

# Πυρηνική Φυσική

Γ.Χ. Σακελλαρόπουλος

Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής – Ιατρικής Πληροφορικής

Τμήμα Ιατρικής – Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής

# Δομή πυρήνα

Νουκλεόνια: Πρωτόνια (p), Νετρόνια (n)

**Ατομικός Αριθμός (Z):** Αριθμός πρωτονίων

**Μαζικός Αριθμός (A):** Αριθμός πρωτονίων & νετρονίων  $A=Z+N$

Νουκλίδια (πυρήνες στοιχείων) διακρίνονται σε οικογένειες:

**Ισότοπα:** Ίδιο Z, διαφορετικό A, άρα διαφορετικό N (ίδιο στοιχείο)

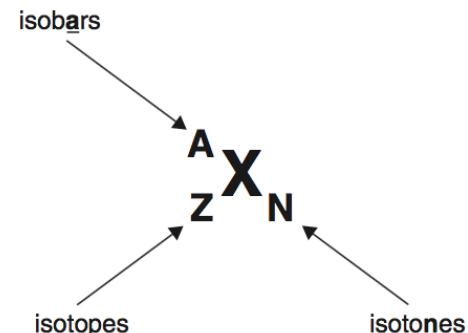
π.χ.  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$

**Ισότονα:** Ίδιο N (διαφορετικά στοιχεία)

**Ισοβαρή:** Ίδιο A, διαφορετικό Z, N (διαφορετικά στοιχεία)

π.χ.  $^{14}\text{C}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{14}\text{N}$

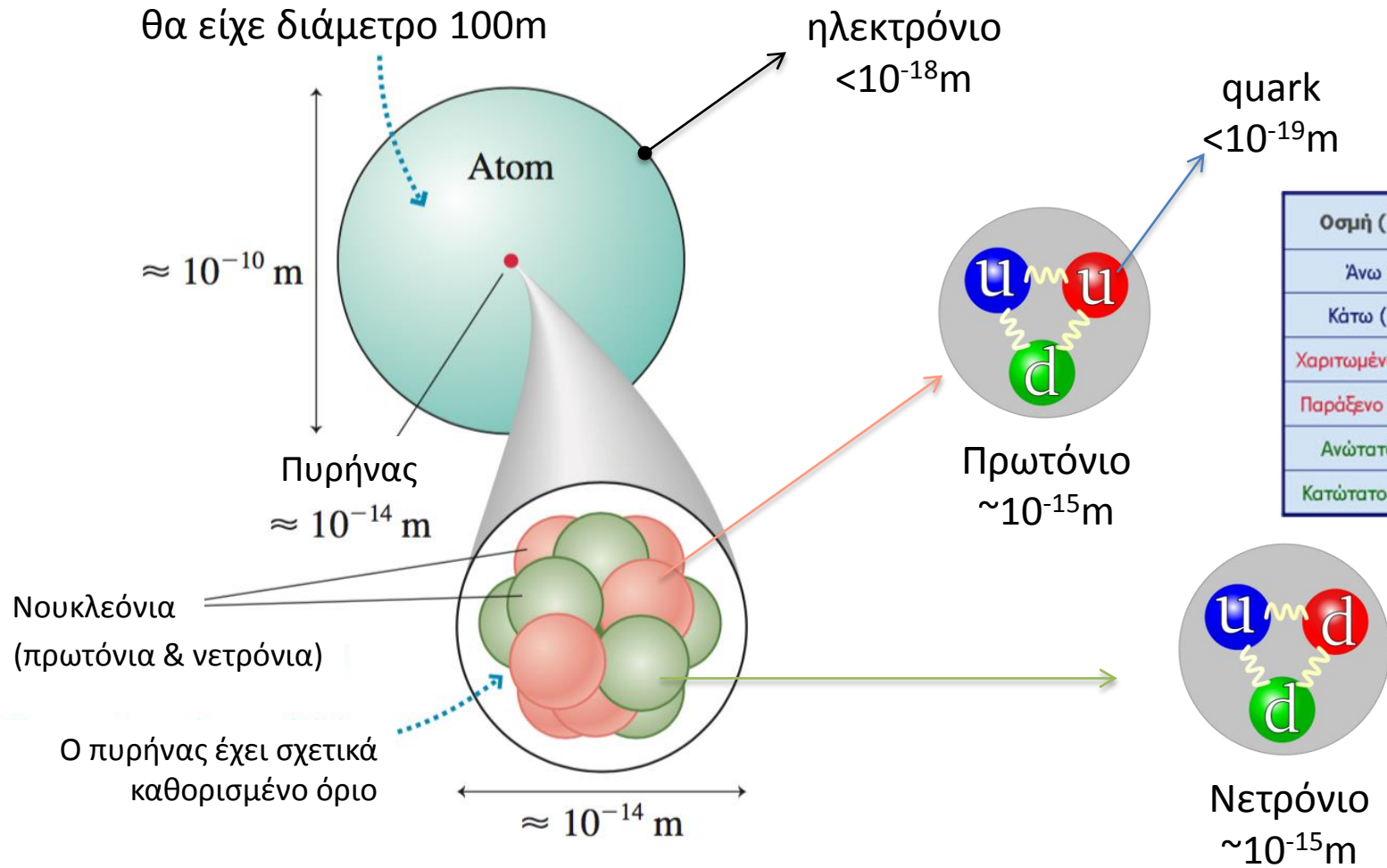
Ατομική Μονάδα Μάζας ( $1u$ ) =  $1.6606 \times 10^{-27} \text{kg}$  =  $931.49 \text{ MeV}/c^2$



	Πρωτόνια	Νετρόνια	Ηλεκτρόνια
Αριθμός	Z	N	Z
Φορτίο	+e	0	-e
Μάζα	1.00728u	1.00866u	$\sim 10^{-4}u$

# Δομή πυρήνα

Αν ο πυρήνας είχε  
διάμετρο 1 cm, το άτομο  
θα είχε διάμετρο 100m



# Δομή πυρήνα

- Τα νουκλεόνια είναι ασυμπίεστα και σε πυκνή διάταξη
- Ο όγκος ενός πυρήνα είναι ανάλογος του μαζικού αριθμού:

