

# $\gamma$ - διάσπαση

Δήμος Σαμψωνίδης  
(25-11-2014)

# $\gamma$ - διάσπαση

- Τύποι διασπάσεων
- Ενεργειακά
- Ακτινοβολία πολυπόλων
- Κανόνες επιλογής
- Εσωτερικές μετατροπές
- Πυρηνικός συντονισμός
- Φαινόμενο Möessbauer
- Φωτόνια στην ύλη

- Σημειώσεις
- C&G 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 13.3

# Τι είναι η $\gamma$ -διάσπαση ;

- ♦ 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 ( $\alpha$  ή  $\beta$ )
- ♦ Κατά την  $\gamma$ -διάσπαση ο ασταθής πυρήνας αποβάλλει την περίσσεια ενέργειας με αυθόρμητη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- ♦ Η  $\gamma$ -διάσπαση περιλαμβάνει δύο ακόμη διαδικασίες,
  - ♦ δημιουργία ηλεκτρονίων “εσωτερικών μετατροπών” και
  - ♦ εσωτερική δημιουργία ζεύγους ( $e^+e^-$ ).
- ♦ Είναι μία **ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση**

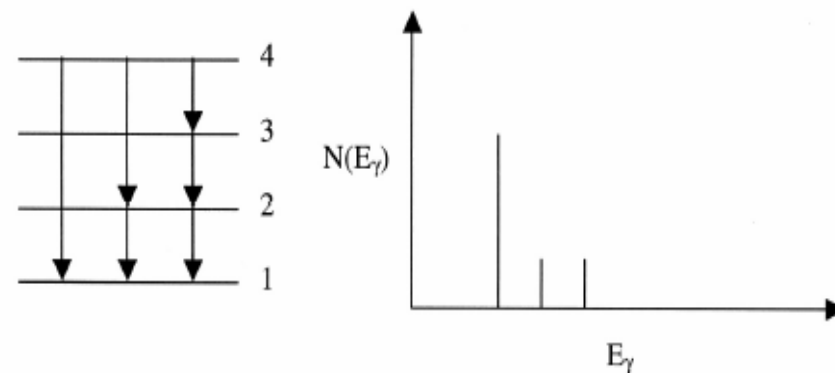
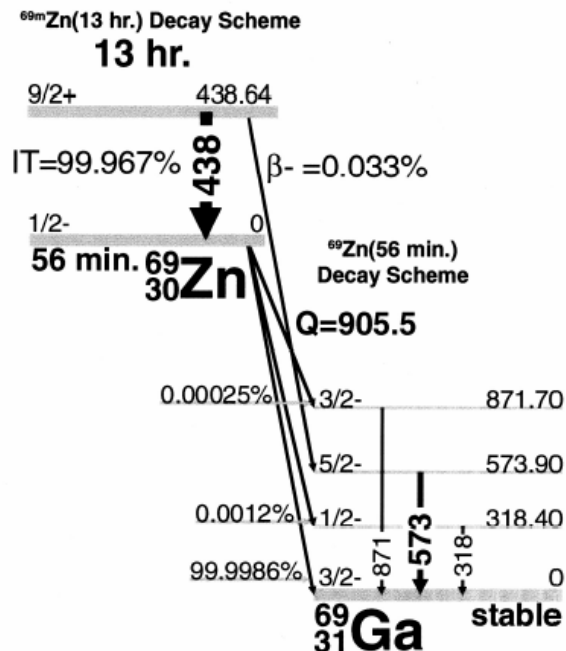
# $\gamma$ - διάσπαση

- *Πότε συμβαίνει μια  $\gamma$ -διάσπαση;*
- Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη αρκετή ενέργεια για να εκπεμφθεί ένα σωματίο (νουκλεόνιο) με ισχυρή αλληλεπίδραση
  - ΗΜ αλληλεπίδραση  $\ll$  Ισχυρή αλληλεπίδραση
  - Καταστάσεις  $E < 6 \text{ MeV}$  δεν μπορούν να διασπαστούν με Ισχυρή  $\rightarrow$  ΗΜ
- Συνήθως μετά από άλλες διασπάσεις ( $\alpha$ ,  $\beta$ , σχάση)
- Ο ποιο κοινός τρόπος αποδιέγερσης των διεγερμένων πυρηνικών καταστάσεων.
- Οι χρόνοι ζωής κυμαίνονται από  $10^{-12} \text{ s}$  - πάνω από 100 χρόνια.

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

# γ - διάσπαση

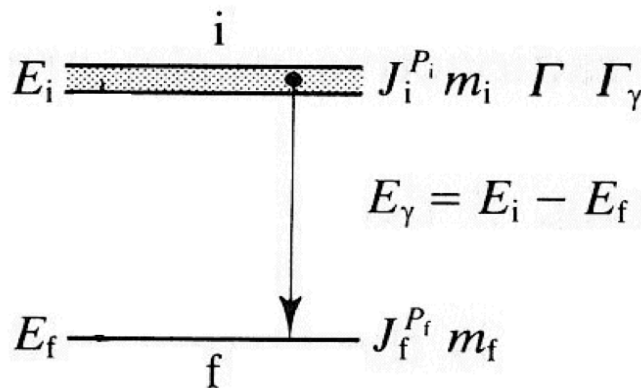
- ♦ Ο πυρήνας  ${}_{30}^{69}\text{Zn} \rightarrow {}_{31}^{69}\text{Ga} + e^- + \nu_{e(\text{anti})}$
- ♦ Ο νέος πυρήνας μπορεί να βρεθεί σε μία από τις 4 δυνατές καταστάσεις
- ♦ Από όλες τις δυνατές μεταπτώσεις κάποιες (3) είναι “επιτρεπτές”
  - ♦ Ο νέος πυρήνας θα αποδιεγερθεί εκπέμποντας γ-ακτινοβολία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



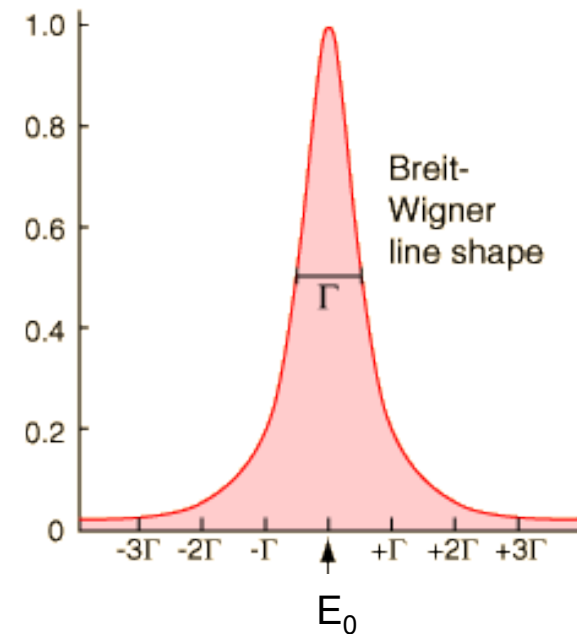
# Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

Κάθε διεγερμένη ενεργειακή στάθμη έχει ένα “φυσικό” πλάτος  $\Gamma$  όπως και κάθε κβαντική κατάσταση και ένα μέσο χρόνο ζωής  $\tau$ , που σχετίζονται μέσω της αρχής της απροσδιοριστίας:  $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \rightarrow \Gamma \cdot \tau \approx \hbar$

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

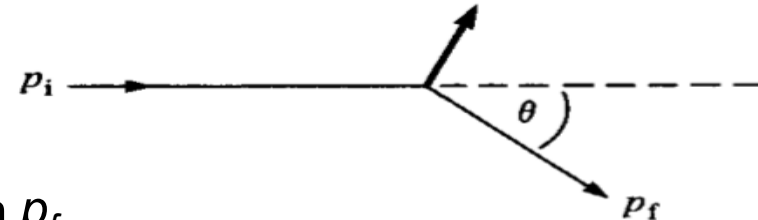


$$\tau \sim 10^{-12} \dots 10^9 \text{ s}$$



# Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

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  $\Delta E$  διεγείρεται σε υψηλότερη στάθμη υπολογίζουμε την ενέργεια του σκεδαζόμενου πρωτονίου  $E_f$ .

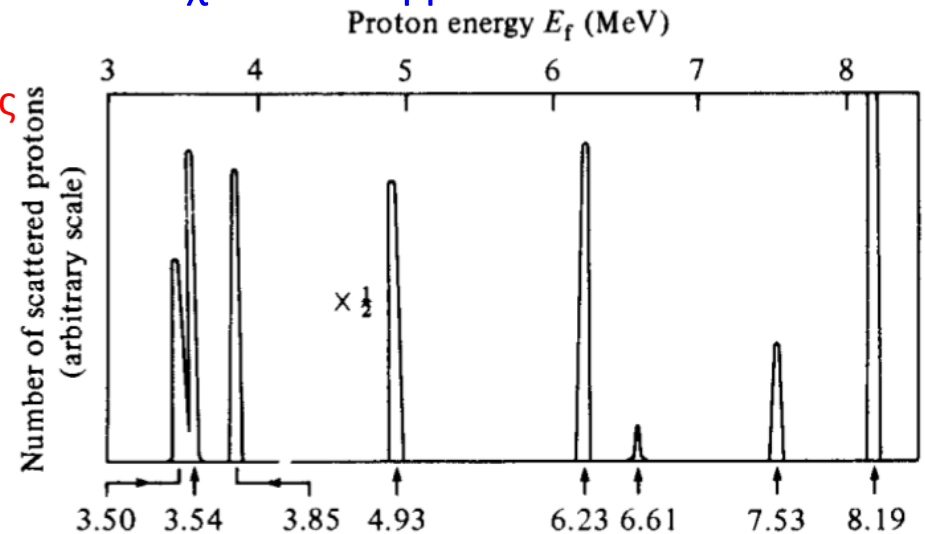
$$\Delta E = \frac{p_i^2}{2m_p} - \frac{p_f^2}{2m_p} - \frac{(p_i^2 + p_f^2 - 2p_i p_f \cos \theta)}{2m_A^*}$$

Ενέργεια ανάκρουσης

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

Μετράμε την ενέργεια των σκεδαζόμενων πρωτονίων σε συγκεκριμένη γωνία  $\theta$  (π.χ.  $90^\circ$ )  
Γραμμικό φάσμα  $\rightarrow$  η  $\Delta E$  παίρνει διακριτές τιμές.

π.χ. σκέδαση p 10.02 MeV σε  $^{10}\text{B}$

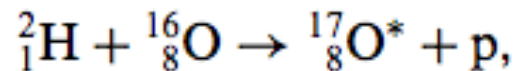


# Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

## Πειραματικός Προσδιορισμός

Η Μέθοδος απογύμνωσης του δευτερίου

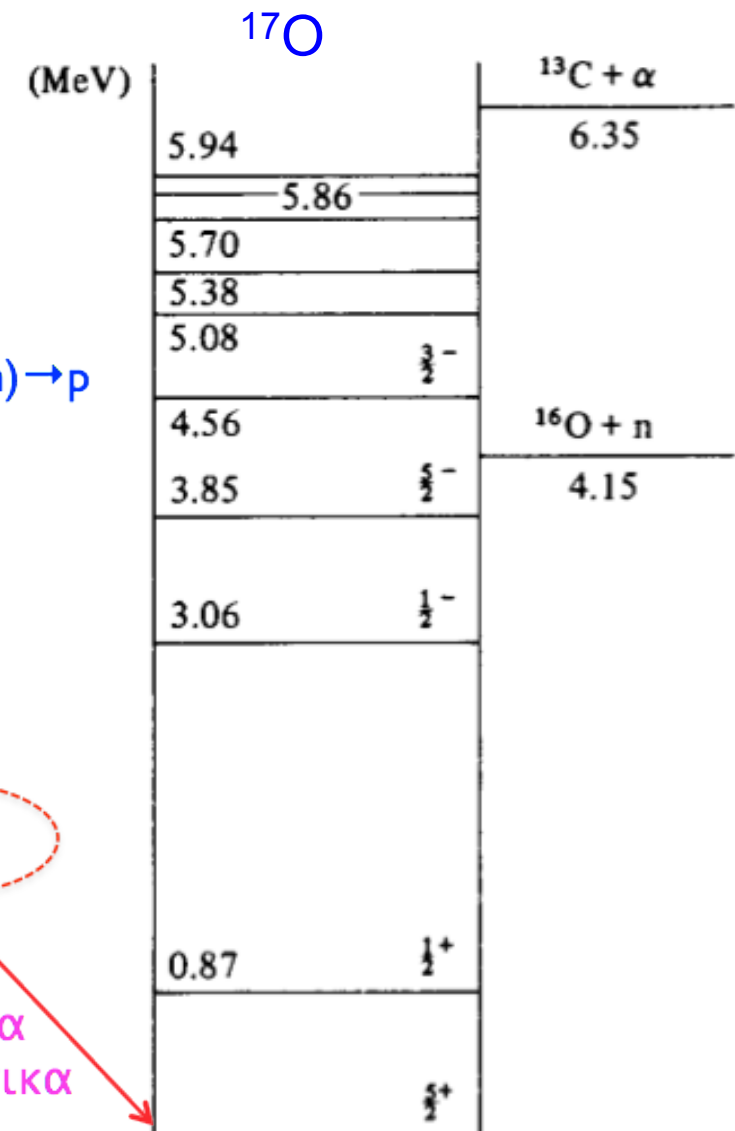
- κατάλληλη για β-ασταθείς πυρήνες



- ◆ Ο πυρήνας του δευτερίου χάνει ένα νουκλεόνιο(n) → 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

