικά πώς;

- Ισχυρά μαγνητικά πεδία συγκρατούν και συμπιέζουν το **πλάσμα του αερίου** όπου θέλουμε να αρχίσει η σύντηξη
- Θέρμανση με ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Άσκηση 2: Σύντηξη υδρογόνου για παραγωγή ηλίου στον Ήλιο

Άσκηση 2:

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):

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

Άσκηση 2: Σύντηξη υδρογόνου - Λύση

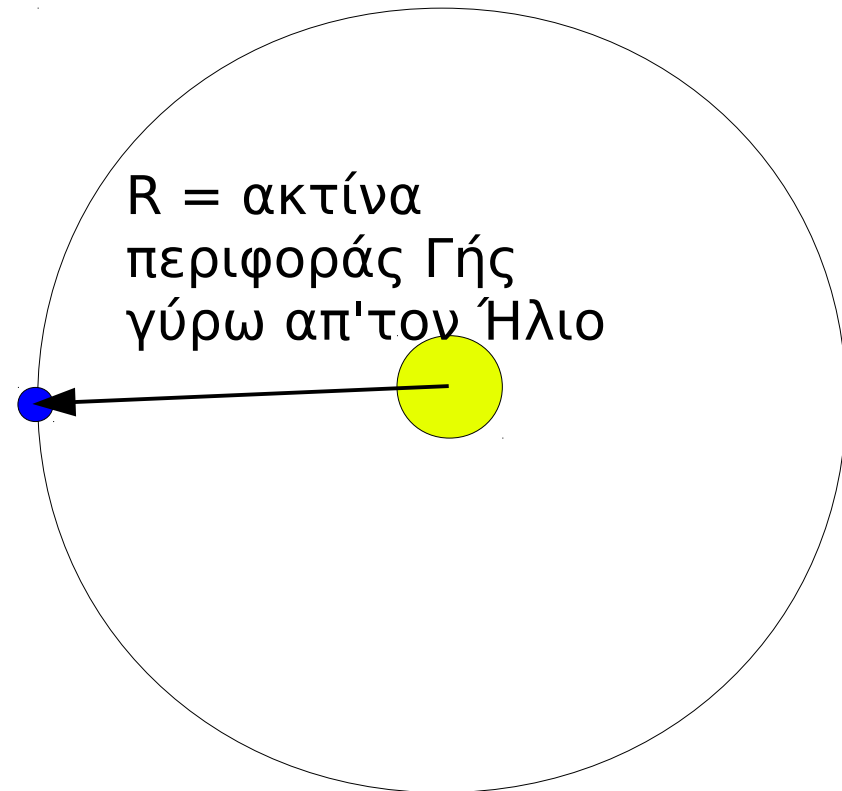


- Γνωρίζετε ότι ο πυρήνας του υδρογόνου (^1H) είναι το πρωτόνιο και άρα δεν έχει ενέργεια σύνδεσης, αφού είναι μόνο του!

$$Q = 4 * M(p) - M(\text{He}) = 4* M(p) - (2 M (p) + 2 M(n) - 28.3) = \dots = 25.7\text{ MeV}$$

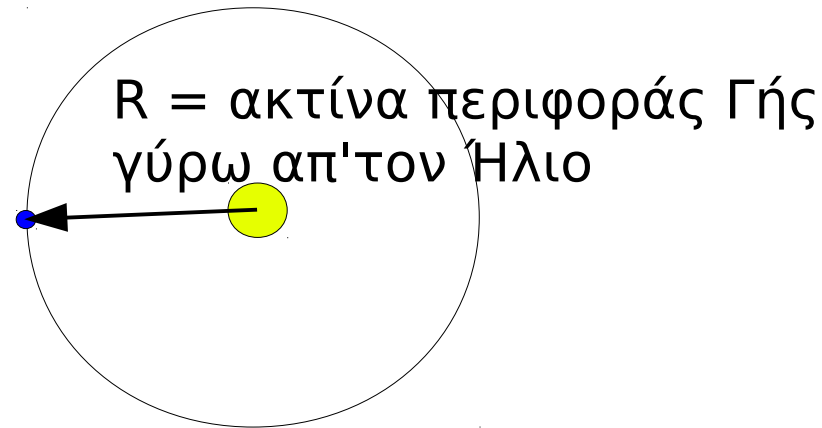
- Η ενέργεια που εκλύεται στον ήλιο κατά τη σύντηξη 4 πυρήνων υδρογόνου για παραγωγή ηλίου είναι 25.7 MeV, δηλαδή **6.43 MeV ανά πυρήνα υδρογόνου**
 $= 6.43 * 10^6 * 1.6 * 10^{-19}\text{ J} = 10^{-12}\text{ J}$
- Τί γίνεται αυτή η ενέργεια;

