

γ -διάσπαση

Μάθημα 10ο
Πετρίδου Χαρά

Τμήμα G3: Χ. Πετρίδου

- Τι είναι η γ -διάσπαση
 - ▶ γ -αποδιέγερση
 - ▶ ηλεκτρόνια εσωτερικών μετατροπών
 - ▶ εσωτερική δημιουργία ζεύγους (e^+e^-)
- Πως προκύπτει?
 - ▶ Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα (πρότυπο των φλοιών)
 - ▶ Πειραματικός καθορισμός (πειράματα σκέδασης)
- Ποιοί κανόνες διέπουν την γ -διάσπαση
 - ▶ Επιτρεπτές μεταπτώσεις, κανόνες επιλογής
- Ρυθμοί διάσπασης/αποσύνθεσης, χρόνοι ζωής στη γ -διάσπαση
- Τι είναι ο πυρηνικός συντονισμός - Το Πείραμα Moessbauer

- Κεφάλαιο 7: Διεγερμένες καταστάσεις του Πυρήνα
 - ▶ 7.2: Μερικά γενικά χαρακτηριστικά των διεγερμένων καταστάσεων
 - ▶ 7.1: Πειραματικός καθορισμός
 - ▶ 7.3: Η αποσύνθεση των διεγερμένων καταστάσεων
 - ▶ 7.4: Επι μέρους ρυθμοί αποσύνθεσης και επι μέρους πλάτη
- Πυρηνικός συντονισμός (Κεφ. 5 στις σημειώσεις)

Τι είναι η γ - διάσπαση ?

4

- ♦ Μια **μορφή αποδιέγερσης** του πυρήνα
 - ♦ Η ηλεκτρομαγνητική αποδιέγερση ενός πυρήνα σε μια κατώτερη ενεργειακή στάθμη του **ίδιου πυρήνα**, όταν δεν είναι δυνατή η αποβολή ενέργειας με εκπομπή ενός σωματιδίου (α ή β)
- ♦ Κατά την γ -διάσπαση ο ασταθής πυρήνας αποβάλλει την περίσσεια ενέργειας με αυθόρμητη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- ♦ Η γ -διάσπαση περιλαμβάνει δύο ακόμη διαδικασίες,
 - ♦ δημιουργία ηλεκτρονίων: “ηλεκτρόνια εσωτερικών μετατροπών” και
 - ♦ εσωτερική δημιουργία ζεύγους (e^+e^-).
- ♦ Είναι μία **ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση**

Πως προκύπτει η γ - διάσπαση ?

5

Η γ -διάσπαση προκύπτει:

- Όταν ένας διεγερμένος πυρήνας δεν έχει διαθέσιμη ενέργεια αρκετή για να υποστεί σχάση, ή να εκπεμφει ένα σωμάτιο (νουκλεόνιο ή α -ακτινοβολία) με ισχυρή αλληλεπίδραση
 - ΗΜ αλληλεπίδραση $\ll$ Ισχυρή αλληλεπίδραση
 - Διεγερμένες καταστάσεις με $E <$ από ένα κατώφλι (μερικά MeV) δεν μπορούν να διασπαστούν με Ισχυρή Αλληλεπίδραση $\rightarrow$ ΗΜ
- Συνήθως μετά από άλλες διασπάσεις (α , β , σχάση)

Η γ -διάσπαση είναι:

- Ο πιο κοινός τρόπος αποδιέγερσης των διεγερμένων πυρηνικών καταστάσεων.
- Οι χρόνοι ζωής κυμαίνονται από $10^{-12}s$ μέχρι πάνω από 100 χρόνια.

