

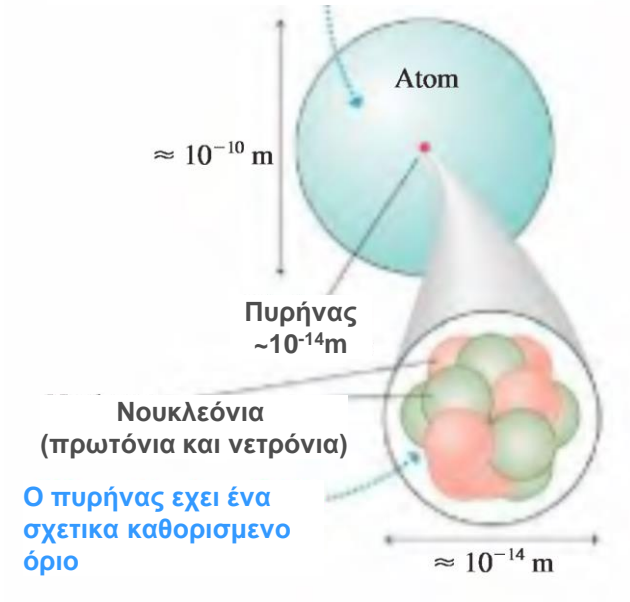
Ενότητα 4:

Πυρηνική Φυσική

Δομή Πυρήνα.
Ενέργεια Σύνδεσης.
Ραδιενέργεια.
Πυρηνική Σχάση.

3.1 Δομή του Πυρήνα

Αν η κουκίδα στο κεντρο παριστανει το πραγματικο μεγαθος ενος πυρηνα, τοτε το ατομο θα επρεπε να σχεδιαστει με διαμετρο 10m !!!



	Πρωτόνια	Νετρόνια	Ηλεκτρόνιο
Αριθμός	Z	N	Z
Φορτίο	+e	0	-e
Μάζα	1.00728u	1.00866u	~ 10 ⁻⁴ u

Νουκλεόνια = Πρωτόνια (Z), Νετρόνια(N)

Μαζικός Αριθμός A = Z + N

Ισότοπα = Δύο στοιχεία με κοινό Z και διαφορετικό N

Σύμβολο : **A**Σ.

πχ ¹²C, ¹³C, ¹⁴C.

πχ ¹H, ²H, ³H

Κοινες χημικές ιδιότητες, διαφορετικές πυρηνικές.

Ισόβαρη = Δύο στοιχεία με κοινό A αλλά διαφορετικά Z, N

πχ ¹⁴C, ¹⁴N, ¹⁴O.

Ατομική Μονάδα Μάζας 1u = 1.6606x10⁻²⁷ kg = **931.49 MeV/c²**.

Ιδιότητες της «πυρηνικής ύλης»

- Τα νουκλεόνια είναι ασυμπίεστα και σε πυκνή διάταξη (σαν ανελαστικές σφαίρες)
- Ο όγκος ενός πυρήνα είναι ανάλογος του μαζικού του αριθμού $V(A)=V_0 \cdot A$ όπου $V_0 \sim 10^{-45} m^3$.
- Η πυκνότητα του πυρήνα είναι ίδια για όλα τα στοιχεία (**Προτυπο Υγρής Σταγόνας**):

$$\rho_{\text{πυρ}} = m / V = (A \cdot u) / (V_0 \cdot A) \sim 10^{17} \text{ kg/m}^3 \text{ δηλαδή } \rho_{\text{πυρ}} \sim 10^{14} \rho_{\text{νερου}}$$

3.2 Ενέργεια Σύνδεσης ενός Πυρήνα

Ενέργεια σύνδεσης (**B**) είναι η ενεργεια που ελευθερώνεται κατά το σχηματισμο του πυρήνα απο τα ελεύθερα νουκλεόνια

ή, ισοδύναμα,

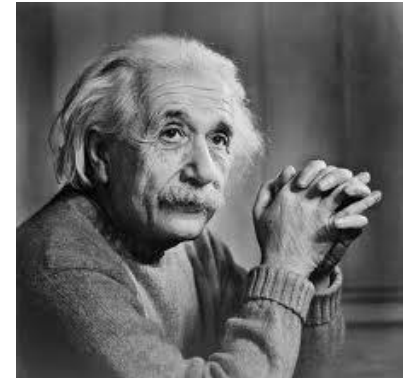
η ενεργεια που πρεπει να δώσουμε για τη διασπαση ενος πυρήνα σε ελεύθερα νουκλεόνια

$$m_{\text{nuc}}c^2 + B = (Zm_p + Nm_n)c^2.$$

Συνεπεια : Πάντοτε ισχύει $m_{\text{nuc}} < Zm_p + Nm_n$

Επειδη $m_{\text{atom}} = Zm_e + M_{\text{nuc}}$ και $m_p + m_e = m_H$, ισχυει:

$$B = (Zm_H + Nm_n - m_{\text{atom}})c^2$$



Ισοδυναμία Μαζας-Ενέργειας
 $E=mc^2$

Παραδειγμα : Η ενεργεια συνδεσης του ^{56}Fe .