Εκπέμπεται παντού



Άσκηση 2: Σύντηξη υδρογόνου - Λύση

- Η ενέργεια που εκλύεται στον ήλιο κατά τη σύντηξη 4 πυρήνων υδρογόνου για παραγωγή ηλίου είναι 25.7 MeV, δηλαδή **6.43 MeV ανά πυρήνα υδρογόνου**
 $= 6.43 * 10^6 * 1.6 * 10^{-19} \text{ J} = 10^{-12} \text{ J}$
- Ο ήλιος εκπέμπει την ενέργεια αυτή. Όση ενέργεια εκπέμπει από τον ήλιο σε κάθε δευτερόλεπτο, διαχέεται ακτινικά προς τα έξω. Οπότε το σύνολο της ενέργειας που “περνάει” μέσα από μια επιφάνεια $4\pi R^2$ κάθε δευτερόλεπτο, είναι όση εκπέμπει από τον ήλιο σε κάθε δευτερόλεπτο.



- Στη Γη ξέρουμε την ηλιακή σταθερά, δηλ. πόση ηλιακή ενέργεια “πέφτει” σε μια επιφάνεια 1 m^2 , σε κάθε δευτερόλεπτο **$= 1.35 \text{ kW} / \text{m}^2 = 1.35 (\text{kJ/s}) / \text{m}^2$**
- Οπότε, στην απόσταση Γης-Ήλιου (σε ακτίνα **$R=1.5 \times 10^8 \text{ km}$** από τον ήλιο), περνούν **$1.35 * 4\pi R^2 \text{ kJ/s} / \text{m}^2$** και άρα ο ήλιος εκπέμπει $3.8 * 10^{26} \text{ J}$ ανά sec.
- Άρα χρειάζονται $(3.8 * 10^{26} \text{ J/s}) / (10^{-12} \text{ J}) = 3.8 * 10^{38}$ πυρήνες υδρογόνου ανά sec.
- Αφού $6.02 * 10^{23}$ πυρήνες ^1H ζυγίζουν 1 γρ (όσο ο μαζικός αριθμός), τότε στον ήλιο συντήκονται **$3.8 * 10^{38} / 6.02 * 10^{23} = 6.3 * 10^{11} \text{ kg } ^1\text{H}$ ανά sec !!!**

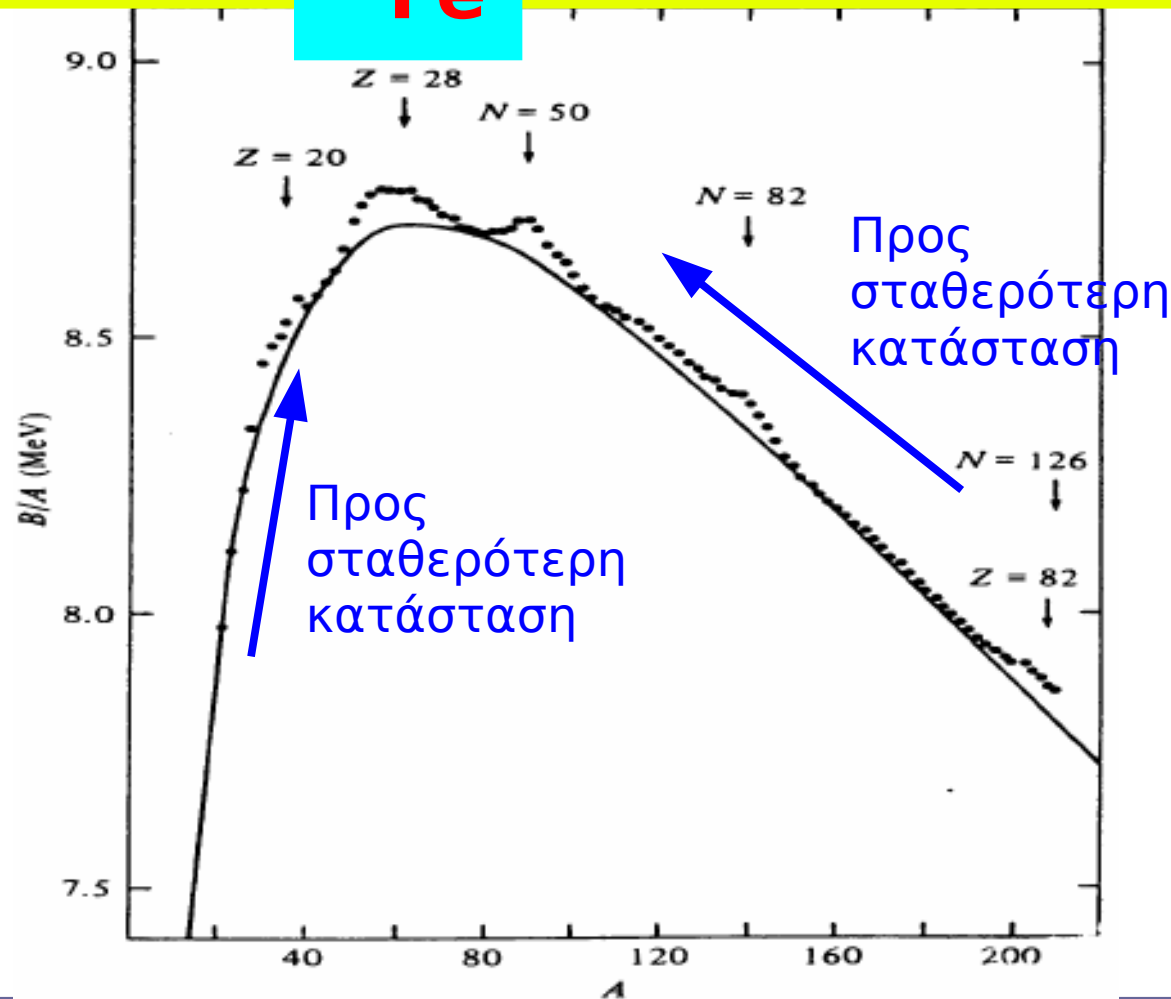
3. Παραγωγή στοιχείων βαρύτερων από το σίδηρο