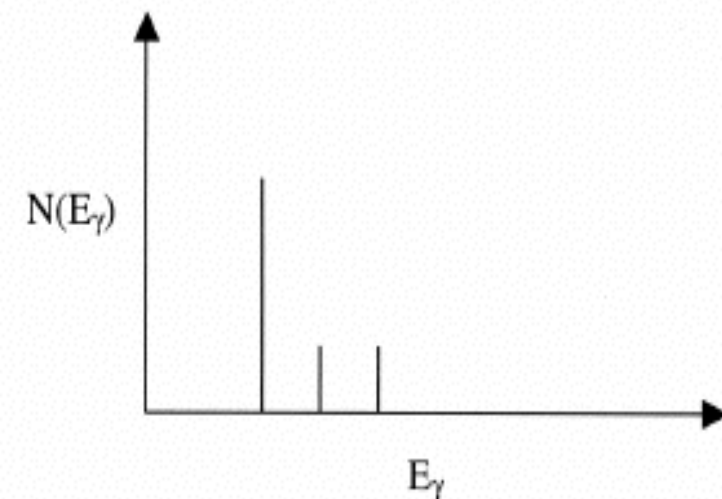
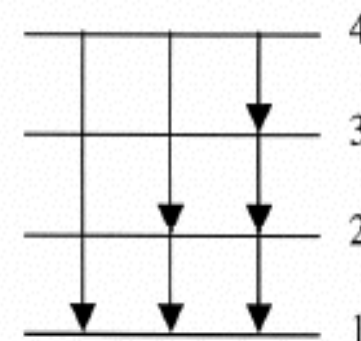
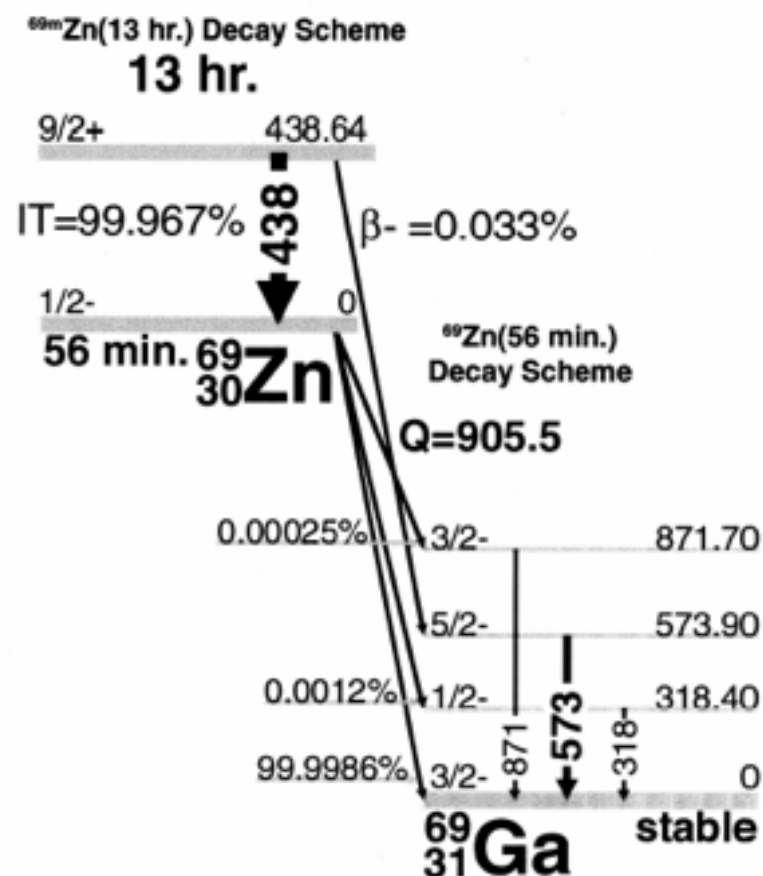
$$\tau \sim 10^{-12} \dots 10^9 s$$

Πως προκύπτει η γ - διάσπαση ?

6

- ♦ Ο πυρήνας ${}_{30}^{69}\text{Zn} \rightarrow {}_{31}^{69}\text{Ga} + e^- + \nu_{e(\text{anti})}$
- ♦ Ο νέος πυρήνας μπορεί να βρεθεί σε μία από τις 4 δυνατές καταστάσεις
- ♦ Από όλες τις δυνατές μεταπτώσεις κάποιες (3) είναι “επιτρεπτές”
- ♦ Ο νέος πυρήνας θα αποδιεγερθεί εκπέμποντας γ -ακτινοβολία που έχει ενέργεια που αντιστοιχεί στη διαφορά ενέργειας των δύο σταθμών

Ένα Παράδειγμα



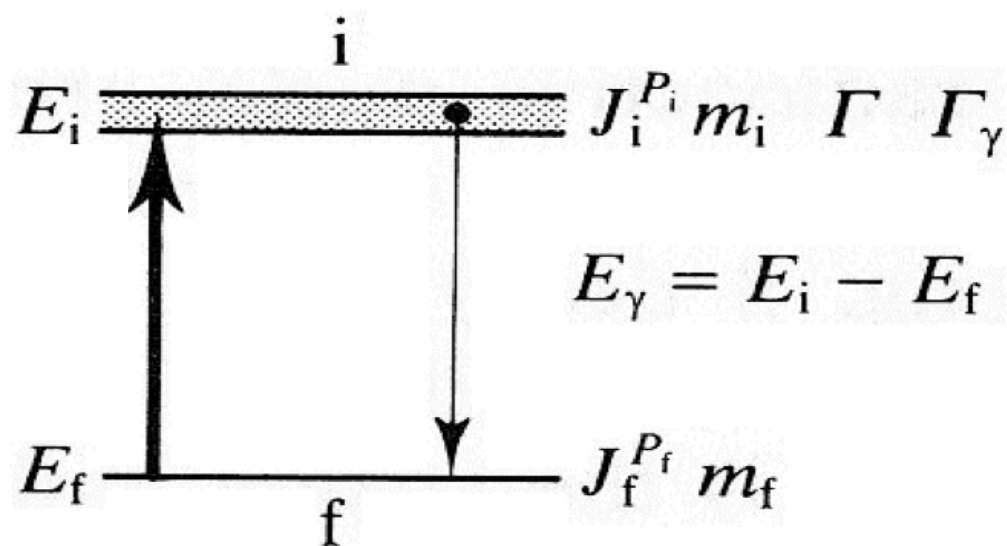
Οι ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

