



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

# ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ακαδημαϊκό Έτος 2021-2022

Ευστάθιος Στυλιάρης

Δευτέρα 14:00-16:00

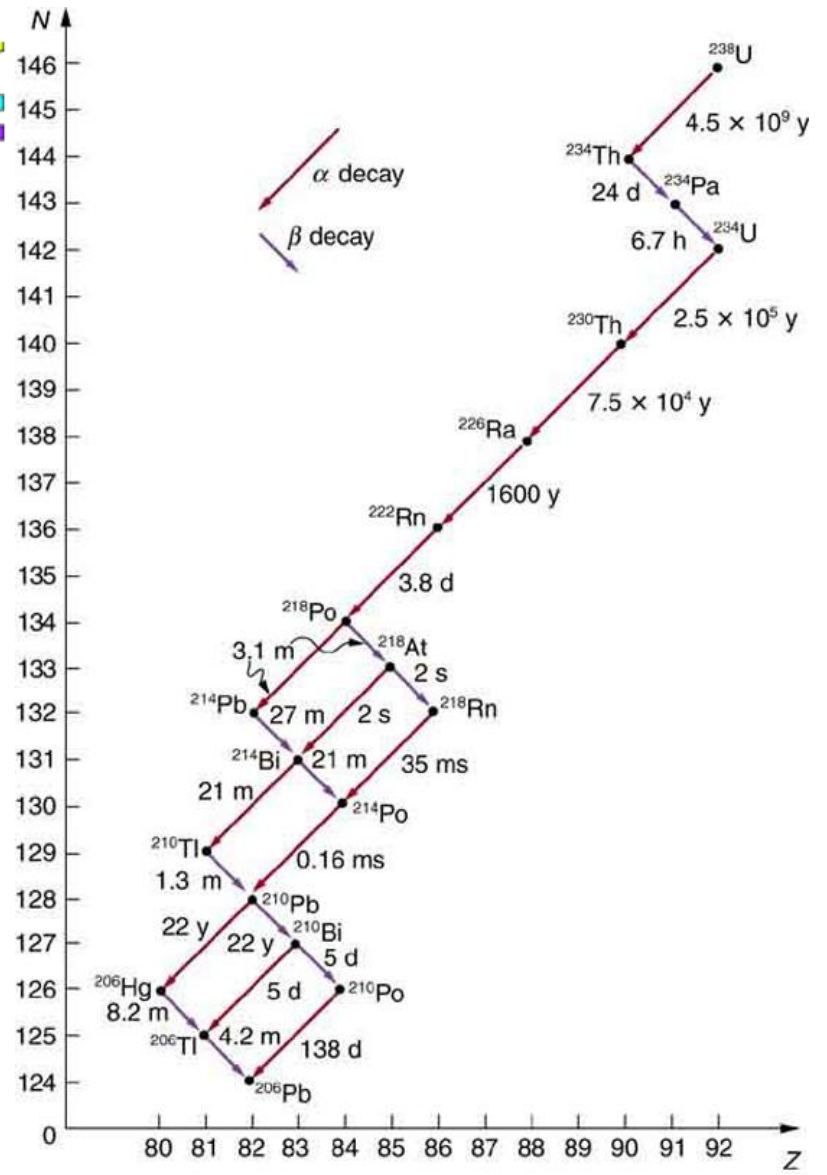
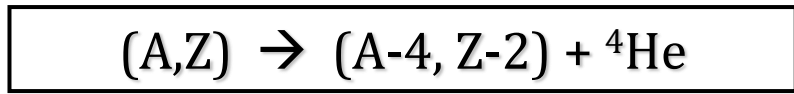
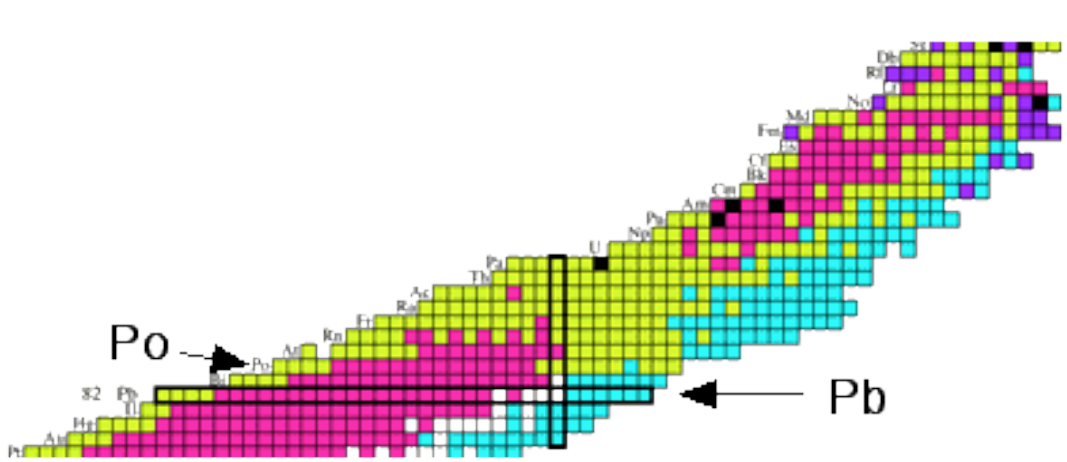


# ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ακαδημαϊκό Έτος 2021-2022  
Ευστάθιος Στυλιάρης

- Ενέργεια κατά την  $\alpha$ -διάσπαση
- Θεωρία της  $\alpha$ -διάσπασης
- Χρόνοι ημιζωής  $\alpha$ -ραδιενεργών
- Αυθόρμητη Σχάση