Παρ. 11.4

Παραγωγή στοιχείων βαρύτερων από το σίδηρο

Κερδίζουμε συντήκοντας πυρήνες, αλλά... μέχρι να φτιάξουμε σίδηρο που είναι στο μέγιστο της ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο. Από εκεί και πέρα πώς φτιάχνονται τα βαρύτερα στοιχεία;

^{56}Fe



Παραγωγή στοιχείων βαρύτερων από το σίδηρο

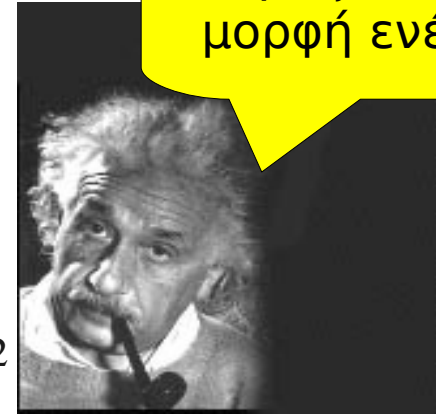
Σχετικιστική κινηματική

Σχετικιστική κινηματική:

$E = mc^2$ = η ενέργεια που έχω επειδή απλά και μόνο έχω μάζα m
 c = ταχύτητα του φωτός

ενέργεια μάζα

Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας



γενικά, με κινητική ενέργεια K , έχουμε: $E = K + mc^2$

$$E = m \gamma c^2, \text{ όπου } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ και } \beta = v/c, \text{ με } v = \text{ταχύτητα σωματιδίου}$$

$$p = m \gamma v = m \gamma \beta c, \text{ όπου } p = \text{ορμή}$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \rightarrow \quad E [\text{MeV}], p [\text{MeV}/c], m [\text{MeV}/c^2]$$

Σημείωση: με $c = 1$, γράφουμε: $E^2 = p^2 + m^2$, κλπ.

Μονάδες

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \text{μονάδα ταχύτητας} \equiv 1$$

$$\text{μονάδα ενέργειας} \equiv eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb} * V = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Συνήθως χρησιμοποιούμε το MeV ($= 10^9 \text{ eV}$)

$$\text{Σταθερά του Plank} = \mathbf{h} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}, \text{ όπου } \hbar = \frac{h}{2\pi} \equiv \text{μονάδα δράσης (ενέργειας} \times \text{χρόνου)} \equiv 1$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} [mks] = \frac{e^2}{\hbar c} [cgs] = \frac{1}{137}$$

$$\alpha = \text{η σταθερά λεπής υφής} = 1/137$$

Θα χρησιμοποιούμε παντού:
eV για ενέργεια (ή MeV στην πυρηνική),
 $1/4\pi\epsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους,

$$\text{και θα βάζουμε: } e^2 = \alpha \hbar c, \text{ όπου } \alpha = 1/137$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$

Μετράμε:

Μάζα: MeV/c^2 (αφού $E = mc^2$)

Ορμή: MeV/c (αφού $p = m\gamma\beta c$)

Χρόνος σε: $1/\text{MeV}$ (αφού η μονάδα δράσης = Ενέργεια * Χρόνος = 1)

Μήκος σε: μονάδες χρόνου = $1/\text{MeV}$ (αφού η μονάδα ταχύτητας=1)

$$1 \text{ amu} = 1/12 \text{ μάζας ουδέτρου ατόμου } ^{12}\text{C} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{Μάζα ηλεκτρονίου} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{Μάζα πρωτονίου} = 938.3 \text{ MeV}/c^2, \text{ Μάζα νετρονίου} = 939.6 \text{ MeV}/c^2$$