

Η κοιλάδα σταθερότητας των πυρήνων

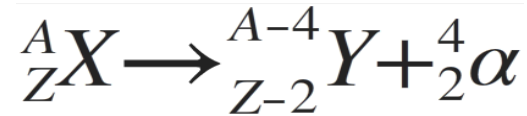


Σταθερότητα των πυρήνων

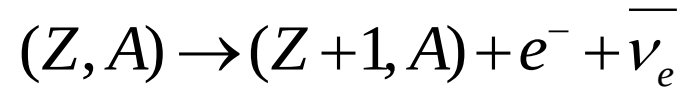
- Όσο μεγαλύτερη η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (δηλαδή όσο χαμηλότερη η μάζα του πυρήνα για δεδομένο A), τόσο πιο σταθερός ο πυρήνας.
- Ερώτηση: Πότε είναι σταθερός ένας πυρήνας με A νουκλεόνια;
Απάντηση: Η σταθερότητα εξαρτάται από το Z και το N (δηλαδή από το πόσα πρωτόνια και νετρόνια υπάρχουν στον πυρήνα). Άρα, θα χρειαστεί διερεύνηση με τον **τύπο του Weizsäcker**.
- **Μη σταθεροί πυρήνες** μεταπίπτουν σε σταθερούς με εκπομπή σωματιδίων (ραδιενεργός διάσπαση α και β). Αλλά υπ' όψιν: η α -διάσπαση συμβαίνει μόνο σε βαρείς πυρήνες ($A > 200$), ενώ η **β -διάσπαση** ($\beta^\pm$, EC) συμβαίνει για όλα τα A .

Διασπάσεις μεταστοιχείωσης

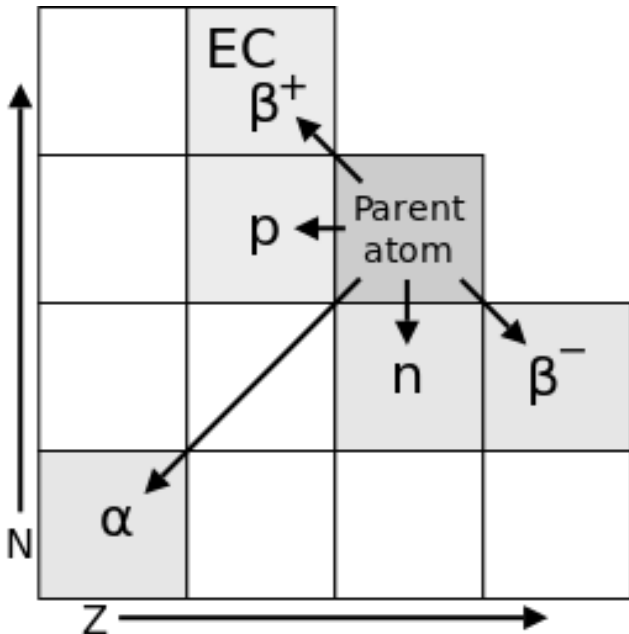
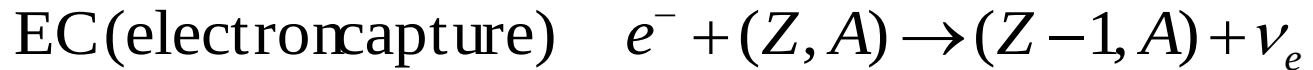
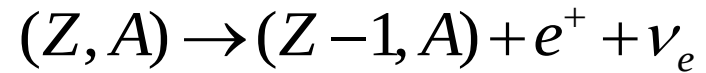
α - decay



β^- -decay



β^+ -decay



**και μετατόπιση στον
χάρτη ισοτόπων**

Σταθερός πυρήνας για δεδομένο A θα είναι αυτός που έχει τη μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο.

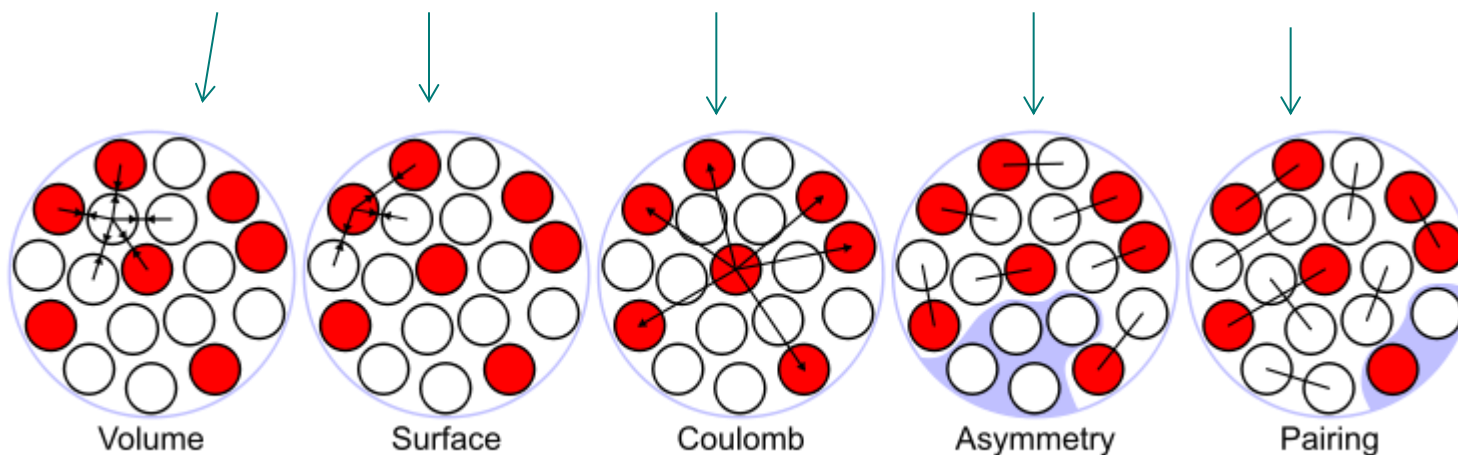
Ενέργεια σύνδεσης πυρήνα

$$B(A, Z) = [ZM_p + NM_n - M(A, Z)]c^2$$



Ημι-εμπειρικός τύπος του Weizsäcker

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N - Z)^2}{A} \pm \delta$$



Διερεύνηση με τον τύπο του Weizsäcker...

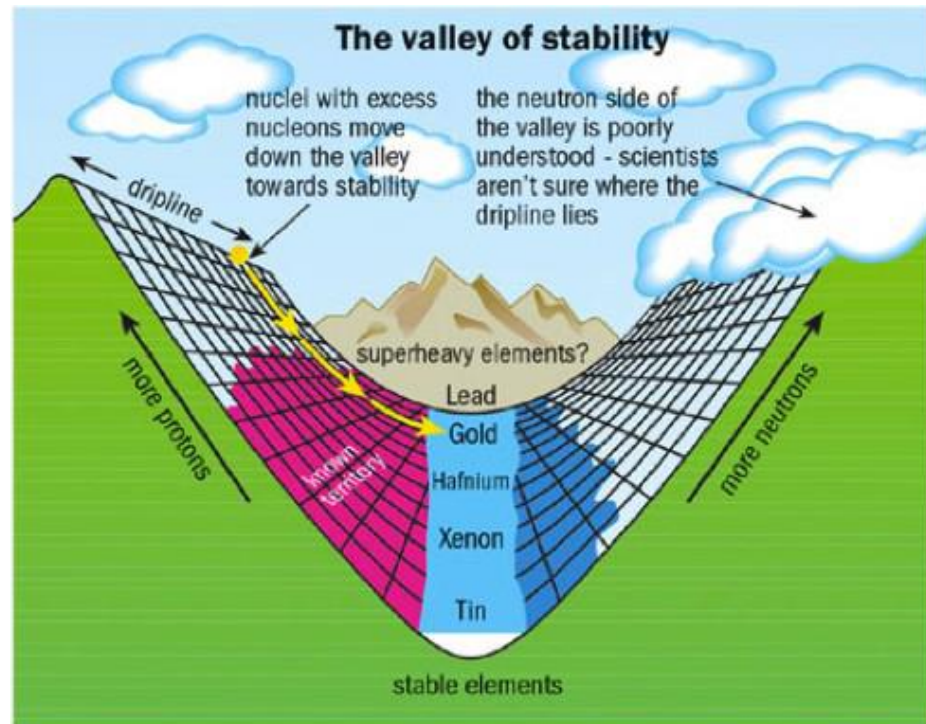
Ξαναγράφουμε τον τύπο
ως συνάρτηση του Z