# Διάσπαση α



# Διάσπαση $\alpha$

2																					
101																					
100																					
99																					
98																					
97																					
156																					
154																					
152																					
150																					
136																					
138																					
140																					
142																					
144																					
146																					
148																					
	Md	Md245	Md246	Md247	Md248	Md249	Md250	Md251	Md252	Md253	Md254	Md255	Md256	Md257							
	+2+3 [258]	0.35 s (7/2) *	1.0 s	1.12 s	7 s	24 s	52 s	4.0 m	2.3 m	6 m	10 m	27 m (7/2-)	78.1 m (0,-1,-)	5.52 h (7/2-)							
	$\alpha$	*	$\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC	EC	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha, sf, \dots$							
	Fm	Fm242	Fm243	Fm244	Fm245	Fm246	Fm247	Fm248	Fm249	Fm250	Fm251	Fm252	Fm253	Fm254	Fm255	Fm256					
	+3 [257]	0.8 ms 0+	0.18 s	3.3 ms 0+	4.2 s	1.1 s 0+	35 s	36 s 0+	2.6 m (7/2+)	30 m 0+	5.30 h (9/2-)	25.39 h 0+	3.00 d 1/2+	3.240 h 0+	20.07 h 7/2+	157.6 m 0+					
	sf	EC, $\alpha, sf, \dots$	sf	$\alpha, sf$	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$					
	Es	Es240	Es241	Es242	Es243	Es244	Es245	Es246	Es247	Es248	Es249	Es250	Es251	Es252	Es253	Es254	Es255				
	+3 [252]		9 s	40 s	21 s	37 s	1.1 m (3/2-)	7.7 m (4,-6+)	35.7 h (7/2+)	27 m (2,-0+)	102.2 m 7/2(+)	8.6 h (6+)	33 h (3/2-)	471.7 d (5-)	20.47 d 7/2+	275.7 d (7+)	39.8 d (7/2+)				
	$\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\beta, \alpha, \dots$	$\alpha, sf$	EC, $\beta, \alpha, \dots$	EC, $\beta, \alpha, \dots$	$\beta, \alpha, sf, \dots$				
	Cf	Cf237	Cf238	Cf239	Cf240	Cf241	Cf242	Cf243	Cf244	Cf245	Cf246	Cf247	Cf248	Cf249	Cf250	Cf251	Cf252	Cf253	Cf254		
	+3 [251]	2.1 s	21 ms 0+	39 s	1.06 m 0+	3.78 m	0+	10.7 m (1/2+)	19.4 m 0+	45.0 m (5/2+)	35.7 h 0+	3.11 h (7/2+)	333.5 d 0+	351 y 9/2-	13.08 y 0+	898 y 1/2+	2.645 y 0+	17.81 d (7/2+)	60.5 d 0+		
	sf	sf	$\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	$\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha$	$\alpha, sf$	$\beta, \alpha$	$\alpha, sf$		
	Bk	Bk235	Bk236	Bk237	Bk238	Bk239	Bk240	Bk241	Bk242	Bk243	Bk244	Bk245	Bk246	Bk247	Bk248	Bk249	Bk250	Bk251	Bk252	Bk253	
	+3+4 [247]				144 s	(7/2+)	4.8 m	(7/2+)	7.0 m	4.5 h (3/2-)	4.35 h (1-)	4.94 d 3/2-	1.80 d 2(-)	1380 y (3/2-)	9 y (6+)	320 d 7/2+	3.217 h 2-	55.6 m (3/2-)			
	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\beta, \alpha, sf, \dots$	$\beta$	$\beta, \alpha$			
	Cm	Cm233	Cm234	Cm235	Cm236	Cm237	Cm238	Cm239	Cm240	Cm241	Cm242	Cm243	Cm244	Cm245	Cm246	Cm247	Cm248	Cm249	Cm250	Cm251	Cm252
	+3 [247]		0+		0+		2.4 h 0+	2.9 h (7/2-)	27 d 0+	32.8 d 1/2+	162.8 d 0+	29.1 y 5/2+	18.10 y 0+	8500 y 7/2+	4730 y 0+	1.56E+7 y 9/2-	3.40E+5 y 0+	64.15 m 1/2(+)	9000 y 0+	16.8 m (1/2+)	2 d 0+
	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha, sf, \dots$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha, sf, \dots$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha$	$\alpha, sf$	$\beta$	$\beta, \alpha, sf, \dots$	$\beta$	$\beta$
	Am	Am231	Am232	Am233	Am234	Am235	Am236	Am237	Am238	Am239	Am240	Am241	Am242	Am243	Am244	Am245	Am246	Am247	Am248	Am249	
		79 s		2.32 m	15 m	73.0 m 5/2(-)	98 m 1+	11.9 h (5/2-)	50.8 h (3-)	432.2 y 5/2-	16.02 h 1-	7370 y 5/2-	10.1 h (6-)	10.1 h (5/2+)	2.05 h (7-)	39 m (7-)	23.0 m (5/2)				
	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\beta$	$\alpha, sf$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	
	Pu	Pu230	Pu231	Pu232	Pu233	Pu234	Pu235	Pu236	Pu237	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Pu243	Pu244	Pu245	Pu246	Pu247		
		0+		34.1 m 0+	20.9 m	8.8 h 0+	25.3 m (5/2+)	2.858 y 0+	45.2 d 7/2-	87.7 y 0+	24110 y 1/2+	6563 y 0+	14.35 y 5/2+	3.733E+5 y 0+	4.956 h 7/2+	8.08E+7 y 0+	10.5 h (9/2-)	10.84 d 0+	2.27 d		
	$\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\beta, \alpha, sf, \dots$	$\alpha, sf$	$\beta$	$\beta$	$\alpha, \beta, \beta, sf, \dots$	$\beta$	$\beta$	$\beta$		
	Np	Np229	Np230	Np231	Np232	Np233	Np234	Np235	Np236	Np237	Np238	Np239	Np240	Np241	Np242	Np243	Np244				
		4.0 m	4.6 m	48.8 m (5/2)	14.7 m (4+)	36.2 m (5/2+)	4.4 d (0+)	396.1 d 5/2+	1.54E5 y (6-)	2.14E+6 y 5/2+	2.117 d 2+	2.3565 d 5/2+	61.9 m (5+)	13.9 m (5/2+)	5.5 m (6)	1.8 m (5/2-)	2.29 m (7-)				
	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC	EC, $\alpha$	EC	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\beta, \alpha, \dots$	$\alpha, sf$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$				
	U	U228	U229	U230	U231	U232	U233	U234	U235	U236	U237	U238	U239	U240	U241	U242					
		9.1 m 0+	58 m (3/2+)	20.8 d 0+	4.2 d (5/2-)	68.9 y 0+	1.592E+5 y 5/2+	2.455E+5 y 0+	7.038E+8 y 7/2-	2.342E7 y 0+	6.75 d 1/2+	4.468E+9 y 0+	23.45 m 5/2+	14.1 h 0+	16.8 m 0+						
	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	$\alpha, sf$	EC, $\alpha$	$\alpha$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\alpha, sf$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$					
	Pa	Pa227	Pa228	Pa229	Pa230	Pa231	Pa232	Pa233	Pa234	Pa235	Pa236	Pa237	Pa238	Pa239	Pa240						
		38.3 m (5/2-)	22 h 3+	1.50 d (5/2+)	17.4 d (2-)	32760 y 3/2-	1.31 d (2-)	26.967 d 3/2-	6.70 h 4+	24.5 m (3/2-)	9.1 m 1(-)	8.7 m (1/2+)	2.3 m (3-)								
	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\alpha$	EC, $\beta, \alpha, \dots$	$\alpha, sf$	EC, $\beta$	$\beta$	$\beta, sf$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta, sf$									

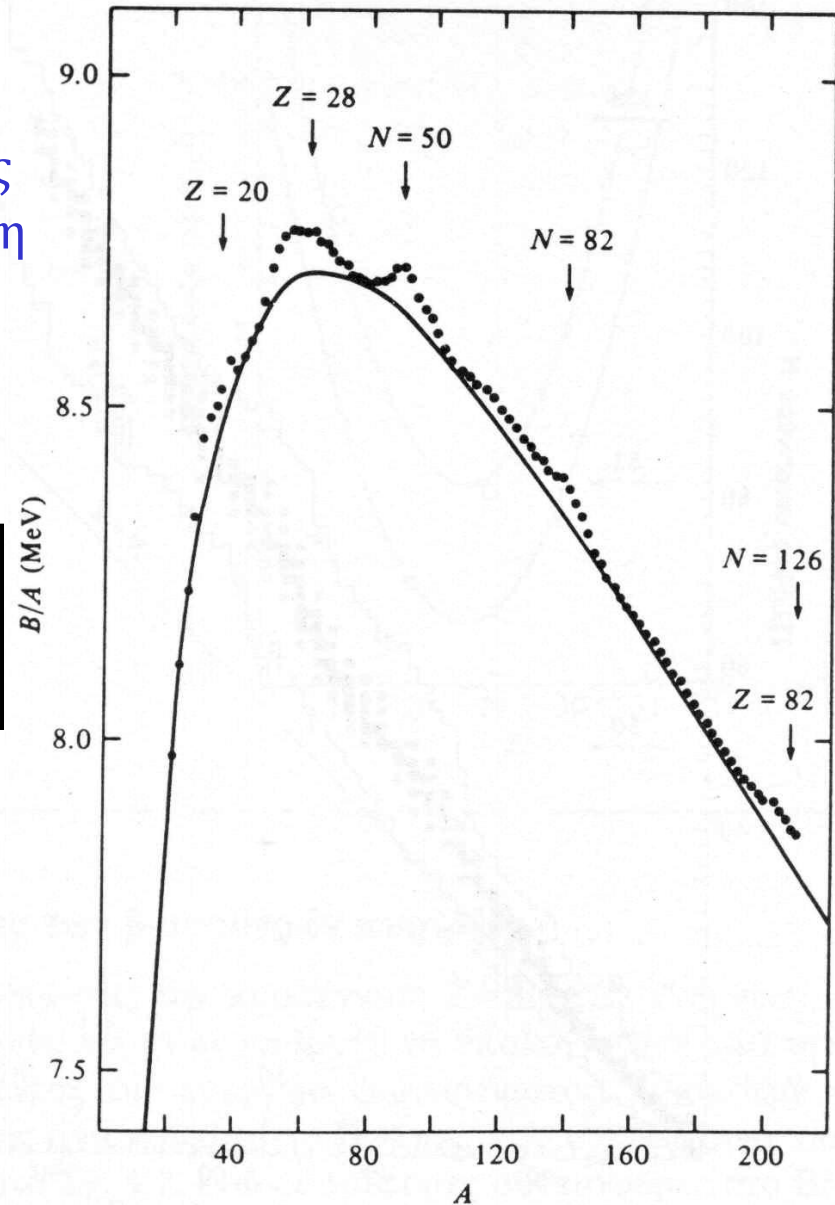
# Σχάση & α-διάσπαση

Η σταδιακή μείωση της Ενέργειας Σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για  $A > 60$  επιτρέπει τη σχάση σε δύο μικρότερους πυρήνες