$$V(A) = V_0 \cdot A \quad (V_0 = 10^{-45} \text{ m}^3)$$

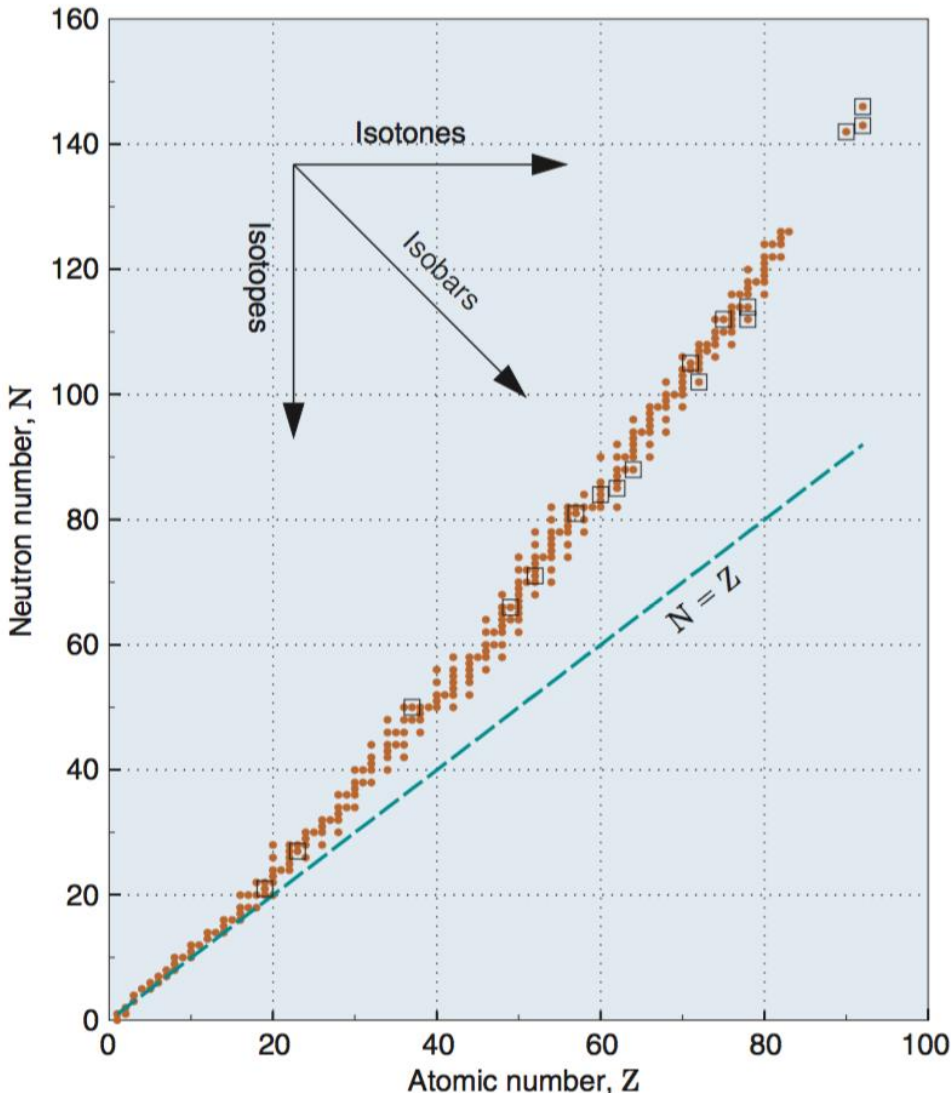
- Η πυκνότητα του πυρήνα είναι ίδια για όλα τα στοιχεία (Πρότυπο Υγρής Σταγόνας):

$$\rho_{\text{πυρήνα}} = \frac{m}{V} = \frac{A \cdot u}{V_0 \cdot A} \approx 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow \rho_{\text{πυρήνα}} = 10^{14} \cdot \rho_{\text{νερού}}$$

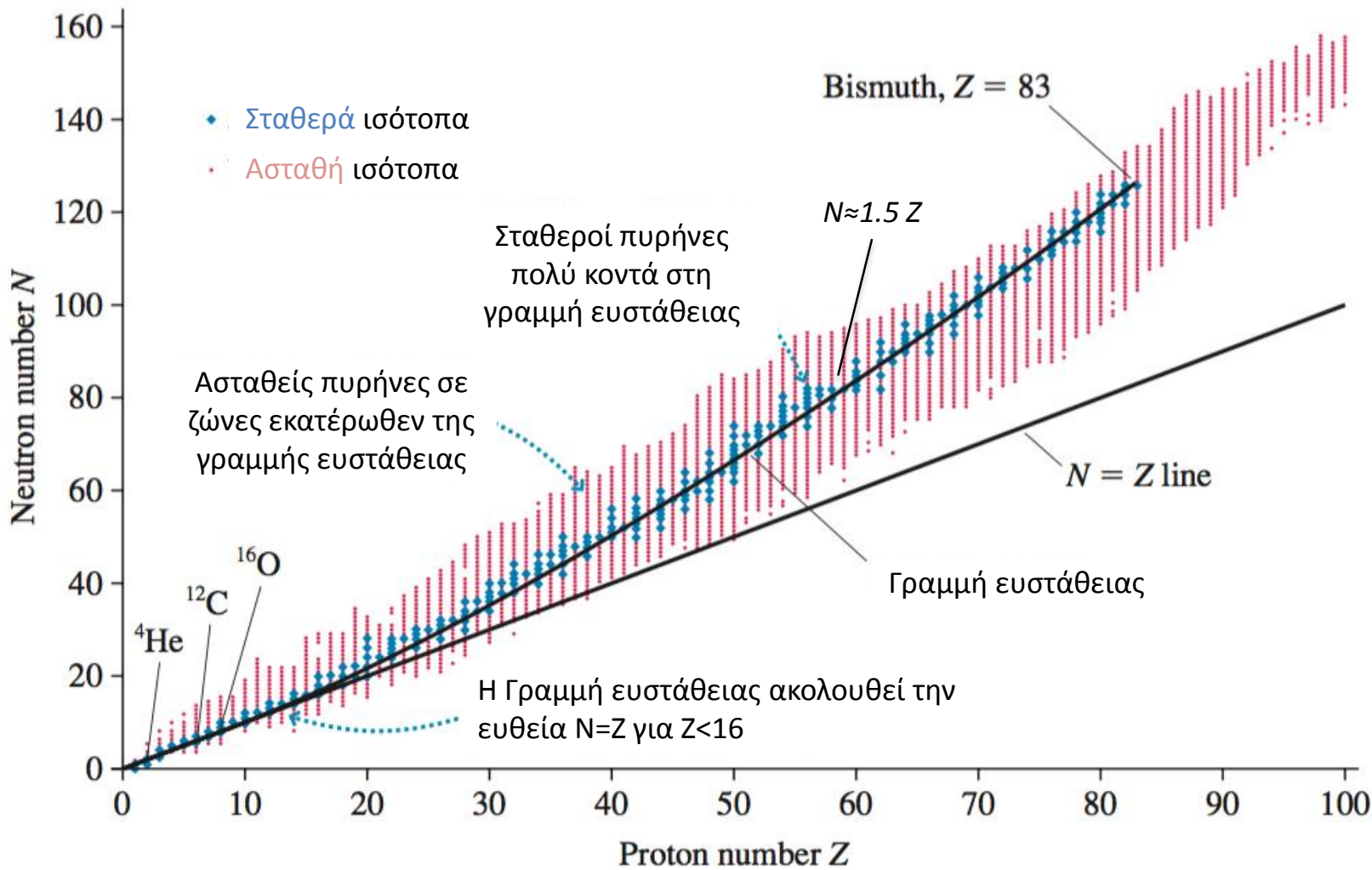
# Αλληλεπιδράσεις και Ενεργειακές στάθμες πυρήνα

- Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση: άπωση μεταξύ πρωτονίων (Coulomb)
- Δύναμη που συγκρατεί πρωτόνια & νετρόνια στον πυρήνα:  
**Ισχυρή αλληλεπίδραση**
  - Ελκτική μεταξύ οποιωνδήποτε νουκλεονίων
  - Δεν επιδρά στα ηλεκτρόνια
  - Μικρής εμβέλειας (μόνο εντός του πυρήνα)
  - Ισχυρότερη της ηλεκτροστατικής άπωσης
- Κίνηση νουκλεονίων
  - Αρχή απροσδιοριστίας
  - Μοντέλο ανάλογο με ηλεκτρόνια (shell model)
  - Ύπαρξη ενεργειακών σταθμών & κβαντικών αριθμών
  - Βασική κατάσταση, Διεγερμένη κατάσταση (παροδική), Μετασταθής κατάσταση (παροδική αλλά χρονικής διάρκειας  $>10^{-12}s$ , ισομερή νουκλίδια)
  - Μεταπτώσεις από υψηλότερη ενεργειακή στάθμη σε άλλη γίνεται με εκπομπή σωματιδίων: πυρήνες He (σωματια α), ηλεκτρόνια (β), φωτόνια (γ)

# Νετρόνια: «συγκολλητική» δράση



- Τα πρωτόνια απωθούνται λόγω της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης
- **Μικροί πυρήνες:** Όλα τα νουκλεόνια είναι σε επαφή, ένα νετρόνιο για κάθε πρωτόνιο αρκεί ( $N=Z$ )
- **Μεγάλοι πυρήνες** απαιτούν περισσότερα νετρόνια ( $N>Z$ )



