

γ - διάσπαση

Δήμος Σαμψωνίδης
(04-12-2018)

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής & Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων
5 ο Εξάμηνο

γ - 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 γ -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 (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 “εσωτερικών μετατροπών” και
 - ♦ εσωτερική δημιουργία ζεύγους (e^+e^-).
- ♦ Είναι μία **ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση**

γ - διάσπαση

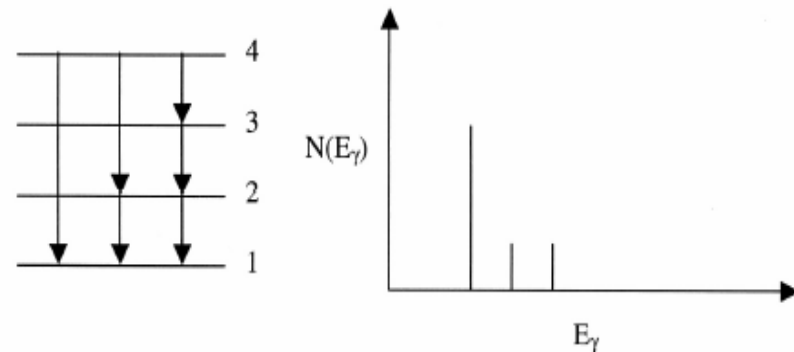
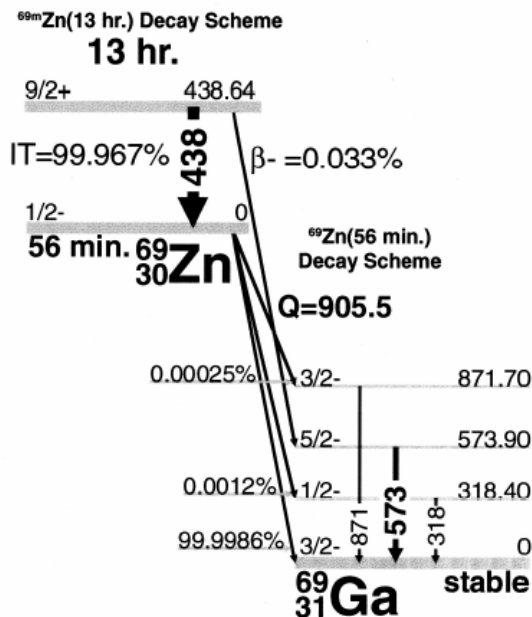
- *Πότε συμβαίνει μια γ -διάσπαση;*
- Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη αρκετή ενέργεια για να εκπεμφθεί ένα σωματίο (νουκλεόνιο) με ισχυρή αλληλεπίδραση
 - ΗΜ αλληλεπίδραση $\ll$ Ισχυρή αλληλεπίδραση
 - Καταστάσεις $E < 6 \text{ MeV}$ δεν μπορούν να διασπαστούν με Ισχυρή $\rightarrow$ ΗΜ
- Συνήθως μετά από άλλες διασπάσεις (α , β , σχάση)

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

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

γ - διάσπαση

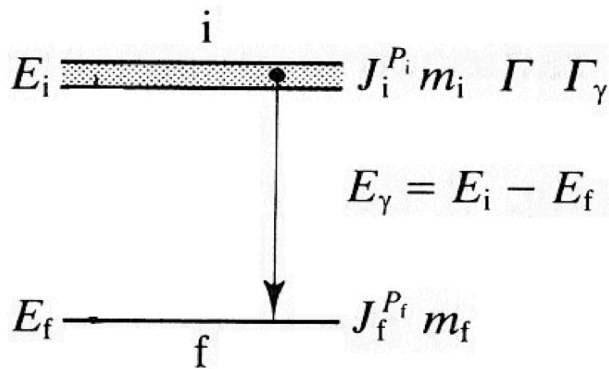
- ♦ Ο πυρήνας ${}_{30}^{69}\text{Zn} \rightarrow {}_{31}^{69}\text{Ga} + e^- + \nu_{e(\text{anti})}$
- ♦ Ο νέος πυρήνας μπορεί να βρεθεί σε μία από τις 4 δυνατές καταστάσεις
- ♦ Από όλες τις δυνατές μεταπτώσεις κάποιες (3) είναι “επιτρεπτές”
 - ♦ Ο νέος πυρήνας θα αποδιεγερθεί εκπέμποντας γ-ακτινοβολία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