7

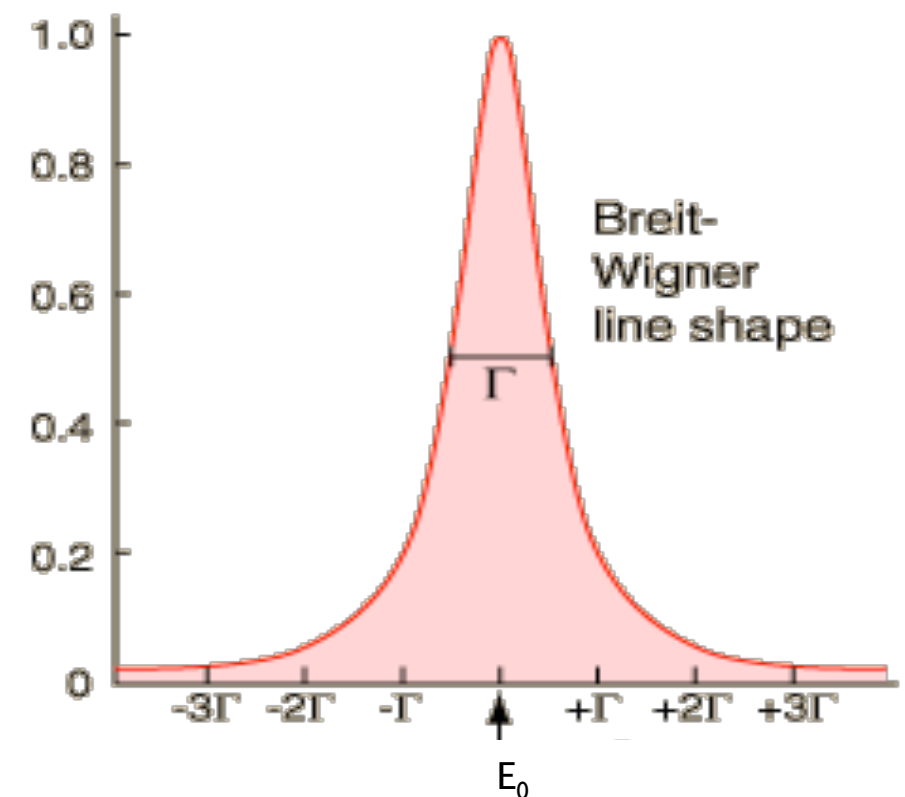
Κάθε ενεργειακή στάθμη (κβαντική κατάσταση) έχει ένα “φυσικό” πλάτος Γ και ένα μέσο χρόνο ζωής τ , που σχετίζονται με την αρχή της απροσδιοριστίας:
 $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \rightarrow \Gamma \cdot \tau \sim \hbar$

$$\Gamma = \hbar \lambda = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV sec}}{\tau}$$

$\lambda = 1/\tau$: η πιθανότητα διάσπασης



$\tau \sim 10^{-12} \dots 10^9 \text{ sec} !$

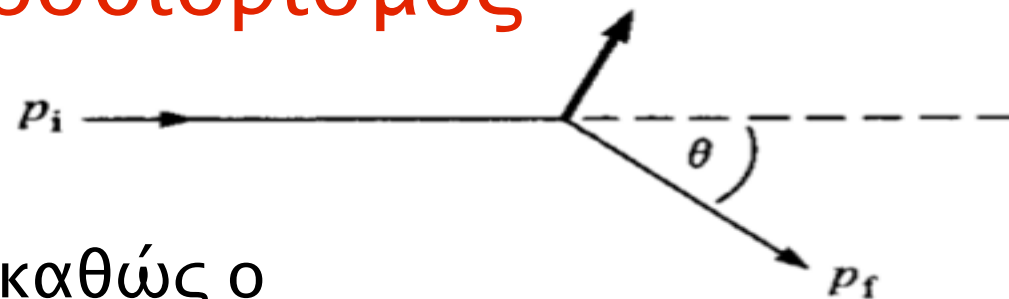


Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

8

Πειραματικός Προσδιορισμός

Σκέδαση πρωτονίων σε πυρήνα (στόχο)



Πρωτόνιο αρχικής ορμής p_i , σκεδάζεται με ορμή p_f καθώς ο πυρήνας ανακρούεται.