# Ενέργεια Σύνδεσης πυρήνα

Η συνολική ενέργεια των μεμονωμένων νουκλεονίων είναι μεγαλύτερη από τη συνολική ενέργεια του πυρήνα

**Ενέργεια Σύνδεσης (B)** ενός πυρήνα είναι

*η ενέργεια που πρέπει να δώσουμε για να διασπαστεί ο πυρήνας στα συστατικά του, ή*

*η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά το σχηματισμό του πυρήνα από τα ελεύθερα νουκλεόνια*

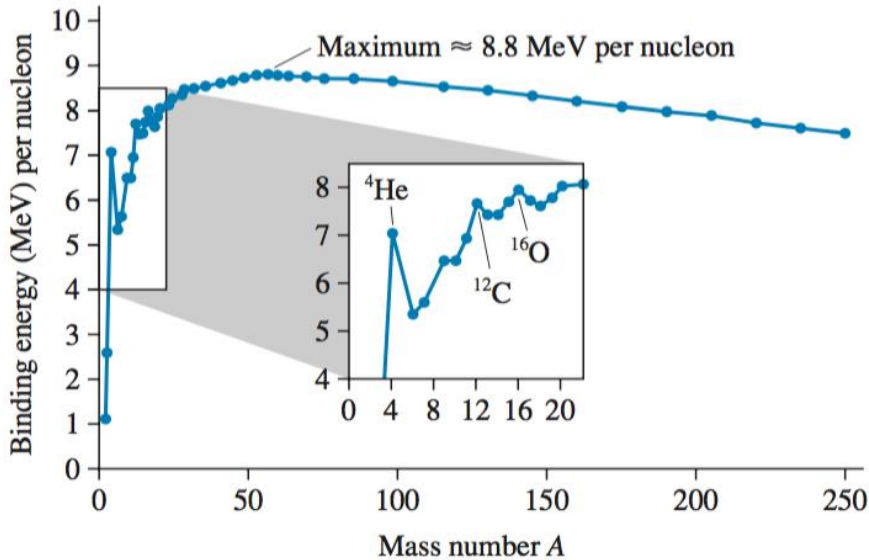
$$m_{nucleus}c^2 + B = (Zm_p + Nm_n)c^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B = (Zm_p + Nm_n - m_{nucleus})c^2 = (Zm_p + Zm_e + Nm_n - m_{nucleus} - Zm_e)c^2 \Rightarrow$$

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



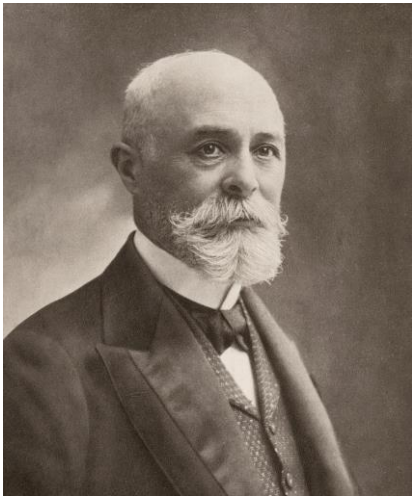
# Ενέργεια Σύνδεσης πυρήνα



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

Μεγάλες τιμές ενέργειας σύνδεσης χαρακτηρίζουν ευσταθείς πυρήνες (ενεργειακά δύσκολο να διασπασθούν)

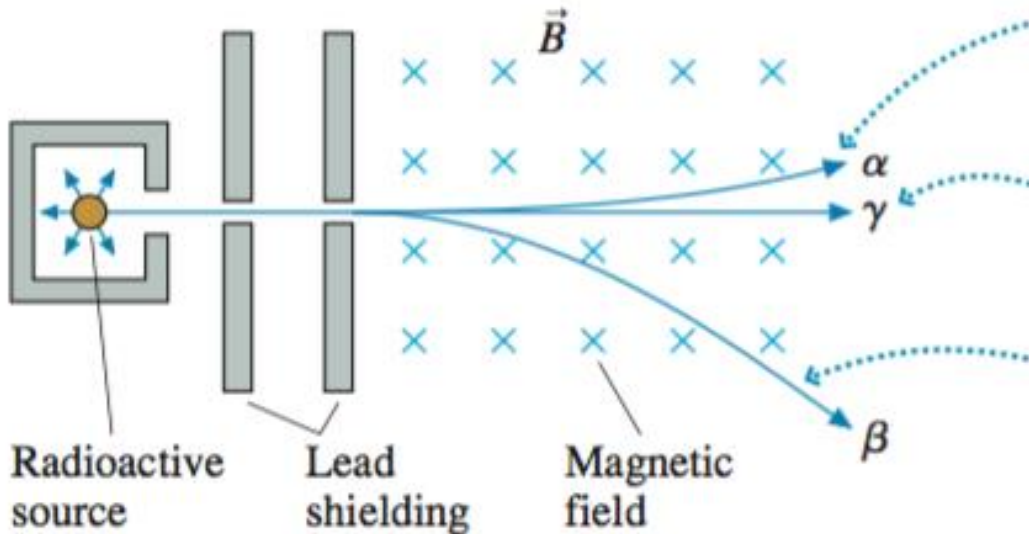
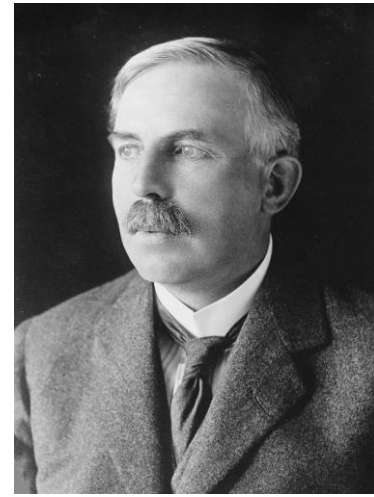
- Εμφανίζονται κορυφές για  $A=4$ ,  $12$  και  $16$  (άρα πολύ σταθεροί οι πυρήνες He, C, O)  
*Σχετίζεται με την ύπαρξη φλοιών αντίστοιχων με των ηλεκτρονίων*
- Β σχετικά σταθερή  $\approx 8\text{MeV}$  ανά νουκλεόνιο για  $A > 20$   
*Κορεσμός πυρηνικών δεσμών: κάθε νουκλεόνιο αλληλεπιδρά μόνο με τα γειτονικά του*
- Εμφανίζεται ευρύ μέγιστο στην τιμή  $A \approx 60$   
*Συμφέρει ενεργειακά όλους τους πυρήνες να διασπασθούν (σχάση) ή να συνενωθούν (σύντηξη) για να σχηματιστούν πυρήνες με  $A \approx 60$  που είναι ενεργειακά πιο σταθεροί*



Antoine Henri Becquerel  
1896: Το Ουράνιο εκπέμπει  
‘ακτίνες’



Joseph John Thomson - Ernest Rutherford  
Ταυτοποίηση των ‘ακτίνων’



