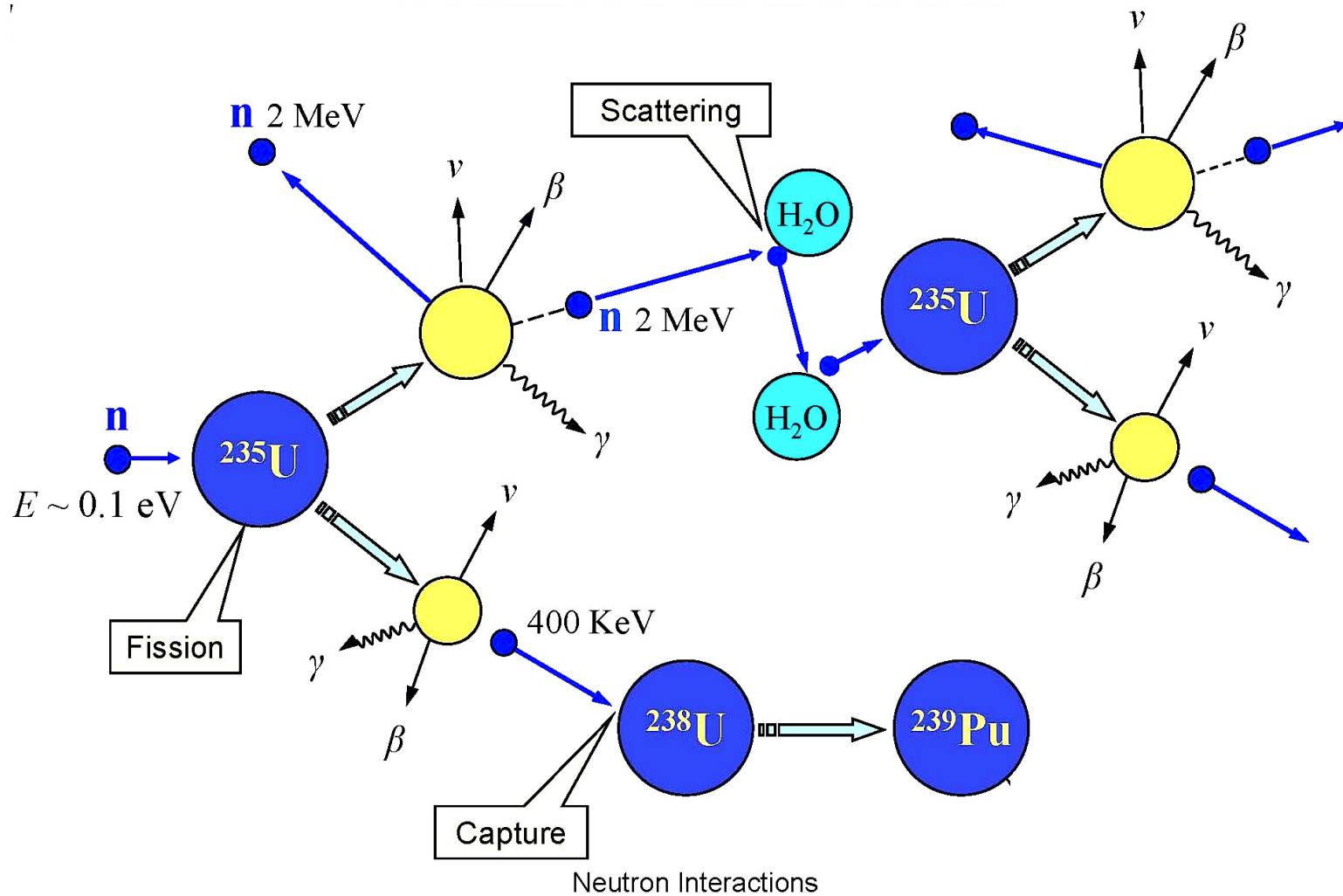


Σχάση - Σύντηξη

Δήμος Σαμψωνίδης
(29-11-2017)

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής & Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων
5 ο Εξάμηνο

Αλληλεπιδράσεις 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
$$\nu q - 1 = \text{η μεταβολή του πληθυσμού των νετρονίων από 1 τέτοιο νετρόνιο}$$
- 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:

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

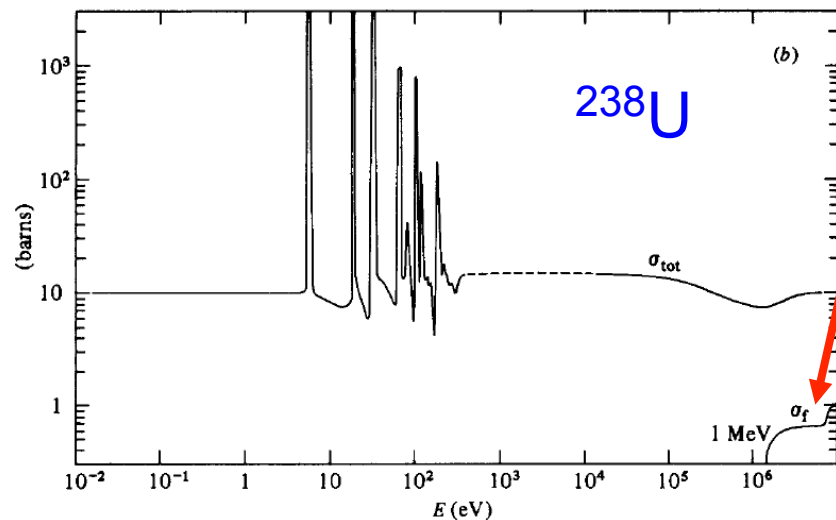
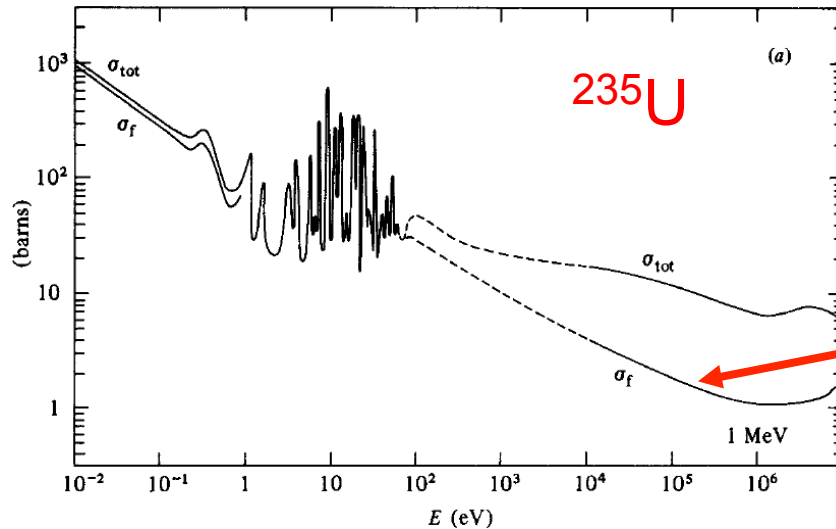
- Για ^{235}U : $v \sim 2.5$ νετρόνια,