Πρέπει να ισχύει:

$$BE(A, Z) < BE(A_1, Z_1) + BE(A - A_1, Z - Z_1)$$

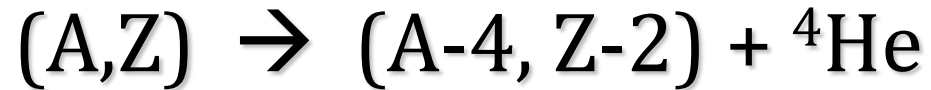
Δεδομένης της μεγάλης ενέργειας σύνδεσης του σωματιδίου-α,  
 $BE(\alpha) = 28.3 \text{ MeV}$ ,  
συνήθως ένα από τα προϊόντα θα είναι σωματίο-α.



# Διάσπαση α

- Ενέργεια κατά την α-διάσπαση
  - (Εύκολο στη κατανόηση)
- Χρόνοι ημιζωής α-ραδιενεργών πυρήνων
  - (Φαίνεται δύσκολο στη κατανόηση: νόμος Geiger -Nuttall )
- Θεωρία της α-διάσπασης
  - (Θεωρία κβαντικού tunnelling)

## Διάσπαση α



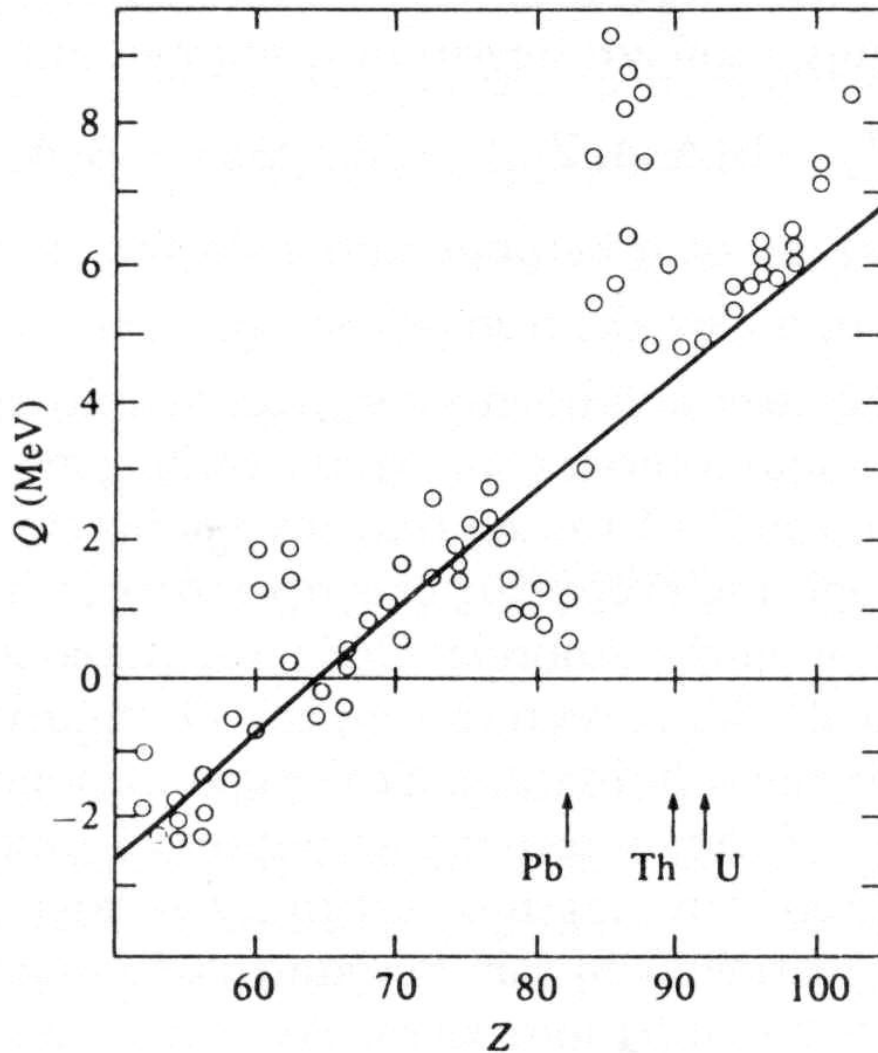
Για να είναι επιτρεπτή ενεργειακά  
πρέπει:

$$m(A,Z) > m(A-4, Z-2) + m({}^4\text{He})$$

$$BE(A,Z) < BE(A-4, Z-2) + 28.3 \text{ MeV}$$

$$Q = BE(A-4, Z-2) + 28.3 \text{ MeV} - BE(A,Z)$$

# Ενέργειες α-διάσπασης



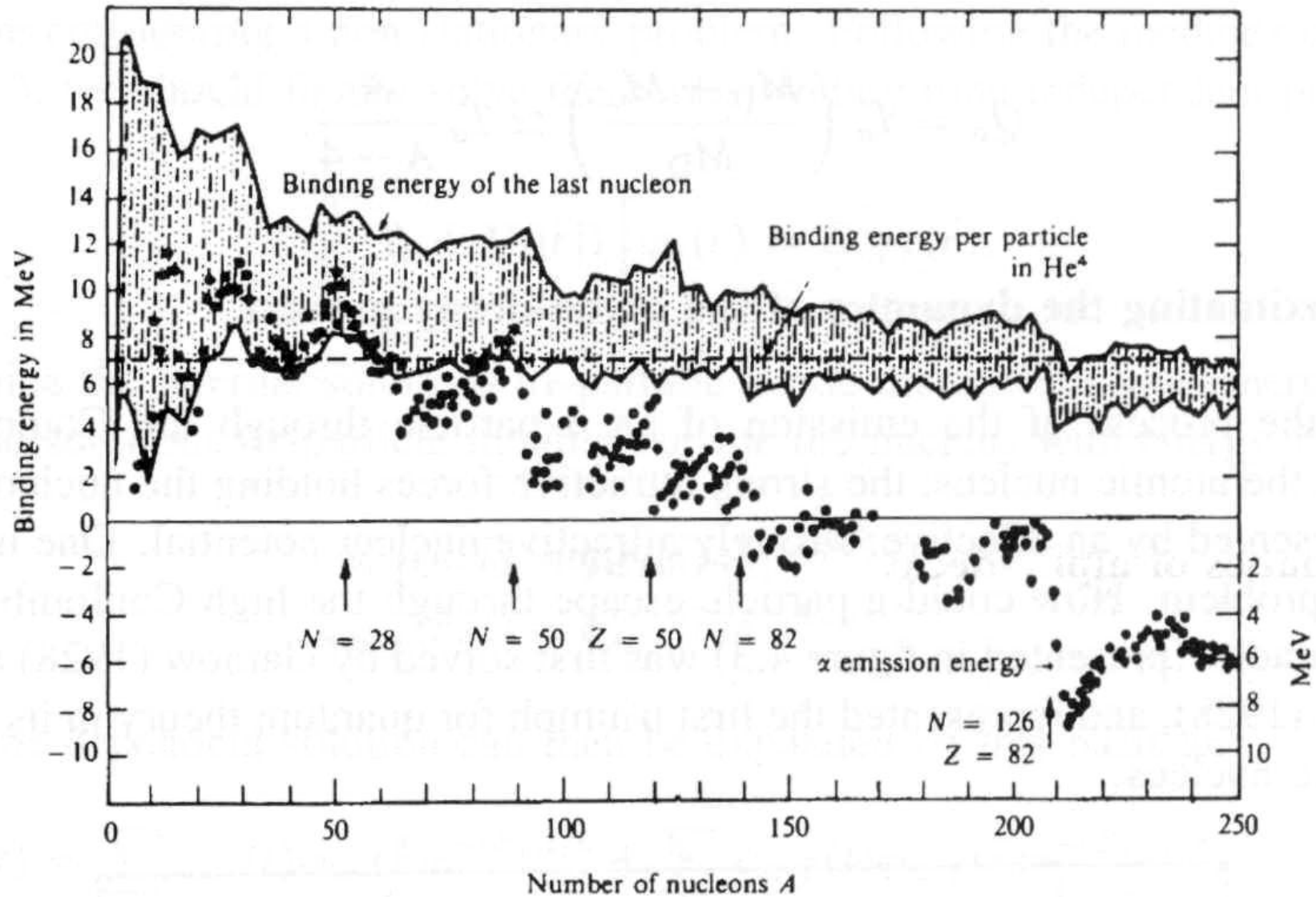
Οι πειραματικές και θεωρητικές τιμές  $Q$  σαν συνάρτηση του  $Z$  του μητρικού πυρήνα.