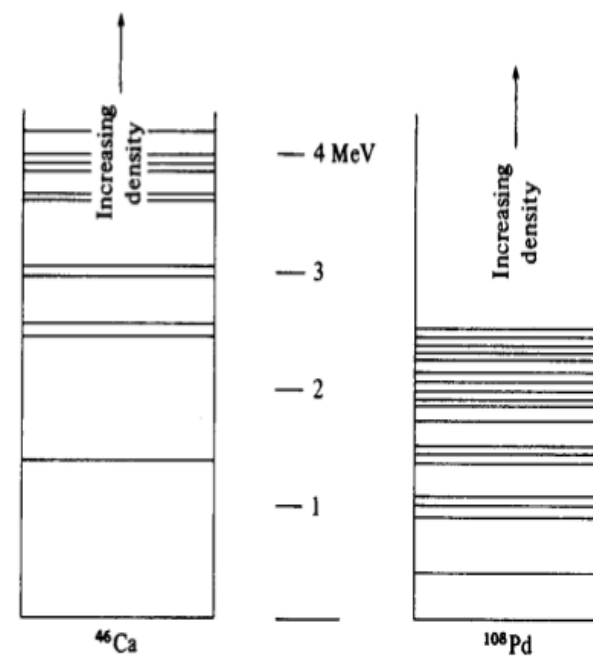
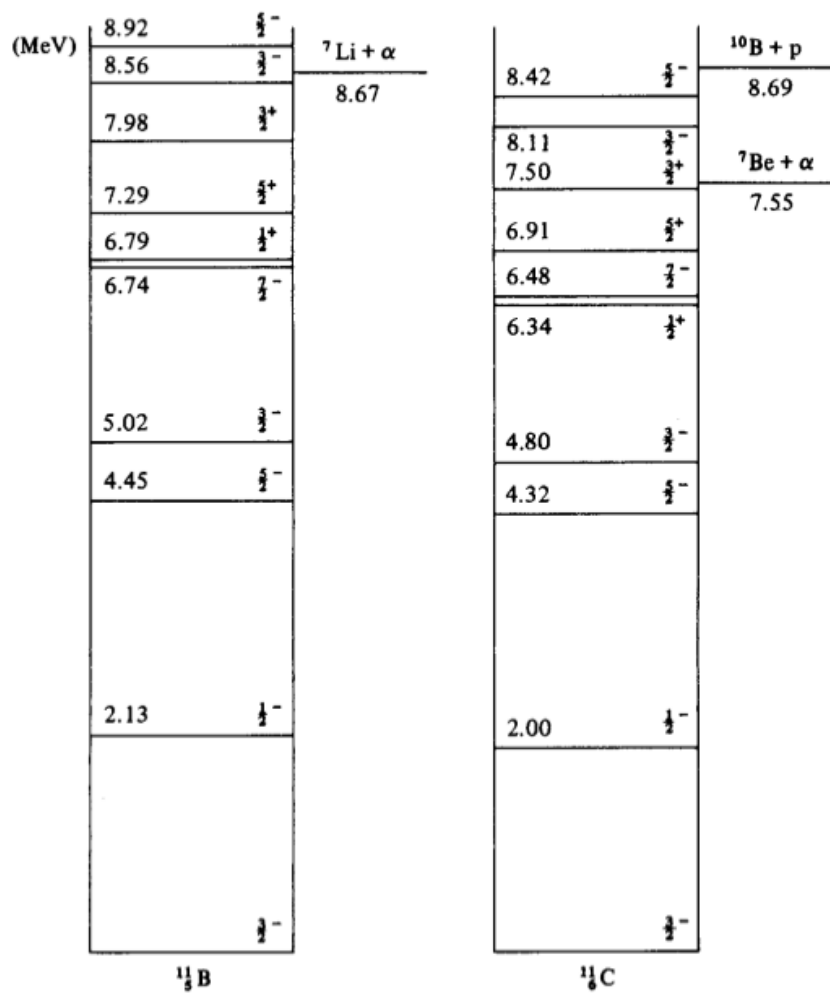
|             |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E_f$ (MeV) | 11.42 | 11.97 | 12.69 | 13.50 | 15.74 | 16.62 |
| $E$ (MeV)   | 5.08  | 4.56  | 3.85  | 3.06  | 0.87  | 0.0   |

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





# Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα



Όσο βαρύτερος ο πυρήνας τόσο περισσότερες στάθμες

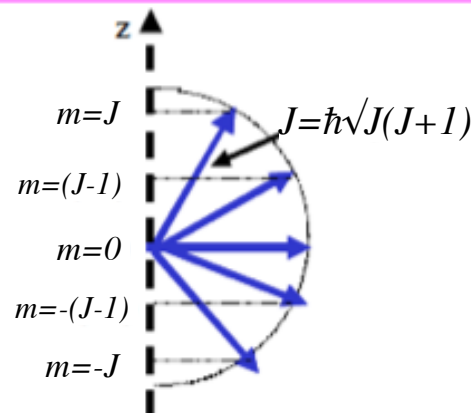
Οι ισχυρές δυνάμεις είναι ανεξάρτητες του φορτίου

# στροφορμή – spin του πυρήνα

- 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 διανύσματος  $J$  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**



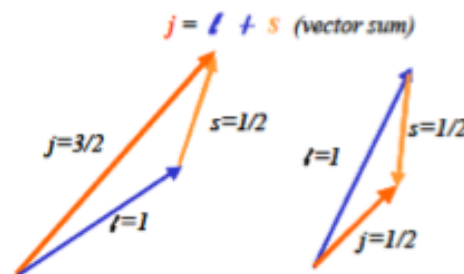
$J_z = m\hbar$  όπου  $m = +J, \dots, -J$

For odd A, I is half integral

For even A, I is integral (figure above)

Vector Coupling of Angular Momentum

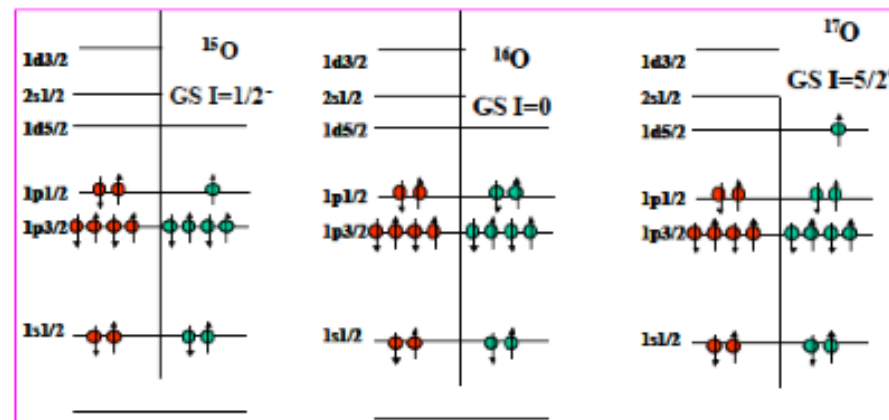
$l$  and  $s$  to give  $j$



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

# στροφορμή – spin του πυρήνα

- 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 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

# Ενεργειακά

Σε μια  $\gamma$ -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,

$$E_i = E_f + E_x.$$

Η ενέργεια της μετάπτωσης  $E_x$  μοιράζεται μεταξύ του φωτονίου  $\gamma$  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 ενέργεια:

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

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*

# Ακτινοβολία πολυπόλων

Η ακτινοβολία  $\gamma$  είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας  $\Rightarrow$   
Μπορεί να θεωρηθεί σαν παλλόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο που διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός

Ο πυρήνας μπορεί να θεωρηθεί σαν σύνολο από παλλόμενα φορτία και παλλόμενα ρεύματα (που δημιουργούνται από την κίνηση των πρωτονίων και νετρονίων του)

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό ή μαγνητικό πολύπολο, και αποτελείται από φωτόνια συγκεκριμένης στροφορμής και ομοτιμίας (parity).

- Κατανομή φορτίου  $\rightarrow$  ηλεκτρική ροπή
- Κατανομή ρεύματος  $\rightarrow$  μαγνητική ροπή



Ταλάντωση  $\rightarrow$  εκπομπή  
φωτονίων

# Ακτινοβολία πολυπόλων

- Οι δύο δυνατές καταστάσεις ακτινοβολίας  $E$  (ηλεκτρική μορφή) -όταν το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στη διάδοση του κύματος- &  $M$  (μαγνητική μορφή) -όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στη διάδοση του κύματος
- Η εκπομπή φωτονίου κατά τη  $\gamma$ -μετάπτωση μπορεί να χαρακτηριστεί ως **ηλεκτρική ( $E$ )** ή **μαγνητική ( $M$ )** και ανάλογα με την τιμή της στροφορμής  $l$  του φωτονίου ως  **$2^l$  -πολική**

(ακτινοβολία τύπου ( $M$ ) με  $l=1$  είναι **μαγνητική διπολική**)

(ακτινοβολία τύπου ( $E$ ) με  $l=2$  είναι **ηλεκτρική τετραπολική**)

**Οι ( $E$ ) και ( $M$ ) ακτινοβολίες πολυπόλου έχουν διαφορετική ομοτιμία:**

Το φωτόνιο έχει ομοτιμία  $(-1)^l$  όταν η αποδιέγερση είναι “ηλεκτρική”

Το φωτόνιο έχει ομοτιμία  $(-1)^{l+1}$  όταν η αποδιέγερση είναι “μαγνητική”

⇒ Οι μεταπτώσεις  $\gamma$  χαρακτηρίζονται από την στροφορμή  $l$  που απάγεται από το φωτόνιο.

- Η πιθανότητα μετάπτωσης μειώνεται δραματικά με την αύξηση της μεταβολής της στροφορμής

# Ακτινοβολία πολυπόλων

- Αφού η  $\gamma$  ακτινοβολία προκύπτει από ηλεκτρομαγνητικές διαδικασίες, μπορεί να θεωρηθεί ως μεταβολή κατανομής φορτίου (E) ή μεταβολή κατανομής ρεύματος (M).
- Η εκπομπή φωτονίου κατά τη  $\gamma$ -μετάπτωση μπορεί να θεωρηθεί ως διαδικασία εκπομπής ακτινοβολίας πολυπόλου
- Η εκπομπή- $\gamma$  αντιστοιχεί ή σε μαγνητική (M) ή ηλεκτρική (E) ακτινοβολία πολυπόλου
  - E και M ακτινοβολίες πολυπόλου διαφέρουν σε ομοτιμία
- Η μεταπτώσεις  $\gamma$  μπορούν να χαρακτηριστούν από την στροφορμή  $\ell$  που απάγεται από το φωτόνιο.
- Η πιθανότητα μετάπτωσης μειώνεται δραματικά με την αύξηση της μεταβολής της στροφορμής



# Ακτινοβολία πολυπόλων

- Κάθε πολύπολο τάξης  $L$ 
  - $2^L$ -πολο ( $1=\text{δίπολο}$ ,  $2=\text{τετράπολο}$ ,  $3=\text{οκτάπολο}$ ...)
- φέρει στροφορμή
  - $L=1,2,3,\dots(\hbar)$
- Συμβολισμός ακτινοβολίας ηλεκτρικού (ή μαγνητικού) πολυπόλου
  - $E1$  ή  $M1$ , ....
    - π.χ.  $E2$  : ηλεκτρικό τετράπολο ( $2^2$ )
    - $M3$ : μαγνητικό οκτάπολο
- Η ομοτιμία για την κάθε περίπτωση
  - $\pi_\gamma = (-1)^L$       *ηλεκτρικό πολύπολο*
  - $\pi_\gamma = -(-1)^L$       *μαγνητικό πολύπολο*



# Ακτινοβολία πολυπόλων

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα είναι το άθροισμα των συνεισφορών των πολυπόλων (αν και συνήθως 1-2 πολύπολα προεξάρχουν)

Ενα φωτόνιο (είναι ένα διανυσματικό σωματίο) πρέπει να φέρει τουλάχιστον μια μονάδα τροχιακής στροφορμής, (άρα δεν επιτρέπονται E0 και M0 ακτινοβολίες)

*Η μεταβολή της πάριτυ σε μια μετάπτωση καθορίζεται από την τάξη της αντίστοιχης ακτινοβολίας και τον τύπο του πολυπόλου*

Για μεταπτώσεις E:  $\pi_i \pi_f(E) = (-1)^L$

Για μεταπτώσεις M:  $\pi_i \pi_f(E) = -(-1)^L$

Η διατήρηση της στροφορμής και της ομοτιμίας οδηγούν σε ένα σύνολο κανόνων επιλογής οι οποίοι καθορίζουν τις επιτρεπτές μεταπτώσεις.