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 $E \sim 2 \text{ MeV}$, σχάση ~ 18%

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

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

Αλλησιδωτές αντιδράσεις

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

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

c =ποσοστό ^{235}U , $1-c$ = ποσοστό ^{238}U

- Μέση ελεύθερη διαδρομή ενός νετρονίου (μάθημα 3):

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

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

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

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

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:

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

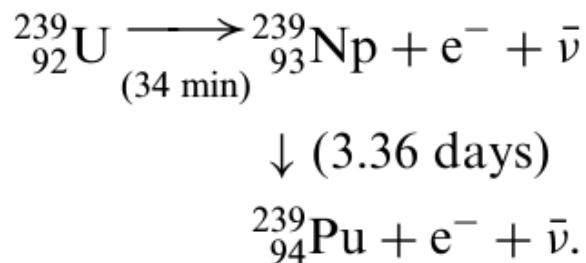
- άρα κάθε 10^{-8}s ένα νετρόνιο από σχάση αντικαθίσταται από ~ 2.5 νέα νετρόνια σχάσης των 2 MeV έκαστο
- **Αν το υλικό είναι λίγο**, τότε κάθε νετρόνιο σχάσης έχει μεγάλη πιθανότητα διαφυγής πριν προλάβει να κάνει σχάση σε μία από τις συγκρούσεις του, οπότε **q μικρό** $\rightarrow (vq-1) < 0$: η αντίδραση σβήνει
 - Σίγουρα θέλουμε υλικό διαστάσεων πάνω από 7 cm :
υπολογίζεται ότι **q > 0.4** για σφαίρα με **ακτίνα > 8.7 cm** $\rightarrow$
--> 52 kg ^{235}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}U → 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' ότι η αλληλεπίδραση με το ^{238}U . Από το σχήμα 9.1:
 - Ενέργειες ~0.1 eV (θερμική ενέργεια για $T=1160\text{ K}$)
- **“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}U → 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 $v \sim 2.96$, αντί για ^{235}U με $v \sim 2.5$) : ~20% του συνόλου.

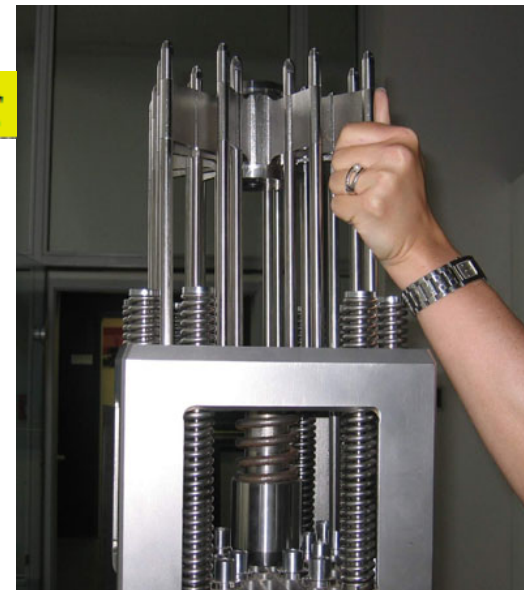


Έλεγχος ρυθμού αντιδράσεων (1)

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

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

- 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 κατεβάσω 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:** $vq - 1 < 0$
και είναι τα καθυστερημένα νετρόνια που κάνουν: $(v + \delta v)q - 1 = 0$

Αντιδραστήρας Σχάσης

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

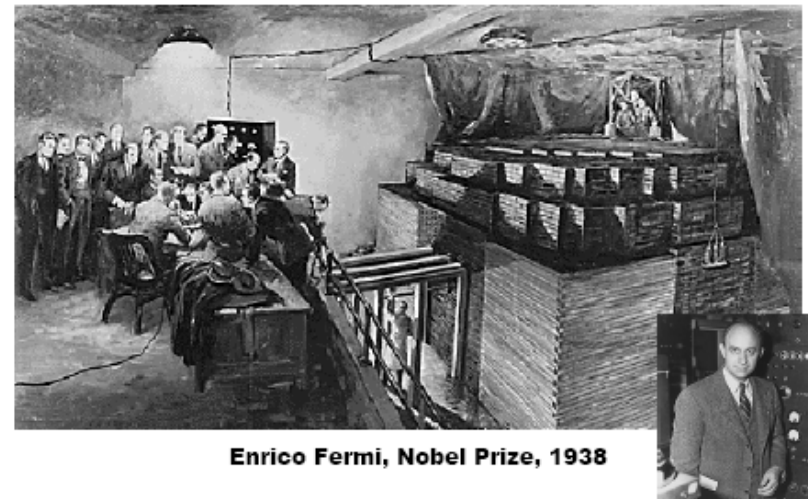
- Θα πρέπει να είναι ελαφρύ
- Καλύτερα να είναι στερεό, από την άποψη της κατασκευής ενός αντιδραστήρα και την υψηλή πυκνότητα των ατόμων.
- Θα πρέπει να είναι φτηνό.
- Θα πρέπει να είναι εύκολα διαχειρίσιμο.
- Θα πρέπει να έχει μικρή ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίου

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 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 ενδιάμεσο αποτέλεσμα της οποίας είναι να αυξήσει την εσωτερική ενέργεια του υλικού σχάσης και του επιβραδυντή που το περιβάλλει.