$$M(A, Z)c^2 = \alpha A + \beta Z + \gamma Z^2 \mp \delta$$

Η εξίσωση αυτή ως προς τη
μεταβλητή Z , είναι **εξίσωση
παραβολής**.

Έχουμε παραβολές
μάζας ισοβαρών
πυρήνων
(για δεδομένη τιμή του A)

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = M_n c^2 - a_V + a_A + \frac{a_S}{A^{1/3}} \\ \beta = -4a_A - (M_n - M_p)c^2 \approx -4a_A \\ \gamma = \frac{4a_A}{A} + \frac{a_C}{A^{1/3}} \end{array} \right.$$



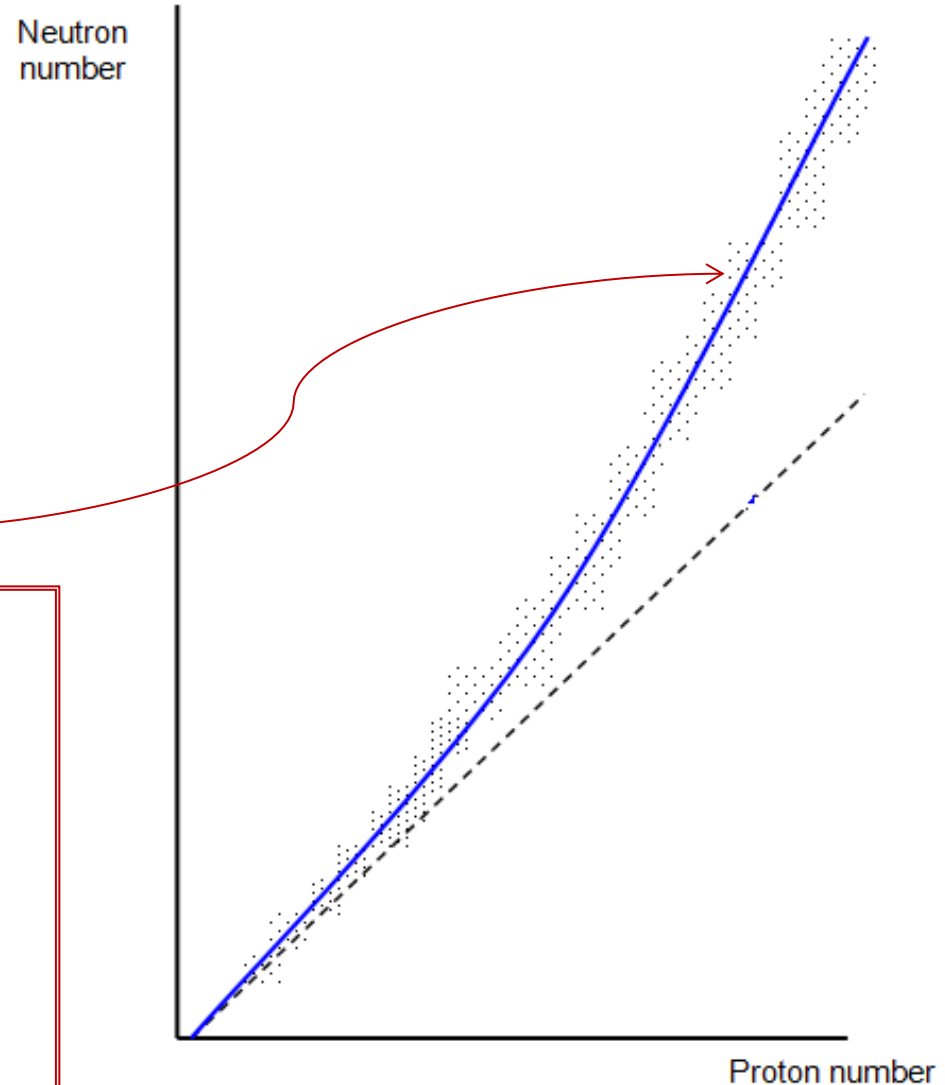
Κοιλάδα της β-σταθερότητας

Για να βρούμε **πότε η μάζα γίνεται ελάχιστη**, διαφορίζουμε την εξίσωση και βρίσκουμε τη ρίζα Z_0 της εξίσωσης που προκύπτει.

$$\frac{\partial}{\partial Z}(Mc^2) = 0 \longrightarrow \beta + 2\gamma Z_0 = 0$$

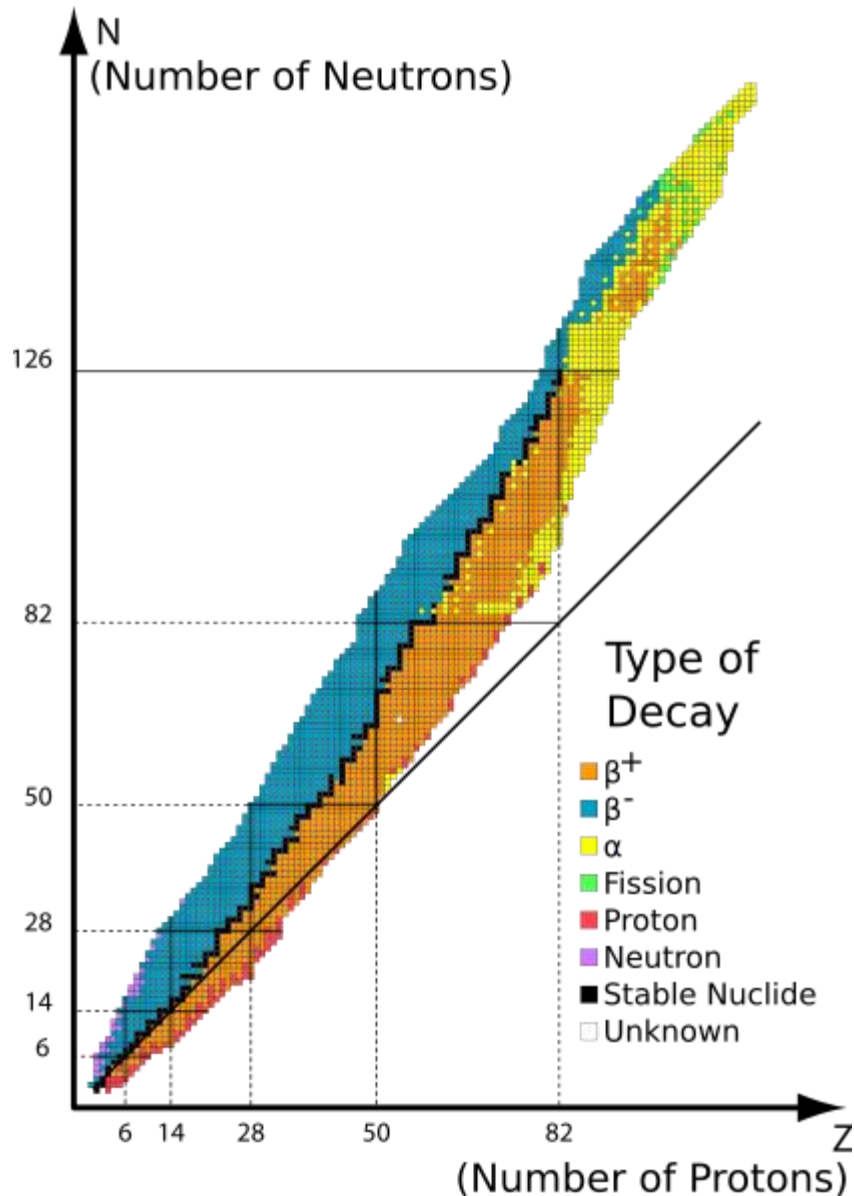
$$Z_0 = -\frac{\beta}{2\gamma} \approx \frac{A/2}{1 + \frac{1}{4}(a_C/a_A)A^{2/3}}$$