# Ακτινοβολία πολυπόλων

| Ακτινοβολία          | Συμβολισμός | $l$ (τιμή $L_\gamma$ ) | $\pi_\gamma$ |
|----------------------|-------------|------------------------|--------------|
| Ηλεκτρ. Διπόλου      | E1          | 1                      | -1           |
| Μαγν. Διπόλου        | M1          | 1                      | 1            |
| Ηλεκτρ. Τετραπόλου   | E2          | 2                      | 1            |
| Μαγν. Τετραπόλου     | M2          | 2                      | -1           |
| Ηλεκτρ. Οκταπόλου    | E3          | 3                      | -1           |
| Μαγν. Οκταπόλου      | M3          | 3                      | 1            |
| Ηλεκτρ. Δεκαεξαπόλου | E4          | 4                      | 1            |
| Μαγν. Δεκαεξαπόλου   | M4          | 4                      | -1           |
| .....                |             |                        |              |

# Κανόνες επιλογής γ-διάσπασης

Διατήρηση της στροφορμής :  $\vec{I}_{in} - \vec{I}_f = \vec{L} \cdot \dots$

προσοχή  
διανύσματα

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

Αν  $I_{in}=3$  και  $I_f=2$ , η  $l$  μπορεί να έχει τιμές 1,2,3,4,5.

Αν  $I_{in}=7/2$  και  $I_f=3/2$ , η  $l$  μπορεί να έχει τιμές 2,3,4,5.

Η μετάπτωση  $0 \rightarrow 0$  είναι απαγορευμένη αφού  $j$  φωτονίου  $\neq 0$ .  
(με εκπομπή ενός φωτονίου)

και η διατήρηση της πάριτυ απαιτεί  $\pi_i = \pi_f \cdot \pi_\gamma$

Αν  $I_{in}=3^+$  και  $I_f=0^+$ , η  $l$  μπορεί να έχει τιμές 3 και  $\pi_\gamma=+1$

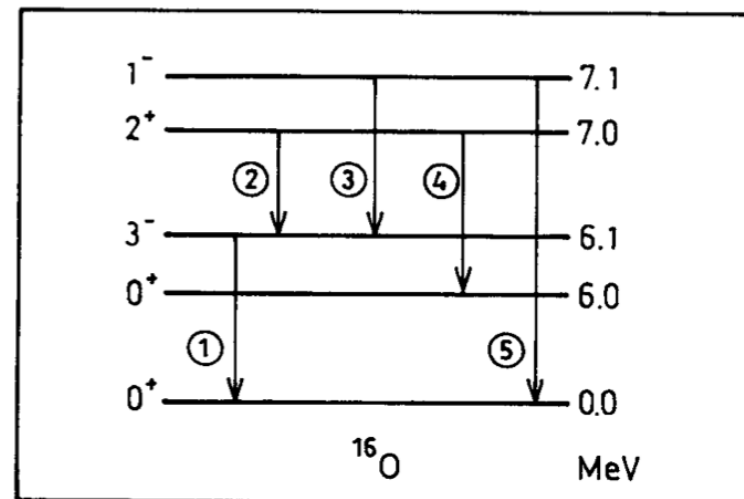
Αν  $I_{in}=5/2^-$  και  $I_f=1/2^+$ , η  $l$  μπορεί να έχει τιμές 2,3 και  $\pi_\gamma=-1$

# άσκηση

Δίνονται οι στάθμες του  $^{16}\text{O}$  με τα αντίστοιχα σπιν, πάρτυ και ενέργεια.

•Τί είδους μετάπτωση είναι η κάθε αποδιέγερση και πόση η ενέργεια σε κάθε περίπτωση (1,2,3,4,5).

•Δώστε τους δυνατούς τρόπους αποδιέγερσης της στάθμης 6.0 MeV.



|   | $J_i \rightarrow J_f$ | $\Delta J \leq l \leq \Sigma J$ | $\Delta \pi$ | τύπος          | $E_\gamma$ |
|---|-----------------------|---------------------------------|--------------|----------------|------------|
| 1 | $3 \rightarrow 0$     | 3                               | -1           | E3             | 6.1        |
| 2 | $2 \rightarrow 3$     | 1,2,3,4,5                       | -1           | E1+M2+E3+M4+E5 | 0.9        |
| 3 | $1 \rightarrow 3$     | 2,3,4                           | +1           | E2+E4+M3       | 1.0        |
| 4 | $2 \rightarrow 0$     | 2                               | +1           | E2             | 1.0        |
| 5 | $1 \rightarrow 0$     | 1                               | -1           | E1             | 7.1        |

# ενέργεια- χρόνος ζωής

Η πιθανότητα μετάπτωσης ( $1/\tau$ : μέσος χρόνος ζωής) στη  $\gamma$ -διάσπαση προκύπτει από την ημικλασική θεωρία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

$$\lambda(l) = \frac{1}{\tau_\gamma} = \frac{8\pi(l+1)}{l[(2l+1)!!]^2} \frac{1}{\hbar} \frac{E_\gamma^{2L+1}}{(\hbar c)^{2l}} \propto B(l)$$

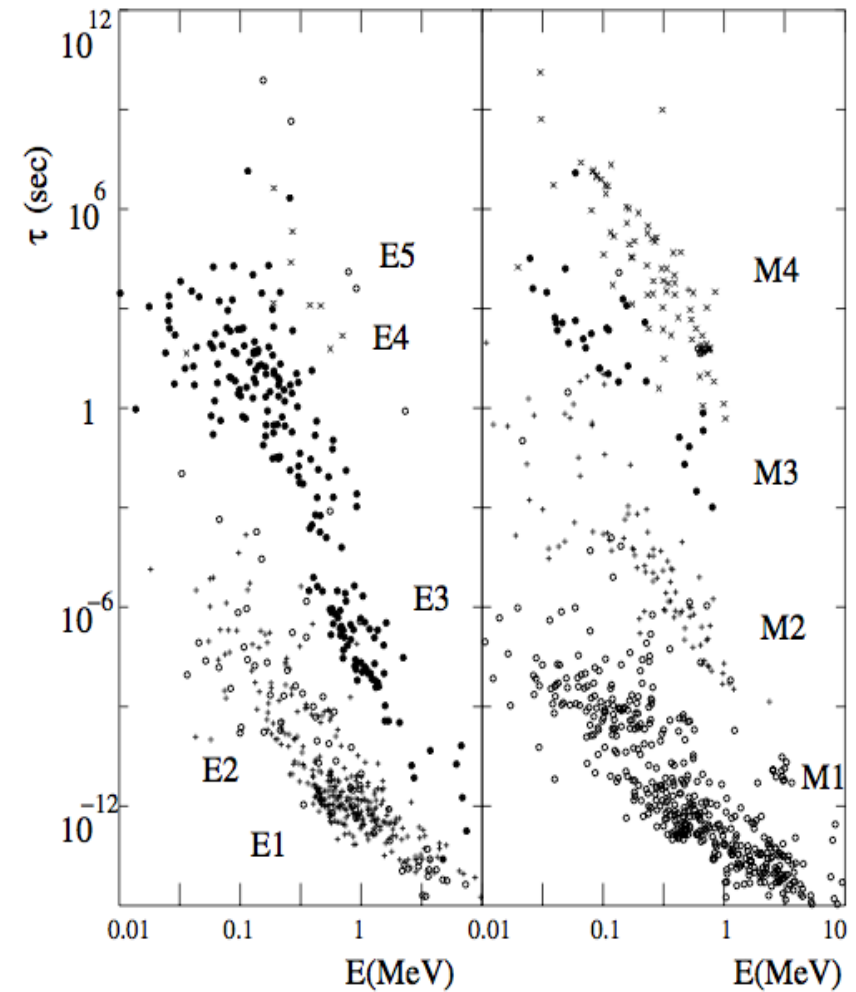
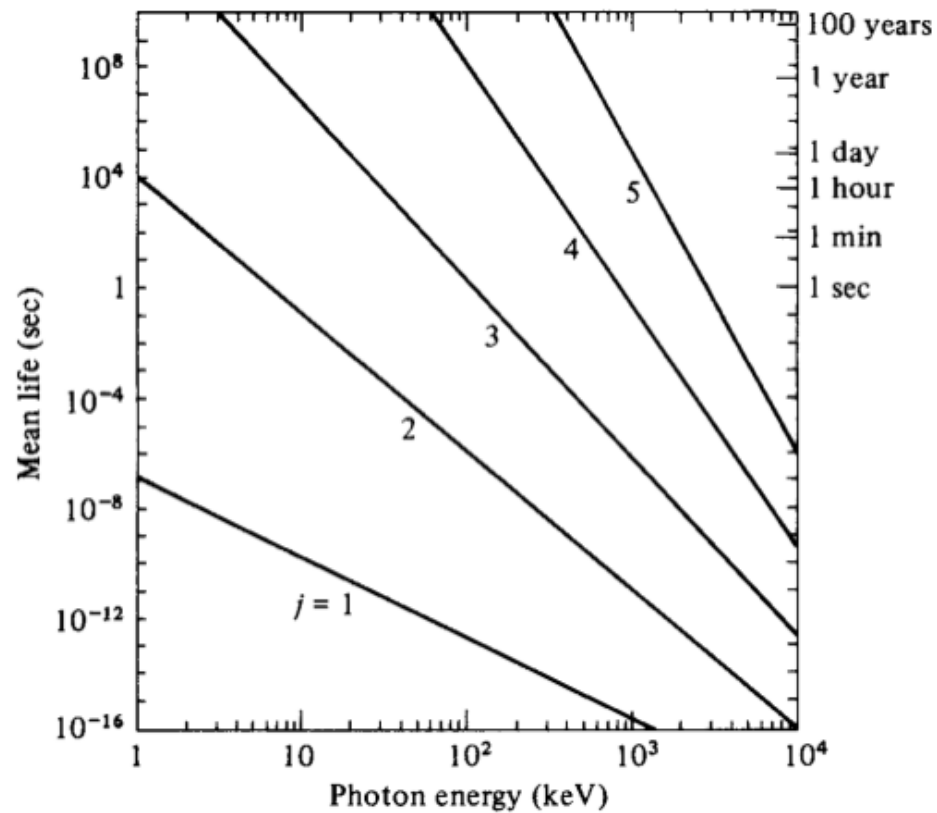
$B(l)$  είναι η ανοιγμένη πιθανότητα μετάπτωσης και περιέχει πληροφορία του πυρήνα

Ο Weisskopf χρησιμοποιώντας το μοντέλο των φλοιών ενός απλού σωματιδίου κατέληξε σε σχέσεις που εκφράζουν τις σταθερές διάσπασης σε συνάρτηση της  $E$  και  $A$ .

| Τύπος μετάπτωσης | $t_\gamma$ (χρόνος ημιζωής, s)        | $t_\gamma$ (s) για $A=125, E=0.1 \text{ MeV}$ |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| E1               | $5.7 \times 10^{-15} E^{-3} A^{-2/3}$ | $2 \times 10^{-13}$                           |
| E2               | $6.7 \times 10^{-9} E^{-5} A^{-4/3}$  | $1 \times 10^{-6}$                            |
| E3               | $1.2 \times 10^{-2} E^{-7} A^{-2}$    | 8                                             |
| E4               | $3.4 \times 10^4 E^{-9} A^{-8/3}$     | $9 \times 10^7$                               |
|                  |                                       |                                               |
| M1               | $2.2 \times 10^{-14} E^{-3}$          | $2 \times 10^{-11}$                           |
| M2               | $2.6 \times 10^{-8} E^{-5} A^{-2/3}$  | $1 \times 10^{-4}$                            |
| M3               | $4.9 \times 10^{-2} E^{-7} A^{-4/3}$  | $8 \times 10^2$                               |
| M4               | $1.3 \times 10^5 E^{-9} A^{-2}$       | $9 \times 10^9$                               |