Για το σιδηρο εχουμε $Z=26$, $N=30$.

Ατομικές μαζες:

Σιδήρου $m_{\text{Fe}} = 55.9349\text{u}$,

Υδρογόνου $m_H = 1.00783\text{u}$

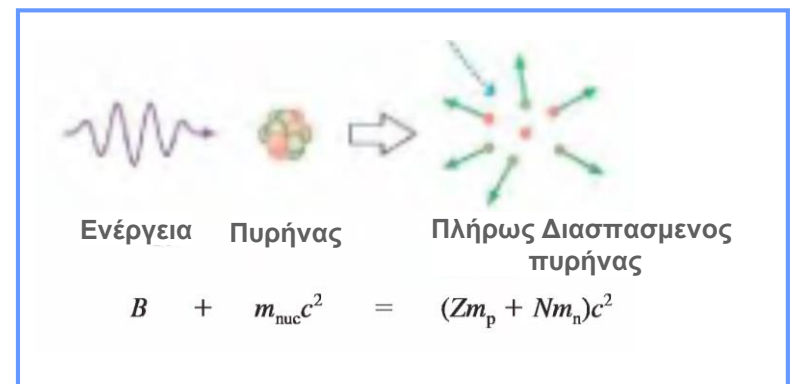
Οπότε:

$$B = [26(1.0078\text{u}) + 30(1.0087\text{u}) - 55.9349\text{u}] \cdot c^2 =$$

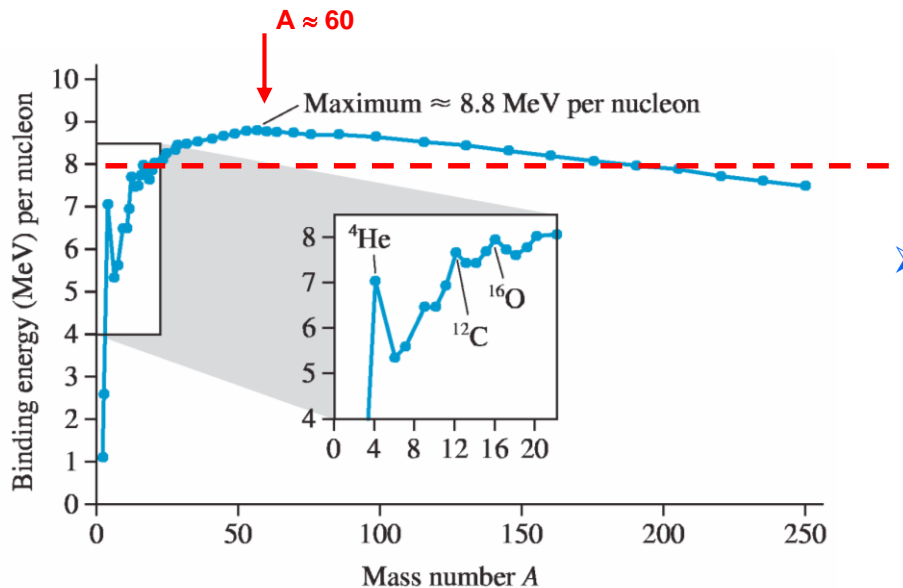
$$0.529\text{u} \cdot c^2 =$$

$$0.529\text{u} \cdot c^2 \times 931.49 \text{ MeV}/c^2 =$$

$$493 \text{ MeV}$$



3.3 Ενέργεια Σύνδεσης και Ευστάθεια ενός Πυρήνα

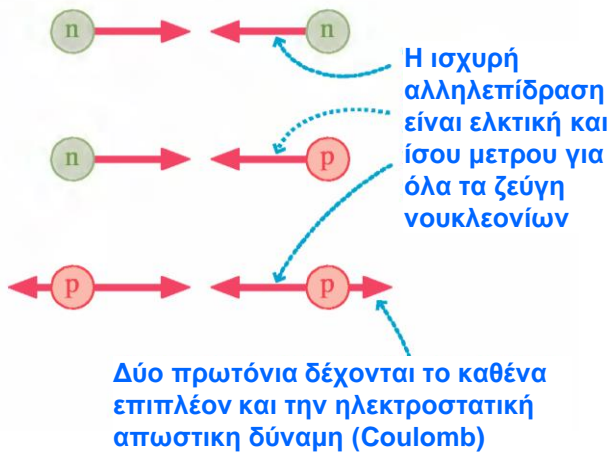


➤ Μεγάλες τιμές της ενέργειας σύνδεσης (ανα νουκλεόνιο) χαρακτηρίζουν ένα **ευσταθή** (δηλαδή, ενεργειακά δύσκολο να διασπασθεί) πυρήνα