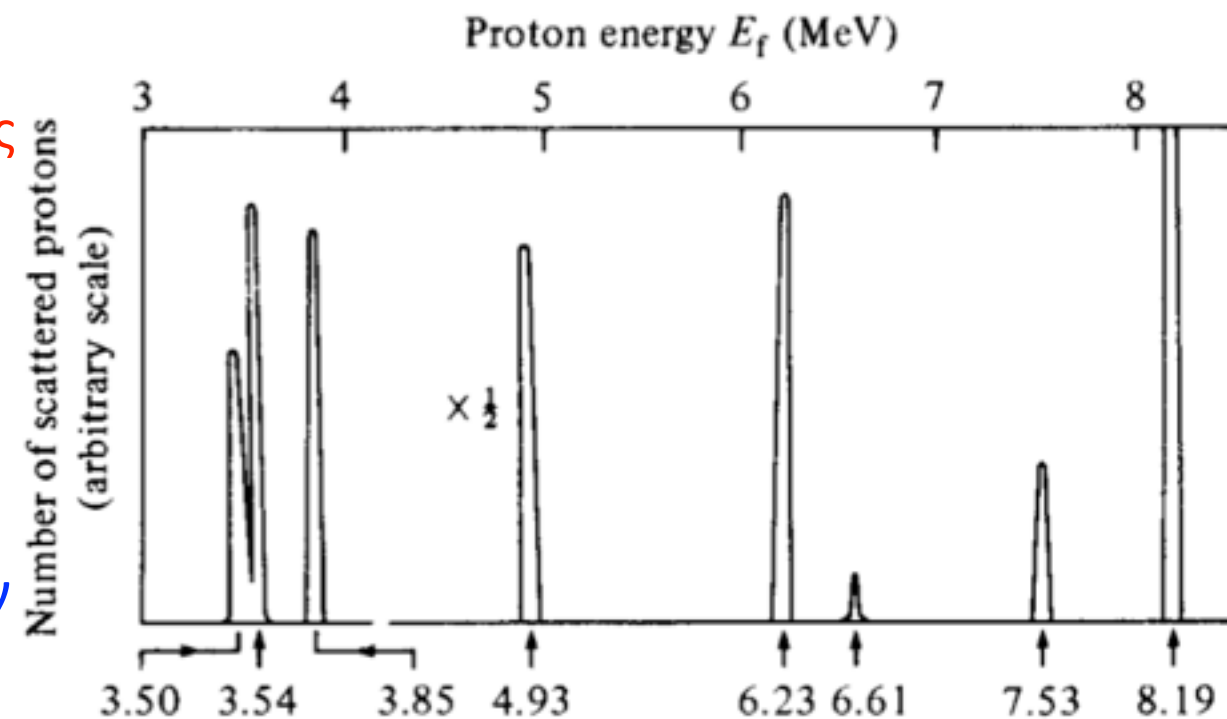
Θεωρώντας ότι ο πυρήνας στόχος απορροφά ενέργεια ΔE & διεγείρεται σε υψηλότερη στάθμη, υπολογίζουμε την ενέργεια του σκεδαζόμενου πρωτονίου E_f .

$$\Delta E = \frac{p_i^2}{2m_p} - \frac{p_f^2}{2m_p} - \frac{(p_i^2 + p_f^2 - 2p_i p_f \cos \theta)}{2m_A^*}$$

Ενέργεια ανάκρουσης

$$\Delta E = E_i \left(1 - \frac{m_p}{m_A^*}\right) - E_f \left(1 + \frac{m_p}{m_A^*}\right) + \frac{2m_p}{m_A^*} (E_i E_f)^{\frac{1}{2}} \cos \theta.$$

π.χ. σκέδαση p 10.02 MeV σε ^{10}B



Θυμηθείτε: Πείραμα Frank-Hertz στην ατομική

Μετράμε την ενέργεια των σκεδαζόμενων πρωτονίων σε συγκεκριμένη γωνία θ .

Γραμμικό φάσμα $\rightarrow$ η ΔE παίρνει διακριτές τιμές.

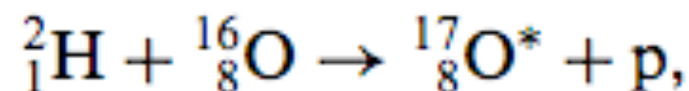
Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