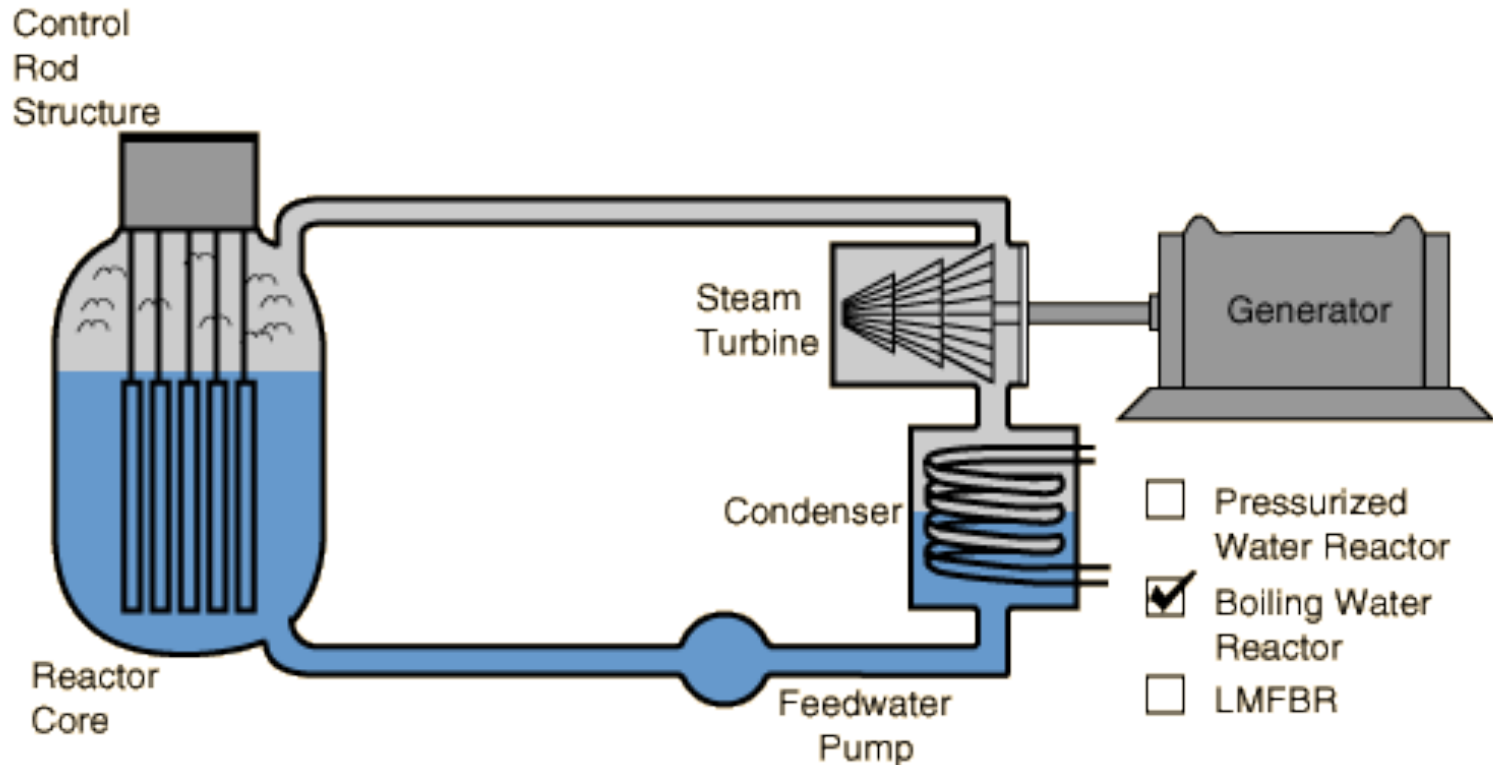
Η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας μεταδίδεται ως θερμότητα για βρασμό νερού → παραγωγή ατμού → περιστροφή της τουρμπίνας → λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας → παραγωγή ηλεκτρισμού.

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.

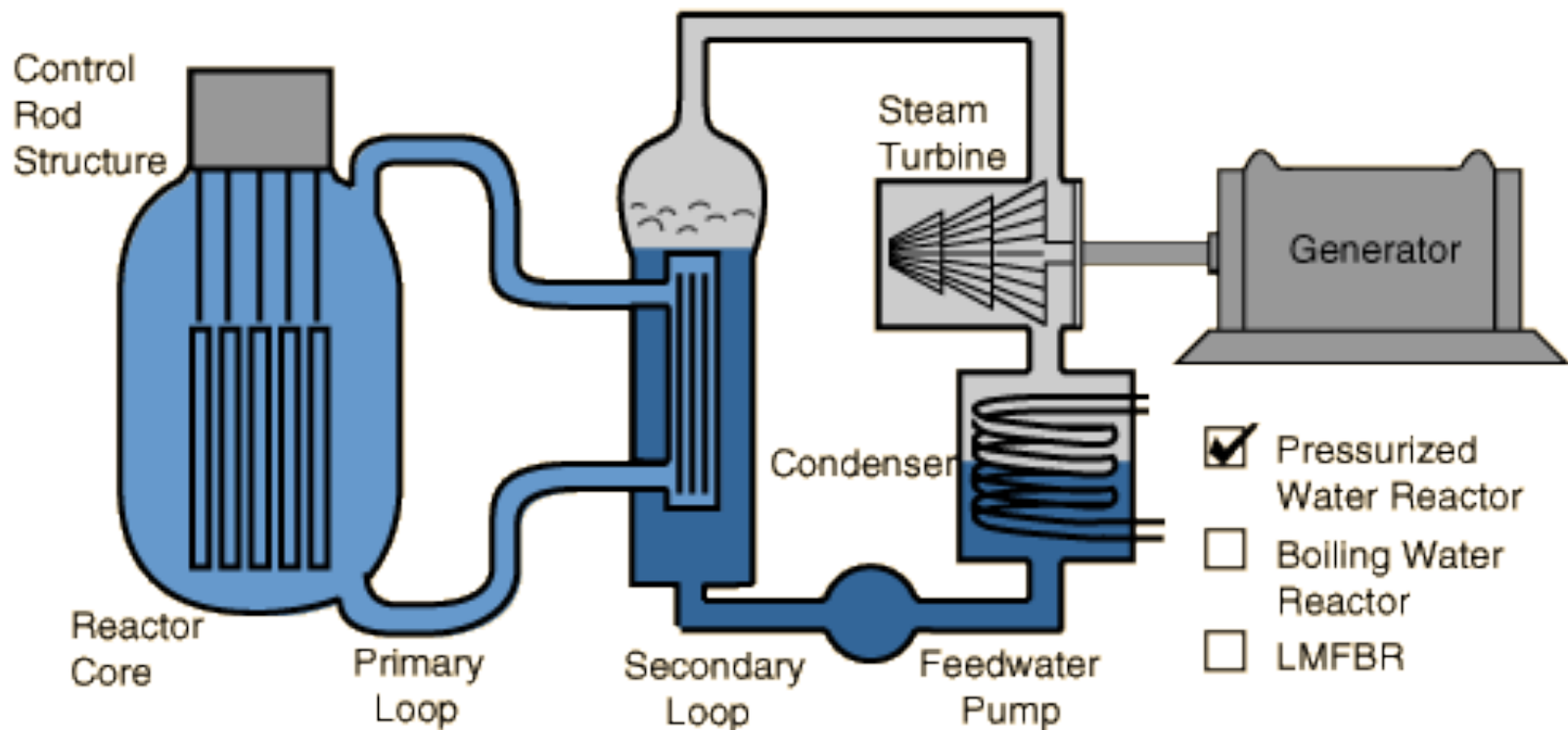
Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (boiling water reactor)

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.