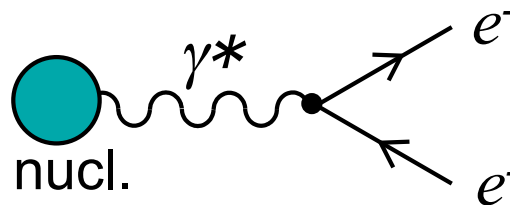
# ενέργεια- χρόνος ζωής

Για  $A=100$ ,  
ηλεκτρικές πολυπολικές

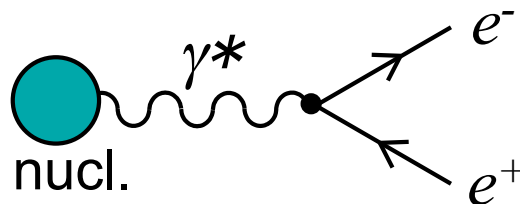


# $\gamma$ - διάσπαση

- Τι γίνεται όταν ένας πυρήνας με  $J=0$  χρειάζεται να αποδιεγερθεί;
- ΔΕΝ μπορεί μέσω εκπομπής  $\gamma$ 
  - Μπορεί να κάνει εσωτερική μετατροπή (α'la Auger στο άτομο)



- Θα μπορούσε μέσω δημιουργίας ζεύγους αν  $E > 2m_e$   
(virtual  $\gamma$  δεν είναι απαραίτητο να έχει  $S=1$  και μετατρέπεται σε ζεύγος σε μια  $J=0$  κατάσταση)



# Εσωτερικές Μετατροπές

0-→0 απαγορευμένη

Τι γίνεται σε μια 0<sup>+</sup> διεγερμένη

Διασπάται με

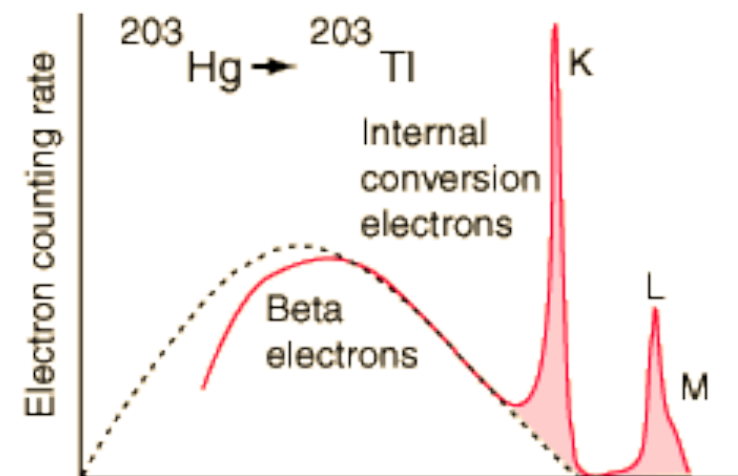
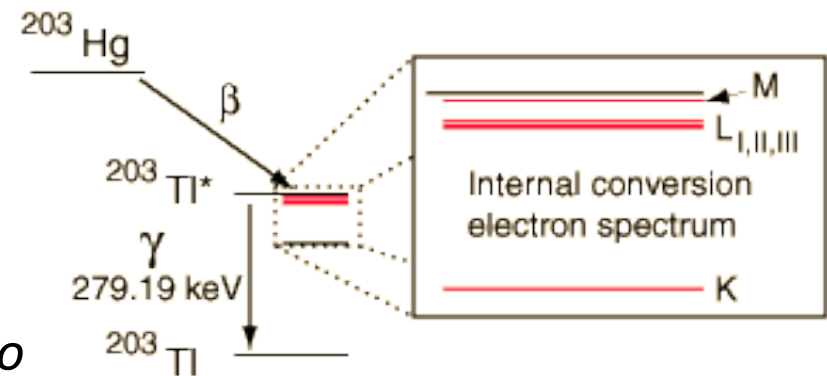
- **Εσωτερική μετατροπή**

Ο πυρήνας εκπέμπει ένα δυνητικό φωτόνιο το οποίο διώχνει ένα ατομικό ηλεκτρόνιο. Η τροχιά του  $e$  περνάει μέσα από τον πυρήνα.

Πιθανότητα να βρεθεί στον πυρήνα αυξάνει με τη  $Z^3$ . Για  $Z \gg$  ανταγωνίζεται τις  $\gamma$  διασπάσεις.

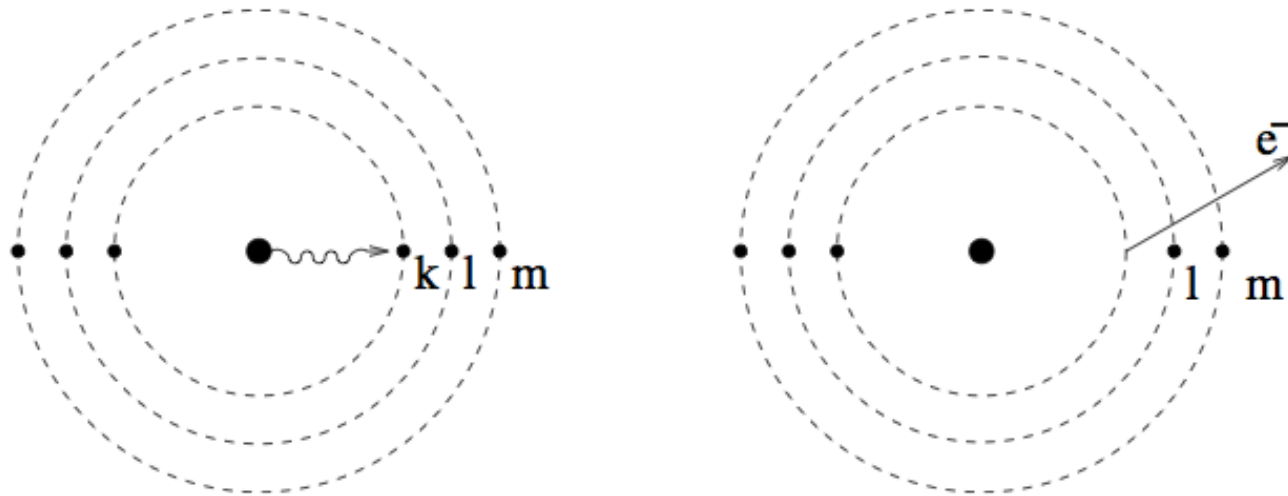
- **Εσωτερική μετατροπή ζεύγους  $e^+e^-$ .**

Ο πυρήνας εκπέμπει ένα δυνητικό φωτόνιο το οποίο διώχνει μετατρέπεται σε ζεύγος  $e^+e^-$ .





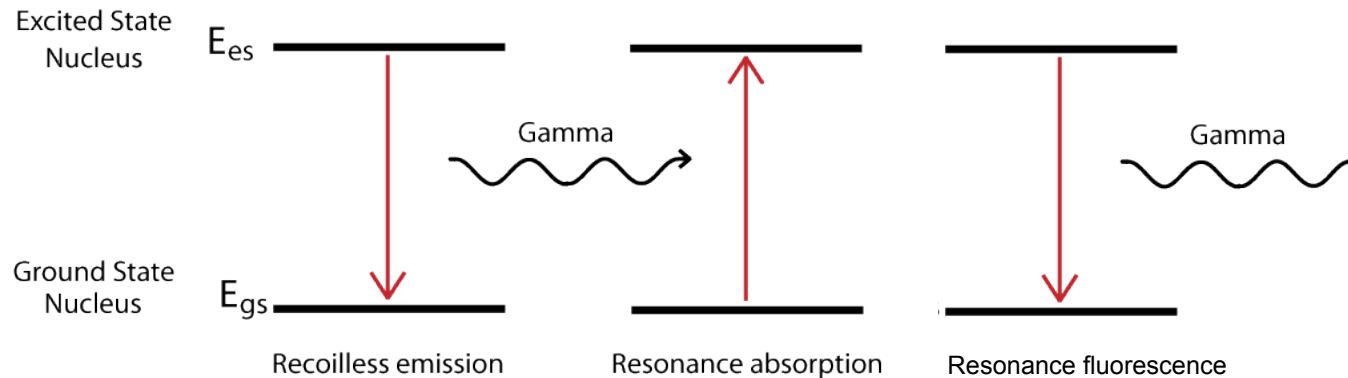
# Εσωτερικές Μετατροπές



Προσοχή:

Δεν μπορεί να είναι Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο λόγω διατήρησης της στροφορμής.

# Πυρηνικός συντονισμός



Φωτόνιο απο αποδιέγερση  $\gamma$  απορροφάται από όμοιο πυρήνα (απορρόφηση συντονισμού), ο οποίος στη συνέχεια αποδιεγείρεται επανεκπέμποντας φωτόνιο (φθορισμός συντονισμού) (1929 Kuhn) .

Πολλές προσπάθειες αποδείχθηκαν άκαρπες ( -1951).

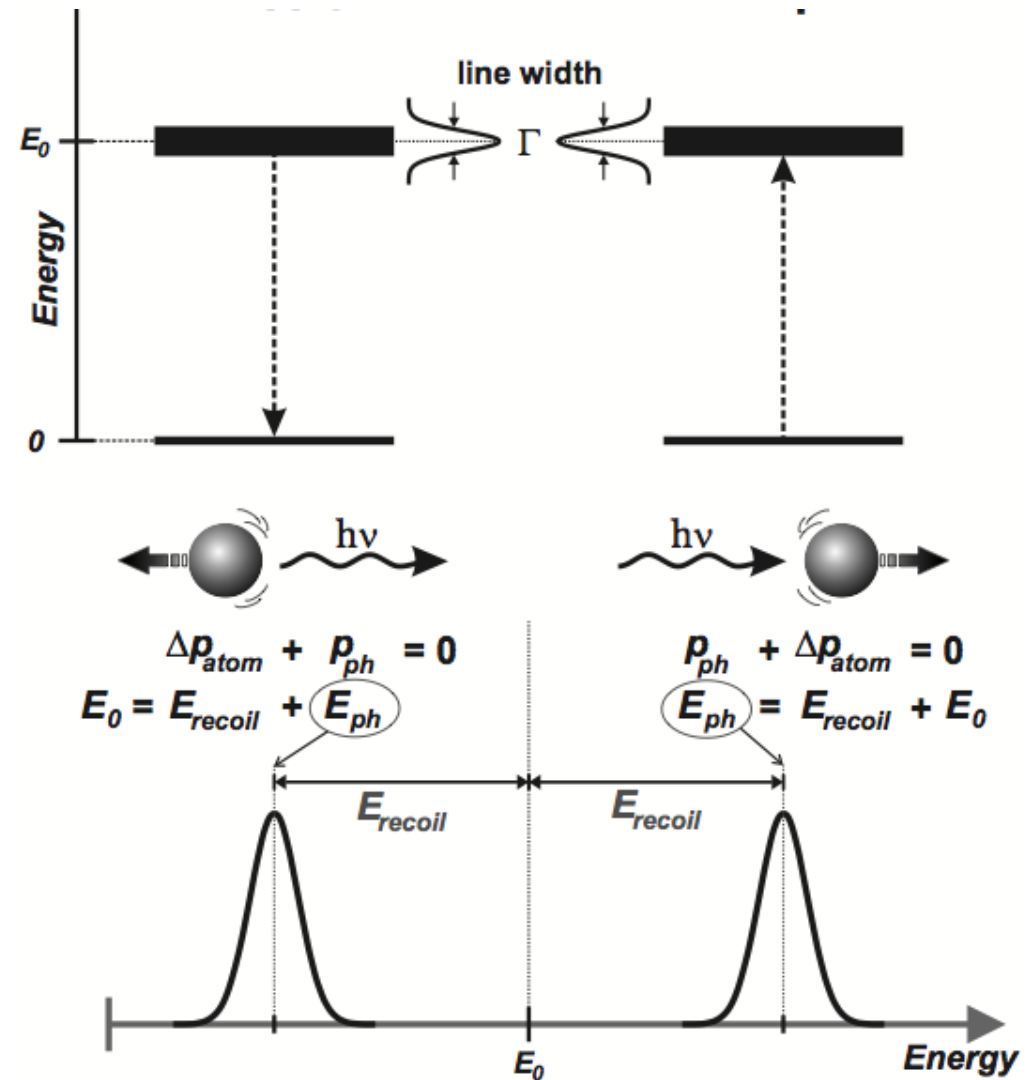
# Πυρηνικός συντονισμός

## Ανάκρουση πυρήνα

- κατά την εκπομπή:  $E_\gamma = E_0 - E_R$
- κατά την απορρόφηση:  $E_\gamma = E_0 + E_R$