Τα σωμάτια  $\alpha$  αποκλίνουν λίγο. Είναι θετικά φορτισμένα και βαριά

Οι ακτίνες  $\gamma$  δεν αποκλίνουν καθόλου. Μάλλον δε φέρουν ηλεκτρικό φορτίο

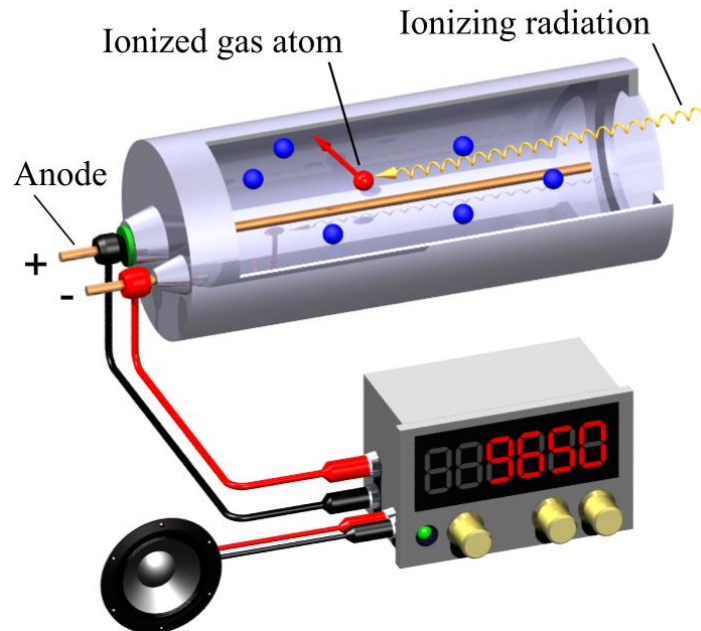
Τα σωμάτια  $\beta$  αποκλίνουν σημαντικά στην αντίθετη κατεύθυνση. Είναι αρνητικά φορτισμένα και ελαφρά

# Ραδιενεργός Φθορά ή Διάσπαση (Radioactive decay)

- Διαδικασία μετασχηματισμού ασταθούς πυρήνα σε πιο σταθερό μέσω της εκπομπής σωματιδίων ή/και φωτονίων και απελευθερώνοντας ενέργεια
- Ασταθής: **Μητρικός** πυρήνας
- Πιο σταθερός: **Θυγατρικός** πυρήνας
- 3000 ισότοπα: 266 σταθερά
- Ενέργεια μετάπτωσης ( $Q$ ): η ενέργεια που απελευθερώνεται από μετατροπή μάζας
- Γενικά, δεν επηρεάζονται οι χημικές ιδιότητες του στοιχείου (π.χ. χρήση ιχνηθετών)

# Ιοντίζουσα ακτινοβολία

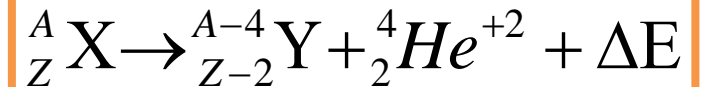
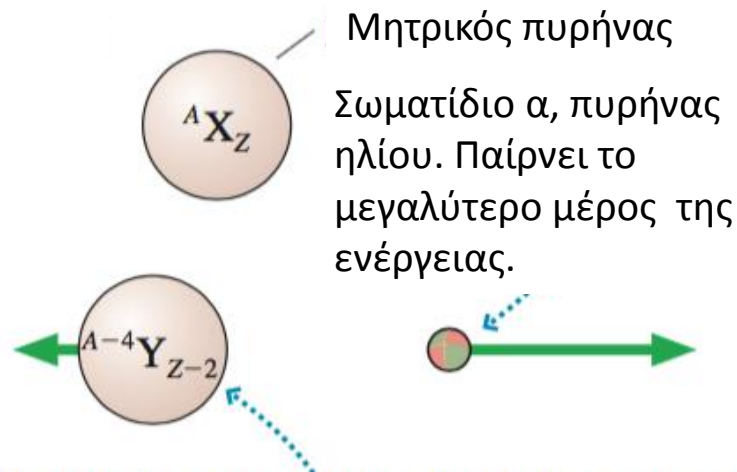
- Προϊόντα ραδιενεργών διασπάσεων ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) έχουν ενέργεια  $10^6$  φορές μεγαλύτερη από ενέργεια ιονισμού (π.χ. Υδρογόνο 13.6 eV)
- Διάσπαση μοριακών δεσμών, αλυσίδας DNA
- Σωματίο 1 MeV ιονίζει 100.000 άτομα σε μια διαδρομή του
- Ανίχνευση ηλεκτρονίων από ιονισμό: μετρητής Geiger-Müller



# Είδη ραδιενεργών διασπάσεων

Διάσπαση α: Συνήθως παρατηρείται σε νουκλίδια υψηλού Z

## Διάσπαση α

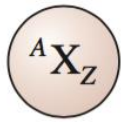


$$\Delta E \approx K_\alpha = (m_X - m_Y - m_{He})c^2$$

# Είδη ραδιενεργών διασπάσεων

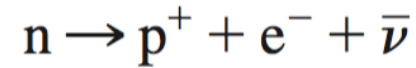
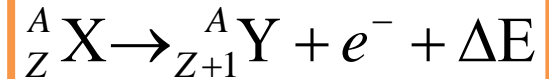
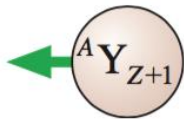
Διάσπαση β: Συνήθως παρατηρείται σε νουκλίδια χαμηλού Z

## Διάσπαση β-



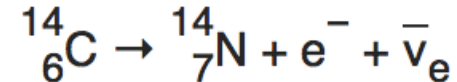
Ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο.

Το ηλεκτρόνιο εκπέμπεται από τον πυρήνα

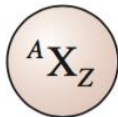


$$\Delta E = (m_X - m_Y)c^2$$

Συμβαίνει μόνον όταν  $m_X > m_Y$

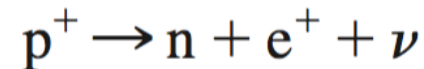
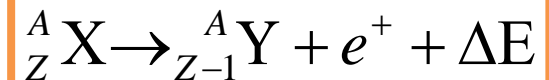
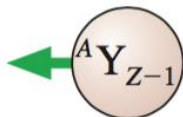


## Διάσπαση β+



Ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο και ένα ποζιτρόνιο.