Η καμπύλη είναι η πρόβλεψη του ημιεμπειρικού τύπου μάζας

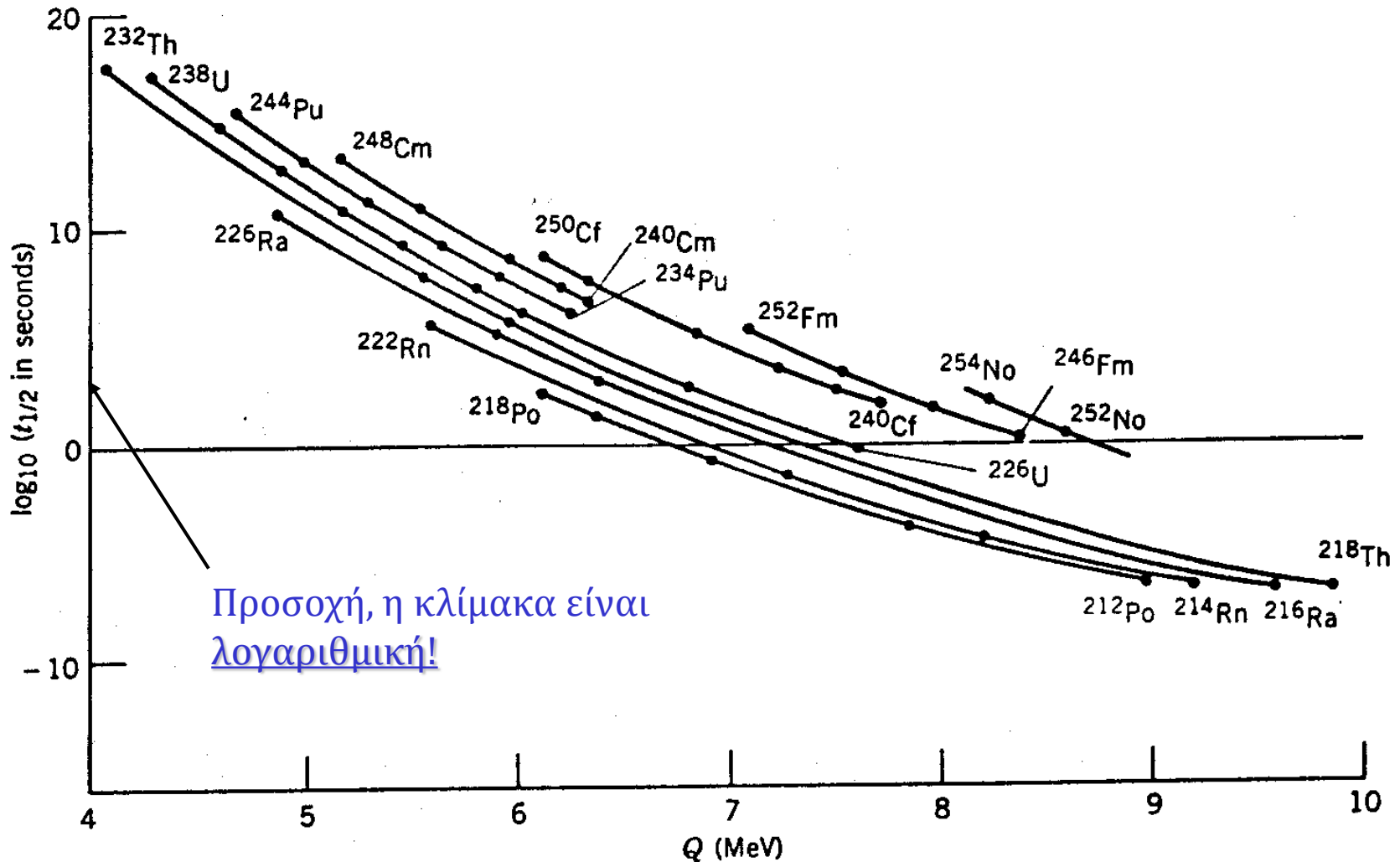
$$Q = BE(A-4, Z-2) + 28.3 \text{ MeV} - BE(A, Z)$$



# Ενέργεια σύνδεσης α-σωματίου



# α-διάσπαση: Κανόνας του Geiger-Nuttall

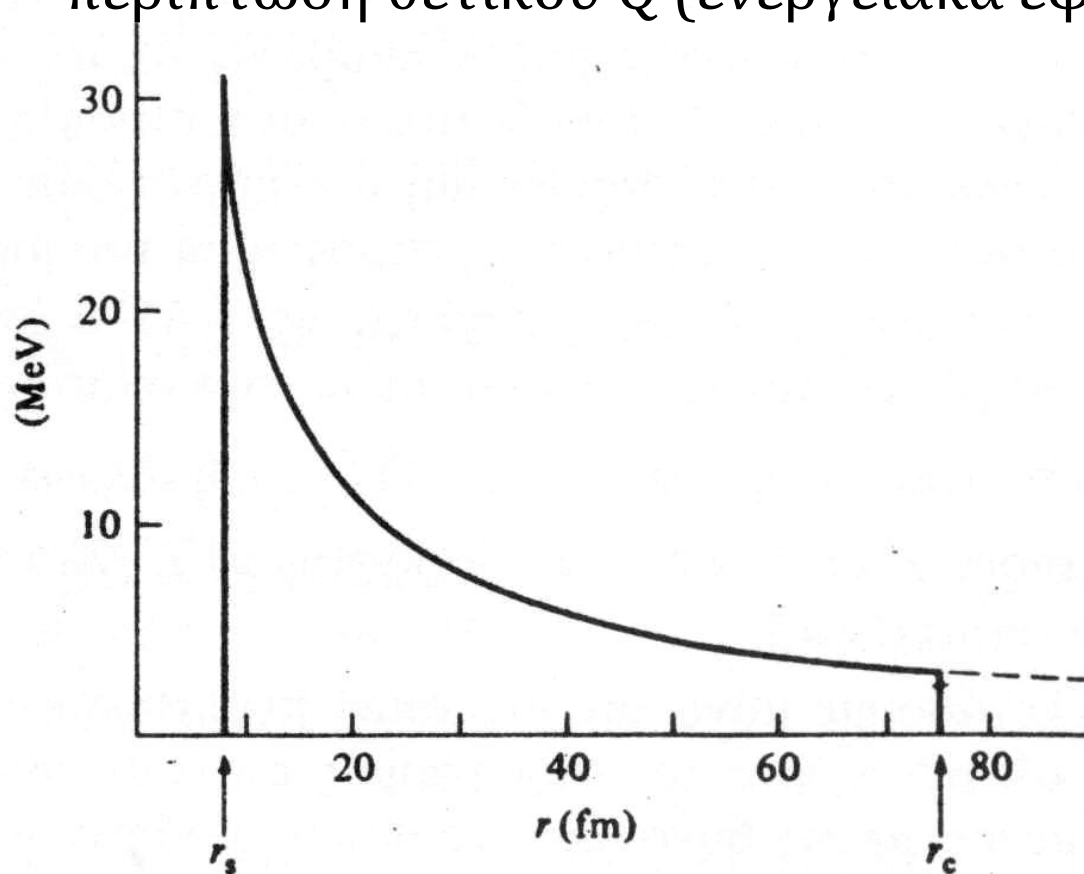


**Figure 8.1** The inverse relationship between  $\alpha$ -decay half-life and decay energy, called the Geiger-Nuttall rule. Only even- $Z$ , even- $N$  nuclei are shown. The solid lines connect the data points.