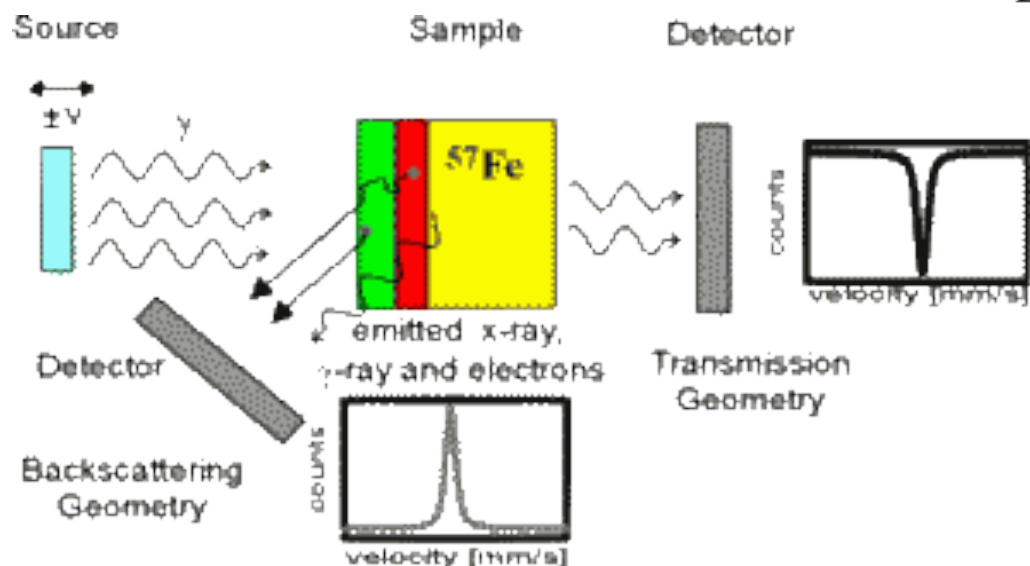
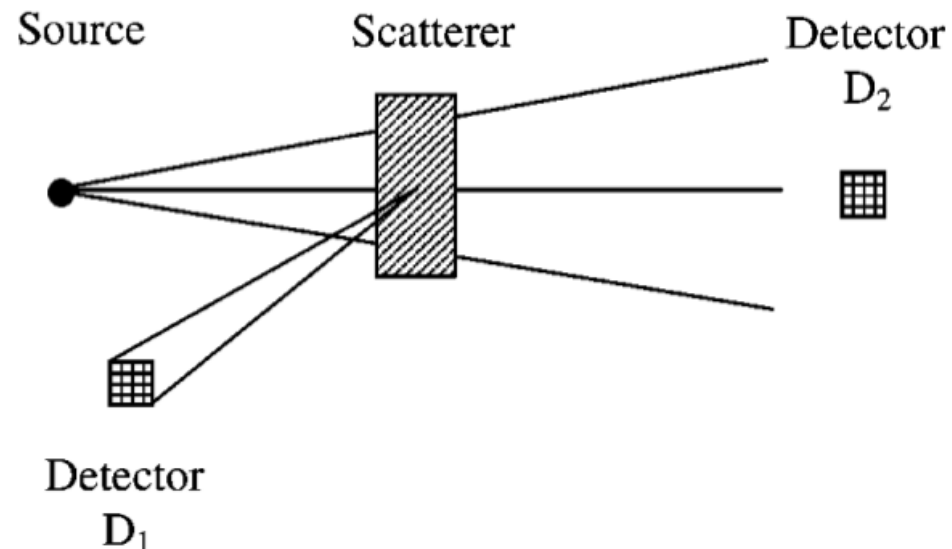
πλάτος της στάθμης

$$\tau \Gamma \approx \hbar$$



# Πυρηνικός συντονισμός

*Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση  
φθορισμό συντονισμού ή/και  
απορρόφηση συντονισμού*

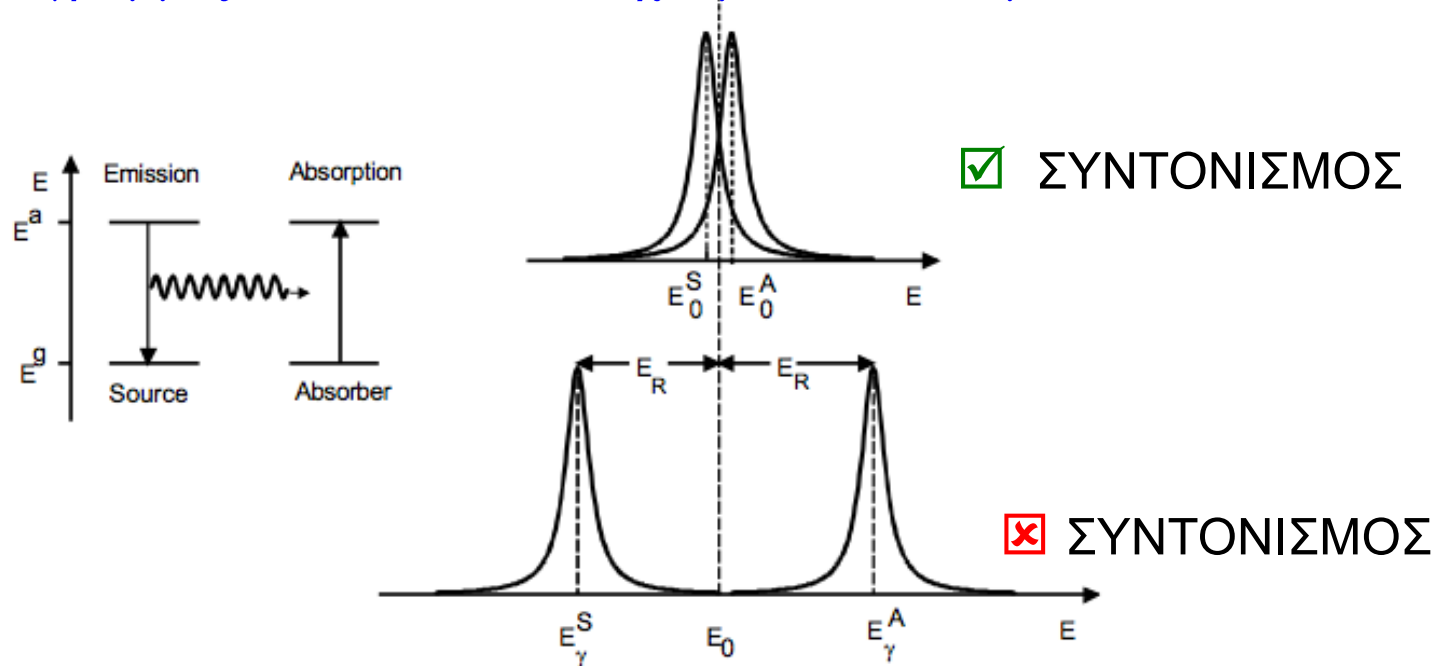


# Πυρηνικός συντονισμός

Γιατί δεν παρατηρείτε ο πυρηνικός συντονισμός ??

Διότι η γραμμή εκπομπής δεν επικαλύπτεται με τη γραμμή απορρόφησης

Αν οι δύο γραμμές επικαλύπτονται έχουμε συντονισμό.



Μπορεί να ξεπεραστεί το πρόβλημα με 2 τρόπους,

1. Μειώνοντας την ενεργειακή διαφορά των δύο γραμμών (πείραμα Moon).
2. Διευρύνοντας το πλάτος των γραμμών ώστε να αλληλεπικαλυφθούν (πείραμα Malmfors, με θερμική κίνηση) .

# Πείραμα Moon

*1950s, Philip Moon in Birmingham*

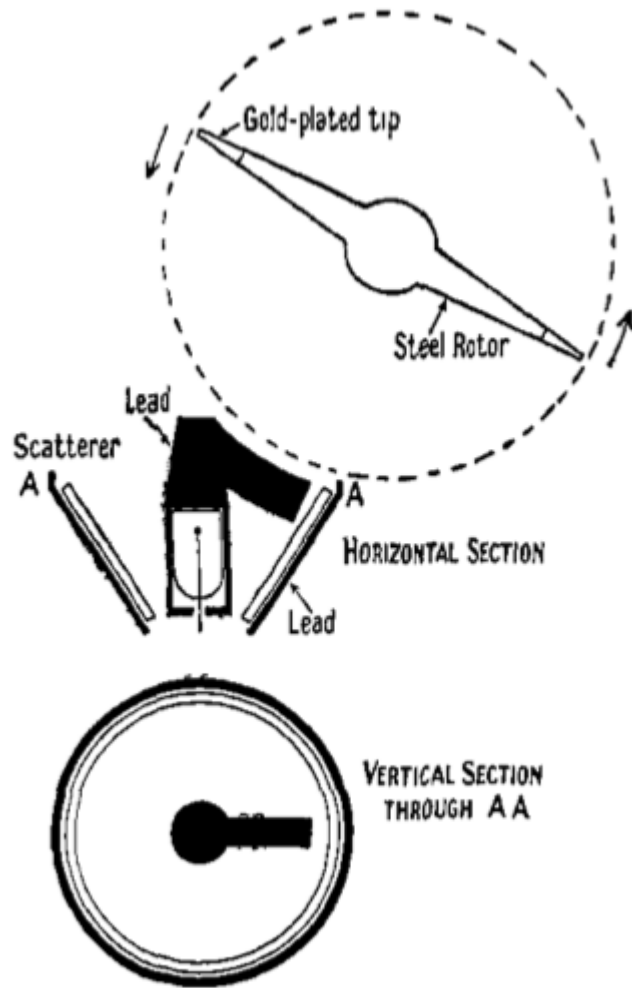


Figure 1. (Not to scale)

Χρησιμοποίησε το φαινόμενο Doppler για να αντισταθμίσει το έλλειμα ενέργειας μεταξύ πηγής και σκεδαστή προσθέτοντας ενέργεια :

$$E_D = \frac{v_n}{c} E_\gamma$$

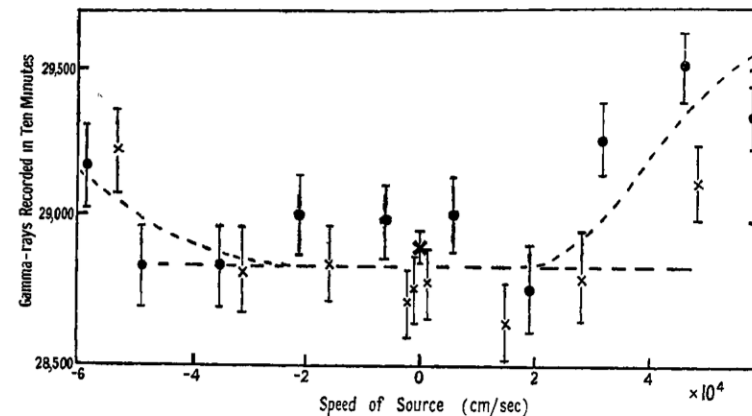


Figure 2. Effect of speed of source on rate of recording of scattered gamma-rays. Negative speeds indicate rotation in opposite sense to that shown in Figure 1.

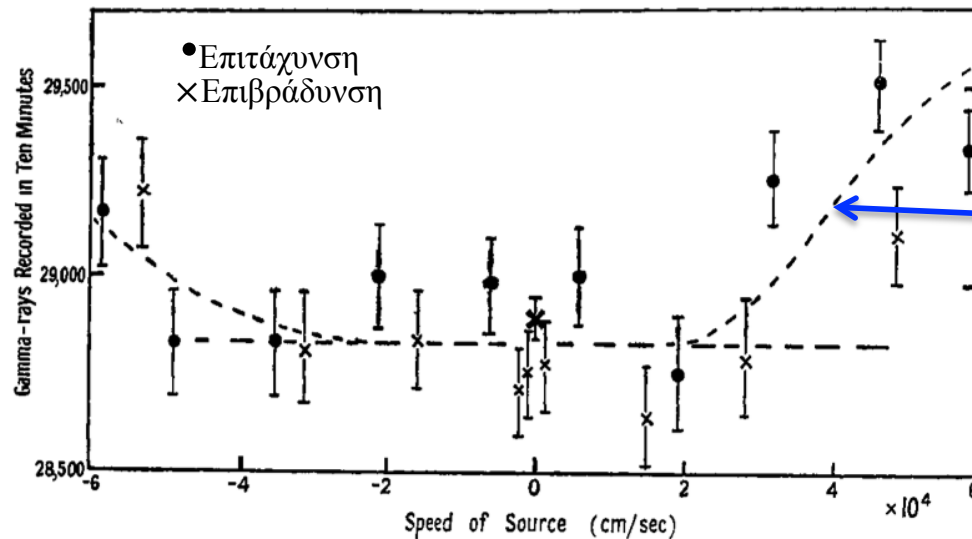
Κατέγραψε μικρή αύξηση στην ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

# Πείραμα Moon

Πηγή  $^{198}\text{Au}$  ( $\beta$ )  $\rightarrow$   $^{198}\text{Hg}$   
 $^{198}\text{Hg}$   $\gamma$ - 411 keV  
Σκεδαστής Hg

## Επιλογή ισοτόπου

- Σε φυσική αυθονία για σκεδαστής
- Να έχει διεγερμένες καταστάσεις για να χρησιμοποιηθεί ως πηγή  $\gamma$ .
- Αποδιέγερση στη βασική στάθμη
- Μεγάλο εύρος  $\Gamma$ .
- Απαιτούμενη ταχύτητα 32E/A μέχρι 5 cm/s (εφικτή τεχνολογικά)