Το ποζιτρόνιο εκπέμπεται από τον πυρήνα

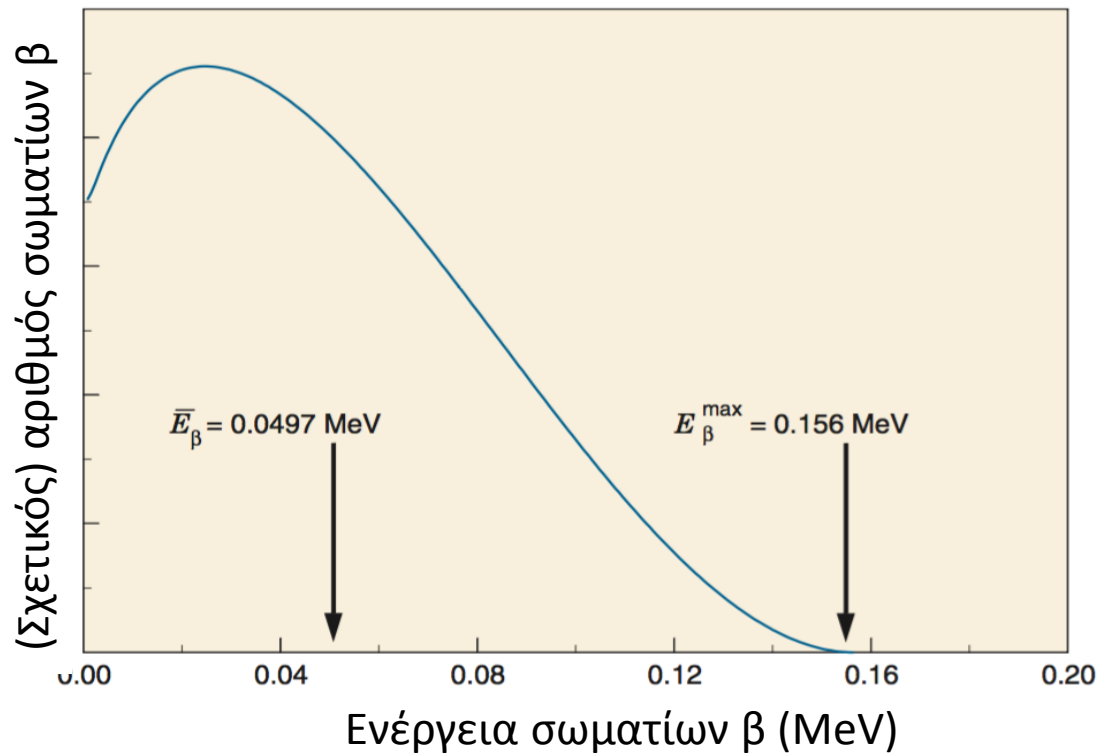


Δε συμβαίνει σε ελεύθερα πρωτόνια αφού  $m_p < m_n$

Μόνον εντός του πυρήνα και με διατήρηση της συνολικής ενέργειας

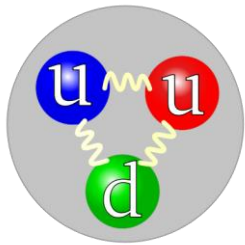
# Ενέργεια σωματίων $\beta$

- Ενέργεια κατανέμεται τυχαία σε  $\beta$ , νετρίνα
- Συνεχές φάσμα ενεργειών σωματίων  $\beta$
- Μέση ενέργεια  $\beta$  περίπου  $1/3 E_{\max}$

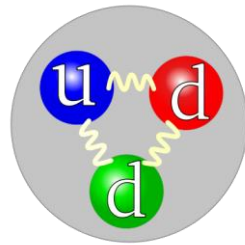


# Ασθενής αλληλεπίδραση

- Ευθύνεται για τη  $\beta$ -διάσπαση
- Ακόμη μικρότερης εμβέλειας από την Ισχυρή αλληλεπίδραση
- Οδηγεί στην αλλαγή οσμής των quark



Πρωτόνιο: uud



Νετρόνιο: udd

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$$

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu$$

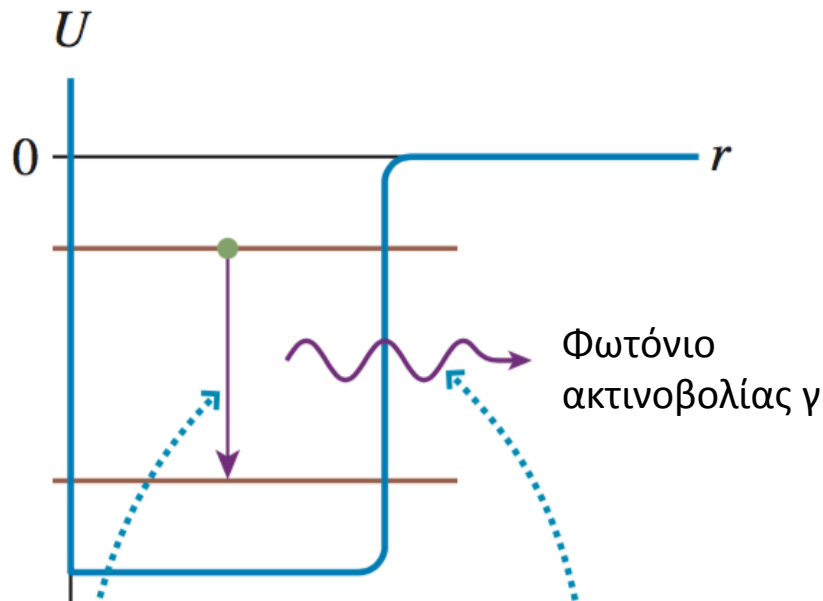
Νεutrίνο: χωρίς φορτίο,  
μάζα  $10^{-6}$  μάζας ηλεκτρονίου

Οσμή (flavor)	Φορτίο
Άνω (Up)	2/3
Κάτω (Down)	-1/3
Χαριτωμένο (Charm)	2/3
Παράξενο (Strange)	-1/3
Ανώτατο (Top)	2/3
Κατώτατο (Bottom)	-1/3



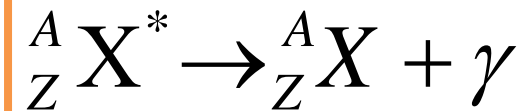
# Είδη ραδιενεργών διασπάσεων

## Διάσπαση $\gamma$



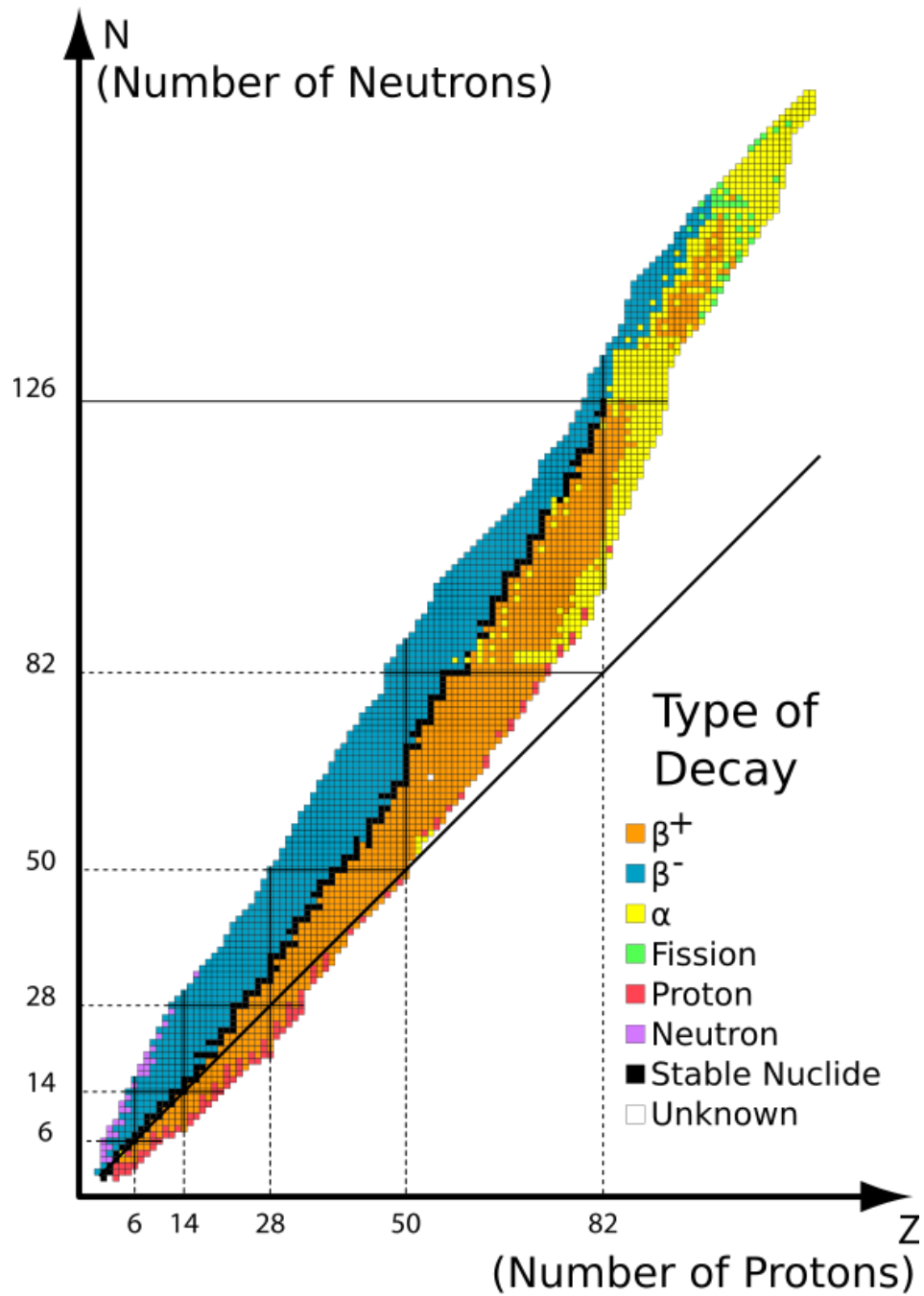
Ένα νουκλεόνιο πραγματοποιεί κβαντικό άλμα σε χαμηλότερο ενεργειακά επίπεδο.