# Θεωρία της α-διάσπασης



✓ Ηλεκτροστατική παρεμπόδιση της α-διάσπασης ακόμα και σε περίπτωση θετικού Q (ενεργειακά εφικτής αντίδρασης).

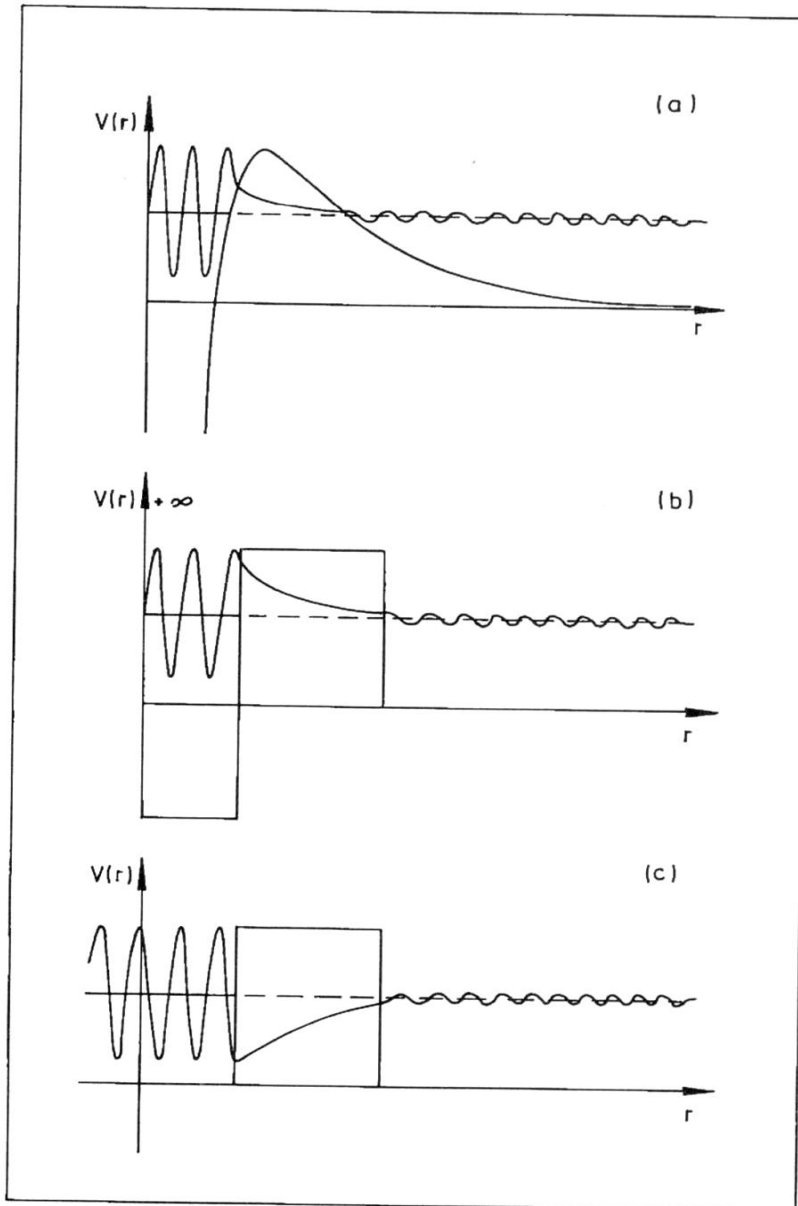


$$\begin{aligned} r_s &= R_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \\ &= 1.1 (205^{1/3} + 4^{1/3}) \\ &= 8.23 \text{ fm} \end{aligned}$$

$$Q = 2Z_d e^2 / (4\pi\epsilon_0) r_c$$

$$\begin{aligned} r_c &= 2Z_d e^2 / (4\pi\epsilon_0) Q \\ &= 2 \cdot 81 \cdot 1.44 / 3.11 \\ &= 75 \text{ fm} \end{aligned}$$

# Εξίσωση Schrödinger για $\alpha$ -σωμάτιο



Ενώ κλασικά το σωματίδιο- $\alpha$  δεν μπορεί να περάσει από το φράγμα δυναμικού, αυτό είναι εφικτό στη κβαντομηχανική.

Η κβαντομηχανική λύση σε αυτό το πρόβλημα ερμηνεύει τα φαινόμενα που παρατηρούνται.

# Υπολογισμός μέσου χρόνος ζωής α-ραδιενεργών

Ο παράγοντας G (Gamow Factor) ισούται με:

$$G = \frac{\pi}{\hbar c} \cdot \frac{Z_\alpha Z_d e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sqrt{\frac{2mc^2}{Q}} \cdot F\left(\frac{r_s}{r_c}\right)$$

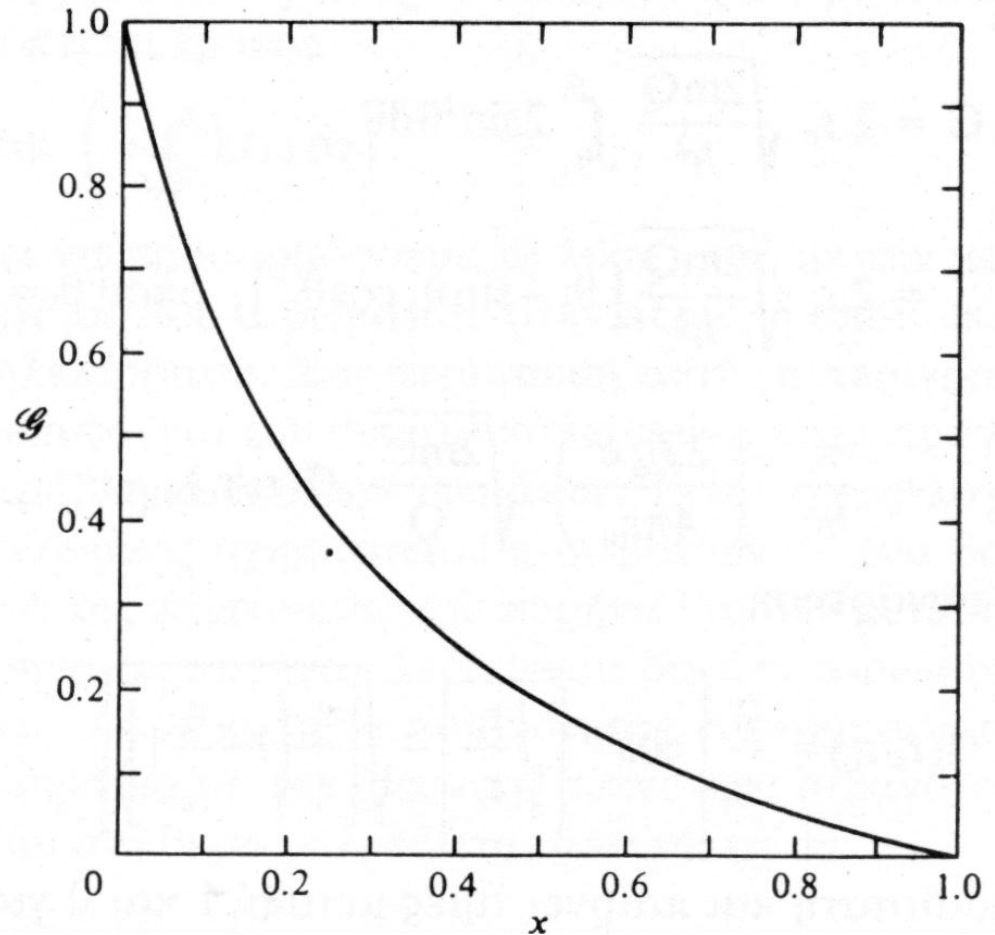
- $r_s$ : απόσταση σχηματισμού α-σωματίου μέσα στον πυρήνα
- $r_c$ : απόσταση όπου  $Q = V_{\text{Coulomb}}$