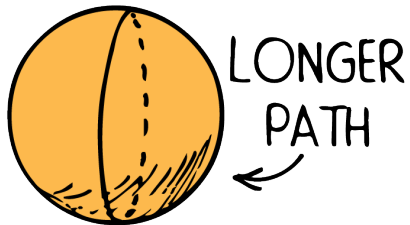
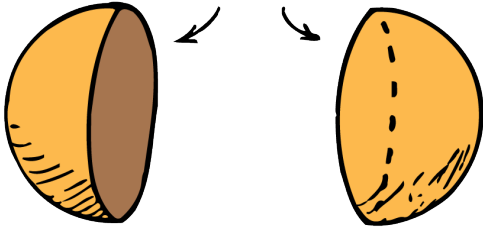
Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactor)

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

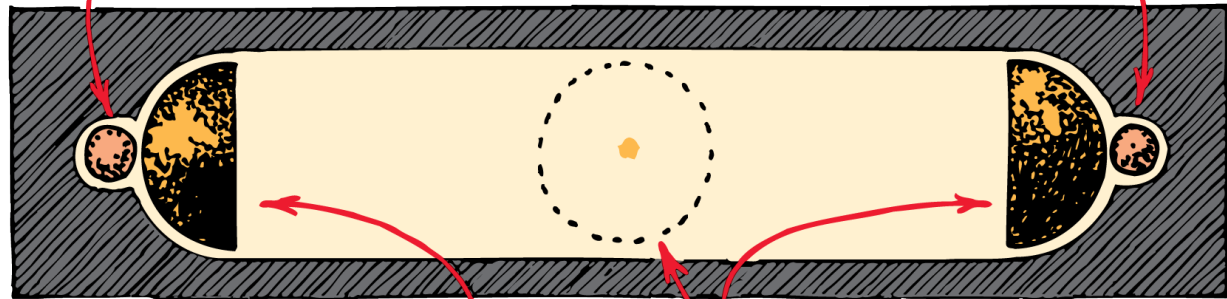


LONGER
PATH

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

BOMBA !

TNT TO DRIVE URANIUM PIECES
QUICKLY TOGETHER



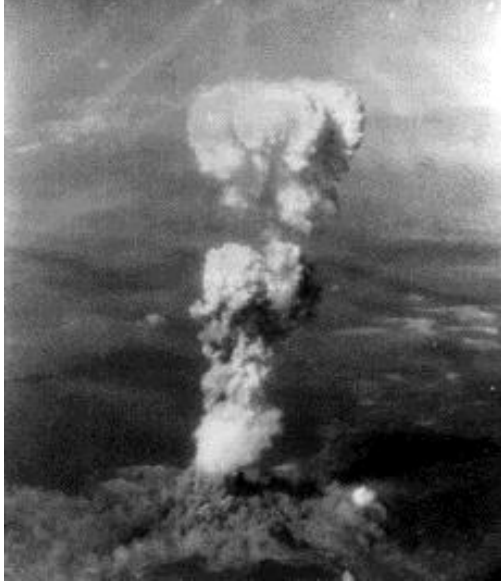
SUBCRITICAL PIECES
OF URANIUM

RADIOACTIVE SOURCE
THAT SUPPLIES FREE
NEUTRONS

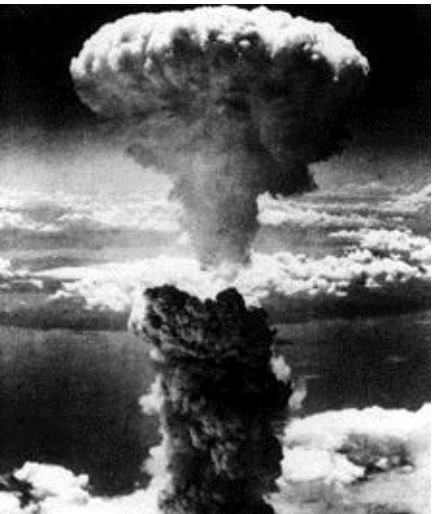
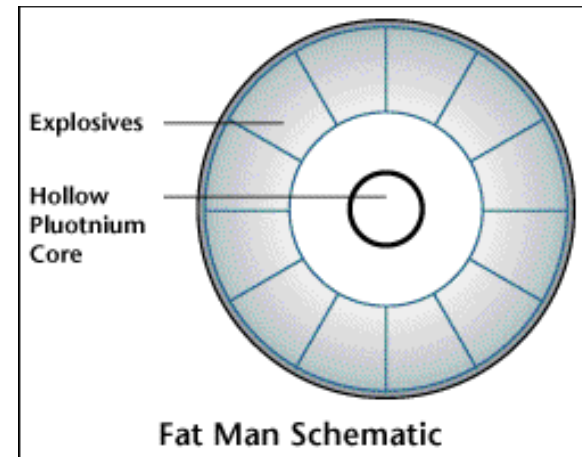
Little Boy Bomb