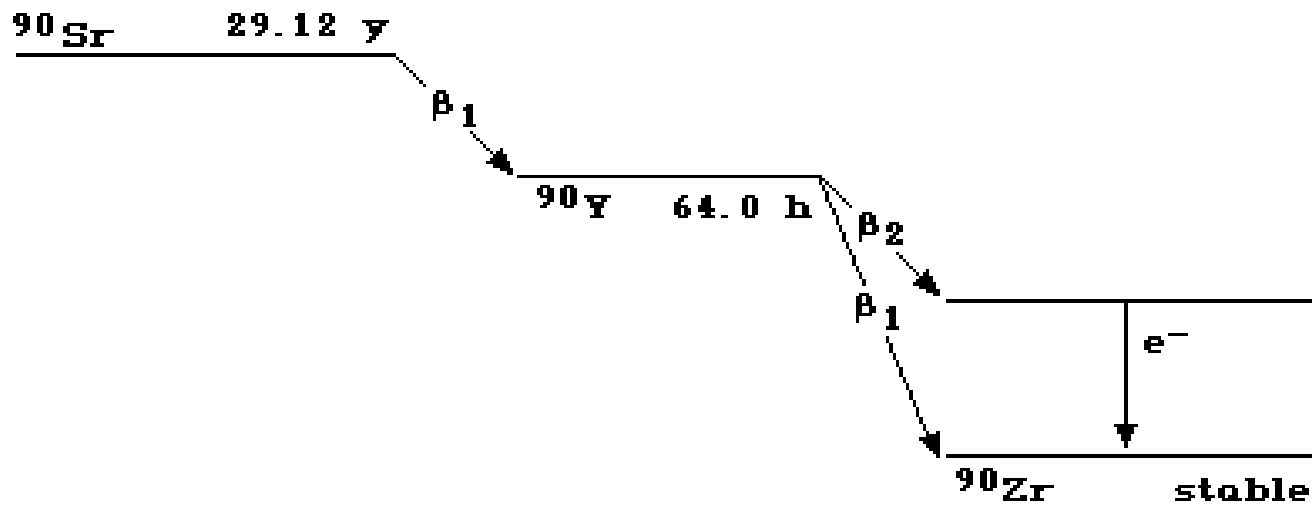
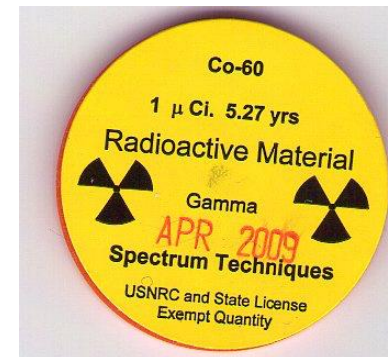
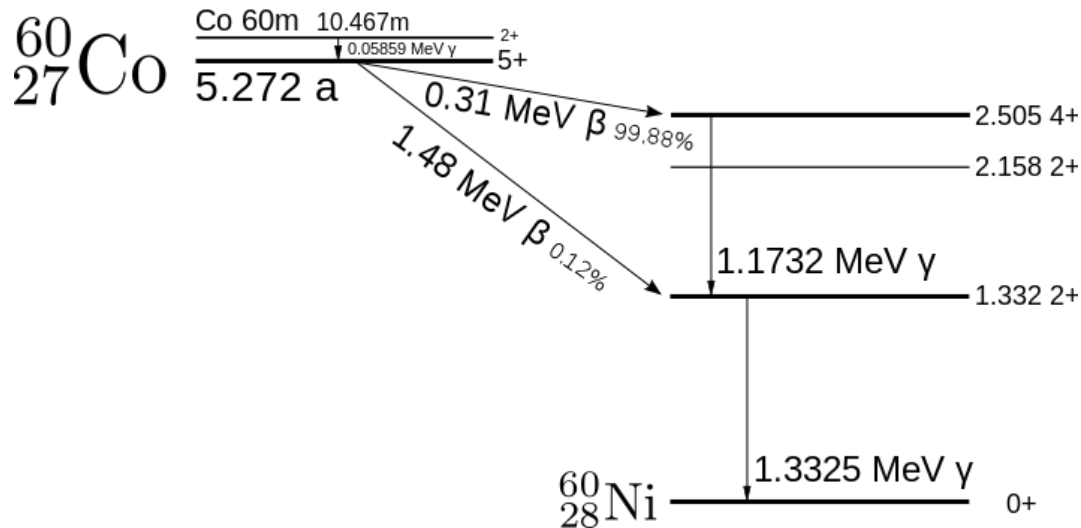
Το άλμα συνοδεύεται από εκπομπή φωτονίου με ενέργεια  $\sim 1$  MeV



Με \* υποδηλώνεται ότι το στοιχείο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση (ασταθής πυρήνας).

Συνήθως οι διεγερμένοι πυρήνες είναι θυγατρικοί πυρήνες που προέκυψαν μετά από  $\alpha$  ή  $\beta$  διάσπαση κάποιου μητρικού πυρήνα.





# Νόμος Ραδιενεργών Διασπάσεων

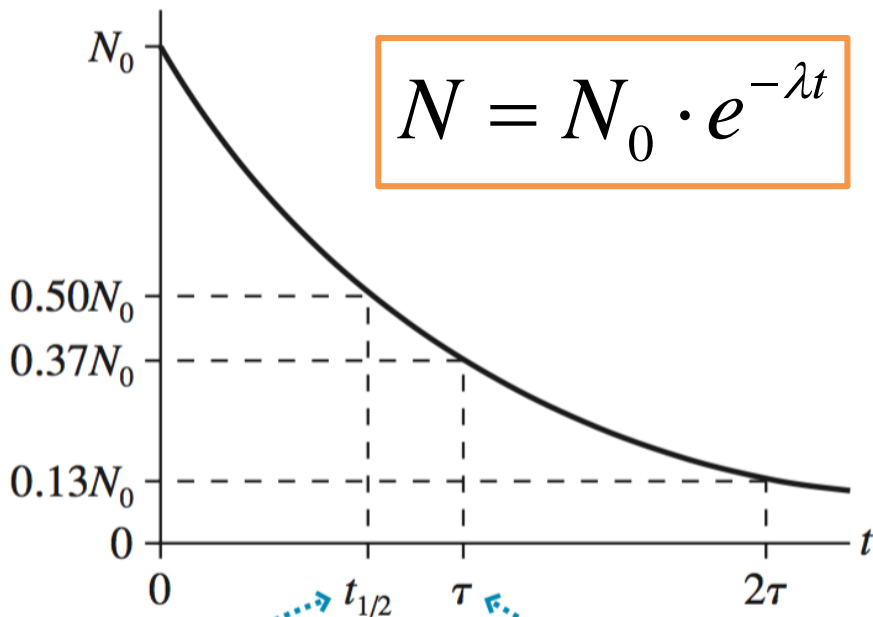
- Για κάθε ραδιενεργό δείγμα υπάρχει **σταθερή πιθανότητα μετασχηματισμού** του σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα
- Πλήθος διασπάσεων σε δεδομένο χρονικό διάστημα ανάλογο του **πλήθους των πυρήνων** και του **χρονικού διαστήματος**

$$dN = -N(t) \cdot \lambda \cdot dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t \Rightarrow$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

- N** Αριθμός πυρήνων που υπάρχουν τη στιγμή t  
**N<sub>0</sub>** Αριθμός πυρήνων που υπάρχουν τη στιγμή t=0  
**λ** Σταθερά μετασχηματισμού