Συμπερασματα από την καμπύλη ενέργειας συνδεσης ανα νουκλεονιο:

- Εμφανίζει «κορυφές» στα $A = 4(\text{He}), 12(\text{C}), 16(\text{O}) \Rightarrow$ **ιδιαίτερα ευσταθείς οι πυρήνες He, C και O.**
- Έχει περίπου σταθερή τιμή ($\approx 8 \text{ MeV}$) για $A > 20 \Rightarrow$ κορεσμος των (ενδο)πυρηνικών αλληλεπιδράσεων \Rightarrow **οι (ενδο)πυρηνικές αλληλεπιδρασεις ειναι μικρής εμβέλειας !**
- Εμφανίζει ένα ευρύ μέγιστο γύρω στην τιμή $A \approx 60. \Rightarrow$ **είναι ενεργειακα συμφέρον για όλους τους πυρήνες να διασπασθούν (σχαση) ή να συνενωθούν (συντηξη) προκειμενου να δημιουργηθουν νεοι πυρήνες με $A \approx 60$ που είναι ενεργειακά σταθερότεροι.**

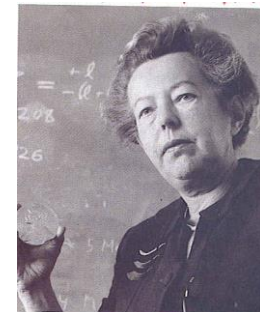
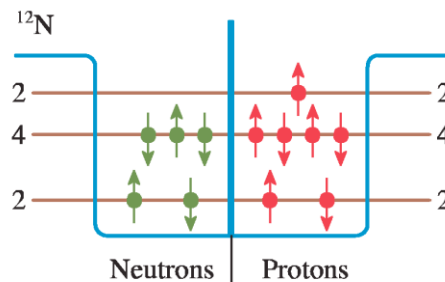
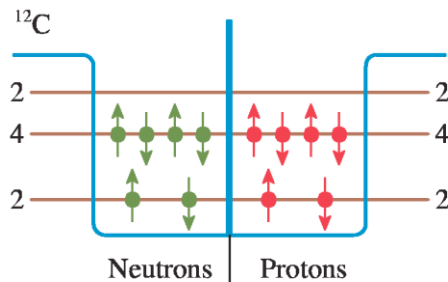
3.4 Τι συγκρατεί τα νουκλεόνια; Η Ισχυρή Αλληλεπίδραση



Η **ισχυρή αλληλεπίδραση**:

- Είναι **ελκτική** μεταξύ δύο οποιωνδήποτε νουκλεονίων
- Δεν επιδρά στα ηλεκτρόνια
- Είναι **μικρής εμβέλειας**, εμφανίζεται μόνο μέσα στον πυρήνα
- Είναι κατά πολύ **ισχυρότερη της ηλεκτροστατικής** άπωσης που τείνει να απομακρύνει τα πρωτόνια μεταξύ τους

Το πρότυπο φλοιών (Shell Model, 1949)



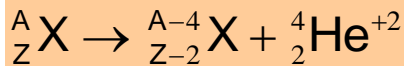
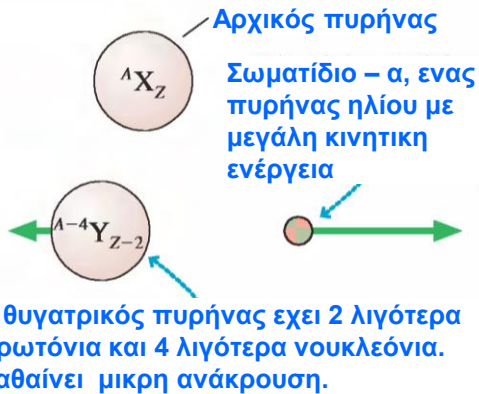
Maria Goeppert-Mayer
Nobel 1963

3.5 Ραδιενέργεια

Ραδιενεργός διάσπαση = Η αυθόρμητη εκπομπή σωματιδίων ή φωτονίων υψηλης ενέργειας από ασταθείς πυρήνες που μεταπίπτουν από μια κατάσταση υψηλης ενέργειας σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας.

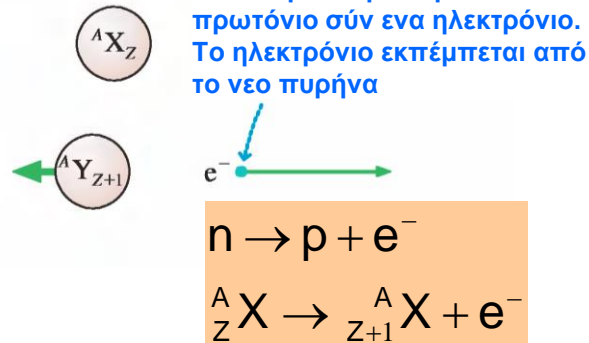
Από τα ~3000 γνωστα ισότοπα μόνο 266 (~10%) είναι ευσταθη και συναντώνται στη φύση, τα υπολοιπα (~90%) διασπώνται αυθόρμητα εκπέμποντας ακτινοβολία (**ραδιενεργεια**)