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

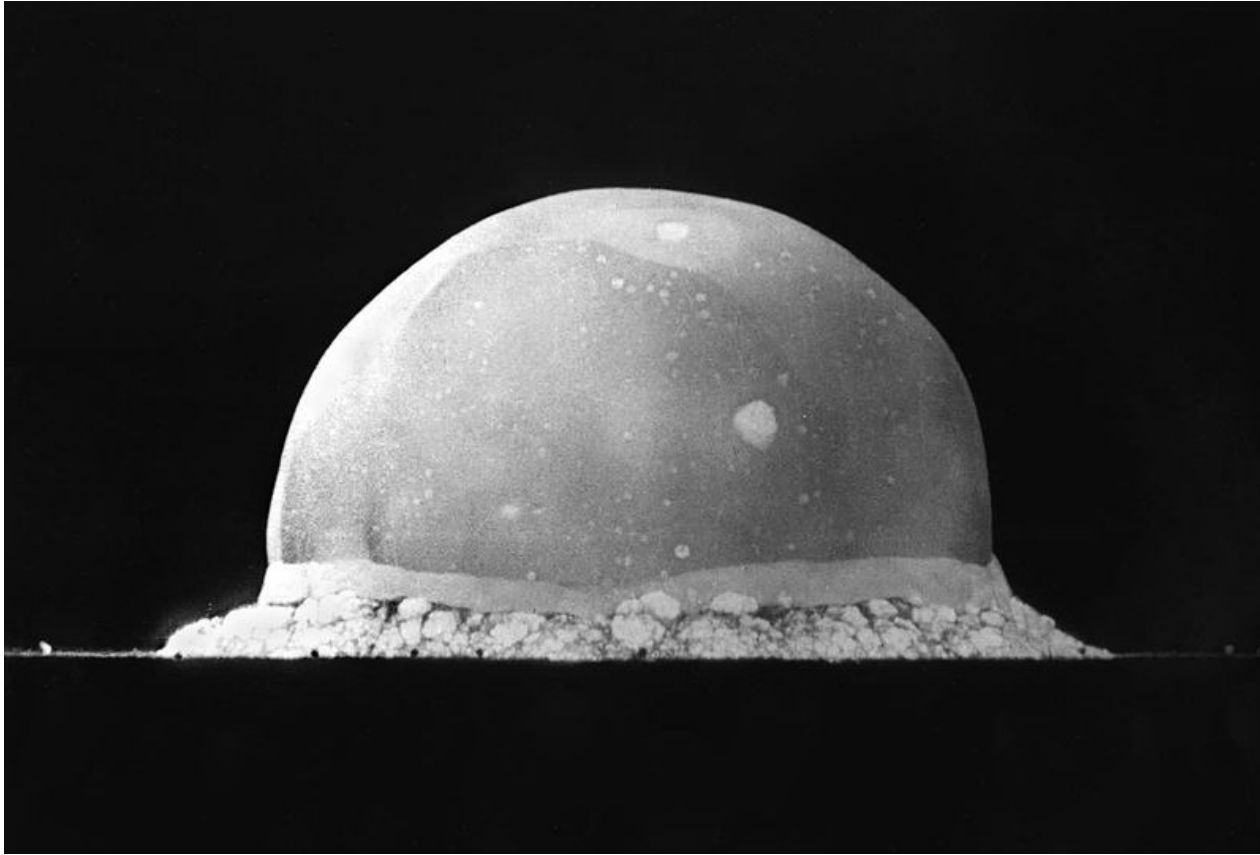


Fat Man



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

Trinity: η πρώτη πυρηνική δοκιμή

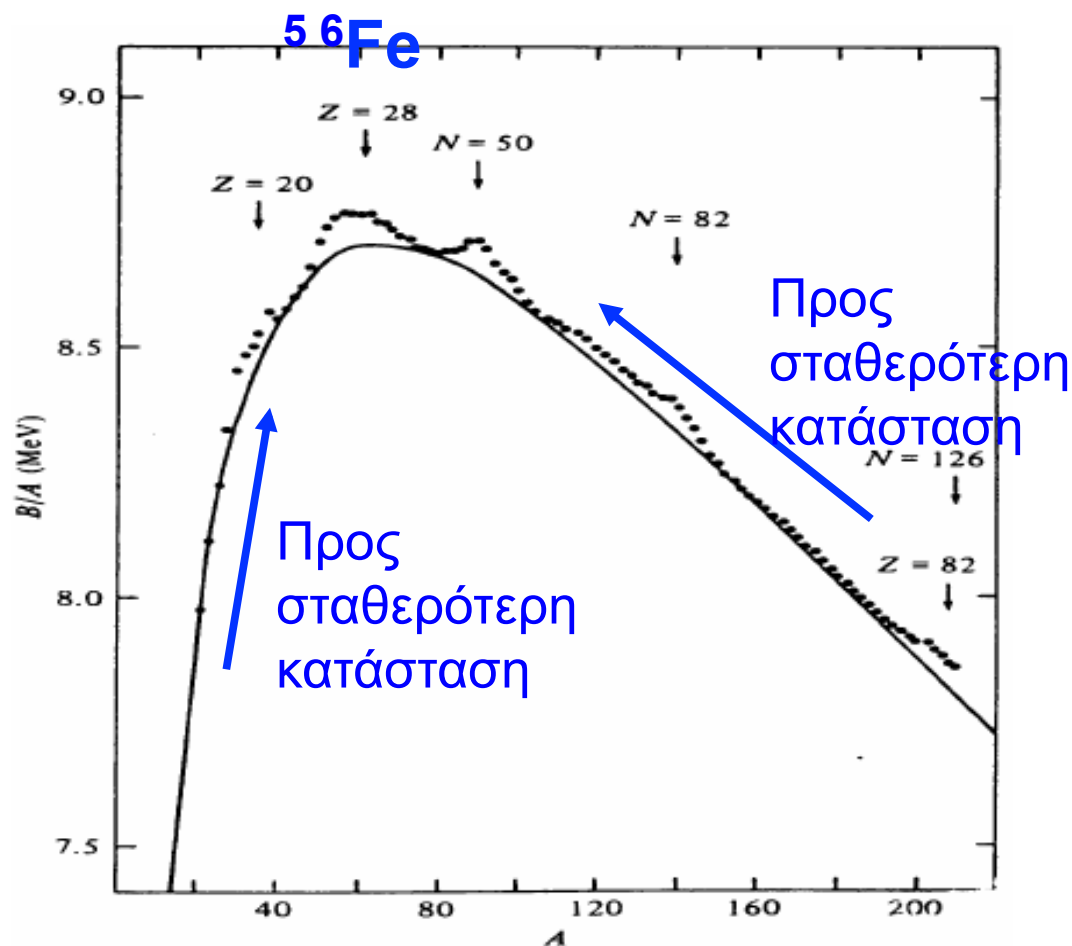


Trinity ήταν η κωδική ονομασία της πρώτης δοκιμής πυρηνικής βόμβας. Πραγματοποιήθηκε από τον Αμερικανικό Στρατό τον Ιούλιο του 1945, ως το αποτέλεσμα του Manhattan Project. Η έκρηξη έγινε σε μια έρημο, 56 km νοτιοανατολικά της πόλης Socorro του New Mexico. Στην Trinity χρησιμοποιήθηκε συσκευή πλουτωνίου (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)

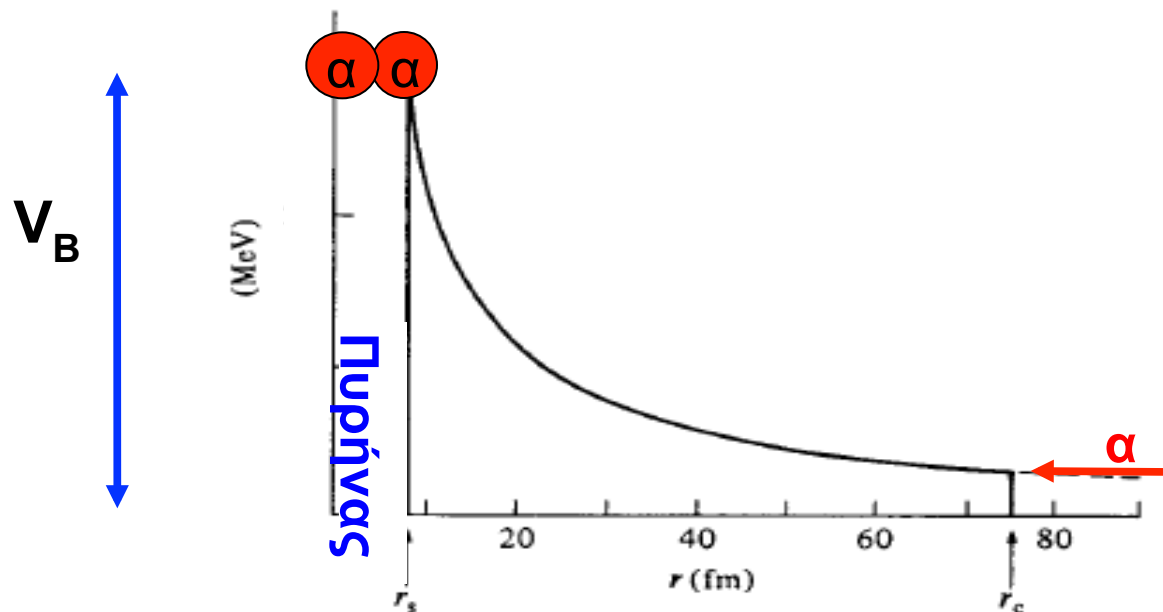
Τι κερδίζουμε συνθέτοντας πυρήνες?