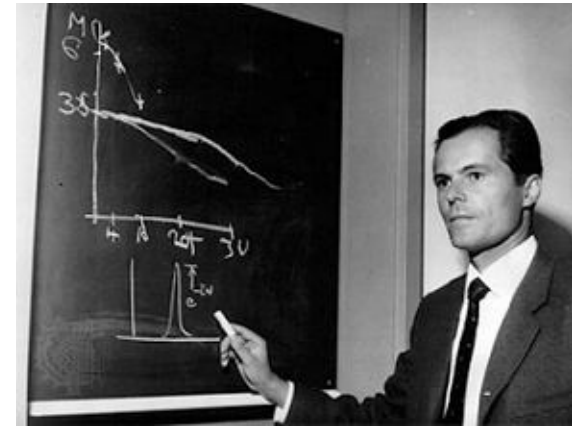


Κατέγραψε μικρή αύξηση στην ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

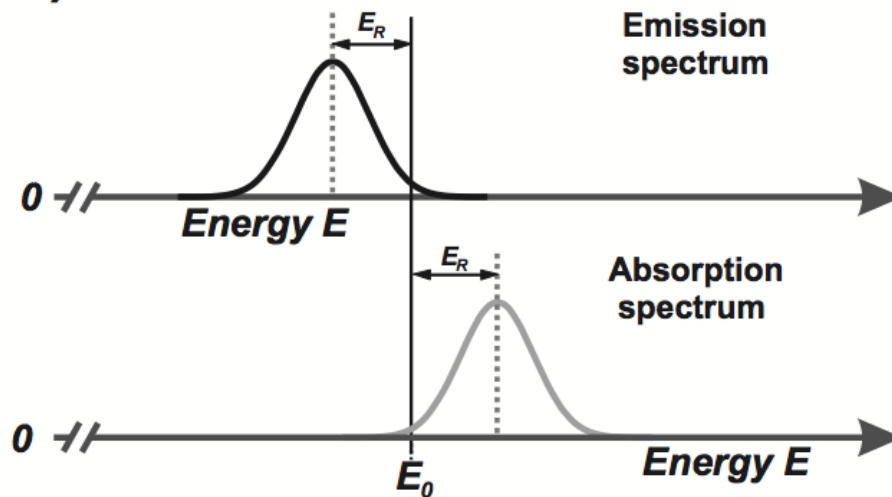
Figure 2. Effect of speed of source on rate of recording of scattered gamma-rays. Negative speeds indicate rotation in opposite sense to that shown in Figure 1.

# Rudolf L. Mössbauer

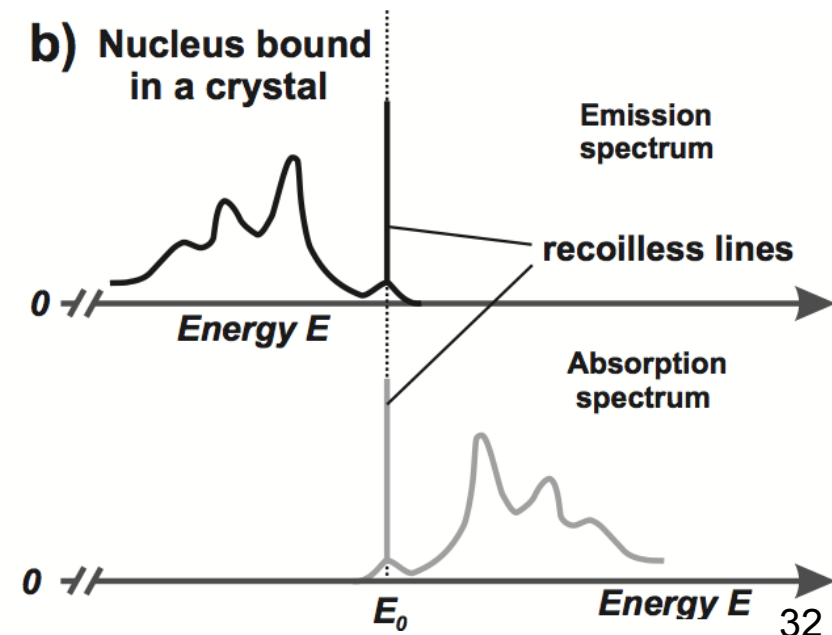
Ο Mössbauer ανακάλυψε ότι σε **χαμηλές θερμοκρασίες**, όταν ένας πυρήνας που βρίσκεται στο πλέγμα ενός κρυστάλλου και εκπέμπει ένα γ-φωτόνιο, η ενέργεια ανάκρουσης γίνεται ελάχιστη και σε κάποιες περιπτώσεις ο κρύσταλλος δεν μπορεί να απορροφήσει ενέργεια και άρα η ενέργεια ανάκρουσης μηδενίζεται.



## a) Freely recoiling nucleus

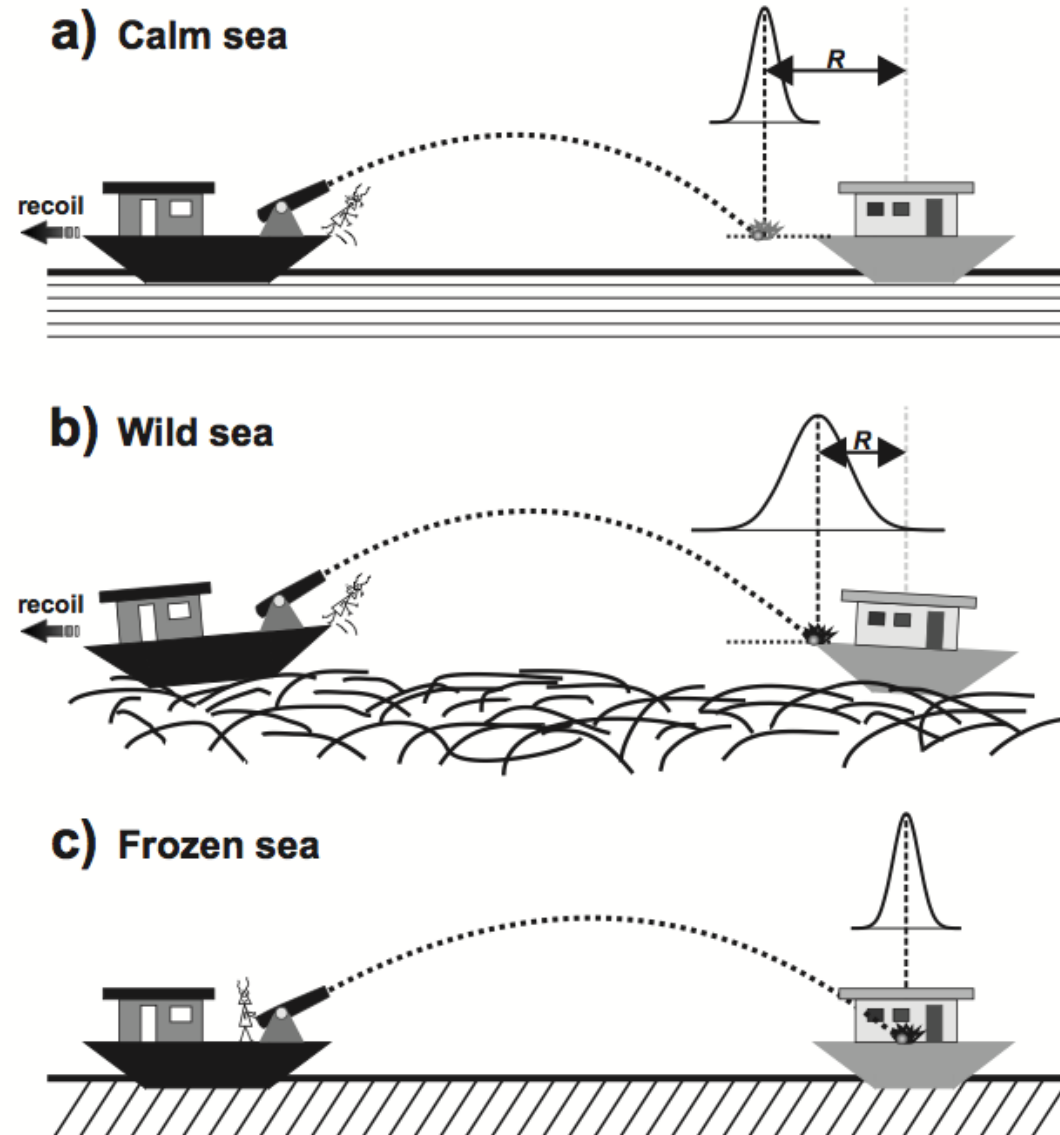


## b) Nucleus bound in a crystal

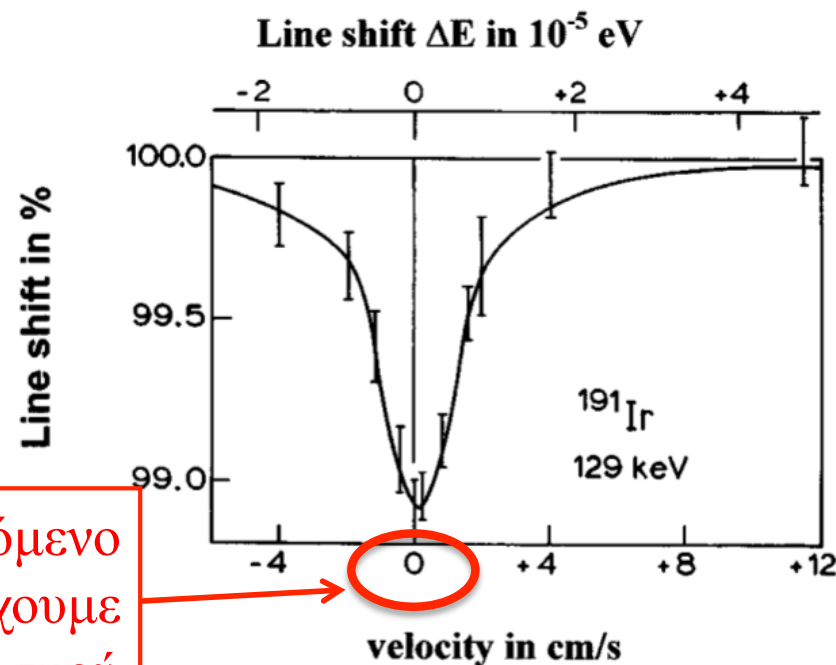
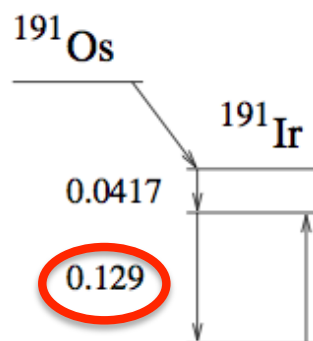
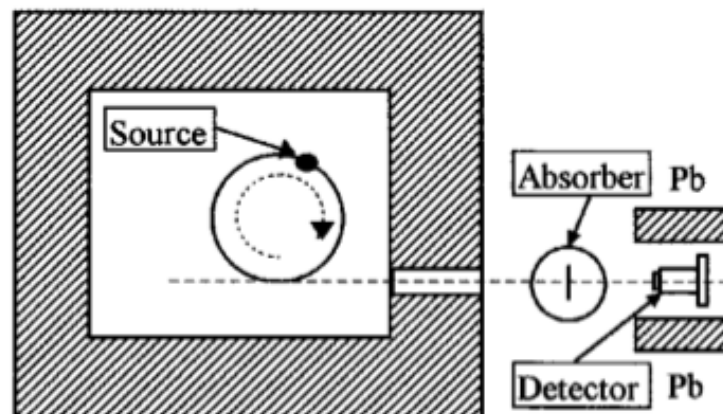
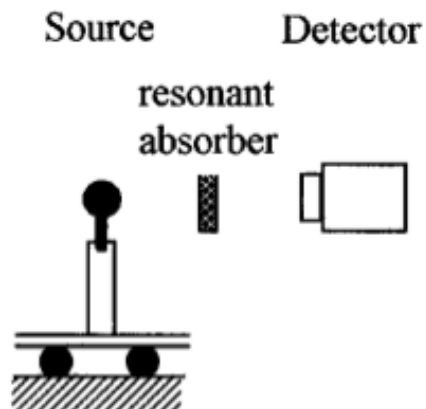