Η Z_0 (που συνήθως δεν είναι ακέραιος αριθμός) είναι η τιμή του αριθμού πρωτονίων που, για δεδομένο A , ο πυρήνας έχει την **πιο μικρή μάζα** άρα είναι ο **πιο σταθερός**.



Η καμπύλη που δίνει την τιμή του $Z(A)$ για την οποία έχουμε β-σταθερούς πυρήνες είναι στον πυθμένα της λεγόμενης “κοιλάδας της β-σταθερότητας”.

Κοιλάδα της β-σταθερότητας



Αντικαθιστώντας τις τιμές των a_c και a_A , στη σχέση:

$$Z_0 = -\frac{\beta}{2\gamma} \approx \frac{A/2}{1 + \frac{1}{4}(a_c / a_A)A^{2/3}}$$

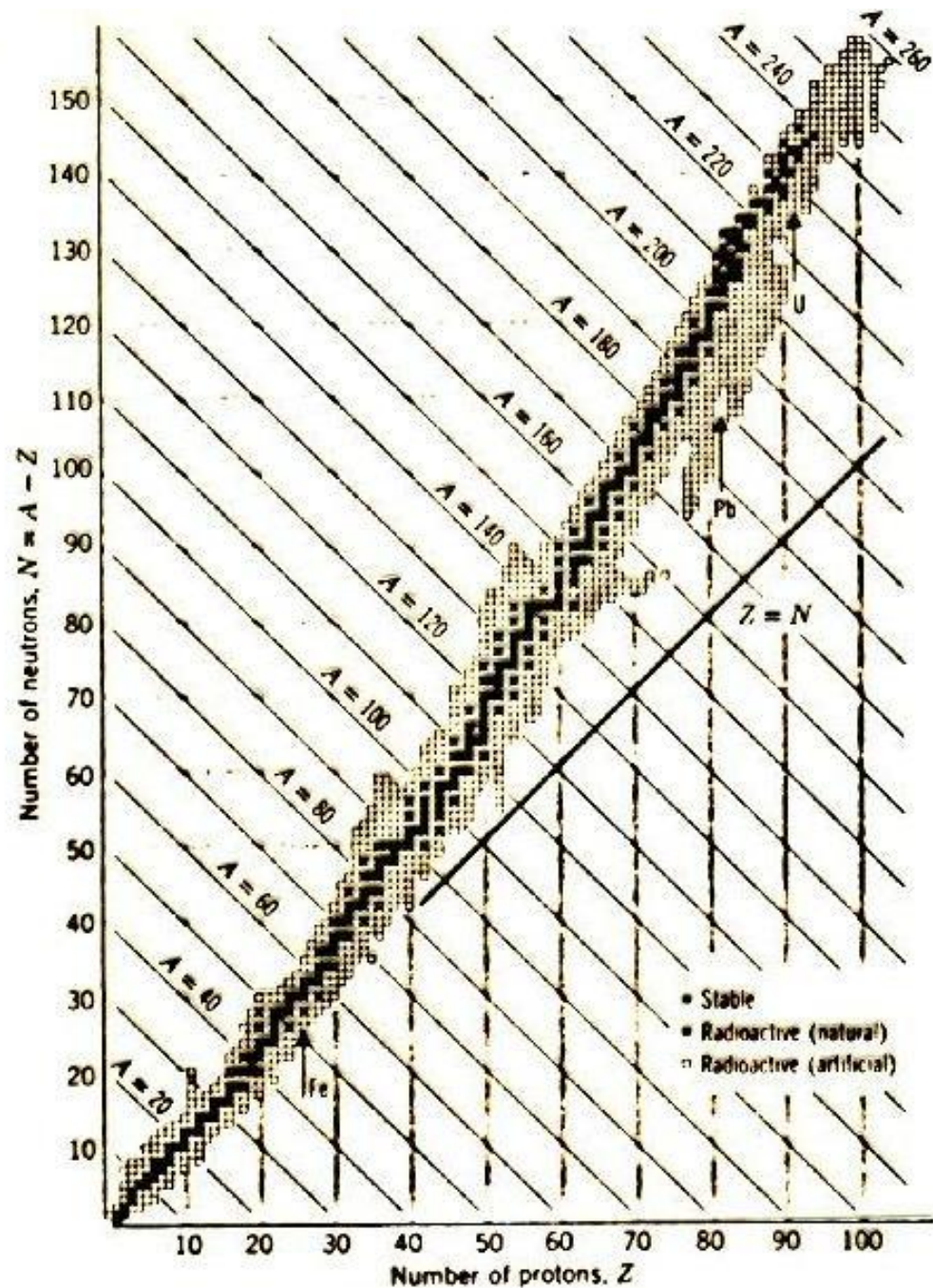
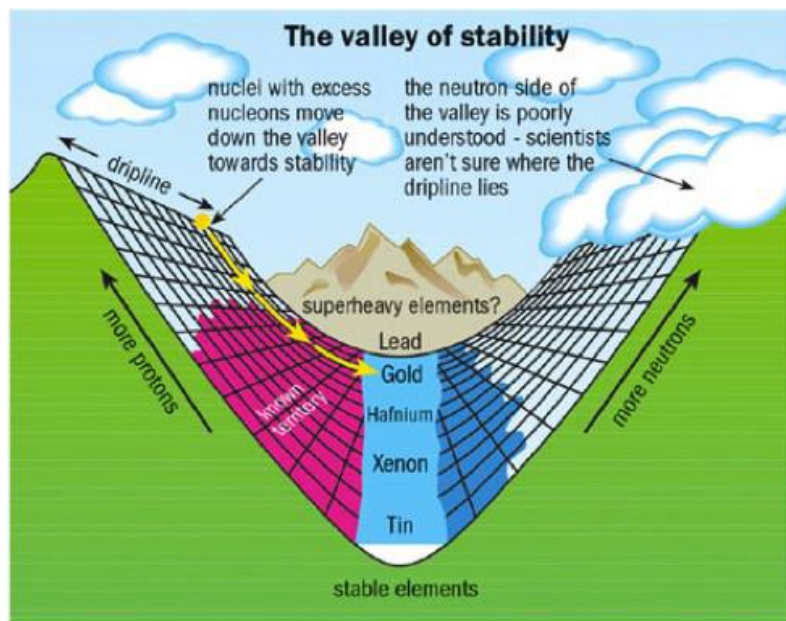
παίρνουμε για το Z ελάχιστης μάζας:

$$Z_0 \approx \frac{A/2}{1 + 0.0077 A^{2/3}}$$

Από τη σχέση αυτή και από την $A = Z_0 + N$ μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα στο επίπεδο N-Z με τη **γραμμή σταθερότητας** των πυρήνων, που βρίσκεται στον πυθμένα της **κοιλάδας σταθερότητας**. Η γραμμή αυτή ακολουθεί ακριβώς τη γραμμή που λαμβάνουμε πειραματικά.