9

Πειραματικός Προσδιορισμός

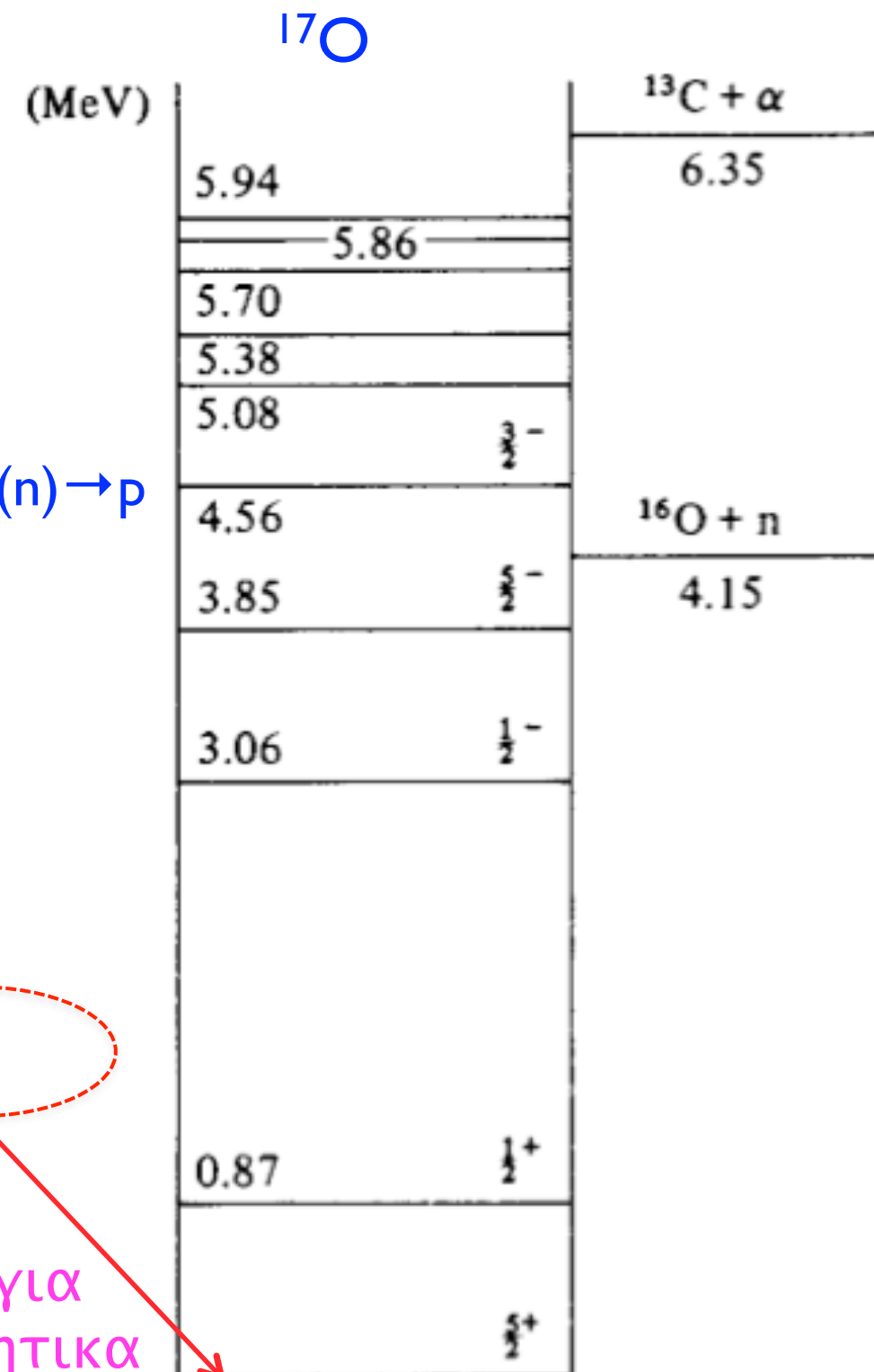
Η Μέθοδος απογύμνωσης του δευτερίου

- κατάλληλη για β-ασταθείς πυρήνες



- ♦ Ο πυρήνας του δευτερίου χάνει ένα νουκλεόνιο(n) $\rightarrow$ p
- ♦ Προκύπτει ισότοπο του πυρήνα στόχου (${}^{17}\text{O}$)
 - πιθανά ασταθές και
 - σε διεγερμένη κατάσταση (${}^{17}\text{O}^*$)
- ♦ Απο την ενέργεια του εξερχομένου p σε συγκεκριμένη γωνία θ υπολογίζεται η ενέργεια διέγερσης του τελικού πυρήνα

E_f (MeV)	11.42	11.97	12.69	13.50	15.74	16.62
E (MeV)	5.08	4.56	3.85	3.06	0.87	0.0