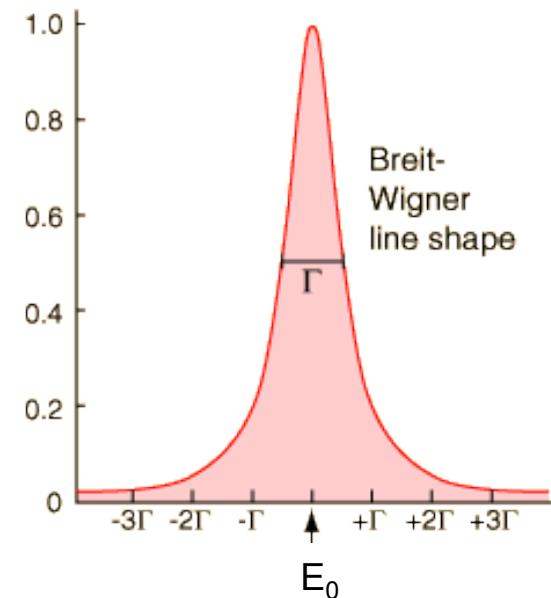
Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

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

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

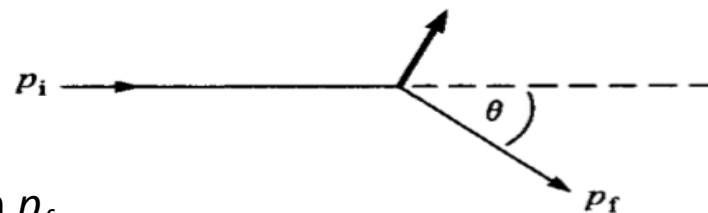


$$\tau \sim 10^{-12} \dots 10^9 \text{ s}$$



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 ΔE διεγείρεται σε υψηλότερη στάθμη υπολογίζουμε την ενέργεια του σκεδαζόμενου πρωτονίου E_f .

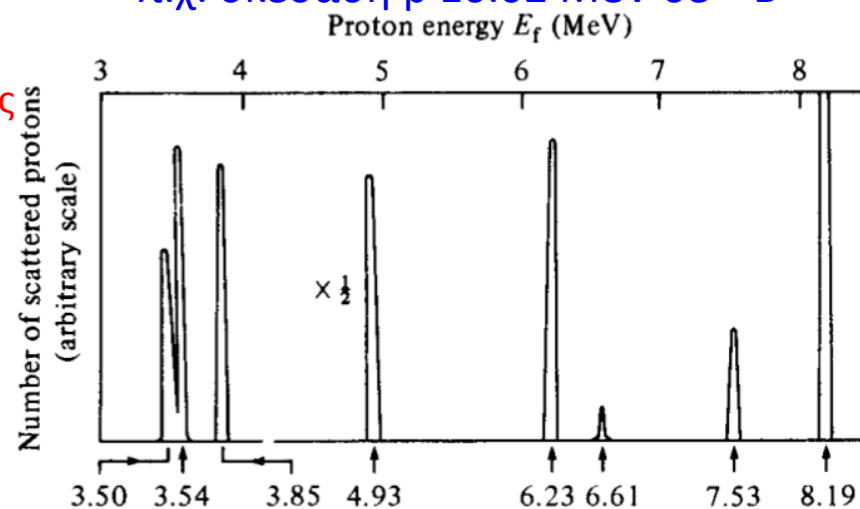
$$\Delta E = \frac{p_i^2}{2m_p} - \frac{p_f^2}{2m_p} - \frac{(p_i^2 + p_f^2 - 2p_i p_f \cos \theta)}{2m_A^*}$$

Ενέργεια ανάκρουσης

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

Μετράμε την ενέργεια των σκεδαζόμενων πρωτονίων σε συγκεκριμένη γωνία θ (π.χ. 90°)
Γραμμικό φάσμα $\rightarrow$ η ΔE παίρνει διακριτές τιμές.