Π.χ., $2^0\text{X} + 2^0\text{X} \rightarrow 4^0\text{Y} + Q$



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 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.

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

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

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

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

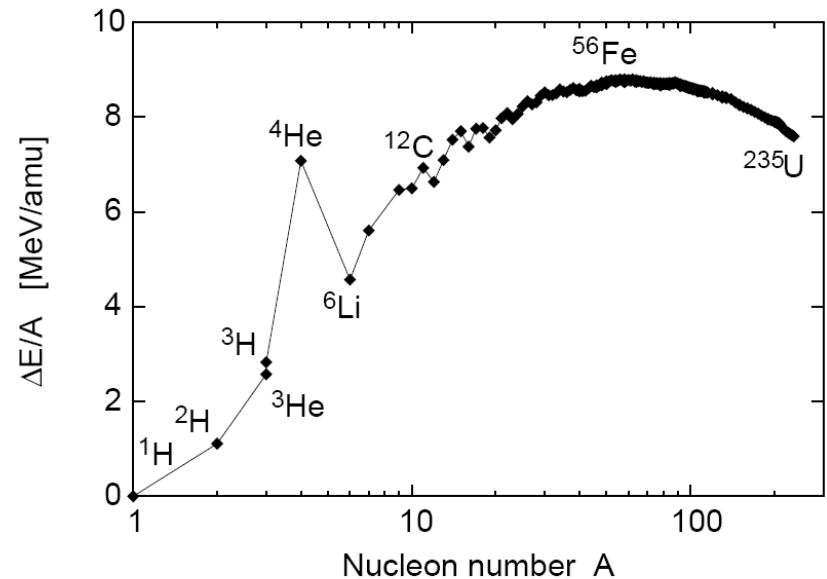
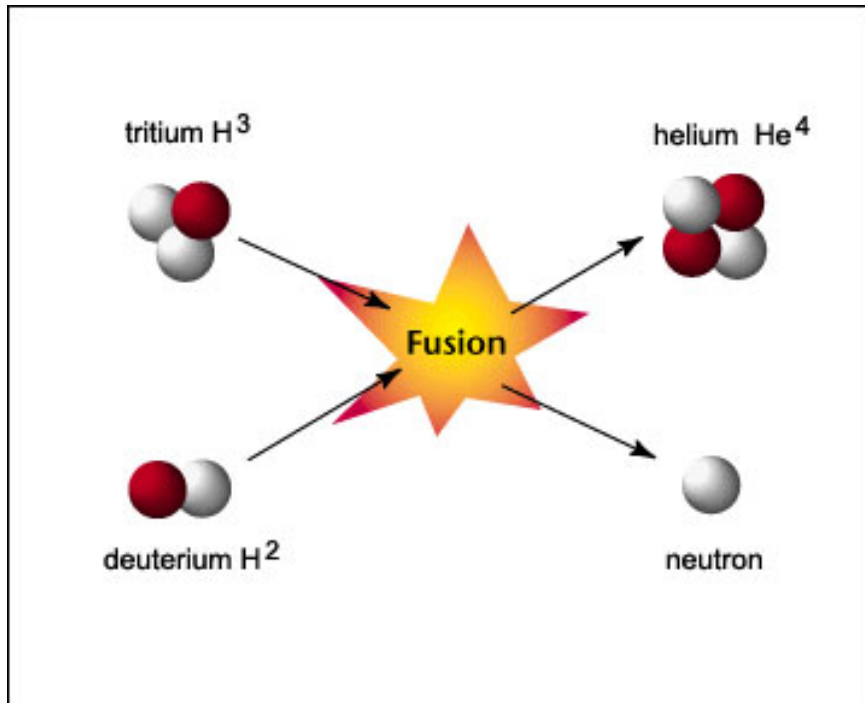
Σε $10^7 \text{ K} \rightarrow kT \sim 1 \text{ keV}$: λίγη σε σχέση με το φράγμα δυναμικού, όμως:

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

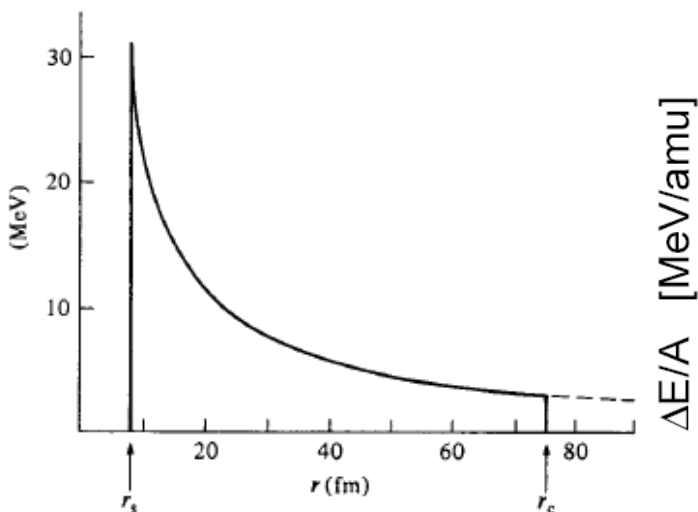
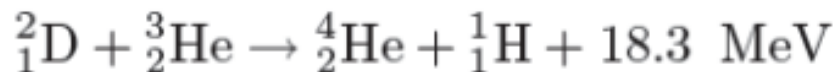
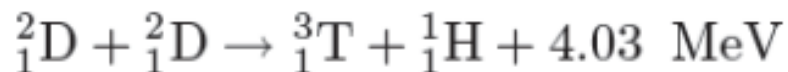
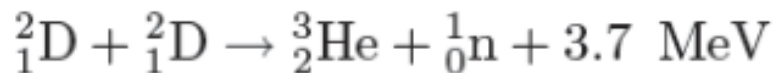
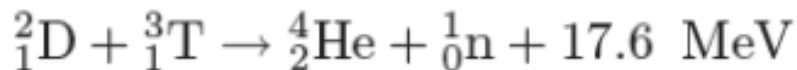
Πυρηνική σύντηξη