# Φαινόμενο Mössbauer



# Φαινόμενο Mössbauer



Δεν χρειάζεται το φαινόμενο  
Doppler για να έχουμε  
απορρόφηση συντονισμού

# Φαινόμενο Mössbauer

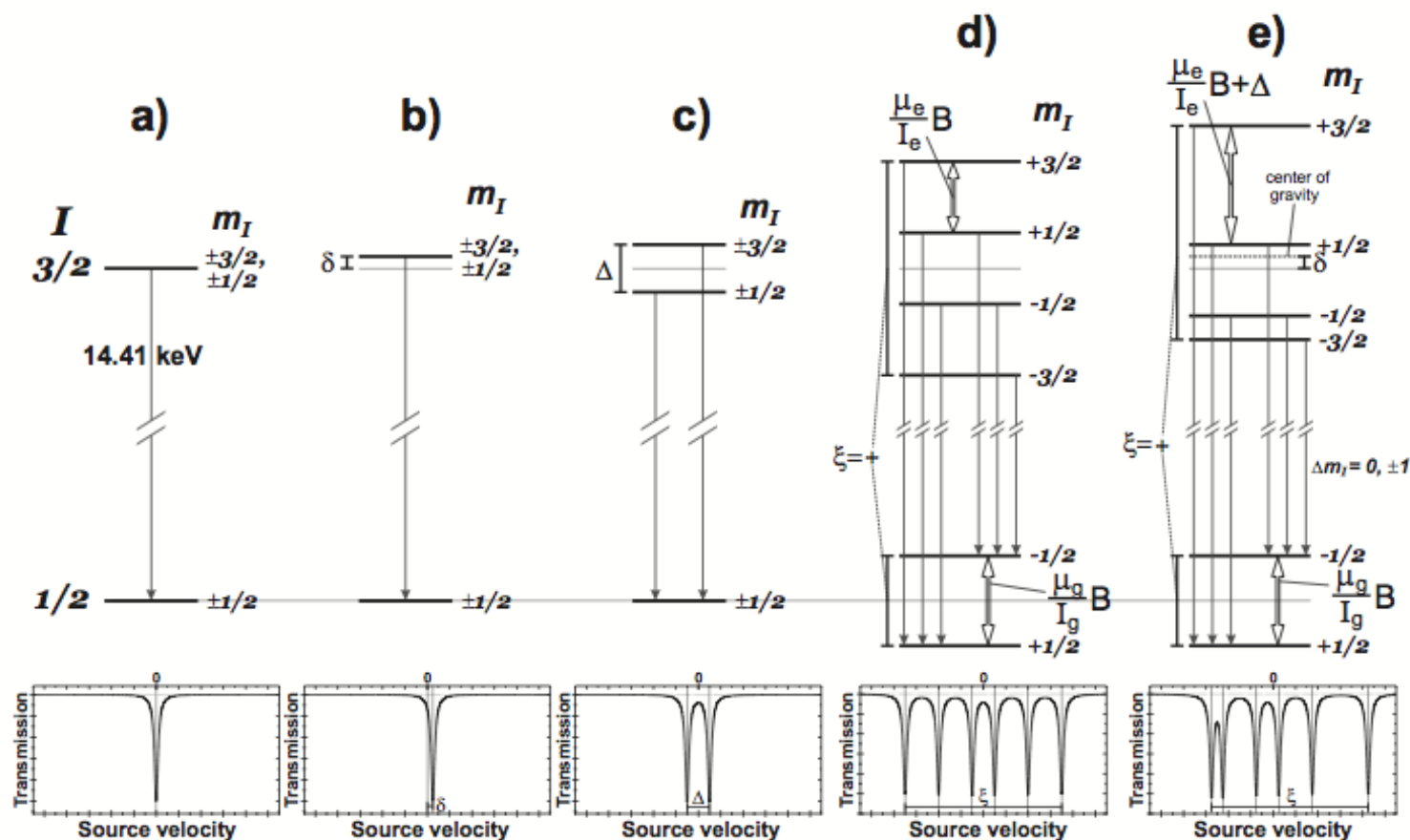
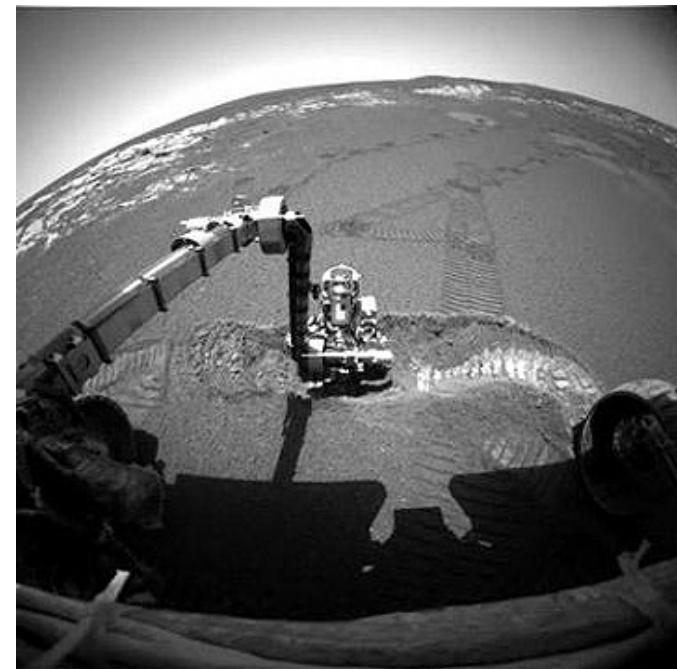
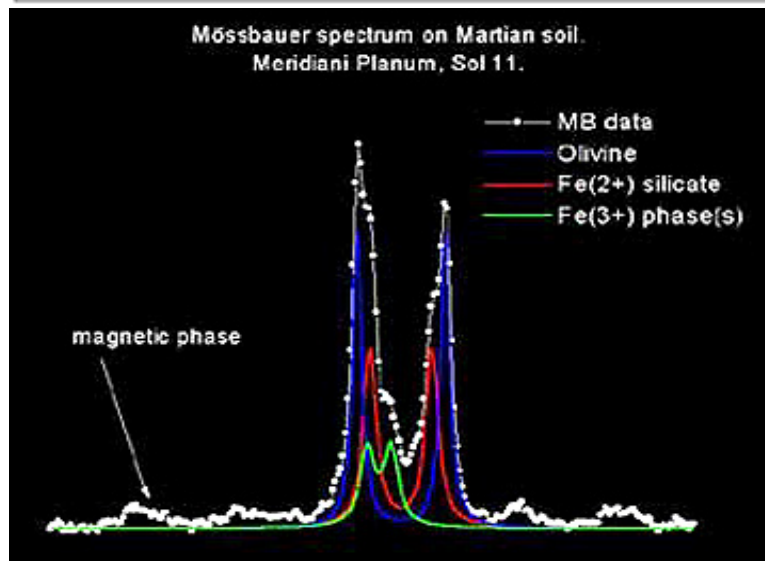
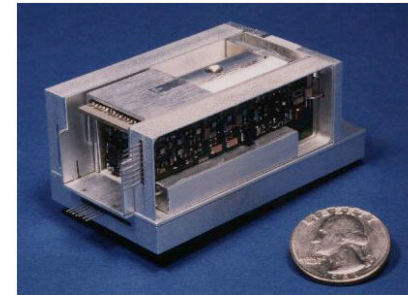


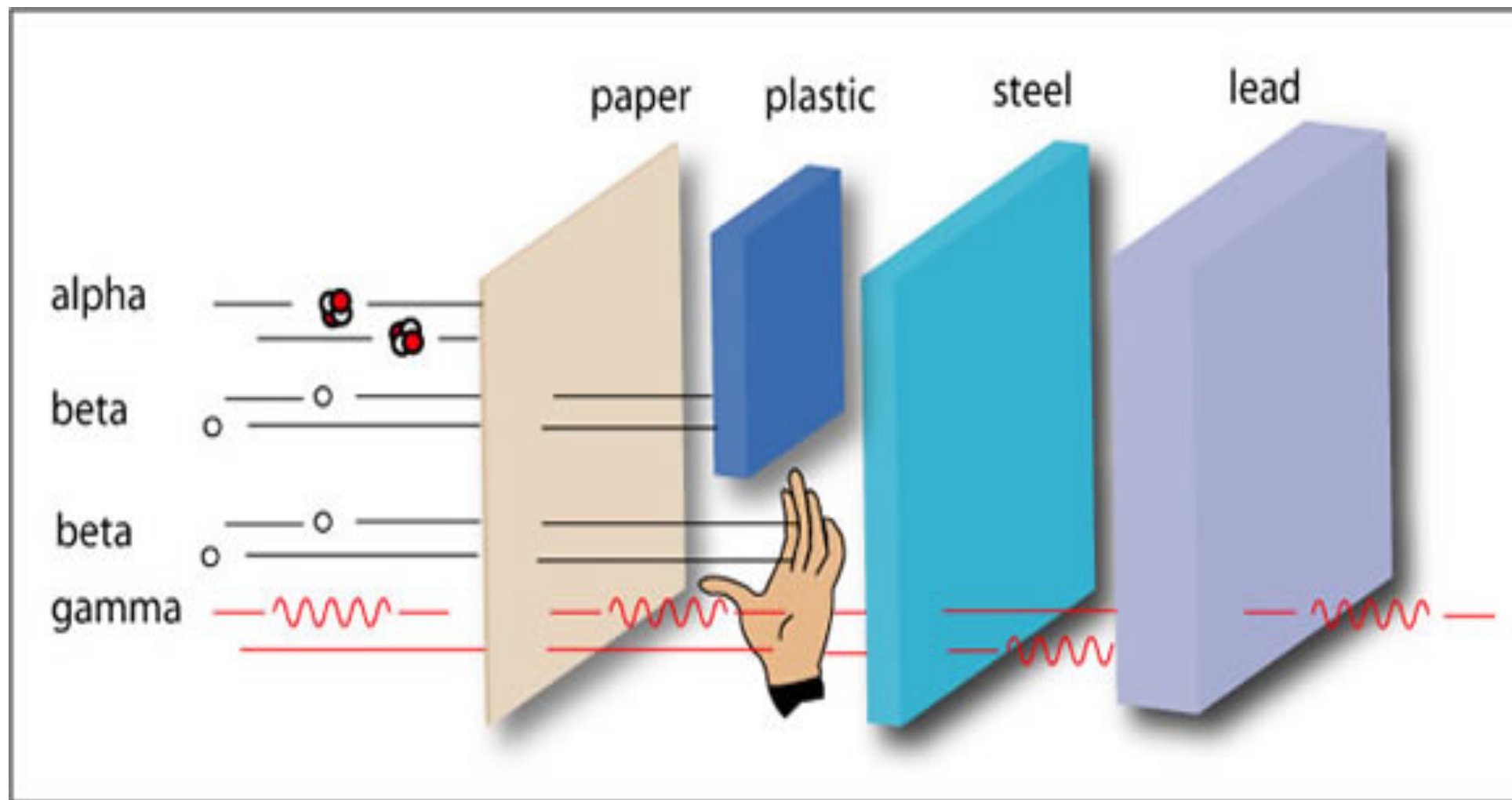
Figure 6.6: Nuclear energy level splittings (top) and corresponding Mössbauer spectra (bottom) for  $^{57}\text{Fe}$  in case of: **a)** an isolated nucleus, **b)** only an electric monopole interaction, **c)** only a quadrupole interaction, **d)** only a magnetic dipole interaction and **e)** all interactions combined (see text). The splittings and spectra are sketched based on the hypothetical but illustrative case where  $\delta : \Delta : \mu_e B / I_e : \mu_g B / I_g = 1 : 4 : 6 : 10$  (resulting in  $\xi = 28$ ). The transitions between the levels are restricted by the dipole selection rule  $\Delta m_I = 0, \pm 1$  in all cases. For clarity and simplicity, all level schemes are drawn with the center of gravity of their nuclear ground state aligned and all transition lines are approximated by lorentzian lineshapes of equal width and intensity.