π.χ. σκέδαση p 10.02 MeV σε ^{10}B

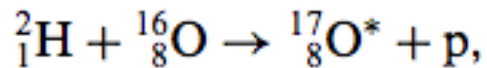


Ενεργειακές στάθμες του πυρήνα

Πειραματικός Προσδιορισμός

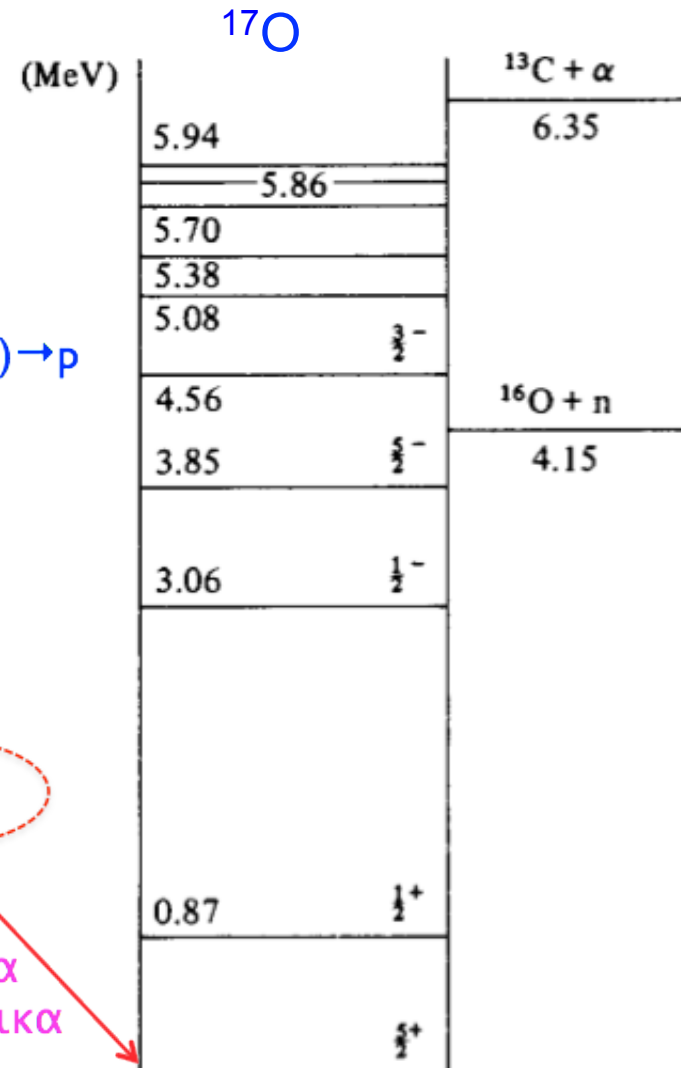
Η Μέθοδος απογύμνωσης του δευτερίου

- κατάλληλη για β-ασταθείς πυρήνες



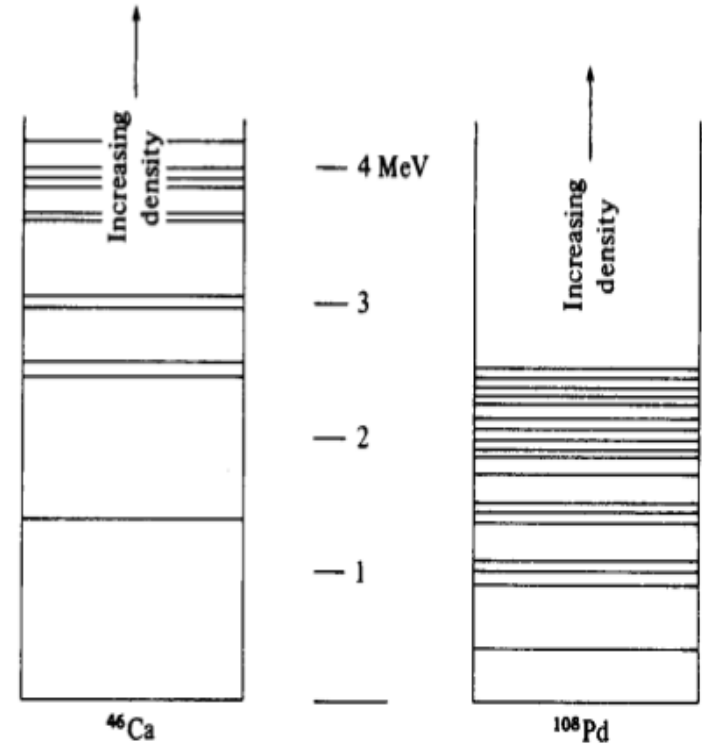
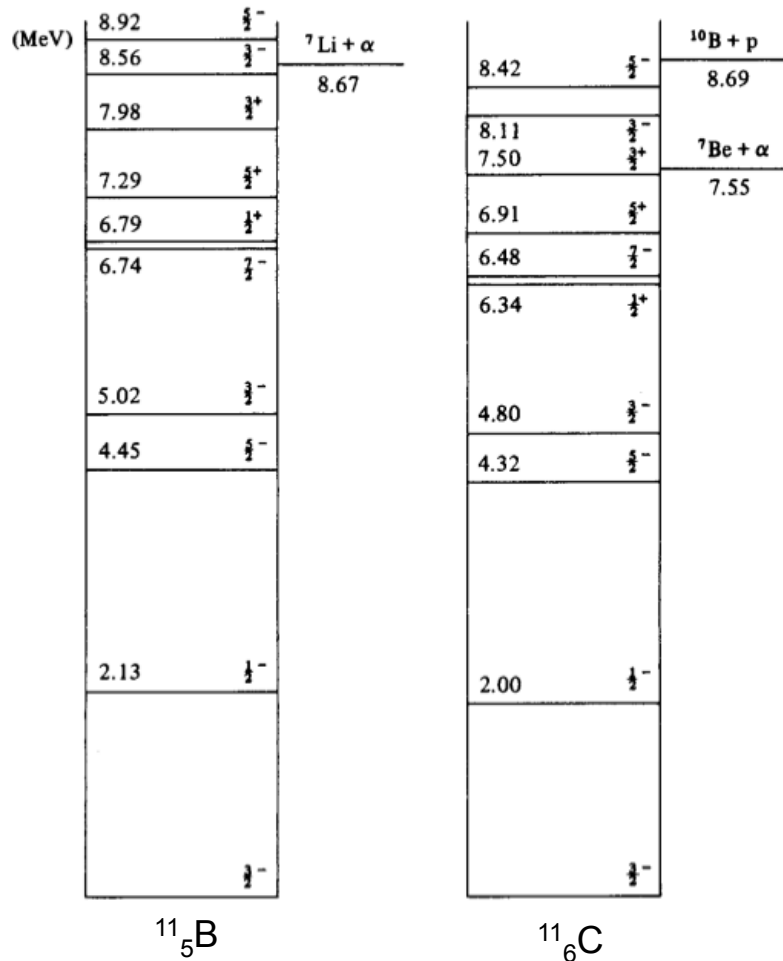
- ◆ Ο πυρήνας του δευτερίου χάνει ένα νουκλεόνιο ($\text{n} \rightarrow \text{p}$)