# Η συνάρτηση $F(x)$

$$F(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[ a \cos(\sqrt{x}) - \sqrt{x(1-x)} \right]$$

$$F(0) = 1$$

$$F(1) = 0$$



# Υπολογισμός μέσου χρόνος ζωής α-ραδιενεργών

$$\tau = \tau_0 e^G = 7 \cdot 10^{-23} e^G$$

Ο παράγοντας  $G$  (**Gamow Factor**) εξαρτάται από:

- Την εκλυόμενη από την διάσπαση **ενέργεια  $Q$**  (Q-Value)
- Το **φορτίο** του θυγατρικού πυρήνα  $Z_d$
- Την **ανηγμένη μάζα** του συστήματος  $m$  ( $m^{-1} = m_d^{-1} + m_a^{-1}$ )
- Από τη **συνάρτηση  $F(r_s/r_c)$**  (αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης στο φαινόμενο σήραγγος)

# Μέσος χρόνος α-διάσπασης

Ο μέσος χρόνος για α-διάσπαση δίνεται από τη σχέση

$$\tau = \tau_0 e^G$$

Όπου το  $\tau_0 = 7.0 \times 10^{-23}$  sec επιλέγεται έτσι ώστε να δίνει μια ικανοποιητική προσαρμογή στη σειρά των παρατηρουμένων χρόνων ζωής.



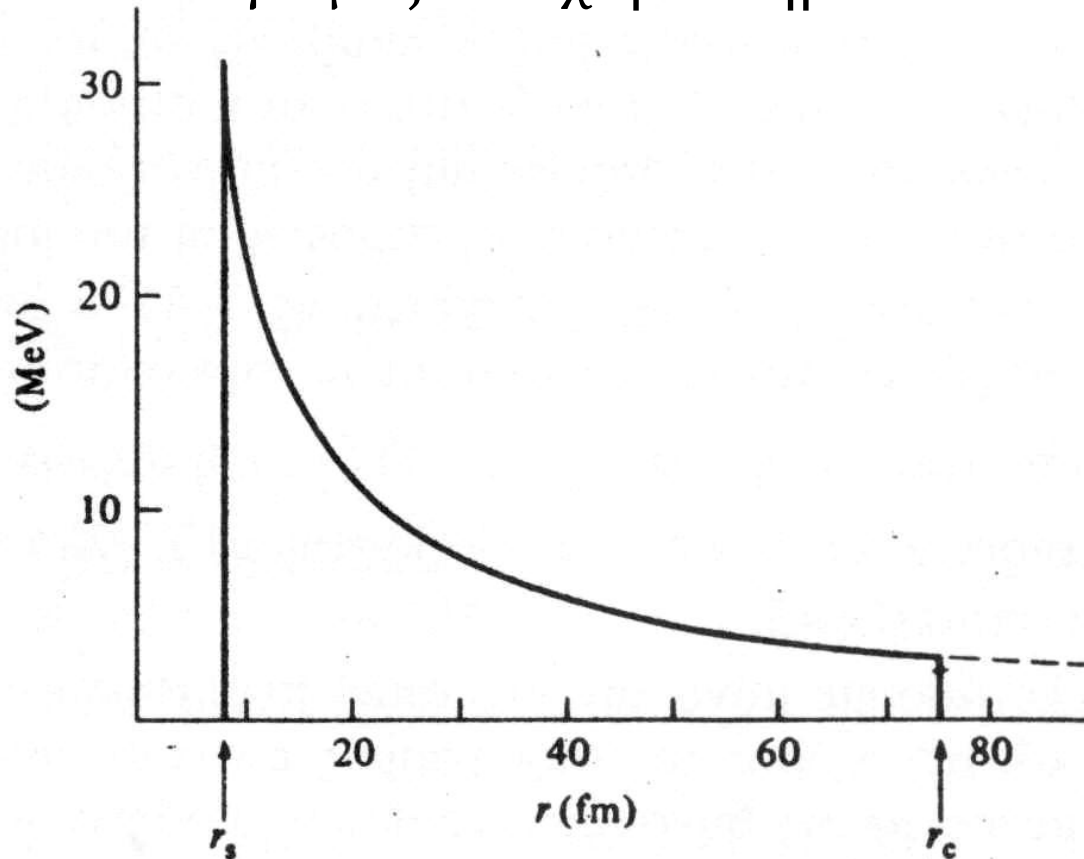
# Μέσος χρόνος α-διάσπασης

	$Q$ (MeV)	$r_s$ (fm)	$r_c$ (fm)	$\mathcal{G}$	$\tau_{\text{πειθ}}$ (s)	$\tau_{(\text{εωφ.})}$ (s)
${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th}$	4.27	8.52	60.7	0.53	$2.0 \times 10^{17}$	$3.3 \times 10^{17}$
			$({}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} \rightarrow {}^{234}_{92}\text{U})$			
${}^{234}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{230}_{90}\text{Th}$	4.86	8.49	53.3	0.51	$1.1 \times 10^{13}$	$1.1 \times 10^{13}$
${}^{230}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{226}_{88}\text{Ra}$	4.77	8.45	53.1	0.51	$3.5 \times 10^{12}$	$3.9 \times 10^{12}$
${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn}$	4.87	8.41	50.9	0.50	$7.4 \times 10^{10}$	$7.4 \times 10^{10}$
${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po}$	5.59	8.37	43.3	0.46	$4.8 \times 10^5$	$4.2 \times 10^5$
${}^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{214}_{82}\text{Pb}$	6.11	8.33	38.7	0.43	$2.6 \times 10^2$	$1.6 \times 10^2$
			$({}^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{214}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{214}_{84}\text{Po})$			
${}^{214}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{210}_{82}\text{Pb}$	7.84	8.28	30.1	0.36	$2.3 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$
			$({}^{210}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{210}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{210}_{84}\text{Po})$			
${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb}$	5.41	8.24	43.7	0.47	$1.7 \times 10^7$	$5.8 \times 10^5$

# Υπολογισμός μέσου χρόνος ζωής α-ραδιενεργών



Υπολογισμός των χαρακτηριστικών αποστάσεων  $r_s$  και  $r_c$ :



$$\begin{aligned} r_s &= R_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \\ &= 1.1 (234^{1/3} + 4^{1/3}) \\ &= 8.52 \text{ fm} \end{aligned}$$

$$Q = 2Z_d e^2 / (4\pi\epsilon_0) r_c$$

$$\begin{aligned} r_c &= 2Z_d e^2 / (4\pi\epsilon_0) Q \\ &= 2 \cdot 90 \cdot 1.44 / 4.27 \\ &= 60.7 \text{ fm} \end{aligned}$$

# Υπολογισμός μέσου χρόνος ζωής α-ραδιενεργών



$$F\left(\frac{r_s}{r_c}\right) = F\left(\frac{8.52}{60.7}\right) = F(0.14) = 0.534$$

$$G = \frac{\pi}{\hbar c} \cdot \frac{Z_\alpha Z_d e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sqrt{\frac{2mc^2}{Q}} \cdot F\left(\frac{r_s}{r_c}\right) = \frac{\pi}{197} \cdot (1.44 \cdot 2 \cdot 90) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3.93 \cdot 931}{4.27}} \cdot 0.534$$

$$G = 91.5 \Rightarrow \tau = 7 \cdot 10^{-23} \cdot e^{91.5} = 3.8 \cdot 10^{17} \text{ sec}$$