Διάσπαση - α

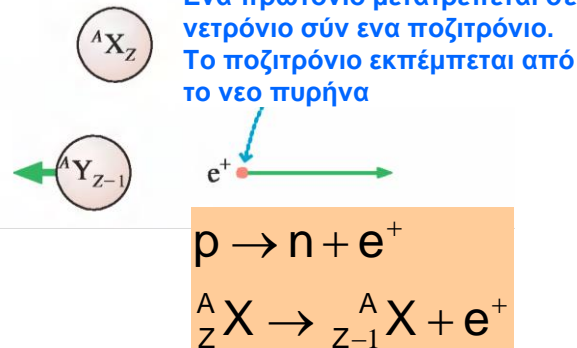


Διάσπαση - β

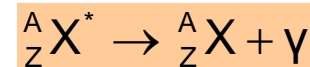
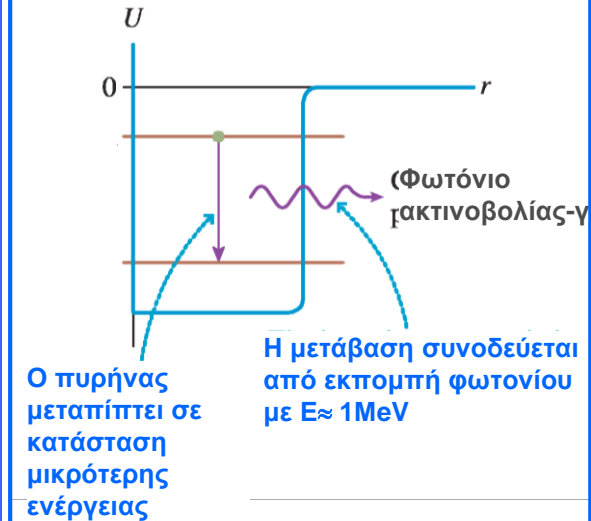
(a) διάσπαση β-μείον



(b) διάσπαση β-σύν



Διάσπαση - γ

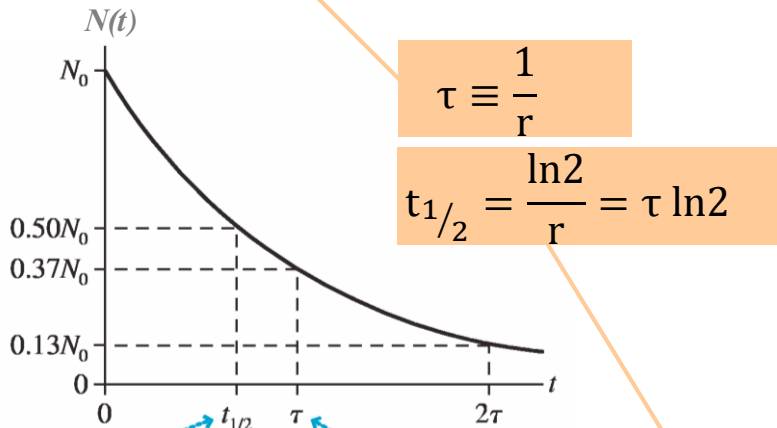


Νομος Ραδιενεργών Διασπάσεων

(Πλήθος Διασπάσεων σε Δt) = (Πλήθος πυρήνων) \times (πιθανότητα διασπασης) \times (χρονικό διάστημα Δt)
 = -(μεταβολή πλήθους πυρήνων)

$$dN = -N(t) \cdot r \cdot dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -r \cdot dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -r \int_0^t dt \Rightarrow \ln N - \ln N_0 = -rt$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-rt}$$

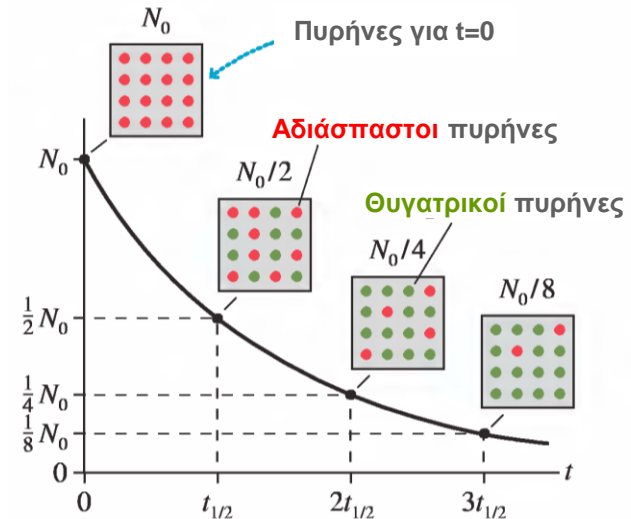


Ο χρόνος μισής ζωής είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο έχουν απομείνει οι μισοί από τους αρχικούς πυρήνες