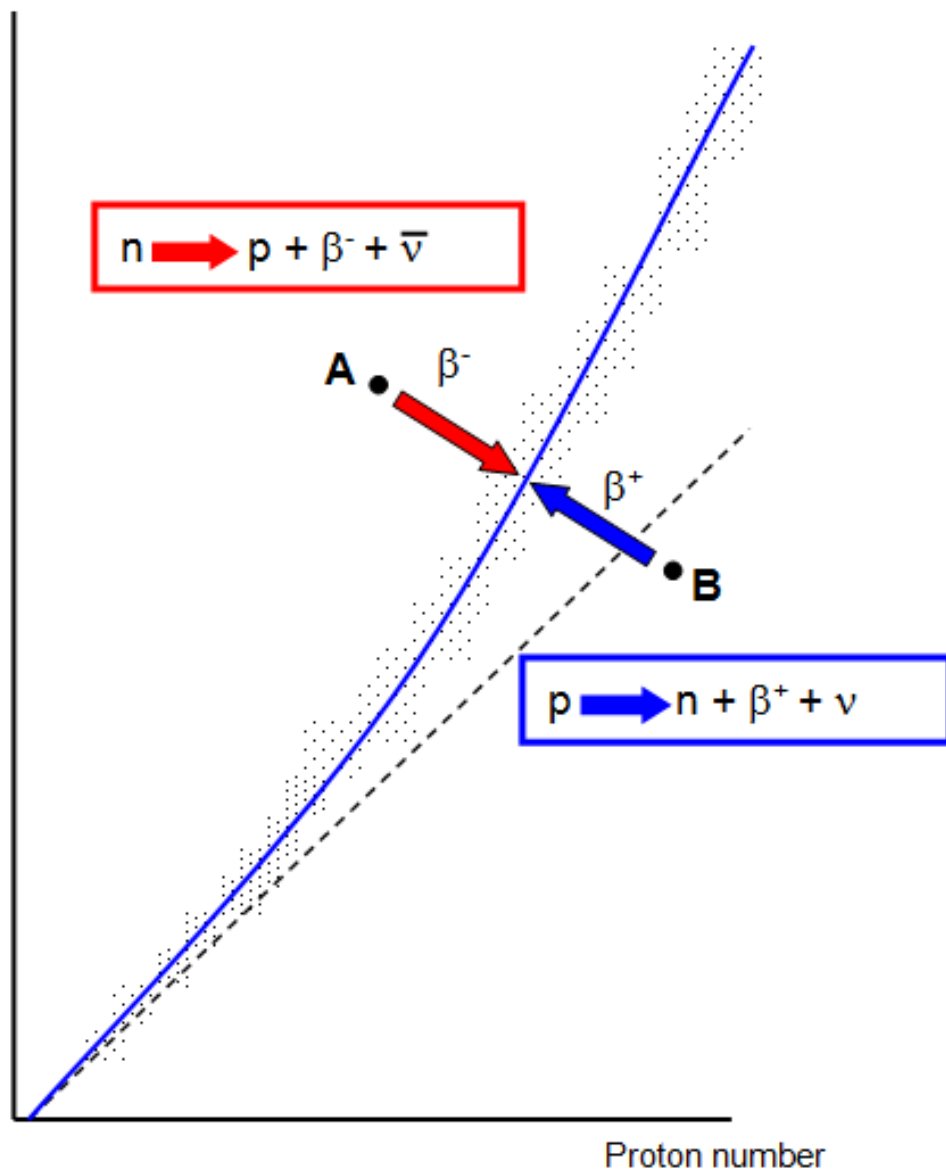
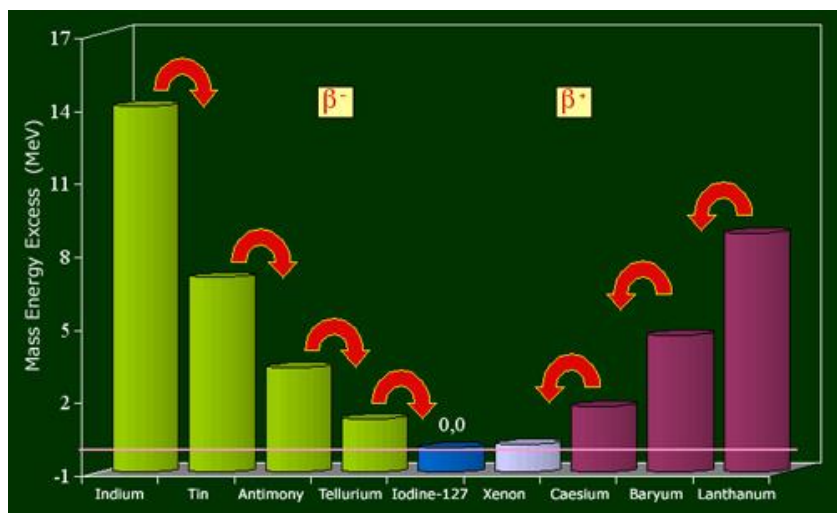
Ένα πρώτο ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι το κλάσμα στην παραπάνω σχέση έχει παρονομαστή πάντα μεγαλύτερο της μονάδας, άρα το Z_0 είναι πάντα μικρότερο του $A/2$, δηλαδή το Z_0 είναι πάντα μικρότερο του N.

Ισοβαρείς της κοιλάδας β-σταθερότητας



β-διασπάσεις ασταθών πυρήνων και μετατόπιση προς τον πυθμένα της κοιλιάδας σταθερότητας

Neutron
number



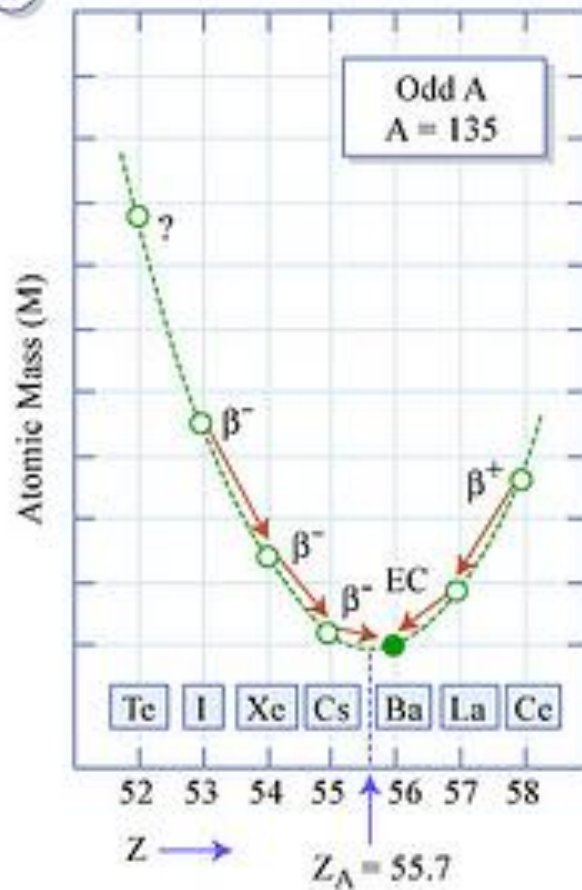
β-διασπάσεις ισοβαρών πυρήνων

Δύο περιπτώσεις:

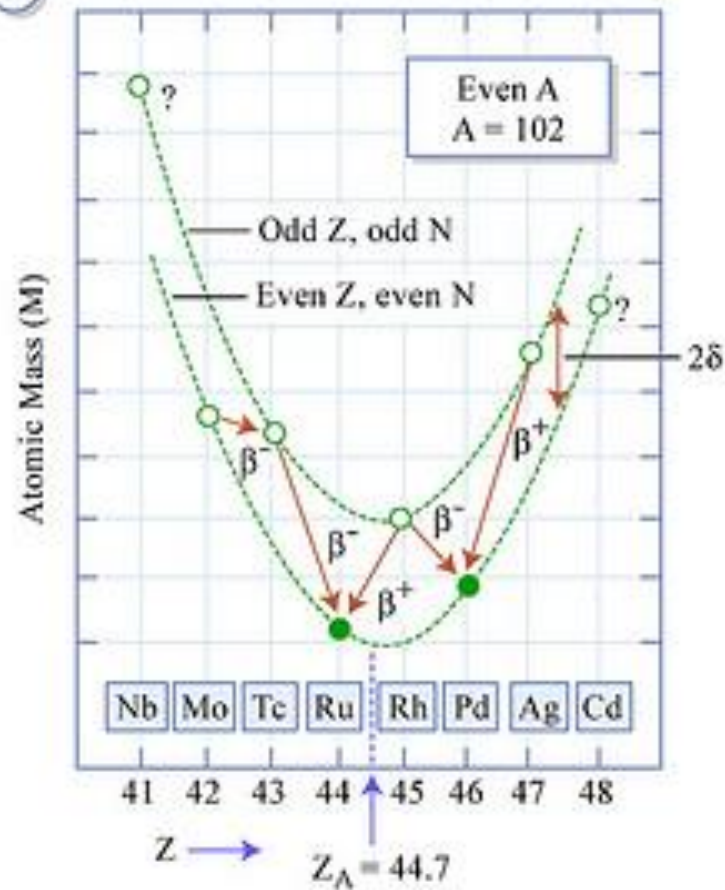
α) περιττός A (απλή παραβολή αφού $\delta = 0$)

β) άρτιος A (διπλή παραβολή αφού $\delta = \pm f$)

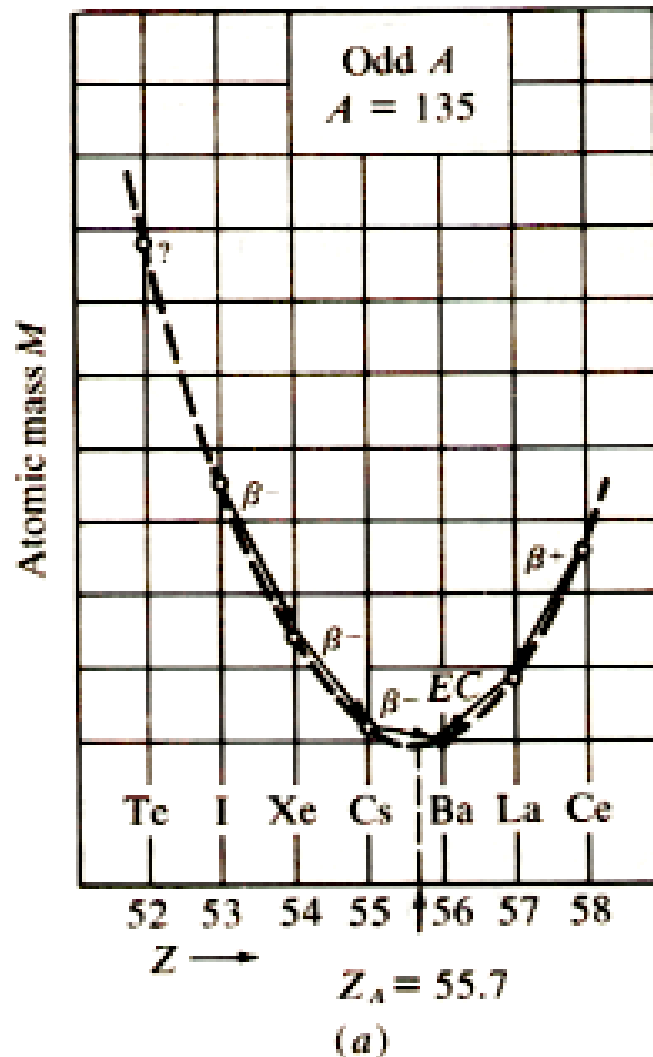
(A)



(b)



Για ισοβαρείς πυρήνες με **περιττό- A** , έχουμε $\delta = 0$, και η εξίσωση για τη $M(A, Z)$ δίνει **μια απλή παραβολή**, με ένα μόνο σταθερό πυρήνα (σχήμα α, π.χ. για $A=135$, είναι το Βάριο).



Αν ισχύει:

$$M(A, Z) > M(A, Z+1)$$

τότε συμβαίνει **β^- -διάσπαση**
(εκπομπή ηλεκτρονίου) και
μεταστοιχείωση **από Z σε $Z+1$**

$$M(A, Z) > M(A, Z-1)$$

τότε συμβαίνει **EC** (electron
capture, αρπαγή ηλεκτρονίου) και
μεταστοιχείωση **από Z σε $Z-1$**

$$M(A, Z) > M(A, Z-1) + 2m_e$$

τότε συμβαίνει **β^+ -διάσπαση**
(εκπομπή ποζιτρονίου) και
μεταστοιχείωση **από Z σε $Z-1$**

Για ισοβαρείς με **άρτιο- A** , έχουμε τον όρο $\pm\delta$, και η εξίσωση για τη $M(A, Z)$ δίνει **δύο παραβολές**, που διαφέρουν κατά 2δ (σχήμα *b*, π.χ. για $A=102$).