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

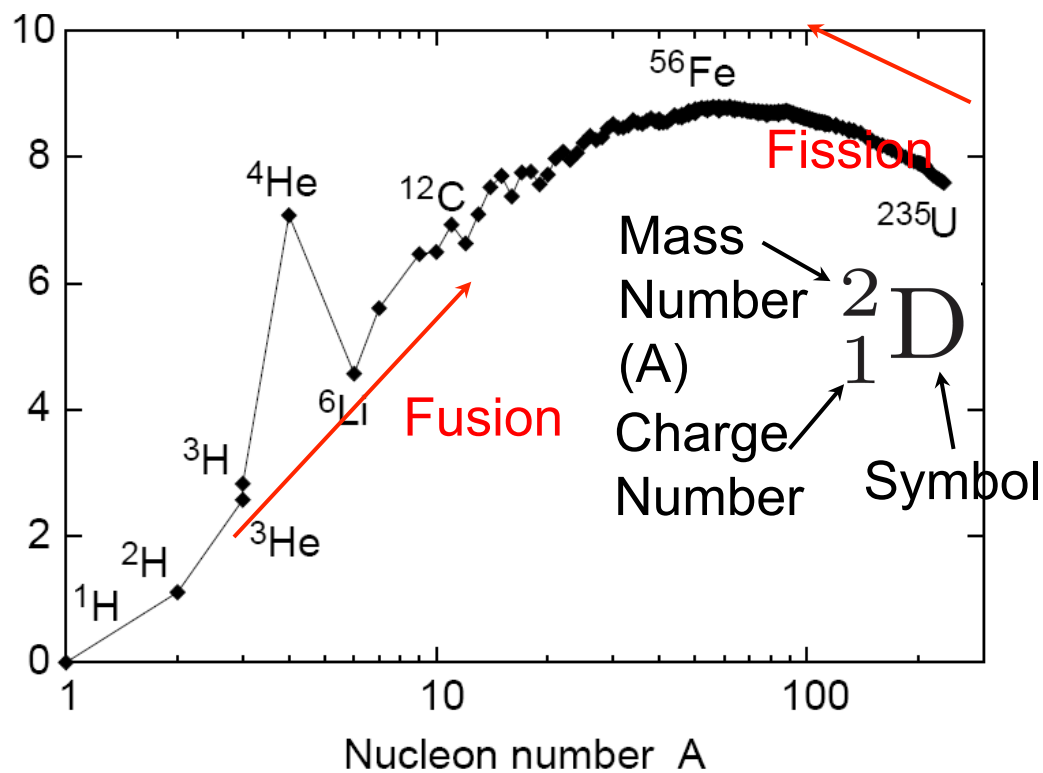


Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (σε MeV) συναρτήσει του μαζικού αριθμού (A) σε log κλίμακα.

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:

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

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

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

Κατανομή της ενέργειας στα προϊόντα

Από τις αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής:

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

$$m_A v_A + m_B v_B = 0$$

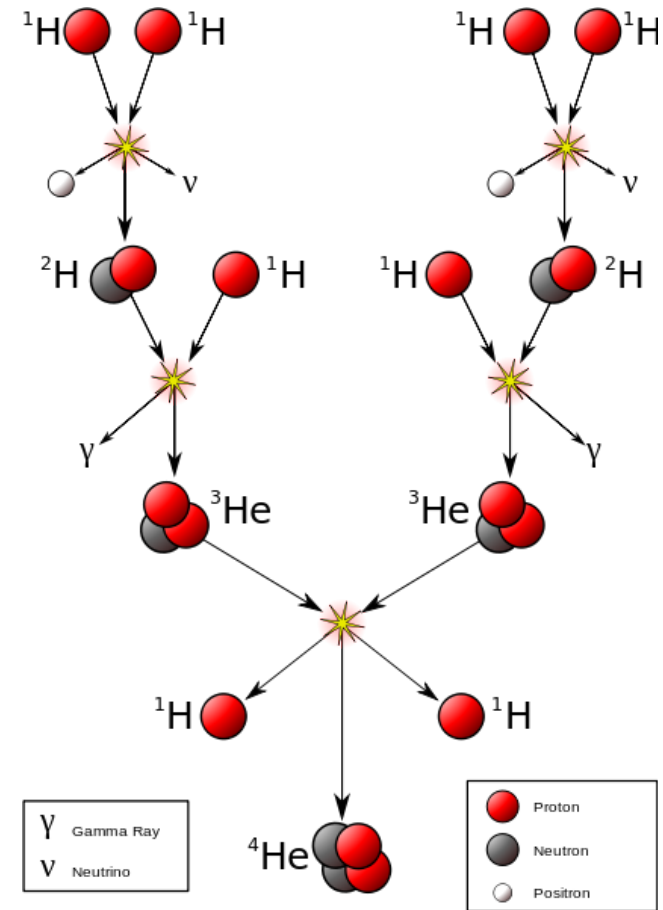
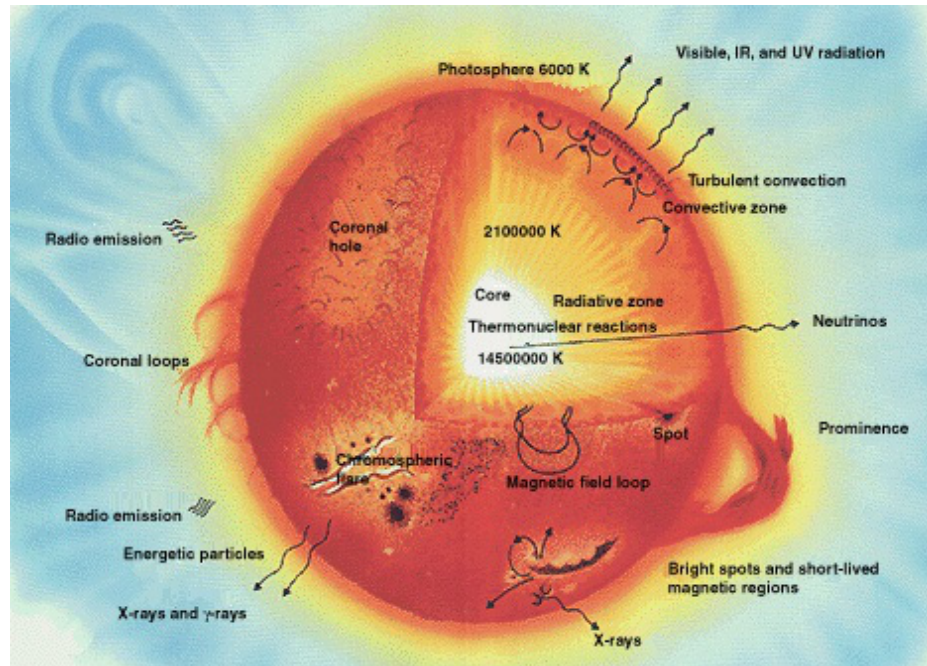
προκύπτει η κατανομή της ελευθερούμενης ενέργειας στα A & B:

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

Για την αντίδραση δευτερίου-τριτίου 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 ακτινοβόληση 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).