Η σταθερά χρόνου είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο το πηθος των αδιασπαστων πυρήνων είναι το 1/e του αρχικου πηθους.

$$N(t) = \frac{N_0}{2^{t/t_{1/2}}}$$

Οι μισοί από τους εναπομείναντες πυρήνες διασπώνται σε κάθε χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο μισής ζωής



Μονάδες Μέτρησης Ρυθμού Διάσπασης (Δραστηριότητας):

$$1 \text{ Becquerel (Bq)} = 1 \text{ decay / s} = 1 \text{ s}^{-1}$$

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Βιολογικές επιπτώσεις Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες : α,β,γ και Χ

Ιοντίζουσα ακτινοβολία + Υλη \Rightarrow διασπαση χημικών δεσμών, ιοντισμός ατομων, καταστροφή κυττάρων, ενώ,

H/M ακτινοβολία (μικροκύματα, υπεριυθρη, ορατή, υπεριωδης) + Υλη \Rightarrow **θερμανση**.

Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας

- **Απορροφούμενη δόση (Gy)** = ενέργεια που εναποτίθεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας της προσβαλλόμενης ύλης. Μοναδα: **1 Gray (Gy) = 1J/Kgr.**
- **Σχετική Βιολογική Δραστικότητα (RBE)** = το βιολογικο αποτέλεσμα συγκεκριμενης δωσης προς με το βιολογικο αποτελεσμα ισης δωσης ακτινων-Χ. Παραδειγμα: **RBE(γ,X)=1 , RBE(β)=1-2 , RBE(α)=10-20**
- **Ισοδύναμη δόση** = είναι το δοσιμετρικό μέγεθος που σχετίζεται με τη βλάβη που μπορεί να προκαλέσει σε έναν ιστό η απορροφούμενη δόση ενός συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας. Μονάδα: **1 Sievert (Sv) = 1Gy x RBE , 1 rem = 0.01 Sv**

Πηγή Ακτινοβολίας	Τυπική Δόση (mrem)
CT scan (e ⁺)	1000
Φυσικό περιβάλλον (1 χρονος)	300
Μαστογραφία (Χ)	80
Ακτ.Θωρακα (Χ)	30
Ακτ. Οδοντιατρική (Χ)	3
Καπνισμα 1 πακετο/μερα (1χρονος)	15000

Πόση είναι η ασφαλης δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας ?

Δεν υπαρχει σαφής απάντηση !!!

Εφαρμογές Πυρηνικής Φυσικής

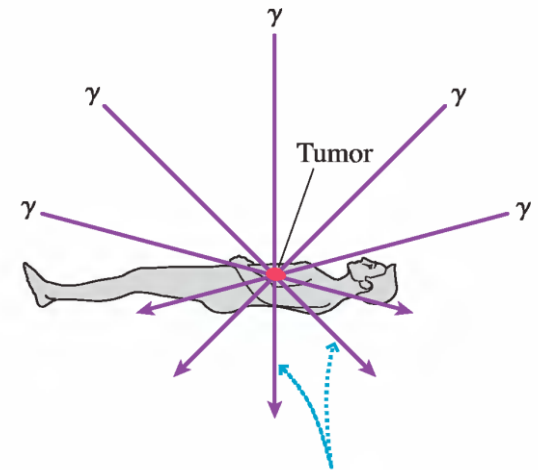
Ραδιενεργός Χρονολόγηση

Το κλάσμα $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ σε κάθε ζώντα οργανισμό είναι $\approx 1.3 \times 10^{-12}$. Όταν ο οργανισμός αποβιώσει οι πυρήνες του ^{14}C στους ιστούς του, που συνεχίζουν να διασπώνται, δεν αντικαθίστανται. Η χρονολόγηση (από την ημερομηνία θανάτου) γίνεται μετρώντας το κλάσμα $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ και συγκρίνοντας με την τιμή 1.3×10^{-12} , με δεδομένο το χρόνο μισής ζωής του ^{14}C που είναι 5730 χρόνια.

Ιατρικές Εφαρμογές – Πυρηνική Ιατρική

- **Καταπολέμηση καρκινικών όγκων:** καταστροφή καρκινικών όγκων με ακτινοβολία- γ ή με χειρουργική επέμβαση και τοποθέτηση ραδιενεργών υλικών (ακτινοβολία- α)
- **Διαγνώση ασθενειών:** Διάγνωση θυροειδούς με χρήση ραδιενεργού ^{131}I (ως ιχνηθέτη) σε αντικατάσταση του ^{127}I . Το ^{131}I που συγκεντρώνεται στην πασχουσα περιοχή υφίσταται β -διασπασή και ανιχνεύεται. Ο ρυθμός συγκεντρώνσης του ^{131}I αποτελεί ένδειξη υγιούς ή μη λειτουργίας του θυροειδή.