Χρόνος ημιζωής ( $t_{1/2}$ )

Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθεί ο αριθμός των πυρήνων στο 50%

Σταθερά χρόνου ( $\tau$ )

Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μειωθεί ο αριθμός των πυρήνων στο  $1/e$  ( $= 0.37=37\%$ )

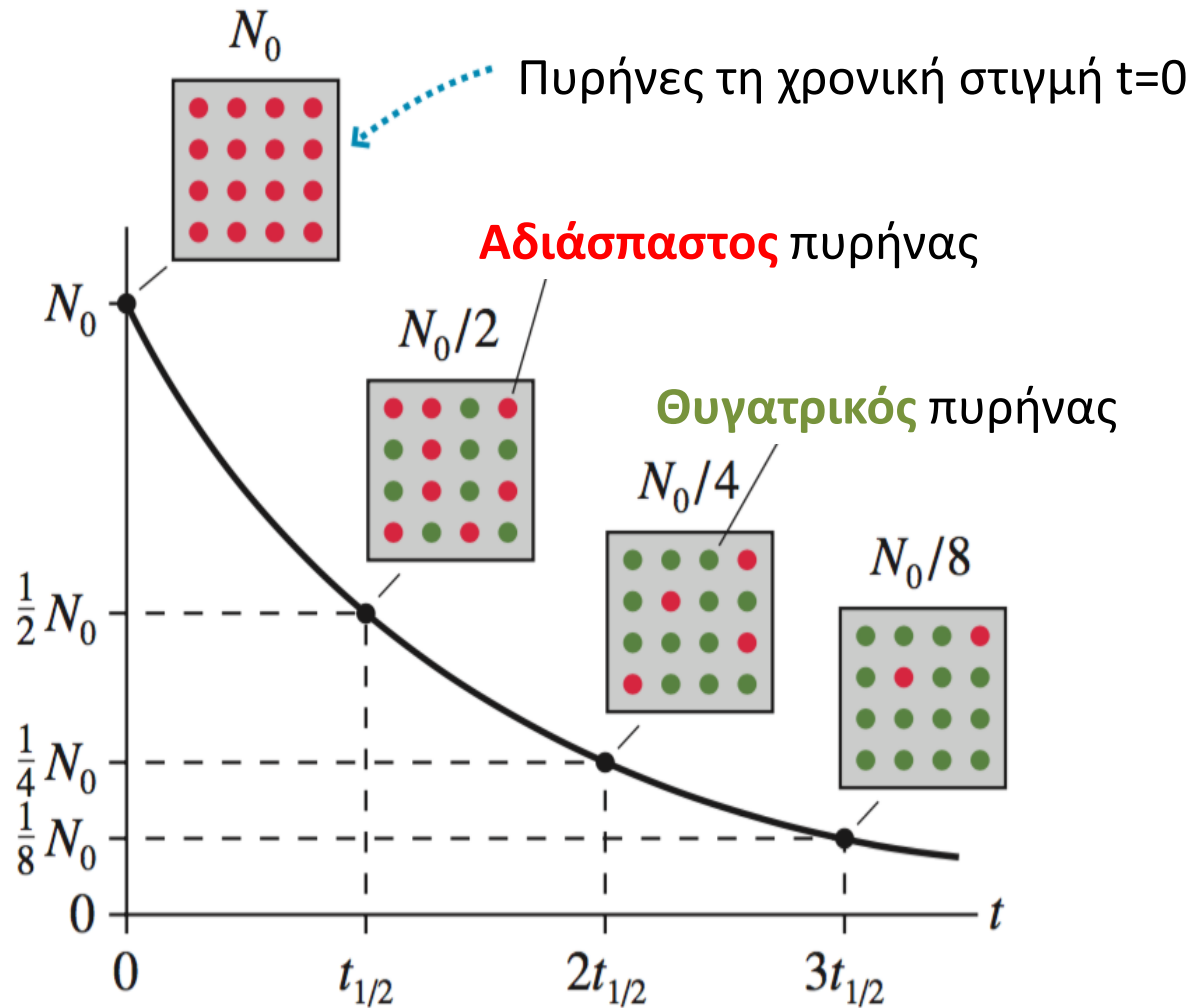
$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1.44 \cdot t_{1/2}$$

Σταθερά χρόνου ( $\tau$ ) είναι η μέση διάρκεια ζωής ενός πυρήνα μέχρι να διασπαστεί

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln(e^{-\lambda t_{1/2}}) \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2} \Rightarrow t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Οι μισοί από τους εναπομείναντες πυρήνες διασπώνται σε  
κάθε χρονικό διάστημα ίσο με  $t_{1/2}$



# Ενεργότητα

- Αριθμός διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου
- Μονάδα μέτρησης:
  - 1 **Becquerel** (Bq) = 1 διάσπαση ανά sec =  $1 \text{ s}^{-1}$
  - 1 **Curie** (Ci) =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda \cdot N = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

# Χρονική συμπεριφορά θυγατρικού ραδιονουκλιδίου

## Μητρικό ραδιονουκλίδιο

- Χρόνος ημιζωής  $T_1$ , σταθερά διάσπασης  $\lambda_1$ , αρχικά  $N_{10}$
- Μετά από χρόνο  $t$ :  $N_1 = N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 t}$

## Θυγατρικό ραδιονουκλίδιο

- Σχηματίζεται με ρυθμό  $\lambda_1 \cdot N_1$  και φθείρεται με ρυθμό  $\lambda_2 \cdot N_2$

- Καθαρός ρυθμός ανάπτυξης  $\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_2 N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) = (\lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t}) \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{(-\lambda_2 t + \lambda_1 t)}]$$



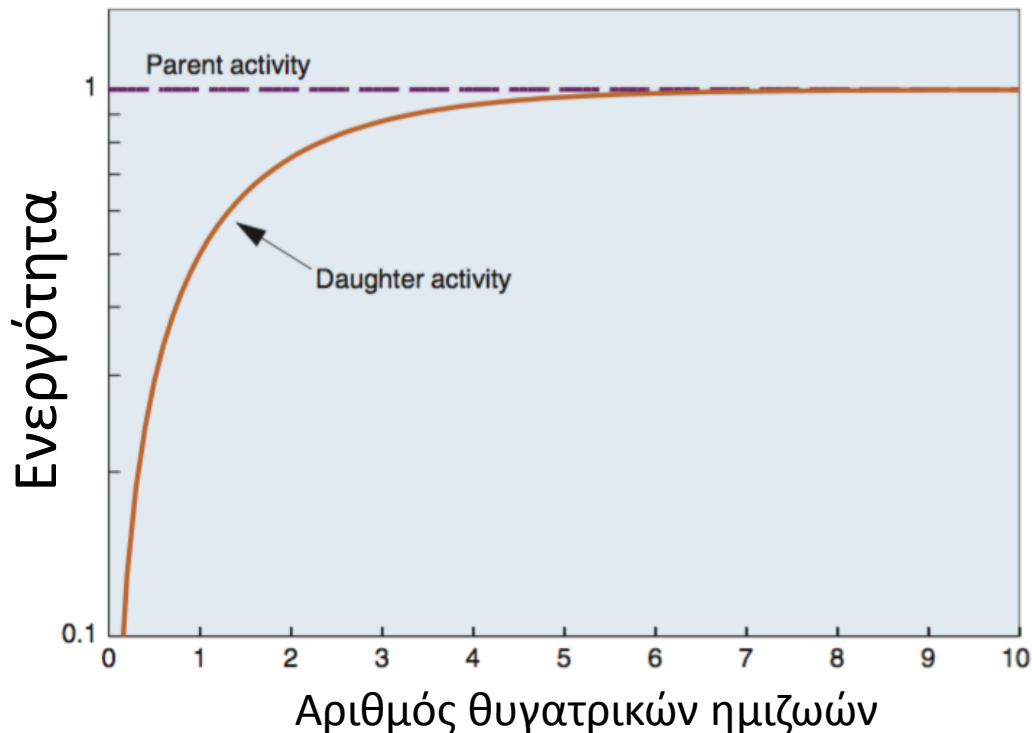
# Χρονική συμπεριφορά θυγατρικού ραδιονουκλιδίου