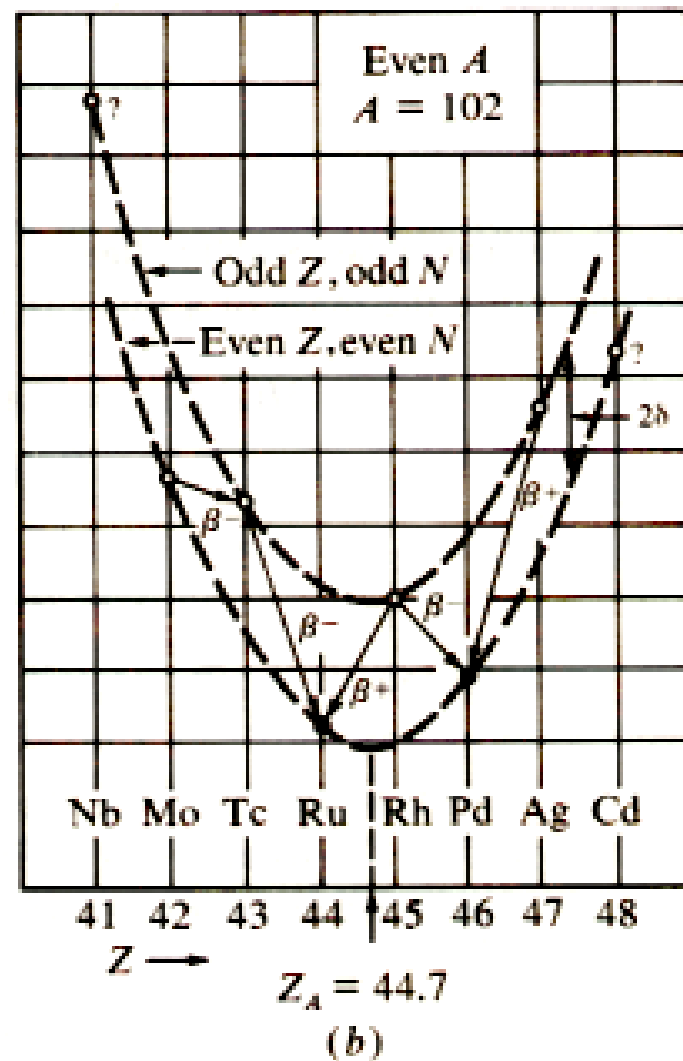
Σε εξάρτηση με την καμπυλότητα των παραβολών και την απόσταση 2δ , μπορούν να υπάρχουν περισσότεροι από ένας σταθεροί ισοβαρείς πυρήνες (π.χ. Ru, Pd).

Το **σχήμα (b)** δείχνει ότι υπάρχει περίπτωση σε μερικούς περιττούς-περιττούς πυρήνες να ισχύει και το:

$$M(A, Z) > M(A, Z+1)$$

$$\text{και το: } M(A, Z) > M(A, Z-1)$$

οπότε είναι δυνατή η β -διάσπαση και με εκπομπή ηλεκτρονίου, και με εκπομπή ποζιτρονίου, όπως και γίνεται.



Δύο άλλα παραδείγματα

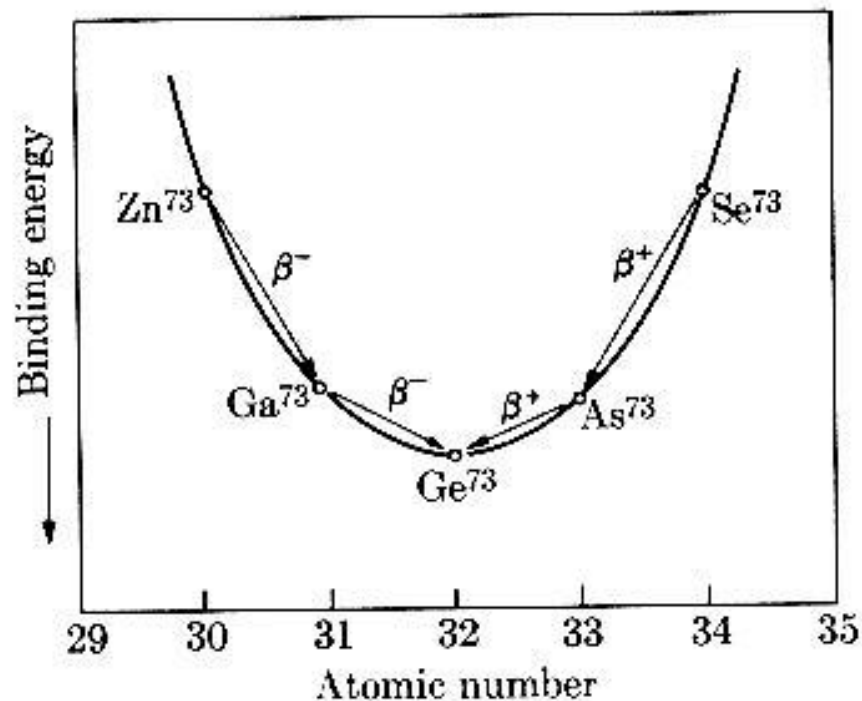


FIG. 17-9. Binding energies and decay properties of nuclides of odd mass number ($A = 73$).

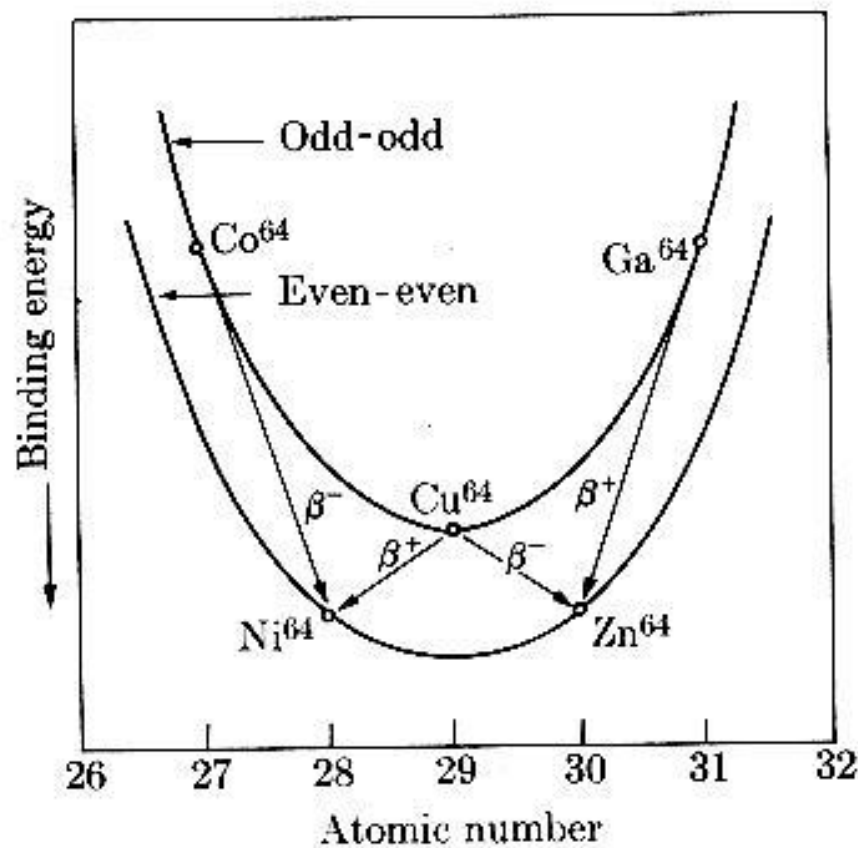


FIG. 17-10. Binding energies and decay properties of nuclides of even mass number ($A = 64$).