- ◆ Προκύπτει ισότοπο του πυρήνα στόχου (${}^{17}\text{O}$)
 - πιθανά ασταθές και
 - σε διεγερμένη κατάσταση (${}^{17}\text{O}^*$)
- ◆ Απο την ενέργεια του εξερχομένου p σε συγκεκριμένη γωνία θ υπολογίζεται η ενέργεια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

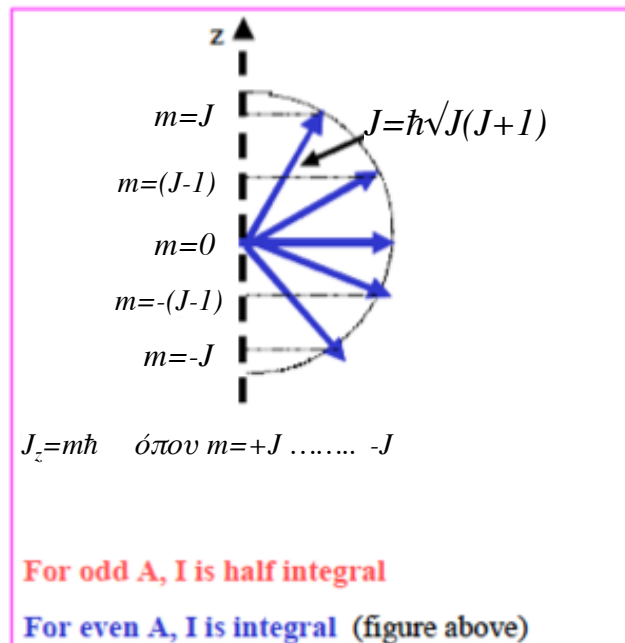
Οι ισχυρές δυνάμεις είναι ανεξάρτητες του φορτίου