# Φαινόμενο Mössbauer

- Nuclear and Solid State Physics
- Biology
- Chemistry
- Materials Science
- Geology
- Archeology
- Forensic Science
- Paleontology
- Mineralogy
- Metallurgy
- Space Science (on Mars Exploration Rovers)



# Αλληλεπίδραση $\gamma$ - ύλης



# Φωτόνια στην ύλη

- Σκέδαση Rayleigh

- Σύμφωνη ελαστική σκέδαση φωτονίου στο άτομο
- $\gamma + \text{atom} \rightarrow \gamma + \text{atom}$
- Προεξάρχει για  $\lambda_\gamma > \text{size of atoms}$

- Σκέδαση Compton

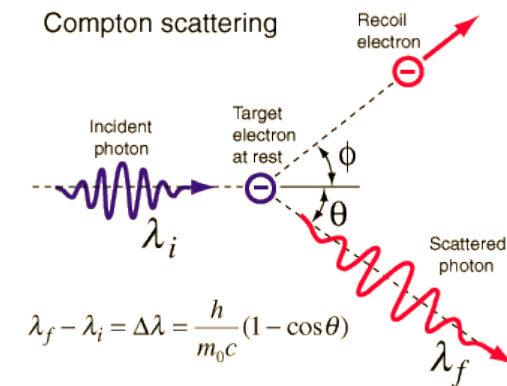
- Μή σύμφωνη σκέδαση σε ατομικό ηλεκτρόνιο (θεωρούμε σχεδόν ελεύθερο το e)
- $\gamma + e^-_{\text{bound}} \rightarrow \gamma + e^-_{\text{free}}$
- Πιθανό για  $E_\gamma > \min(E_{\text{bind}})$

- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Απορρόφηση του φωτονίου και εκπομπή ενός ηλεκτρονίου
- $\gamma + \text{atom} \rightarrow \gamma + e^-_{\text{free}} + \text{ion}$
- Πιθανό  $E_\gamma > \max(E_{\text{bind}}) + dE$  ( $E_{\text{atomic-recoil}}$ , εύρος γραμμής)

- Δύδιμη γέννηση

- Απορρόφηση του  $\gamma$  από το άτομο και εκπομπή ζεύγους  $e^+e^-$ .
- $\gamma + \text{nucleus} \rightarrow e^+ + e^- + \text{nucleus}_{\text{recoil}}$
- Απαιτείται:  $E_\gamma > 2m_e c^2 + E_{\text{recoil}}$  (μεγάλο  $M_{\text{recoil}}$  μικρότερο κατώφλι  $E_{\text{recoil}} = P_{\text{recoil}}^2 / 2M_{\text{recoil}}$ )
- Ο πυρήνας πρέπει να ανακρουσθεί για τη διατήρηση της ορμής,  $\rightarrow$  απαιτείται η παρουσία πυρήνα/ατόμου  $\rightarrow$  ισχυρή εξάρτηση ενεργού διατομής από το φορτίο 38 (αυξάνεται με το Z)



# Αλληλεπίδραση $\gamma$ - ύλης

Υλικό πυκνότητας  $\rho$ , επιφάνειας  $S$ , αποτελείται από άτομα μάζας  $m_a$ , περιέχει  $(\rho/m_a)Sdx$  άτομα

$$\frac{dn}{n} = -\frac{(\rho/m_a)S dx \sigma_{\text{tot}}}{S} = -(\rho/m_a)\sigma_{\text{tot}} dx.$$

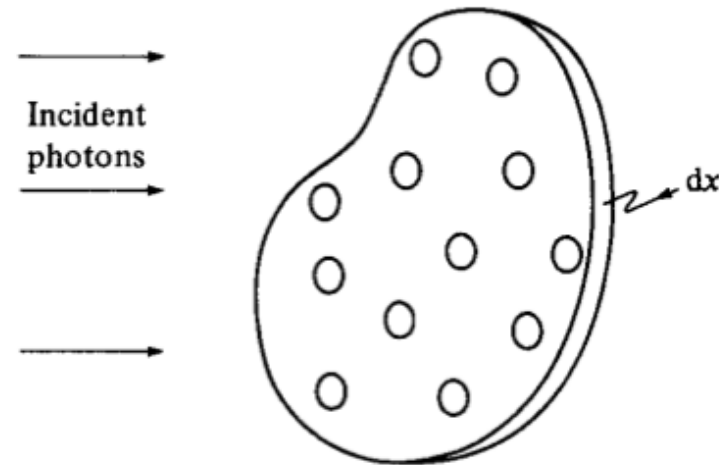
$$n(x) = n(0)e^{-\mu x}$$

Μαζικός συντελεστής  
εξασθένισης (ή απορρόφησης)

$$\mu = \rho\sigma_{\text{tot}}/m_a$$

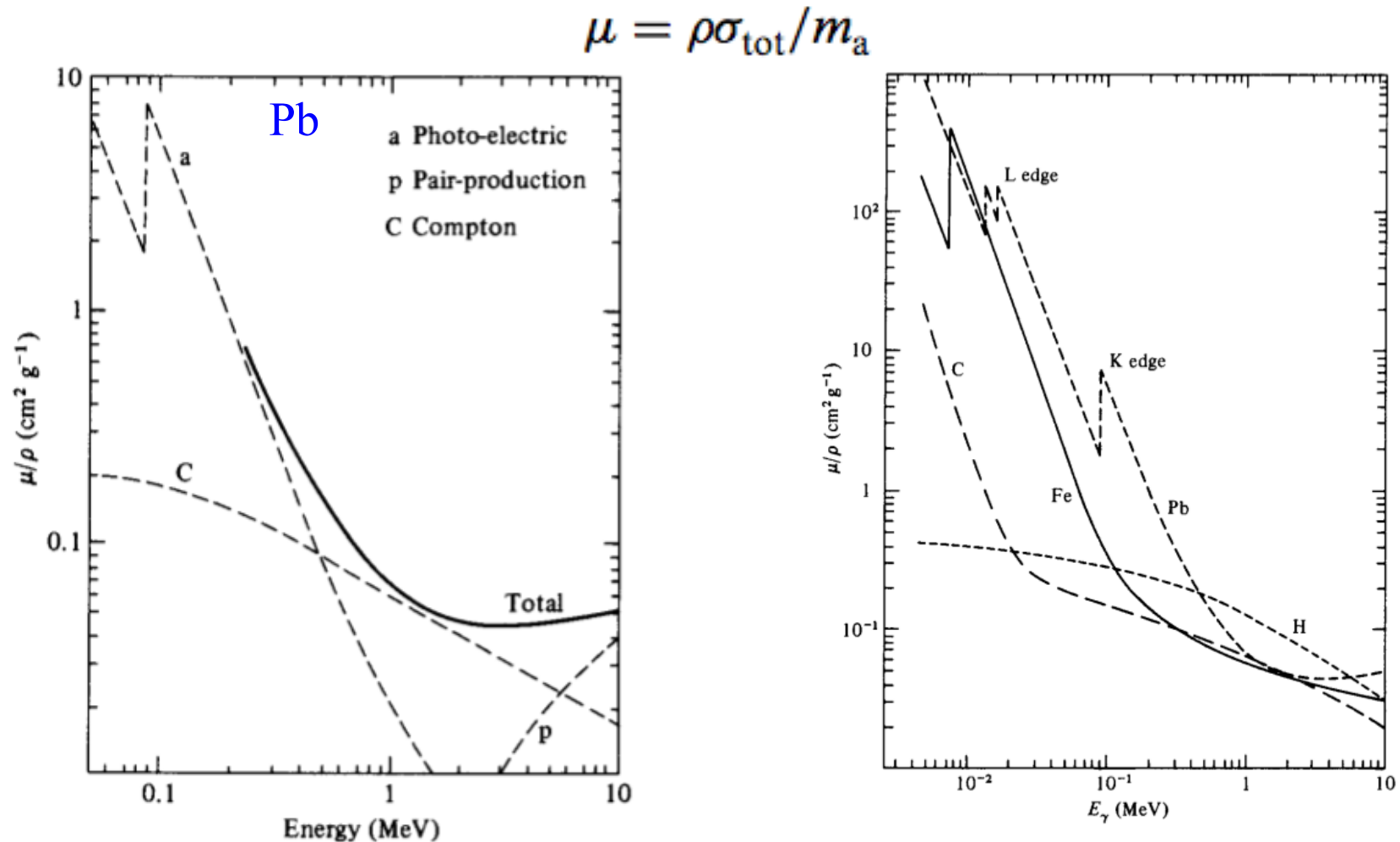
συνολική ενεργός διατομή

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_a + Z\sigma_C + \sigma_p.$$





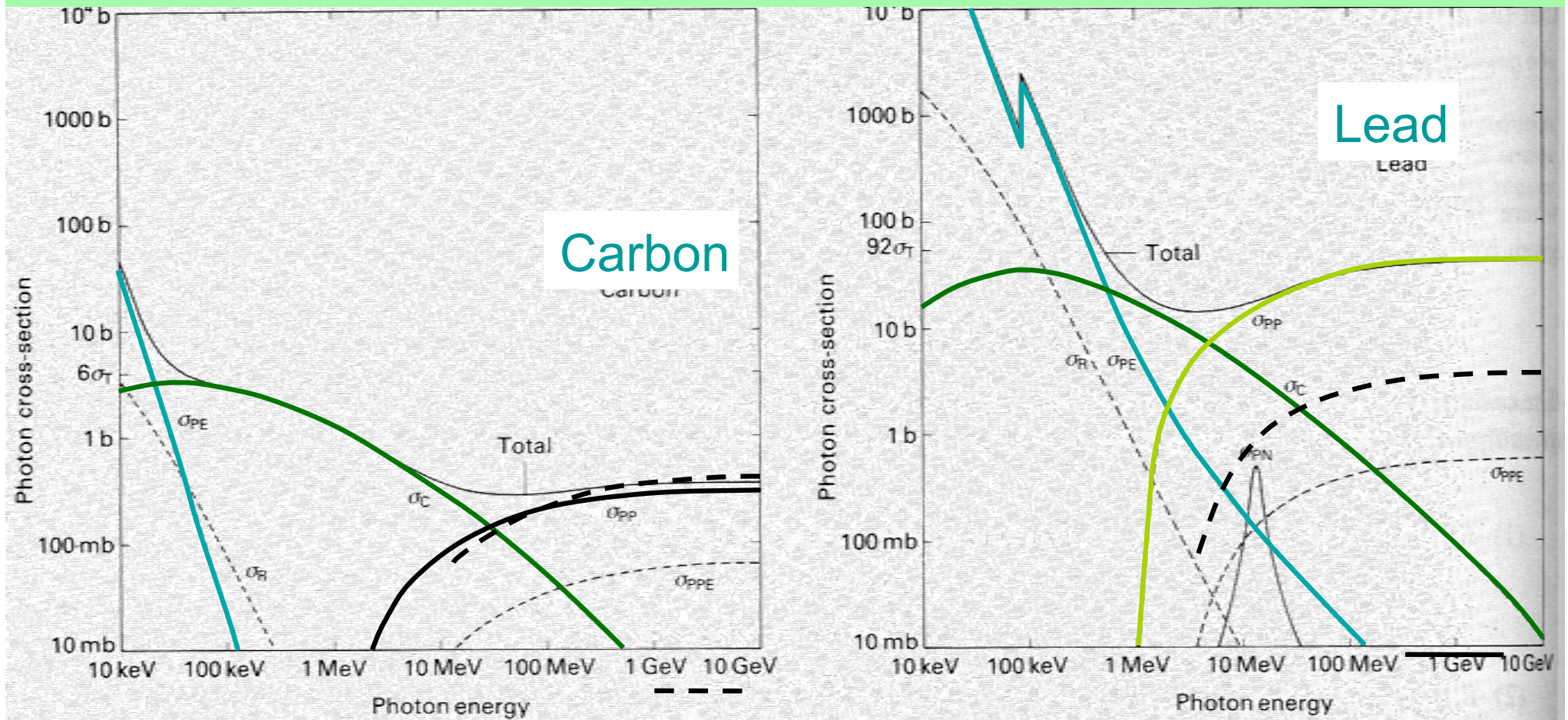
# Αλληλεπίδραση $\gamma$ - ύλης



Μαζικός συντελεστής απορρόφησης ως συνάρτηση της ενέργειας του φωτονίου και οι συνεισφορές των διαφόρων φαινομένων.



# Φωτόνια στην ύλη



R → Rayleigh      PE → Photoeffect      C → Compton      PP → Pair Production on nucleus  
 PPE → Pair Production on atomic electrons      PN → Giant Photo-Nuclear dipole resonance

# ασκηση

Η βασική κατάσταση του  $^{73}\text{Br}$  έχει  $J^P = 1/2^-$  και οι δύο πρώτες καταστάσεις έχουν  $J^P = 5/2^-$  (26.92 keV) και  $J^P = 3/2^-$  (178.1 keV). Δώστε τις πιθανές μεταπτώσεις γ ανάμεσα σ' αυτές τις στάθμες και εκτιμήστε το μέσου χρόνο ζωής της κατάστασης  $3/2^-$ .

(χρησιμοποιείτε τις σχέσεις του Weisskopf:  $\Gamma_\gamma(E1) = 0.07E^3A^{2/3}$ ,  $\Gamma_\gamma(M1) = 0.0021E^3$ ,  $\Gamma_\gamma(E2) = 4.9 \cdot 10^{-8}E^5A^{4/3}$ ).

|   | $J_i \rightarrow J_f$ | $\Delta J \leq l \leq \Sigma J$ | $\Delta\pi$ | τύπος       | $E_\gamma(\text{keV})$ |
|---|-----------------------|---------------------------------|-------------|-------------|------------------------|
| 1 | $5/2 \rightarrow 1/2$ | 2,3                             | +1          | M3+E2       | 26.92                  |
| 2 | $3/2 \rightarrow 1/2$ | 1,2                             | +1          | M1+E2       | 178.1                  |
| 3 | $3/2 \rightarrow 5/2$ | 1,2,3,4                         | +1          | M1+E2+M3+E4 | 151.18                 |

$$\Gamma = \Gamma_\gamma(M1) + \Gamma_\gamma(E2) = 0.0021E^3 + 4.9 \cdot 10^{-8}E^5A^{4/3} = 1.187 \times 10^{-5} \text{ MeV}$$

$$\tau = \hbar / 2\pi\Gamma = 5.55 \times 10^{-17} \text{ s}$$