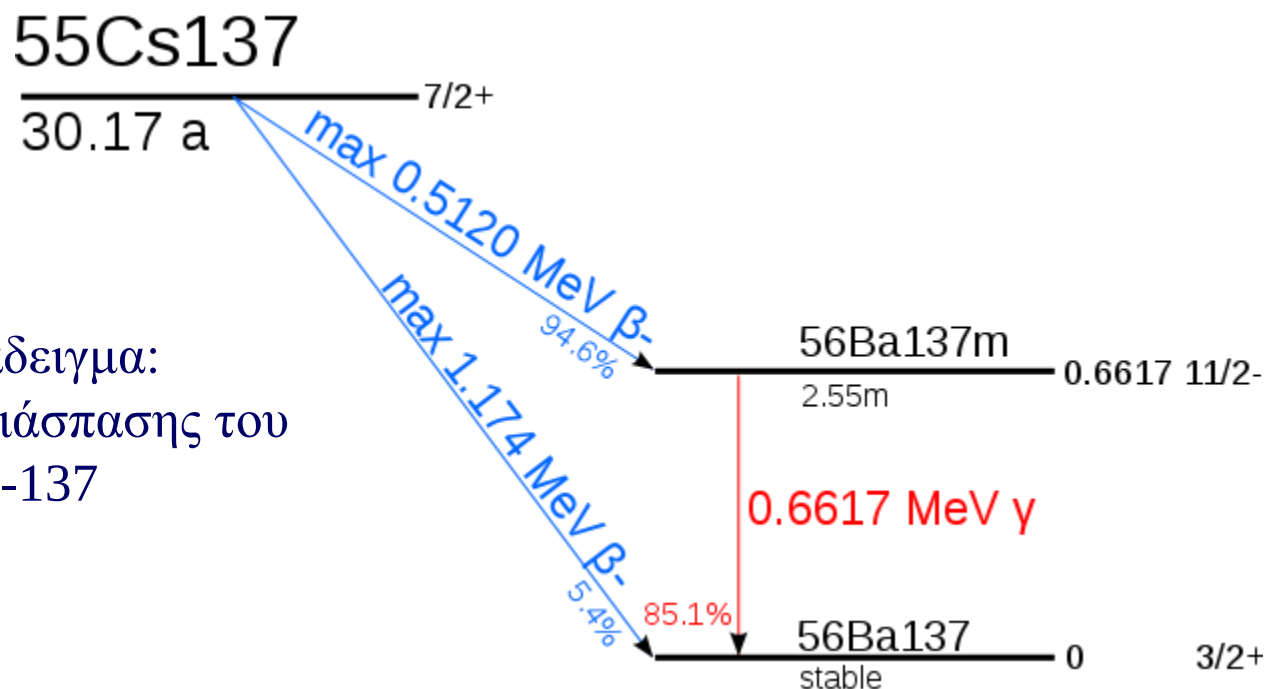
Οι τρεις μορφές της β-διάσπασης

$$\beta^- \text{ -decay} \quad (Z, A) \rightarrow (Z+1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\beta^+ \text{ -decay} \quad (Z, A) \rightarrow (Z-1, A) + e^+ + \nu_e$$

$$\text{EC (electron capture)} \quad e^- + (Z, A) \rightarrow (Z-1, A) + \nu_e$$

Παράδειγμα:
Το σχήμα διάσπασης του
Cs-137



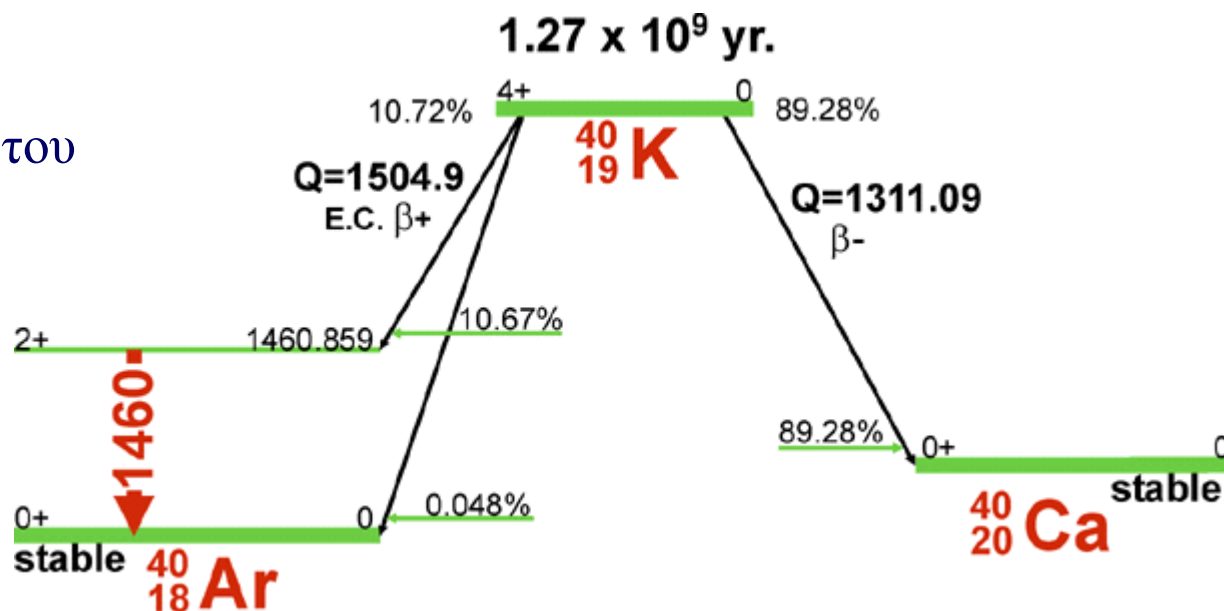
Οι τρεις μορφές της β-διάσπασης

$$\beta^- \text{ -decay} \quad (Z, A) \rightarrow (Z+1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\beta^+ \text{ -decay} \quad (Z, A) \rightarrow (Z-1, A) + e^+ + \nu_e$$

$$\text{EC(electron capture)} \quad e^- + (Z, A) \rightarrow (Z-1, A) + \nu_e$$

Παράδειγμα:
Το σχήμα διάσπασης του
Καλίου-40

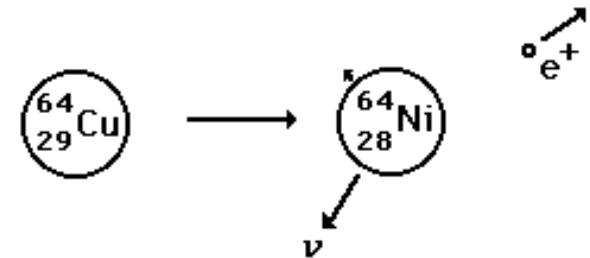
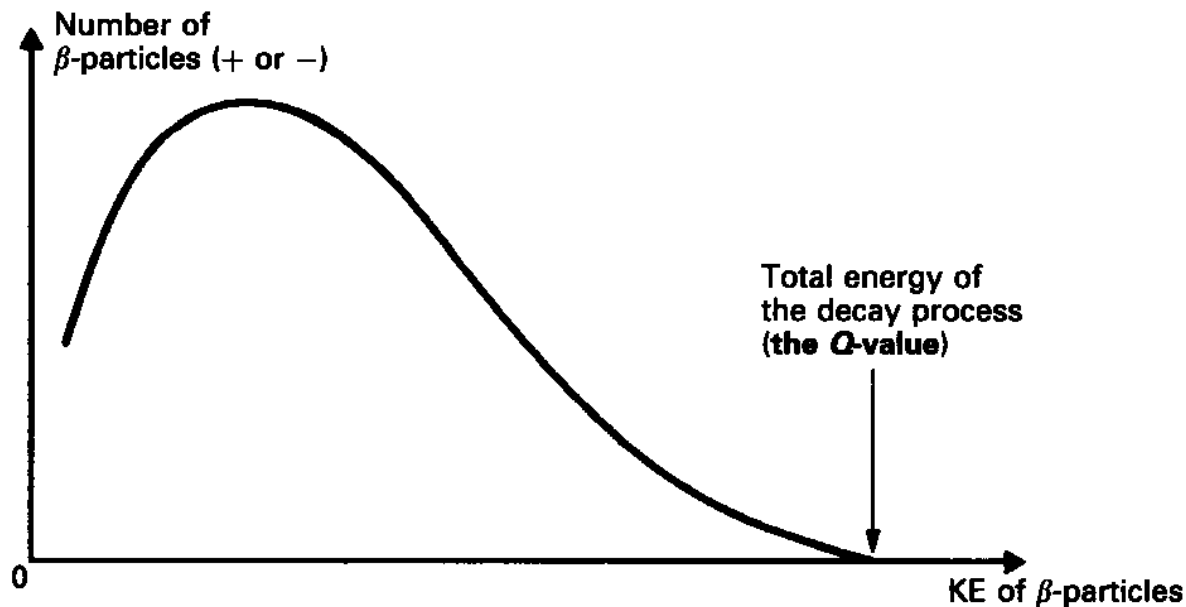