στροφορμή – spin του πυρήνα

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

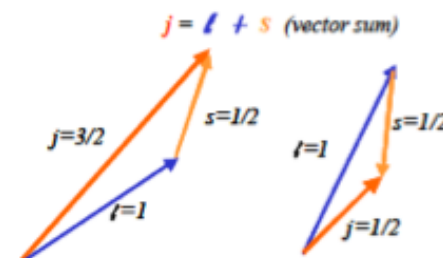
► $|J| = \sqrt{J(J+1)}\hbar$

- 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**



Vector Coupling of Angular Momentum

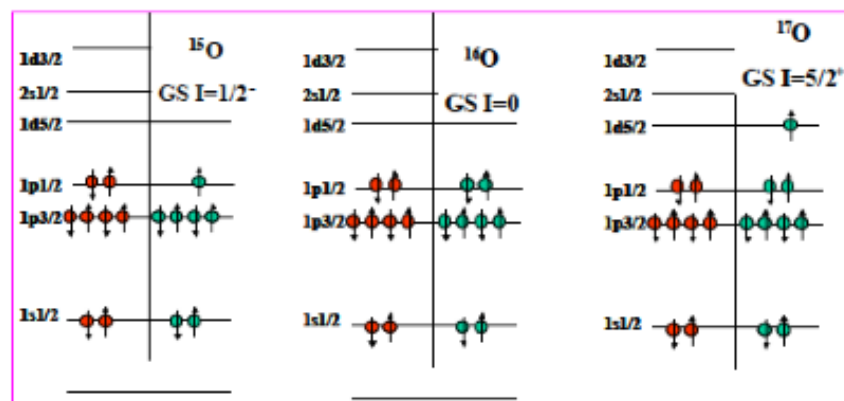
l and s to give j



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 αρτίο-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 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,

$$E_i = E_f + E_x.$$

Η ενέργεια της μετάπτωσης 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 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

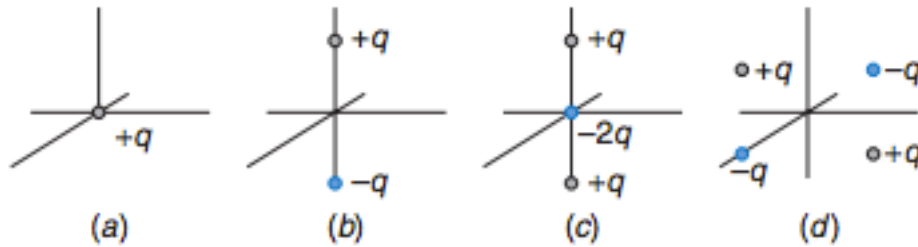
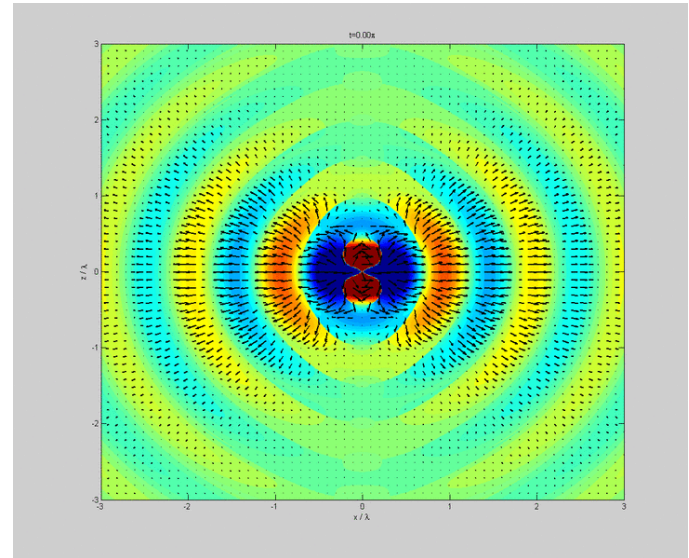
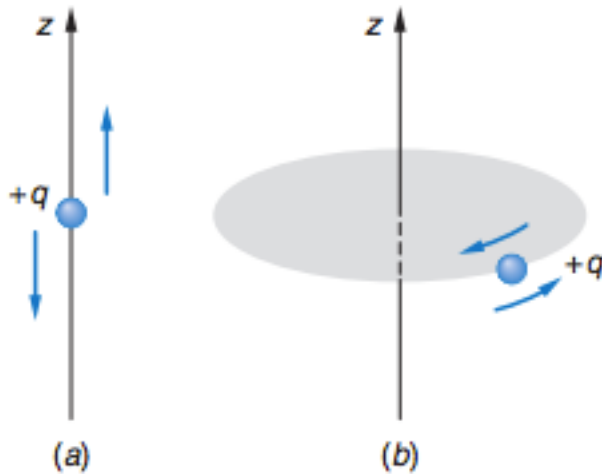
Η ακτινοβολία γ είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας $\Rightarrow$
Μπορεί να θεωρηθεί σαν παλλόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο που διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός