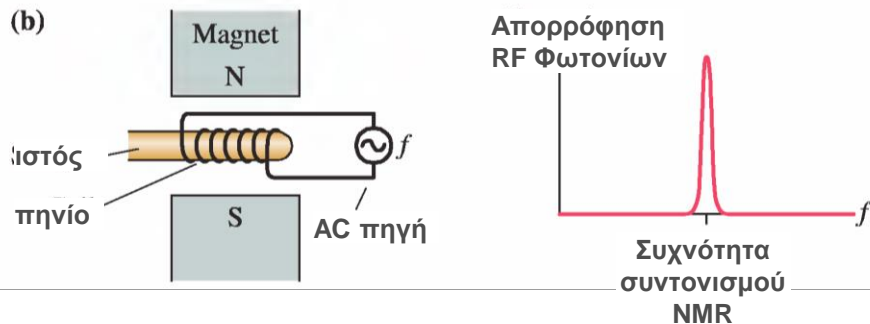
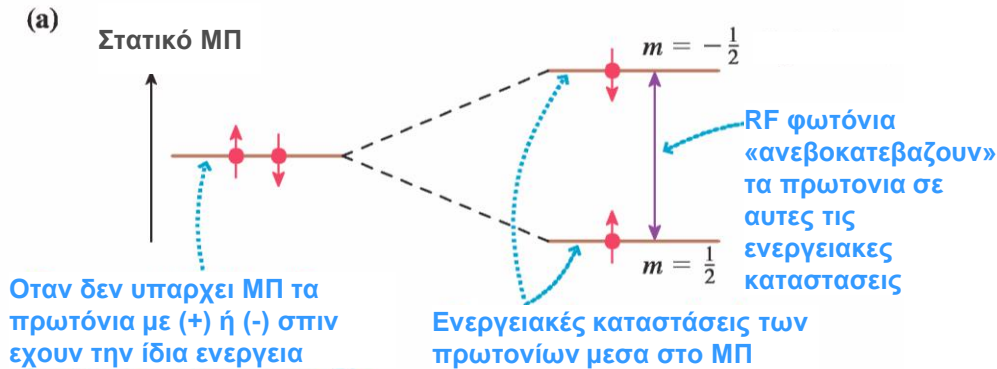
FIGURE 43.25 Radiation therapy is designed to deliver a lethal dose to the tumor without damaging nearby tissue.



Gamma radiation is incident along many lines, all of which intersect the tumor.

- **Τεχνικές Απεικόνισης οργανικών ιστών (Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός NMR , Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού MRI) :** Το 70% των βιολογικών ιστών αποτελείται από νερό, δηλαδή πρωτόνια. Τα πρωτόνια έχουν spin $s=1/2$ (όπως τα ηλεκτρόνια) και με εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου ΜΠ κατάλληλης συχνότητας εναλλάσσουν τον προσανατολισμό τους μέσα σε ένα στατικό ΜΠ, απορροφώντας ή εκπέμποντας RF φωτόνια τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν. Σε ένα χωρικά μεταβαλλόμενο στατικό ΜΠ, η συχνότητα και το εύρος του συντονισμού μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο ακολουθώντας τις μεταβολές του ΜΠ. Οι χωρικές μεταβολές αυτές καταγράφονται και μετατρέπονται με κατάλληλη επεξεργασία σε εικόνα.

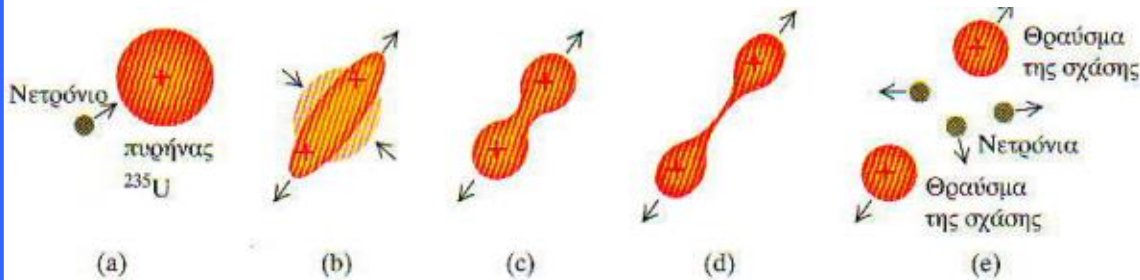
Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)



3.6 Πυρηνική Σχάση

- **Σχάση** = διεργασία κατά την οποία ένας ασταθής πυρήνας διασπάται σε δυο θραύσματα με συγκρίσιμες μαζες, αντί να εκπέμπει σωματιδία α ή β. (Hahn-Strassman 1939)
- Για να πραγματοποιηθεί απαιτείται ο αρχικός πυρήνας **να βομβαρδιστεί με νετρόνια**.
- Πάντοτε κατά τη σχάση **ελευθερώνονται νετρόνια**.
- Είναι δυνατό ολοι οι πυρήνες να υποστούν σχάση, αλλά προτιμώνται αυτοί που απαιτούν βομβαρδισμό με αργα κινούμενα («θερμικά») νετρόνια. (πχ ^{235}U)