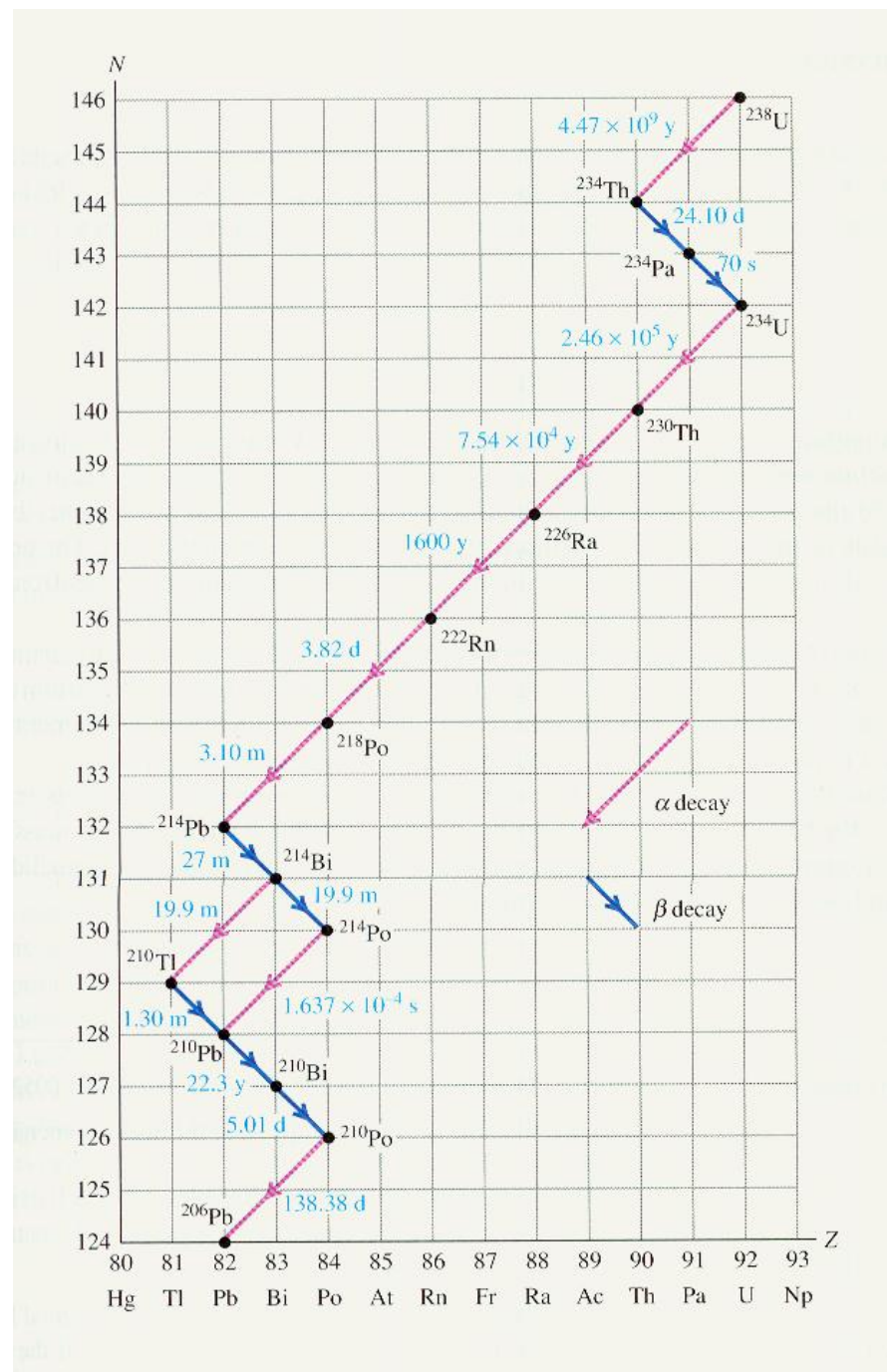
Σε πολύ καλή συμφωνία με την πειραματική τιμή  $2 \times 10^{17} \text{ sec}$

# Σειρές Αποσύνθεσης

Συνήθως η αποσύνθεση ασταθών πυρήνων οδηγεί σε άλλους ασταθείς πυρήνες.

Μετά από πολλές τέτοιες αποσυνθέσεις (όλων των ειδών) που καταλήγουμε σε κάποιο σταθερό πυρήνα.

Η σειρά  $^{238}\text{U}$  οδηγεί τελικά στο σταθερό πυρήνα του  $^{208}\text{Pb}$ , όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα Segre.



# Αυθόρμητη Σχάση

Σχάση: Διαδικασία τεμαχισμού ενός βαρέως πυρήνα σε δύο περίπου ίσες μάζες

Ενεργειακή διερεύνηση με βάση τον ημιαμπειρικό τύπο μάζας:

- Συμμετρική σχάση ενός άρτιου-άρτιου  $(A, Z)$  πυρήνα σε δύο ίδιους πυρήνες  $(A/2, Z/2)$
- Αγνοούμε τις ενέργειες ζευγαρώματος
- Για καθορισμένο λόγο  $Z/N$  δεν έχουμε συνεισφορά από τον όρο της ενέργειας ασυμμετρίας και τον όρο της ενέργειας συνοχής (όγκου).

# Αυθόρμητη Σχάση

Στη διαφορά ενέργειας σύνδεσης συνεισφέρουν λοιπόν μόνο οι ενέργειες επιφάνειας και Coulomb.

$$\begin{aligned}\Delta B &= 2*B(A/2, Z/2) - B(A,Z) = \\ &= -b A^{2/3} \{ 2(1/2)^{1/3} - 1 \} - d Z^2/A^{1/3} \{ 2 (1/2)^{5/3} - 1 \}\end{aligned}$$

Αν  $\Delta B > 0$  τότε η σχάση είναι ενεργειακά δυνατή και τα θραύσματα αποκτούν κινητική ενέργεια  $\Delta B$ .

Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται για  $Z^2/A > 18$  πυρήνες (βαρύτερους του  $^{98}\text{Mo}$ )

# Αυθόρμητη Σχάση

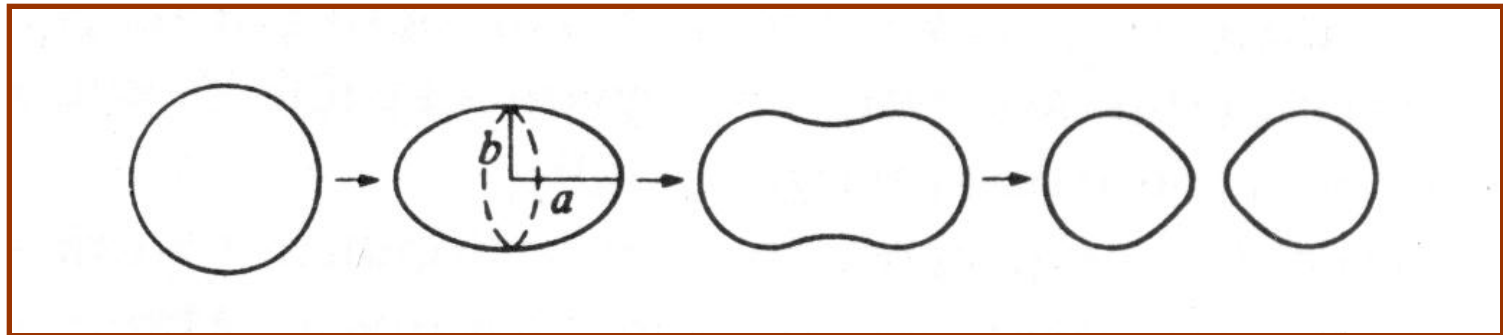
Η ενέργεια από τη σχάση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της α-διάσπασης!