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_2 N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) = (\lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t}) \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{(-\lambda_2 t + \lambda_1 t)}]$$

$$A_2 = A_1 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{(-\lambda_2 t + \lambda_1 t)}] = A_1 \cdot \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left[ 1 - e^{-0.693 \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} t} \right]$$

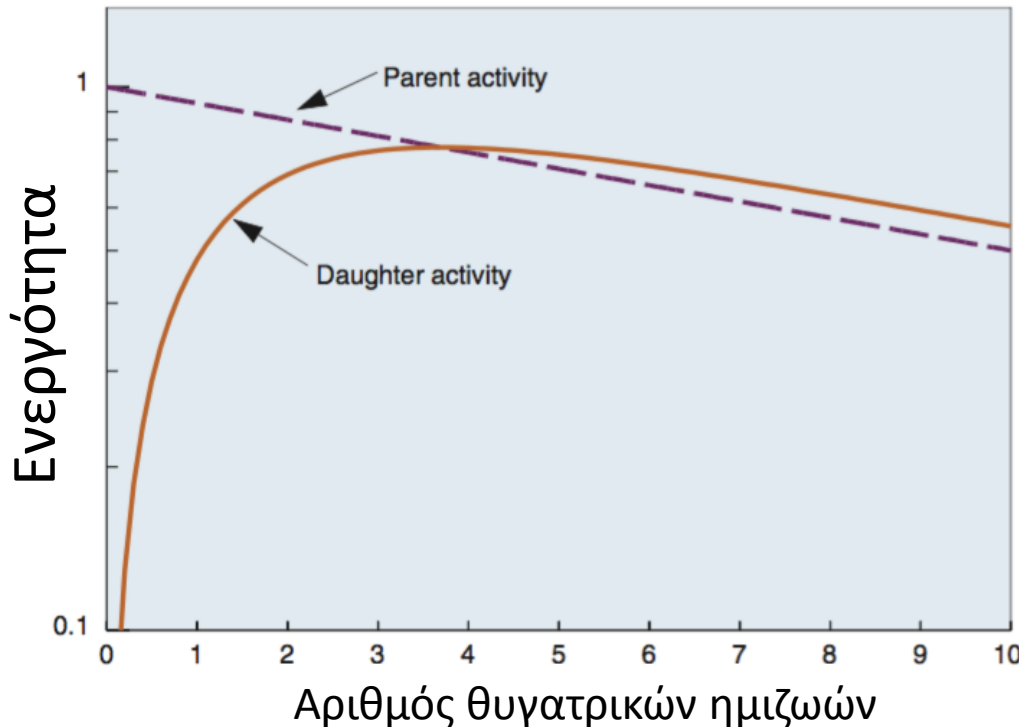
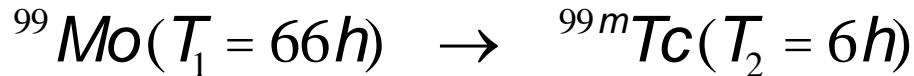
# Αιώνια ισορροπία

- Αν η ημιζωή του μητρικού ραδιονουκλιδίου είναι πολύ μεγάλη ( $\lambda_1 \approx 0$ ) και πολύ μεγαλύτερη από του θυγατρικού



# Μεταβατική ισορροπία

- Αν η ημιζωή του μητρικού ραδιονουκλιδίου είναι μεγαλύτερη από του θυγατρικού



Μέγιστη ενεργότητα  
θυγατρικού όταν

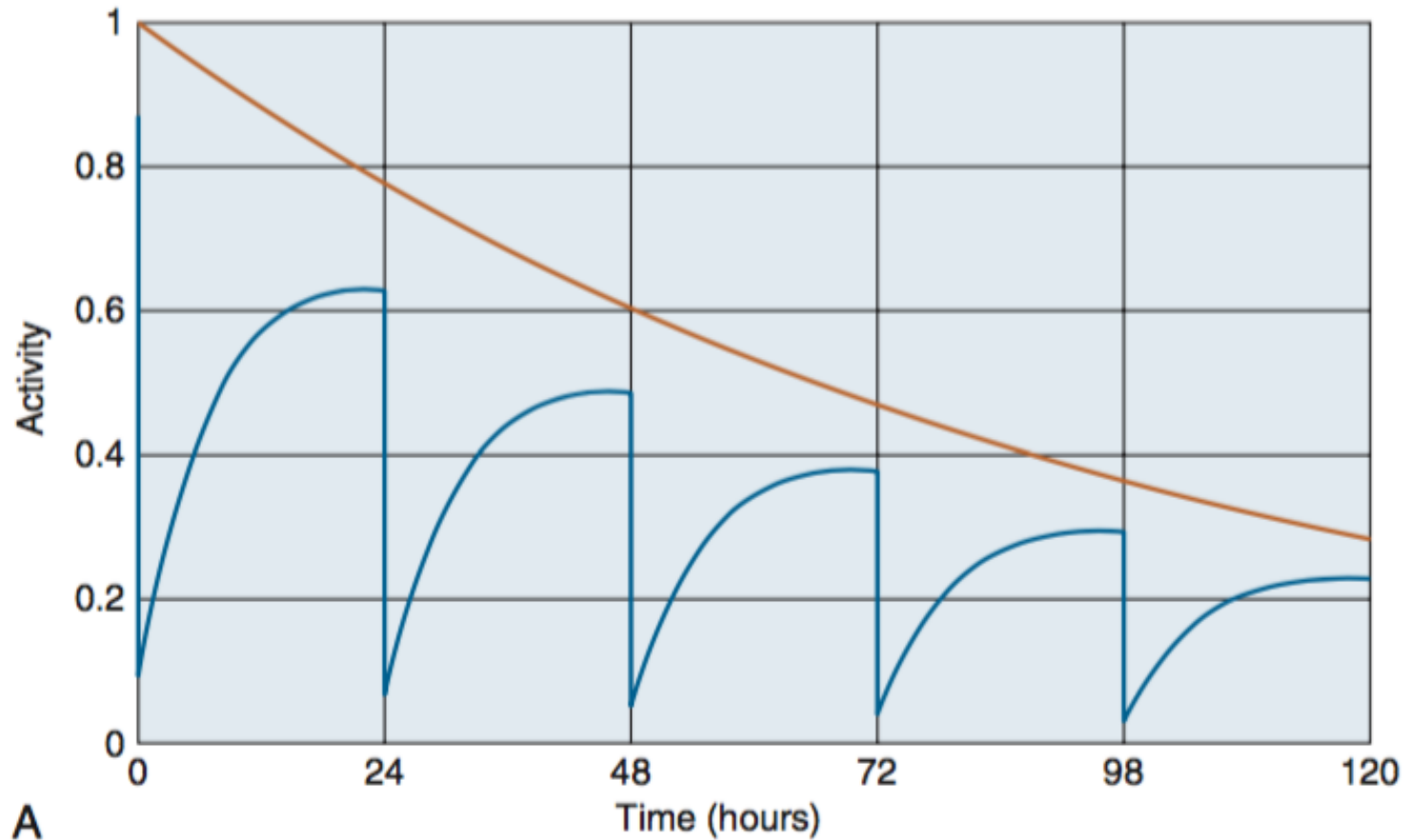
$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1$$

$$t_{\max} = 1.44 \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

Κλάσμα ενεργοτήτων

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1$$

# Μέθοδος άντλησης $^{99m}\text{Tc}$ από $^{99}\text{Mo}$



A