Το πρότυπο της σταγόνας (1936) και η πυρηνική σχάση



Συνθήκη για σχάση:

Τα θραύσματα να έχουν μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης από τον αρχικό πυρήνα

$$X \rightarrow Y + Z \Leftrightarrow B(X) < B(Y), B(Z)$$

$$B(A) = C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(A-2Z)^2}{A};$$

$$C_1 = 15.7 \text{ MeV}$$

1: Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο

$$C_2 = 17.8 \text{ MeV}$$

2: Επιφανειακή διόρθωση ενέργειας σύνδεσης

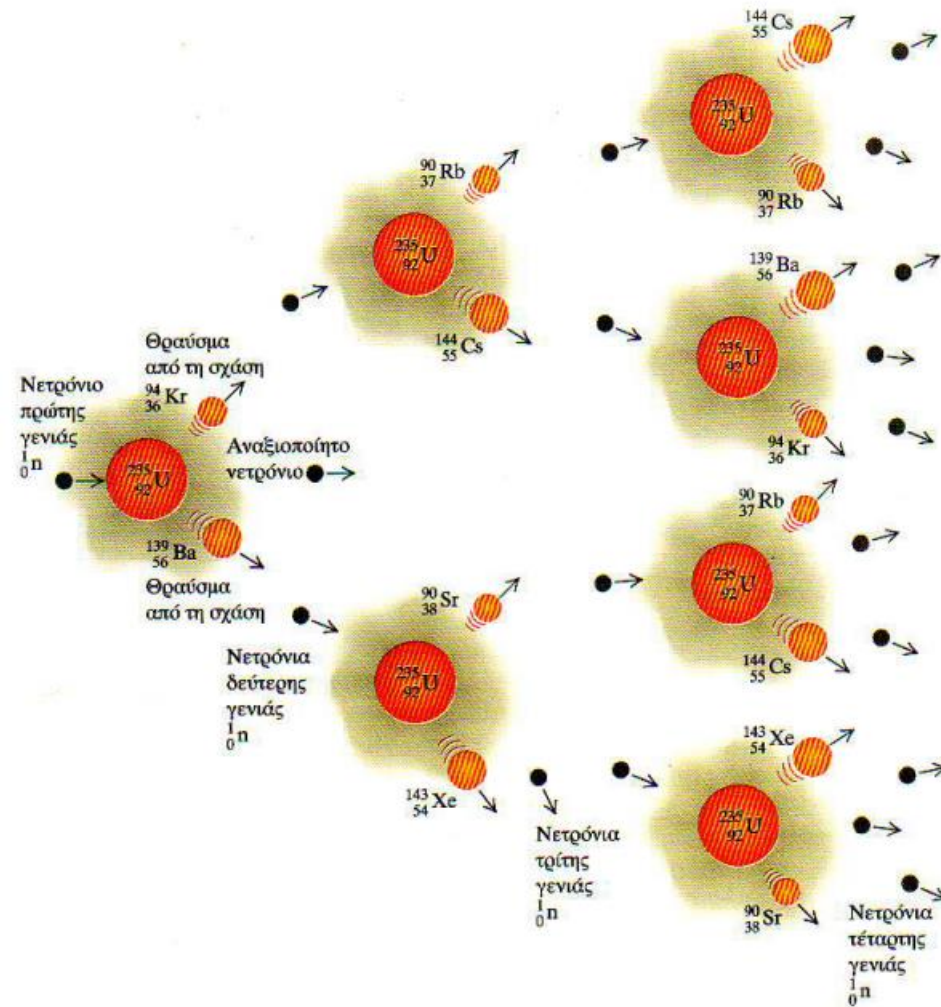
$$C_3 = 0.71 \text{ MeV}$$

3: Ηλεκτροστατική απωστική ενέργεια πρωτονίων

$$C_4 = 23.7 \text{ MeV}$$

4: Μείωση της ενέργειας ισχυρής αλληλεπίδρασης, λόγω των αζευγάρωτων νουκλεονίων $|N-Z|=|A-2Z|$

Αλυσωτές Αντιδράσεις



Τα παραγόμενα από τη σχάση νετρόνια προκαλούν με τη σειρά τους νέες σχάσεις πυρήνων, οπότε προκαλείται ένα «**φαινόμενο χιονοστιβαδας**» απο διαδοχικές πυρηνικές σχάσεις, το οποίο περιγράφεται ως **αλυσωτη αντιδραση**.