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



Electric (a) monopole, (b) dipole, (c) linear quadrupole and (d) simple quadrupole.

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

Ακτινοβολία πολυπόλων

- Κάθε πολύπολο τάξης L
 - 2^L -πολο ($1=\text{δίπολο}, 2=\text{τετράπολο}, 3=\text{οκτάπολο} \dots$)
- 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)

Ένα 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

$$\text{Για μεταπτώσεις } E: \quad \pi_i \pi_f(E) = (-1)^L$$

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

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_γ)	π_γ
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 : $\vec{I}_{in} - \vec{I}_f = \vec{L} \cdot \cdot \cdot$

προσοχή
διανύσματα

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

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 $\pi_\gamma=+1$

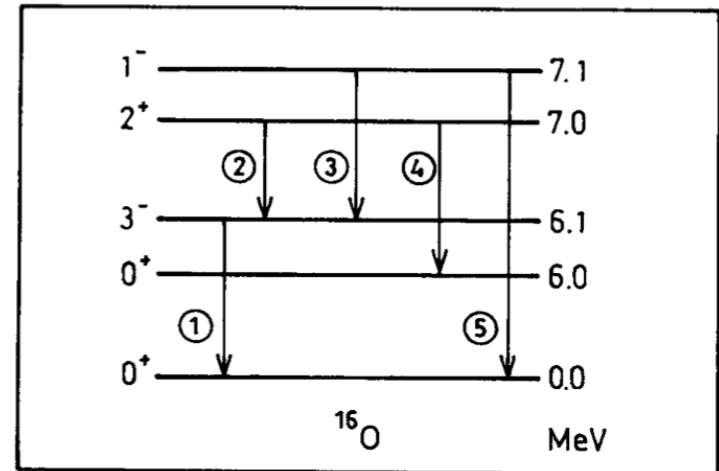
Αν $I_{in}=5/2^-$ και $I_f=1/2^+$, η l μπορεί να έχει τιμές 2,3 και $\pi_\gamma=-1$

άσκηση

Δίνονται οι στάθμες του ^{16}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_γ
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 γ -διάσπαση προκύπτει από την ημικλασική θεωρία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