Φάσμα της β-διάσπασης

$$\beta^- \text{ -decay} \quad (Z, A) \rightarrow (Z+1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\beta^+ \text{ -decay} \quad (Z, A) \rightarrow (Z-1, A) + e^+ + \nu_e$$

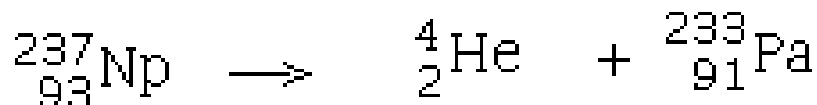
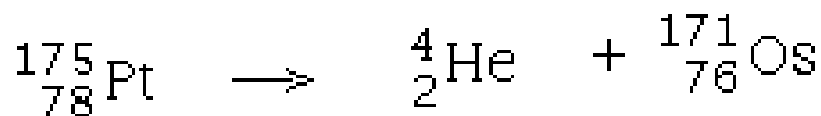
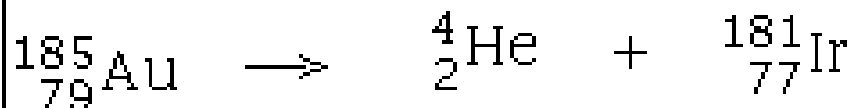
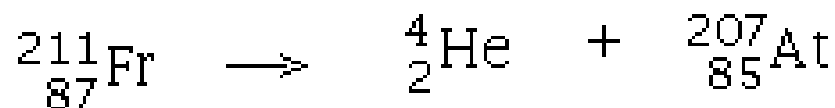
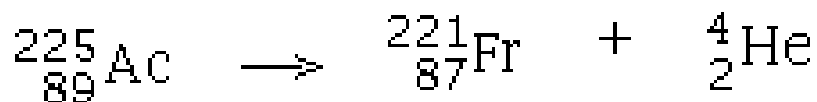
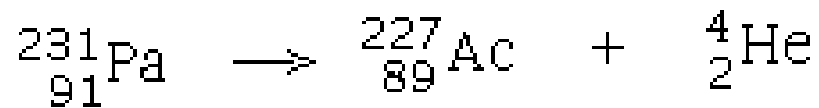
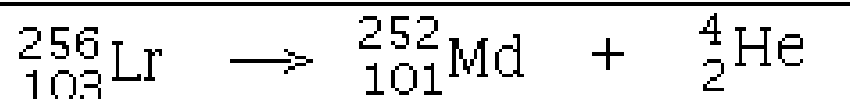
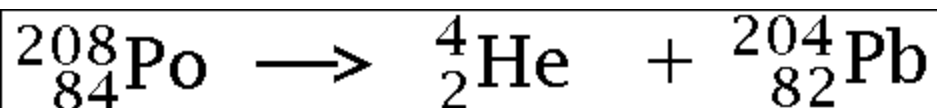
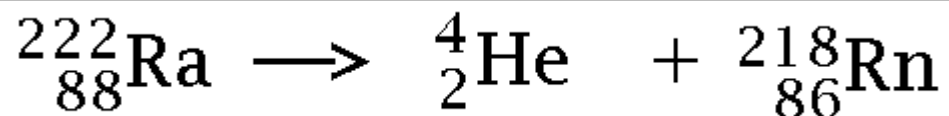
$$\text{EC (electron capture)} \quad e^- + (Z, A) \rightarrow (Z-1, A) + \nu_e$$



Το φάσμα των βήτα είναι συνεχές λόγω της εκπομπής και ενός (αντι-)νετρίνο

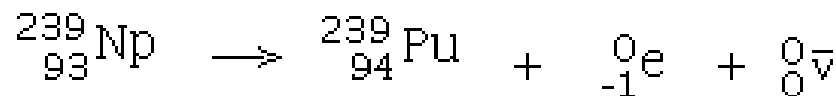
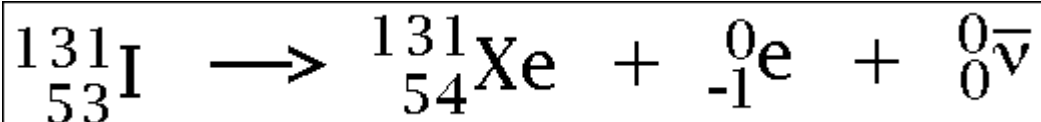
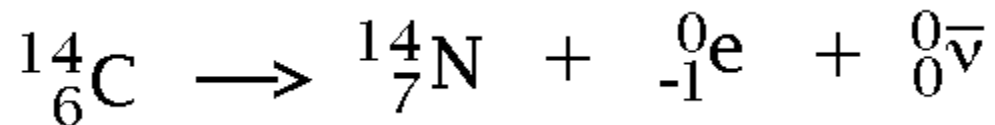
Writing Alpha and Beta Decay Equations

Alpha Decay



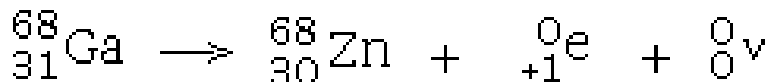
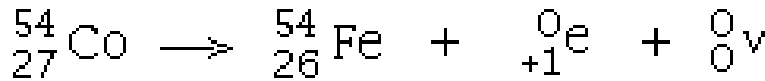
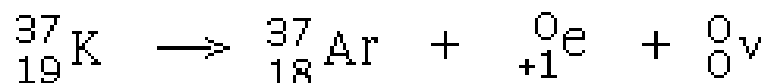
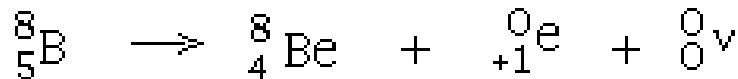
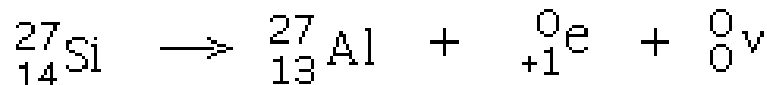
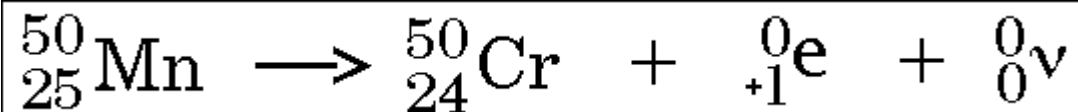
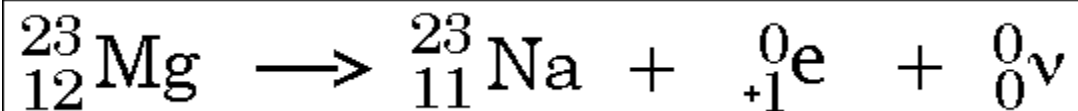
Writing Alpha and Beta Decay Equations

Beta Decay



Writing Positron Decay and Electron Capture Equations

Positron Decay



Writing Positron Decay and Electron Capture Equations

Electron Capture