Η εξέλιξη της αλυσωτης αντιδρασης γίνεται με ελεγχόμενο (αργό) ρυθμό, στους **πυρηνικούς αντιδραστήρες**, ενώ με ανεξέλεγκτο ρυθμό σε μια **πυρηνική βόμβα**.

Η **επιβράδυνση των νετρονίων** γίνεται μεσω συγκρούσεων με το περιβαλλον αδρανες (μη-σχασιμο) υλικό (πχ νερο, γραφίτης, ραβδοι καδμίου).

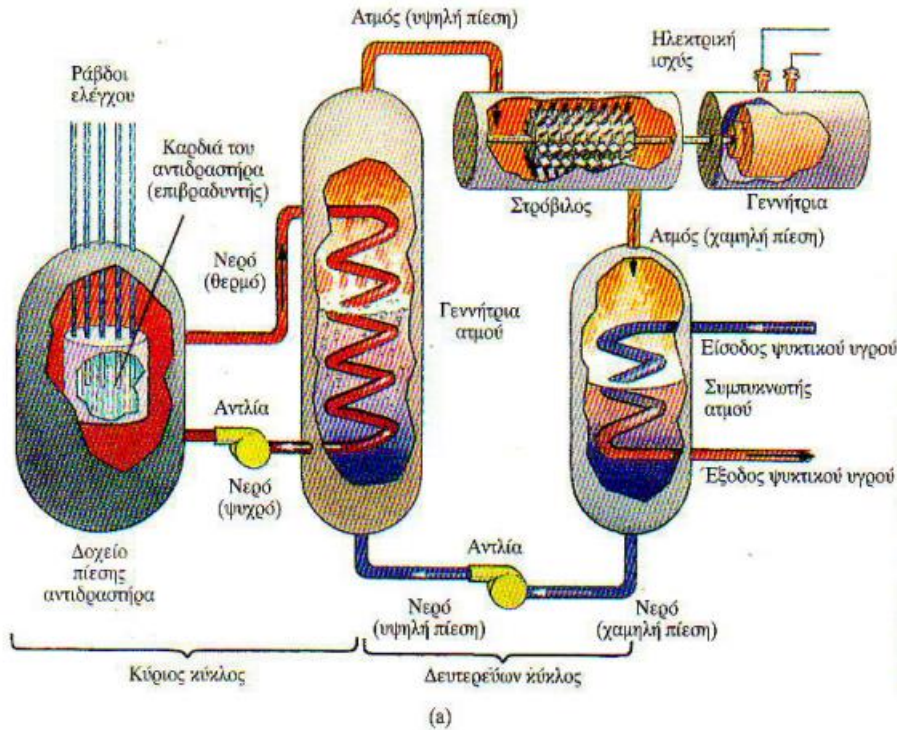


EKEFE «Δ» (5MW)

Forsmark, Sweden

Πυρηνικοί Αντιδραστήρες

Πυρηνικός Αντιδραστήρας = Συστημα στο οποίο πραγματοποιείται μια ελεγχόμενη πυρηνική αλυσωτή αντίδραση με σκοπό την απελευθέρωση ενέργειας



Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Πυρηνικό Αντιδραστήρα:

Σχάση → Κινητική Ενέργεια των θραυσμάτων (πυρηνων, νετρονίων) → θέρμανση νερού και παραγωγή ατμού → κίνηση ατμοστροβίλου → κίνηση γεννητριας → παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Άλλες Χρήσεις Πυρηνικού Αντιδραστήρα:

- Παραγωγή τεχνητών ραδιοϊσοτόπων (ιατρική, έρευνα)
- Παραγωγή δέσμης νετρονίων (έρευνα φυσικής)
- Παραγωγή σχάσιμων υπερουράνιων στοιχείων (πλουτώνιο)



The CANDU [Bruce Nuclear Generating Station](#) in **Canada** is the largest [nuclear power](#) plant in the world. (900 MW)



Fukushima Daiichi (**Japan**) nuclear disaster 16-3-2011



Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant (**Japan**) is the most powerful nuclear plant in the world (8.21 GW)



Tsar Bomba is the nickname for the AN602 hydrogen bomb, the most powerful nuclear weapon ever detonated. Its October 30, 1961 test remains the most powerful artificial explosion in human history. (33.8 YW peak power output , 1yottawatt= 10^{24} W)

Σημαντικά ατυχήματα αντιδραστήρων(*)

(*) http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_and_radiation_accidents

Χρονολογία	Τοπος	Απώλειες	Επίπεδο (log)
28-3-1979	“Three Mile Island”, Pennsylvania, USA	1 θάνατος	5 / 7
26-4-1986	“Chernobyl”, USSR	56 θάνατοι + 4000 απο καρκίνο	7 / 7
11-3-2011	Fukushima, Japan	37 τραυματίες	7/7



Chernobyl. The nuclear reactor after the disaster.



clean-up crew working to remove radioactive contamination at Three Mile Island.



Fukushima Daiichi (**Japan**) nuclear disaster 16-3-2011