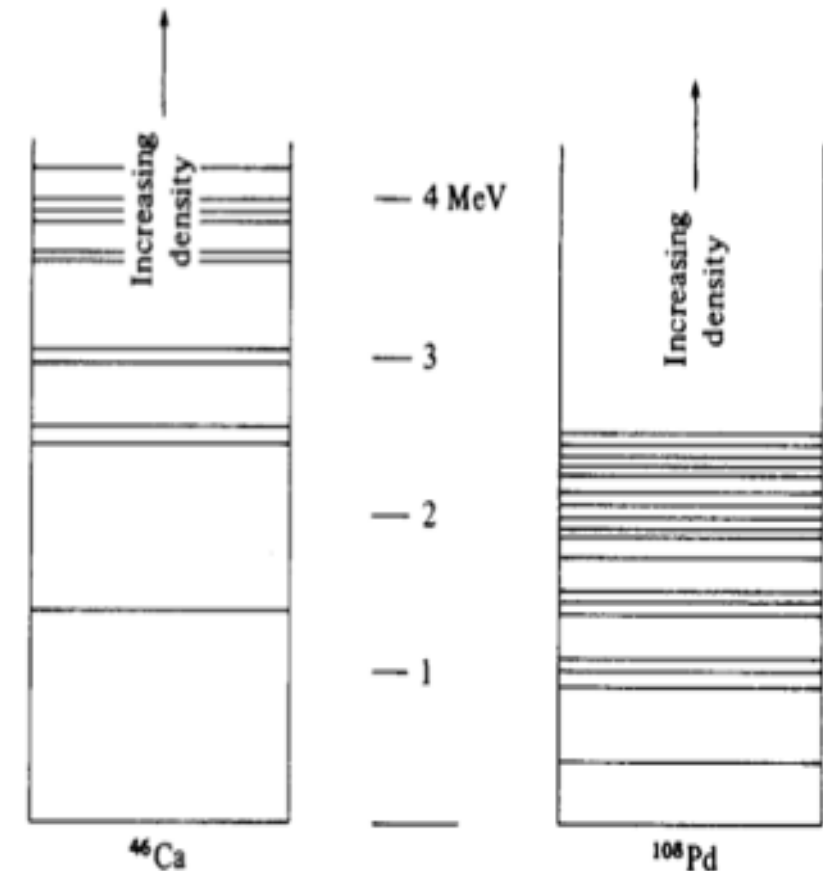
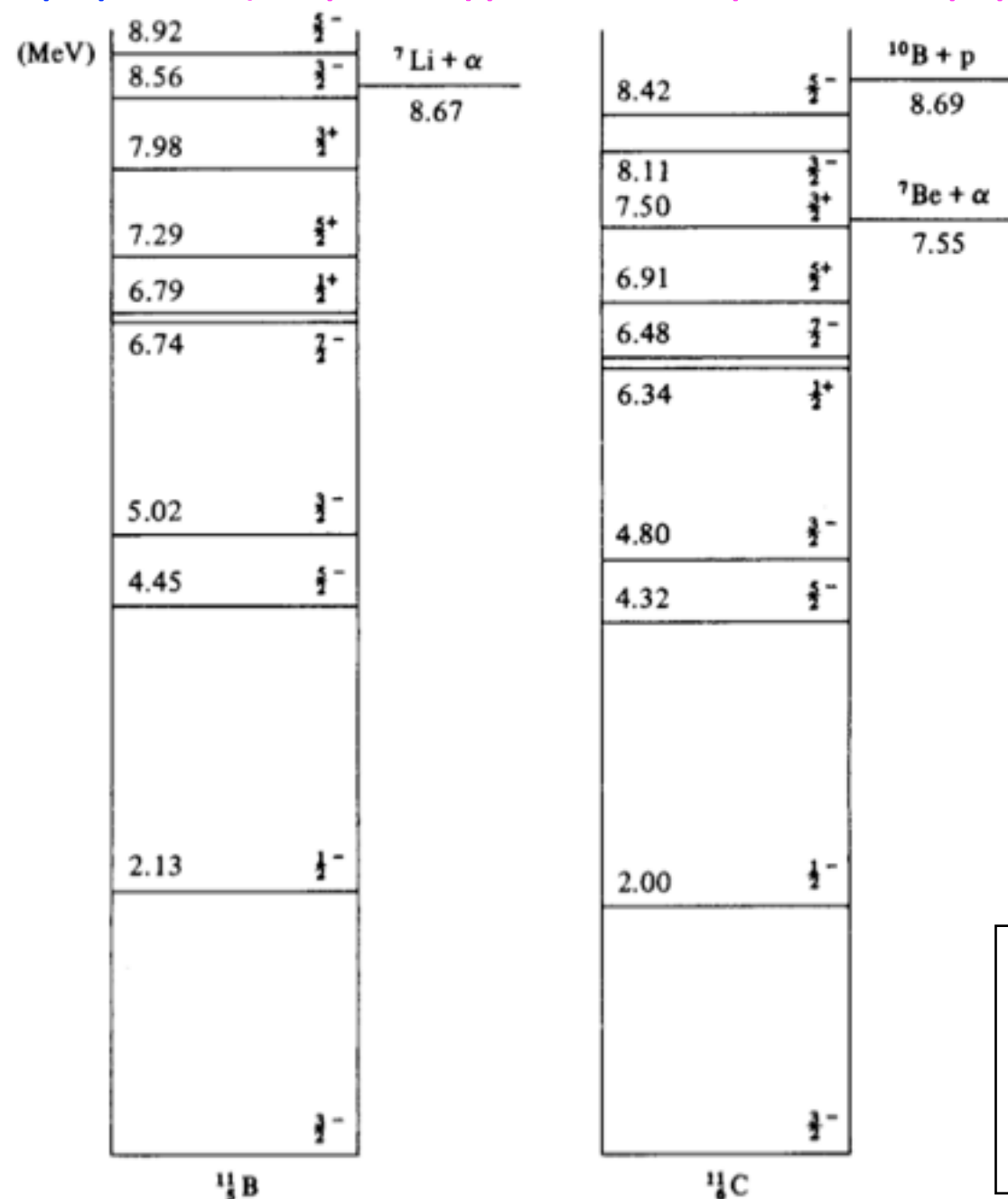
Οι διεγερμένες καταστάσεις κάτω από το κατώφλι για το ${}^{17}\text{O} \rightarrow {}^{16}\text{O} + n$ αποδιεγείρονται ΜΟΝΟ ηλεκτρομαγνητικά

Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

10

Μερικά χαρακτηριστικά των διεγερμένων καταστάσεων

Οι ισχυρές δυνάμεις είναι ανεξάρτητες του φορτίου (Παράδειγμα Κατοπτρικών Πυρήνων)