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

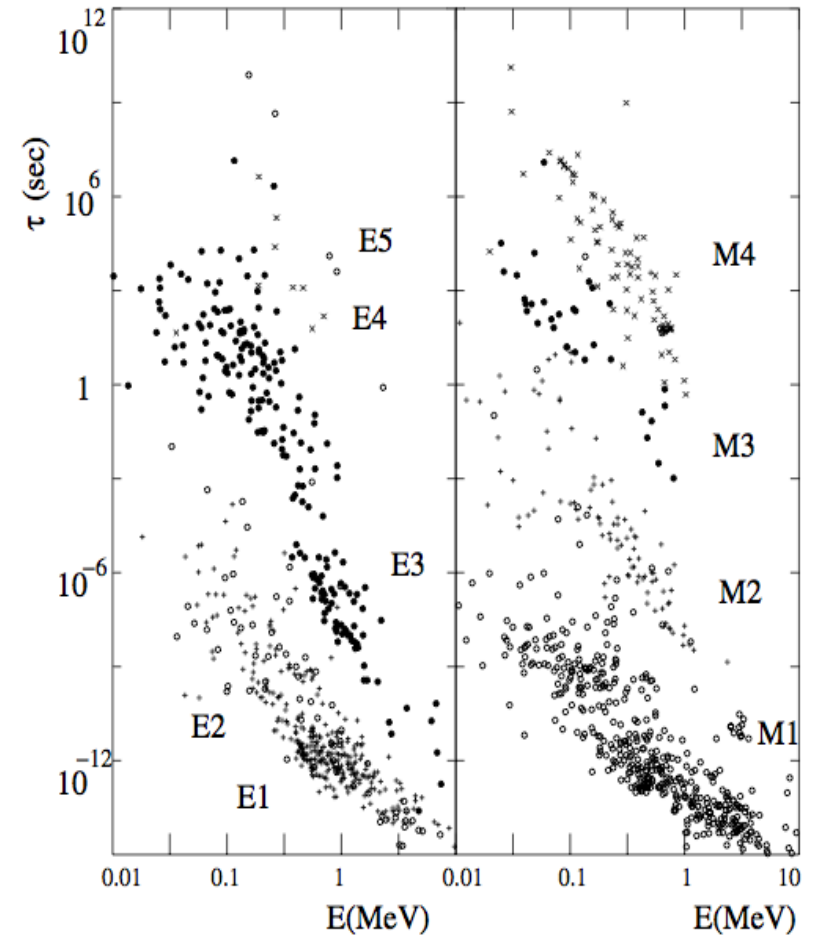
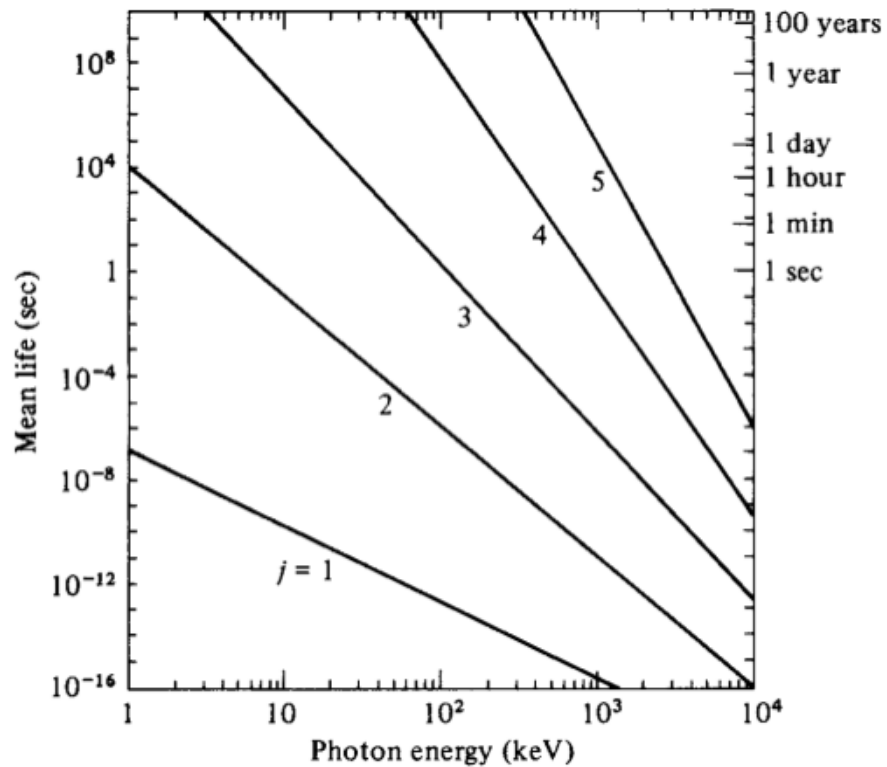
$B(l)$ είναι η ανοιγμένη πιθανότητα μετάπτωσης και περιέχει πληροφορία του πυρήνα

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

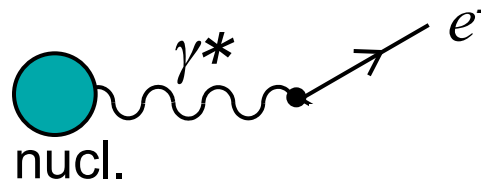
ενέργεια- χρόνος ζωής

Για $A=100$,
ηλεκτρικές πολυπολικές

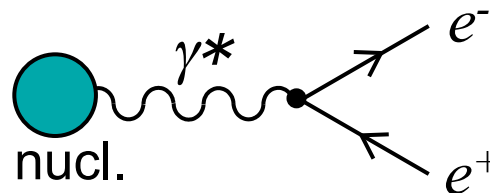


γ - διάσπαση

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



- Θα μπορούσε μέσω δημιουργίας ζεύγους αν $E > 2m_e$
(virtual γ 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⁺ διεγερμένη