Συμμετρική Σχάση of  $^{238}\text{U}$  απελευθερώνει  **$\sim 180 \text{ MeV}$** .

Η διαδικασία της σχάσης δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη με το φαινόμενο σήραγγας.

- Το θραύσμα **δεν δημιουργείται στην επιφάνεια**.
- Δύσκολος υπολογισμός **του φράγματος δυναμικού**.

# Σχηματική Αναπαράσταση Συμμετρικής Σχάσης



Εισάγοντας την παράμετρο παραμόρφωσης  $e$ , είναι:

➤  $a = (1+e) R$

➤  $b = R/(1+e)^{1/2}$

➤  $V = 4/3 \pi a b^2$  παραμένει σταθερός



# Ημιεμπειρικός Τύπος Μάζας

Συνεισφορές στο  $B/A$  των επιμέρους όρων του ημιεμπειρικού τύπου μάζας

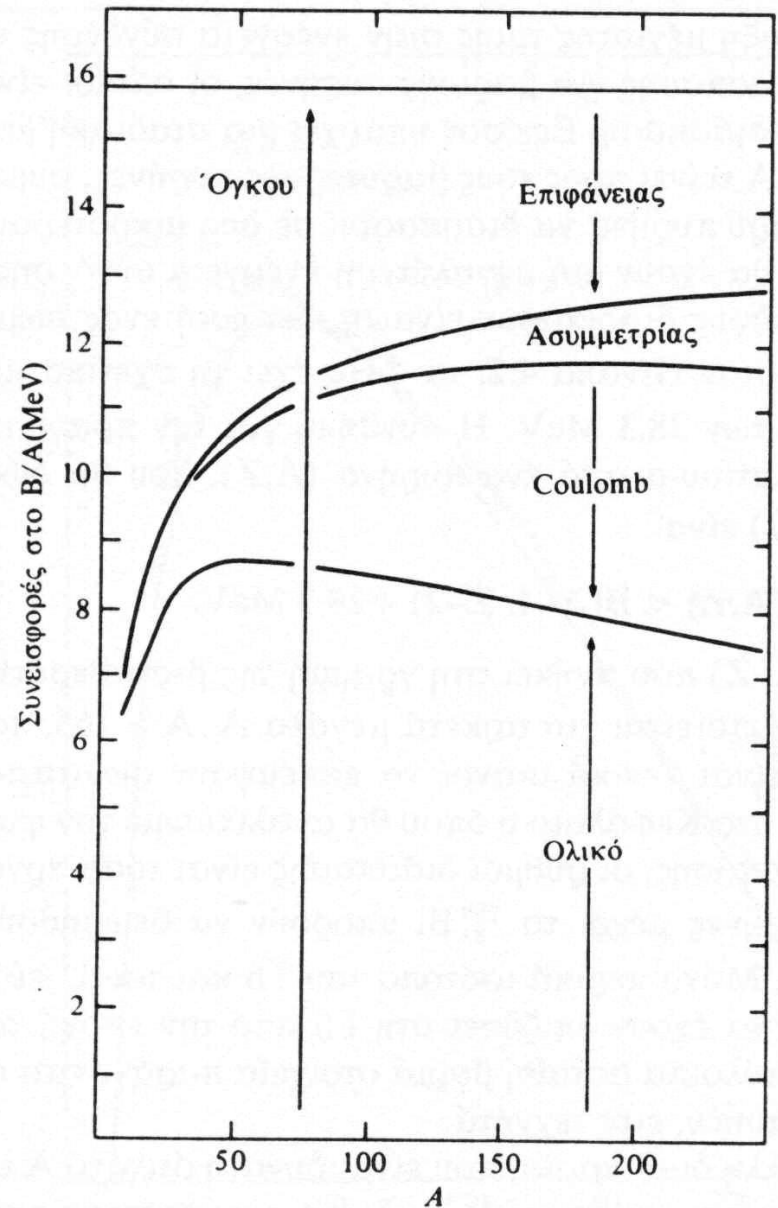
$$B/A = a$$

$$- b / A^{1/3}$$

$$- s (N-Z)^2 / A^2$$

$$- d Z^2 / A^{4/3}$$

$$- \delta / A^{3/2}$$



# Συμμετρική Σχάση

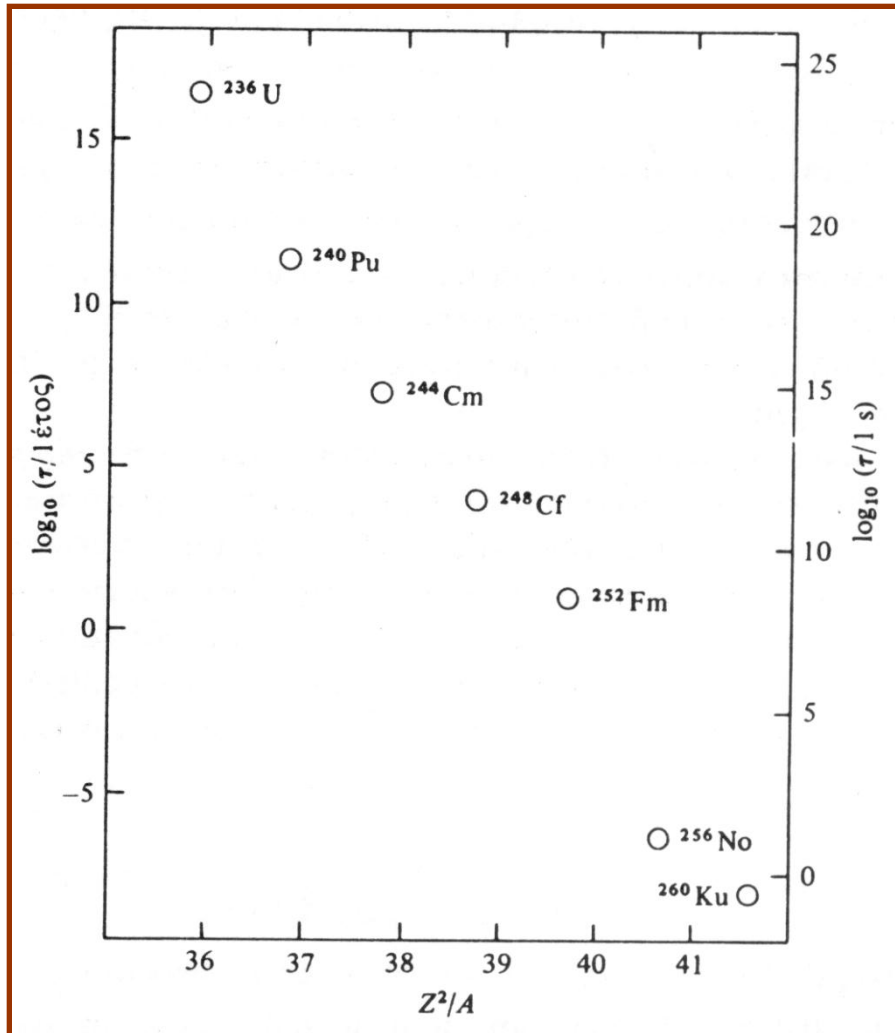
Ο συντελεστής του όρου  $e^2$  είναι αρνητικός όταν:

$$Z^2 / A > 2b/d = 51$$

Όταν ικανοποιείται η συνθήκη αυτή τότε η σχάση προχωράει ανεμπόδιστη από οποιοδήποτε φράγμα δυναμικού!

Υπάρχει ένα απόλυτο άνω όριο στη σταθερότητα των νουκλιδίων:  $Z=144$

# Μέσος Χρόνος Ζωής στην Αυθόρμητη Σχάση



Μεταξύ του λογαρίθμου του μέσου χρόνου ζωής και του  $Z^2/A$  υπάρχει μια εμπειρική σχέση προσεγγιστικά γραμμική.

American Institute of Physics Handbook, 1972, New York: Mc Graw-Hill.