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
ηλιακό
σύστημα:
κυρίως H

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

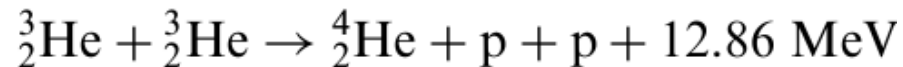
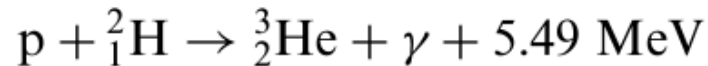
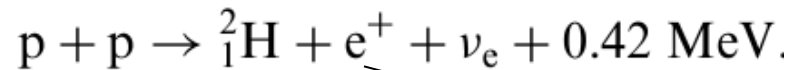
H	He	C	N	O	Ne	Mg	Si	S	Fe
2400	162	1.0	0.21	1.66	0.23	0.10	0.09	0.05	0.08

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:



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

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

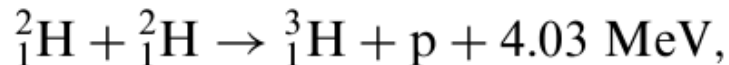
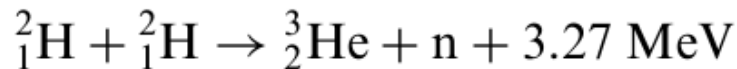
$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

- 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.

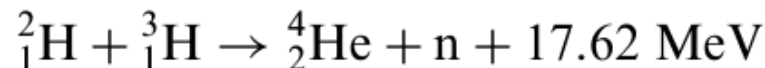
Σύντηξη για ενέργεια

Υποψήφιες αντιδράσεις:

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



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



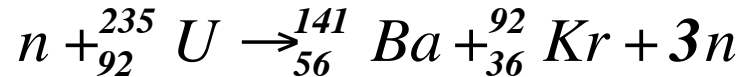
Τεχνικά πώς;

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

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

Άσκηση 2:

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 2α): Σχάση ουρανίου-235 ($^{235}_{92}\text{U}$)

$$Q \geq 0$$

- 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
- 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.
- $M(^{235}_{92}\text{U}) + M(n) = M(^{141}_{54}\text{Ba}) + M(^{92}_{36}\text{Kr}) + 3 \cdot M(n) + Q$
 $\rightarrow Q = M(^{235}_{92}\text{U}) - M(^{141}_{54}\text{Ba}) - M(^{92}_{36}\text{Kr}) - 2 \cdot M(n) = 0.2153 \text{ amu} \rightarrow$
 $Q = 0.2153 \cdot 931.49 \text{ MeV} = \mathbf{234.1 \text{ MeV}}$ (δηλ. $Q > 0$: άρα γίνεται αυθόρμητα)
- Οπότε κατά την αντίδραση αυτή (δηλ., για ENAN μόνο πυρήνα $^{235}_{92}\text{U}$), εκλύεται ενέργεια **234.1 MeV**.

Άσκηση 2β): Σχάση ουρανίου-235 (^{235}U) - Λύση

- Υπολογίσαμε πρίν 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)

$$1 \text{ χρόνος} = 1 \text{ γ} = 365 * 24 * 60 * 60 \text{ s} = 31536000 \text{ s} = 3.15 * 10^7 \text{ s}$$

$$\text{Οπότε: } 1 \text{ MW} = 3.15 * 10^7 \text{ MJ/γ}$$

- Οπότε μπορούμε να βρούμε πόσους πυρήνες χρειαζόμαστε για να πάρουμε τόση ενέργεια σε ένα χρόνο

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

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

→ οπότε χρειαζόμαστε:

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

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

Άσκηση 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):

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

Άσκηση 3: Σύντηξη υδρογόνου - Λύση

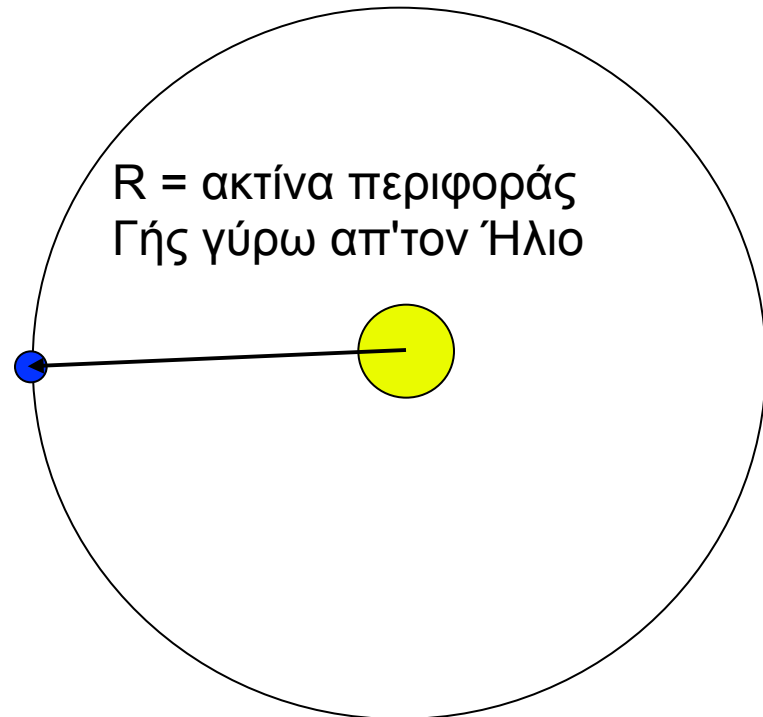


- Γνωρίζετε ότι ο πυρήνας του υδρογόνου (^1H) είναι το πρωτόνιο και άρα δεν έχει ενέργεια σύνδεσης, αφού είναι μόνο του!

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

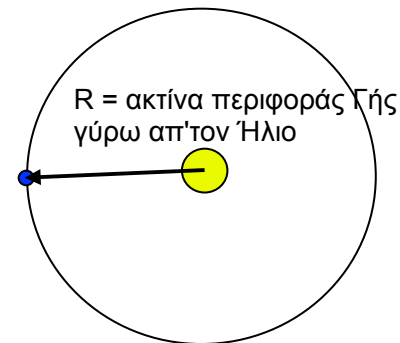
- Η ενέργεια που εκλύεται στον ήλιο κατά τη σύντηξη 4 πυρήνων υδρογόνου για παραγωγή ηλίου είναι 25.7 MeV, δηλαδή **6.43 MeV ανά πυρήνα υδρογόνου = $6.43 * 10^6 * 1.6 * 10^{-19}\text{ J} = 10^{-12}\text{ J}$**
- Τί γίνεται αυτή η ενέργεια;

Εκπέμπεται παντού



Άσκηση 3: 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 gr (όσο ο μαζικός αριθμός), τότε στον ήλιο συντήκονται $3.8 * 10^{38} / 6.02 * 10^{23} = \mathbf{6.3 * 10^{11} \text{ kg } ^1\text{H} \text{ ανά sec !!!}}$