Οσο βαρύτερος ο πυρήνας τόσο περισσότερες στάθμες

Το πρότυπο των φλοιών εξηγεί ποιοτικά τις διεγερμένες καταστάσεις του πυρήνα

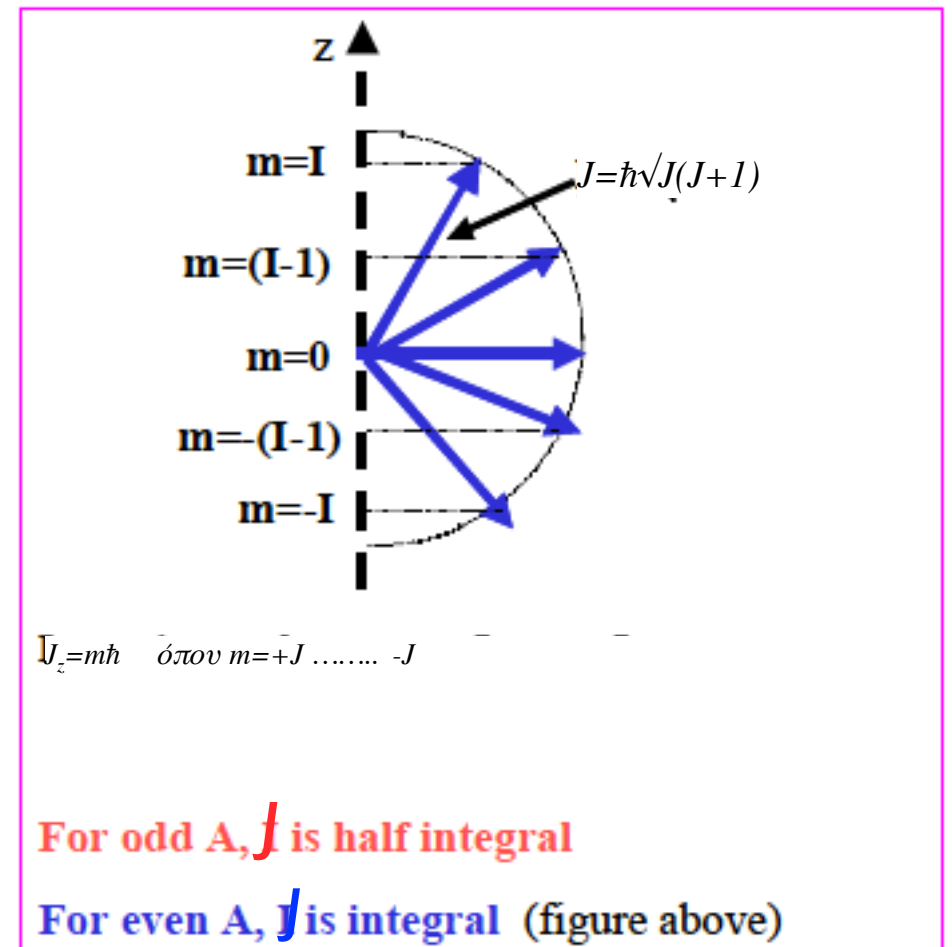
Υπενθύμιση: Γωνιακή Ορμή του Πυρήνα: Πυρηνικό Spin

II

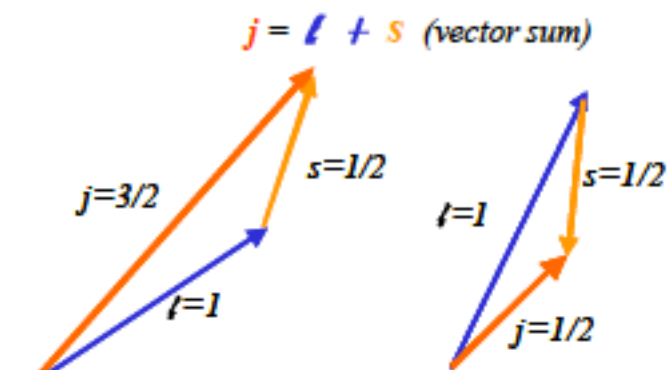
- Οι πυρήνες, ακόμα και στη βασική κατάσταση μπορεί να έχουν Γωνιακή ορμή που καθορίζεται/συμβολίζεται με το **κβαντισμένο διανυσμα J**

► $|J| = \sqrt{J(J+1)}\hbar$

- Η αναμενόμενη τιμή του J δεν είναι **παρατηρήσιμο μέγεθος**.
- Η συνιστώσα του όμως $J_z = m_j \hbar$ κατά την διεύθυνση κβάντωσης μπορεί να μετρηθεί και βρέθηκε ότι παίρνει $2J+1$ τιμές: $J \geq m_j \geq -J$
- Η μέγιστη τιμή του J ονομάζεται **σπίν του πυρήνα**