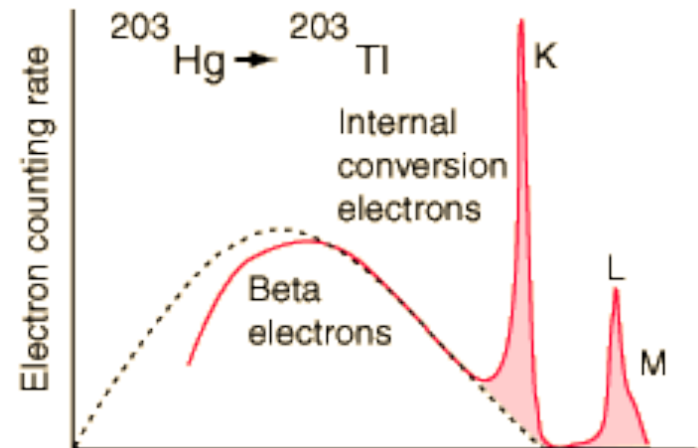
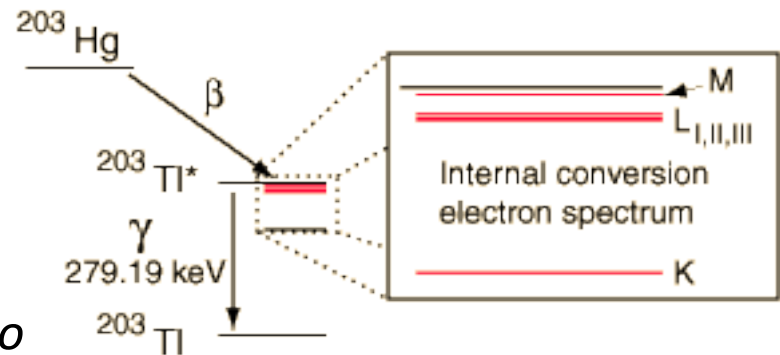
Διασπάται με

- **Εσωτερική μετατροπή**

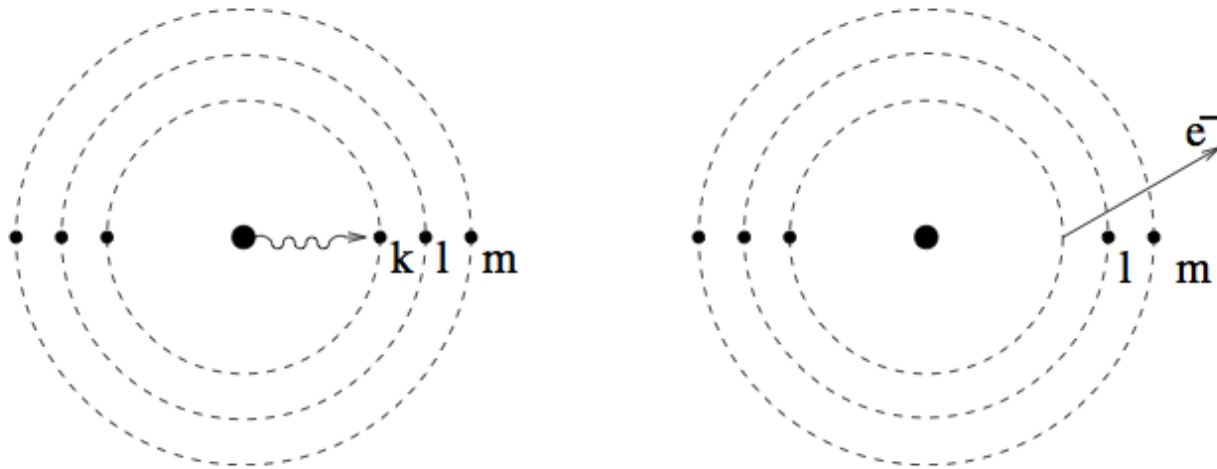
Ο πυρήνας εκπέμπει ένα δυνητικό φωτόνιο το οποίο διώχνει ένα ατομικό ηλεκτρόνιο. Η τροχιά του e περνάει μέσα από τον πυρήνα. Πιθανότητα να βρεθεί στον πυρήνα αυξάνει με τη Z^3 . Για $Z \gg$ ανταγωνίζεται τις γ διασπάσεις.

- **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.