Vector Coupling of Angular Momentum
 l and s to give j

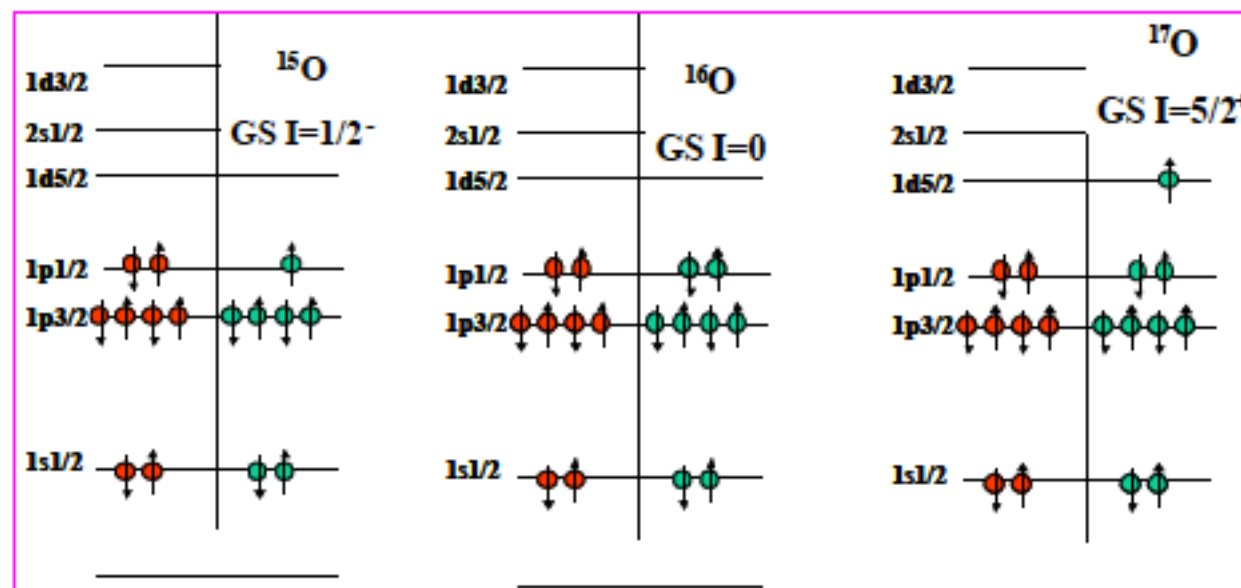


Είναι το διανυσματικό άθροισμα (“διανυσματική σύζευξη”) των τροχιακών στροφορμών (l) και σπίν (s) των νουκλεονίων του πυρήνα

Υπενθύμιση: Γωνιακή Ορμή του Πυρήνα: Πυρηνικό Spin

12

- Διανυσματική σύζευξη των τροχιακών στροφορμών (l) και σπιν(s) των νουκλεονίων του πυρήνα
 - ▶ Τα διάφορα πυρηνικά μοντέλα ορίζουν τον τρόπο σύζευξης των διανυσμάτων
 - Λογικό να υποθέσουμε ότι όμοια νουκλεόνια: nn, pp, φτιάχνουν ζευγάρια με ίσα και αντίθετα σπιν και ίδια στροφορμή (σε συμφωνία και με την αρχή του Pauli, και λόγω ελάχιστης δυναμικής ενέργειας)
 - Αν ο πυρήνας αποτελείται από αρτιο-Z και άρτιο-N, ανεξαρτητα μοντέλου, έχει σπιν μηδέν στη βασική κατάσταση
 - Αν όλα τα ζευγάρια νουκλεονίων έχουν συνιστώσα (s)=0 το σπιν J ενός περιττού-Α πυρήνα θα είναι το $J = l+s$ του “περιττού” νουκλεονίου



Η βασική κατάσταση του πυρηνικού σπιν ενός πυρήνα μετριέται με τις μεθόδους της Υπερλεπτής Υφής και του Μαγνητικού Συντονισμού

Η ενέργεια του φωτονίου κατά την γ-διάσπαση

13

Σε μια γ-μετάπτωση από μια αρχική διεγερμένη ενεργειακή στάθμη E_i σε μια τελική E_f , η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου καθορίζεται από τη διατήρηση της ενέργειας και της ορμής: $E_i = E_f + E_\gamma$

Η διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο σταθμών E_x μοιράζεται μεταξύ του φωτονίου γ και της ενέργειας ανάκρουσης του τελικού πυρήνα, $E_x = E_\gamma + E_R$.

Διατήρηση ορμής :

$$p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c} = \frac{h\nu}{c} = Mv$$

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2$$

Διατήρηση ενέργειας:

$$T = E_\gamma + E_R = h\nu + \frac{1}{2} Mv^2 = h\nu + \frac{1}{2M} \left(\frac{h\nu}{c} \right)^2 = h\nu + \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}$$

Ενέργεια ανακρουόμενου:

$$E_R = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \ll E_\gamma$$

π.χ. $A=50$, $E_\gamma = 2 \text{ MeV}$, $E_R \approx 4 \times 10^{12} / 2 \times 50 \times 10^9 \approx 40 \text{ eV}$ ($\ll 2 \times 10^6 \text{ eV}$)

Η ενέργεια της μετάπτωσης απάγεται από το φωτόνιο

Στο ίδιο άτομο ($A=50$) να υπολογισθεί η E_R για εκπομπή φωτονίου 1 eV (ατομικού)

Ποιοί κανόνες διέπουν την γ-διάσπαση?

Κανόνες Επιλογής

14

- Η γ-διάσπαση είναι ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση $\Rightarrow$

Διατήρηση της στροφορμής :

$$\vec{J}_{in} - \vec{J}_f = \vec{J}$$

προσοχή
διανύσματα

$$\left| |\vec{J}_{in}| - |\vec{J}_f| \right| \leq J \leq |\vec{J}_{in}| + |\vec{J}_f|$$

Αν $J_{in}=3$ και $J_f=2$, η j μπορεί να έχει τιμές 1,2,3,4,5.

Αν $J_{in}=7/2$ και $J_f=3/2$, η j μπορεί να έχει τιμές 2,3,4,5.

Η μετάπτωση $0 \rightarrow 0$ είναι απαγορευμένη αφού j φωτονίου $\neq 0$.
(Το φωτόνιο έχει σπιν $1\hbar$ + στροφορμή...)

Διατήρηση της πάριτυ απαιτεί

$$\pi_i = \pi_f \cdot \pi_\gamma$$

Αν $J_{in}=3^+$ και $J_f=0^+$, η j μπορεί να έχει τιμές: 3 και $\pi_\gamma=+1$

Αν $J_{in}=5/2^-$ και $J_f=1/2^+$, η j μπορεί να έχει τιμές 2,3 και $\pi_\gamma=-1$

Η ομοτιμία του φωτονίου πρέπει να είναι θετική αν η αρχική και τελική κατάσταση έχουν την ίδια ομοτιμία και αρνητική αν έχουν αντίθετες ομοτιμίες