

γ - διάσπαση

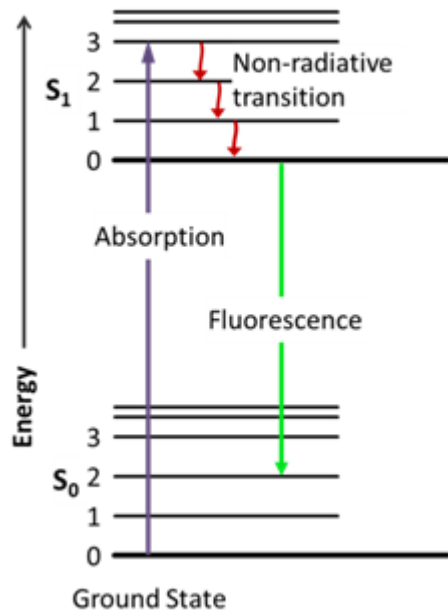
Δήμος Σαμψωνίδης

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

Φθορισμός (απο την Ατομική Φυσική)

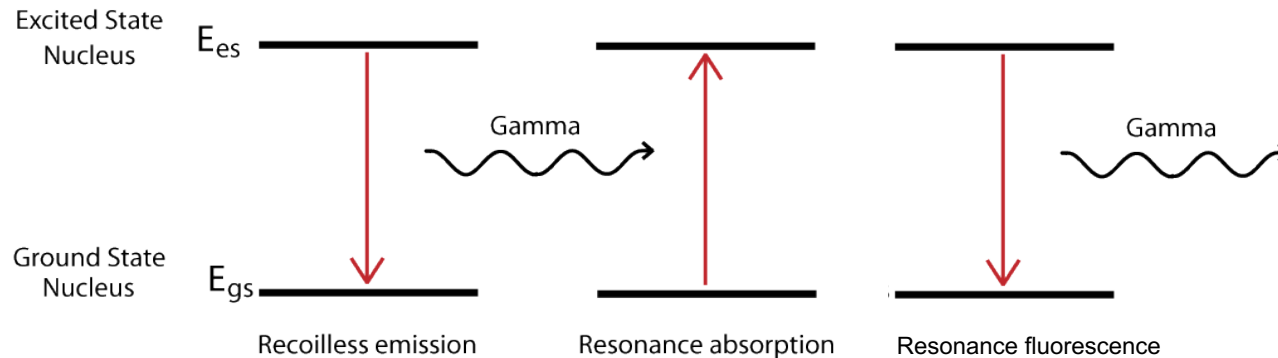


Φθορισμός συντονισμού

Φθορισμός συντονισμού ή απορρόφηση συντονισμού καλείται το φαινόμενο όπου ένα αέριο-στόχος διεγείρεται από μία φωτεινή πηγή η οποία αποτελείται από ένα ίδιο υπέρθερμο αέριο.

Ατμοί Hg φθορίζουν όταν ακτινοβολούνται με το φως μιάς λυχνίας Hg.

Πυρηνικός συντονισμός



Φωτόνιο απο αποδιέγερση γ 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

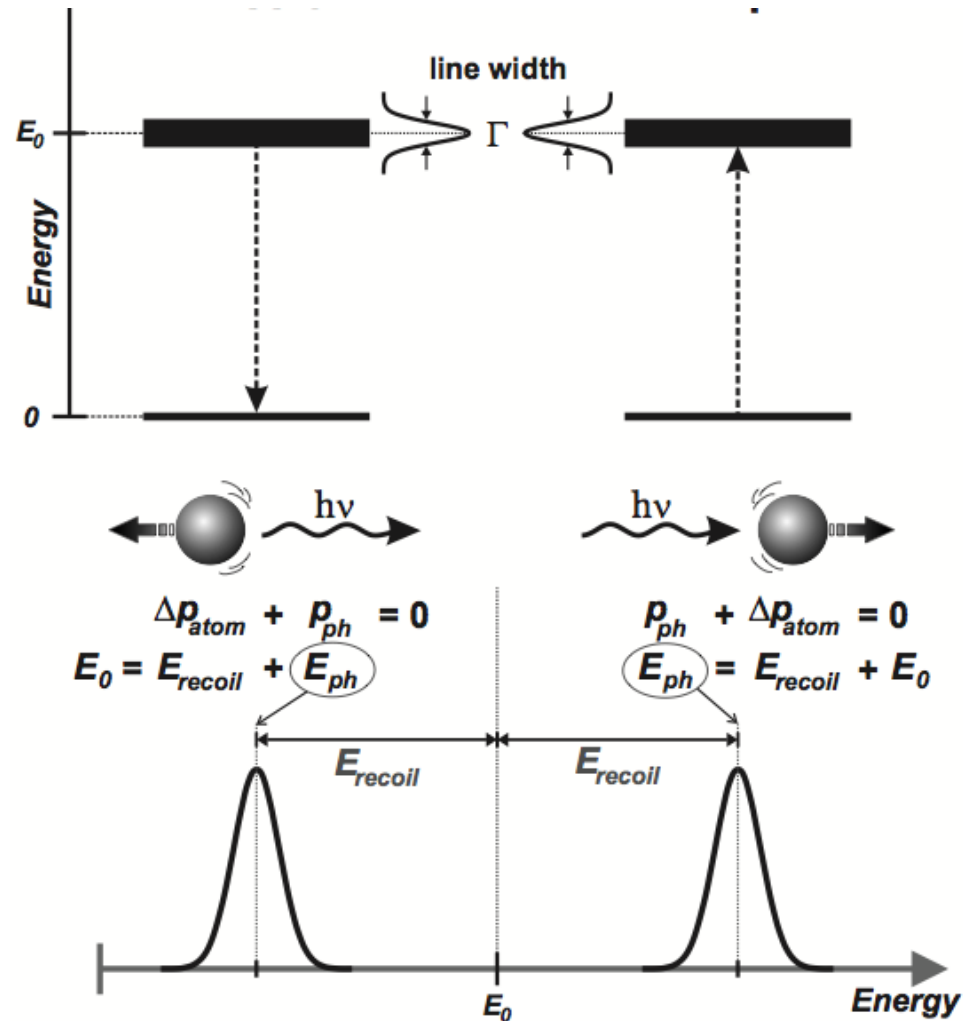
- κατά την εκπομπή : $E_\gamma = E_0 - E_R$
- κατά την απορρόφηση : $E_\gamma = E_0 + E_R$

πλάτος της στάθμης

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

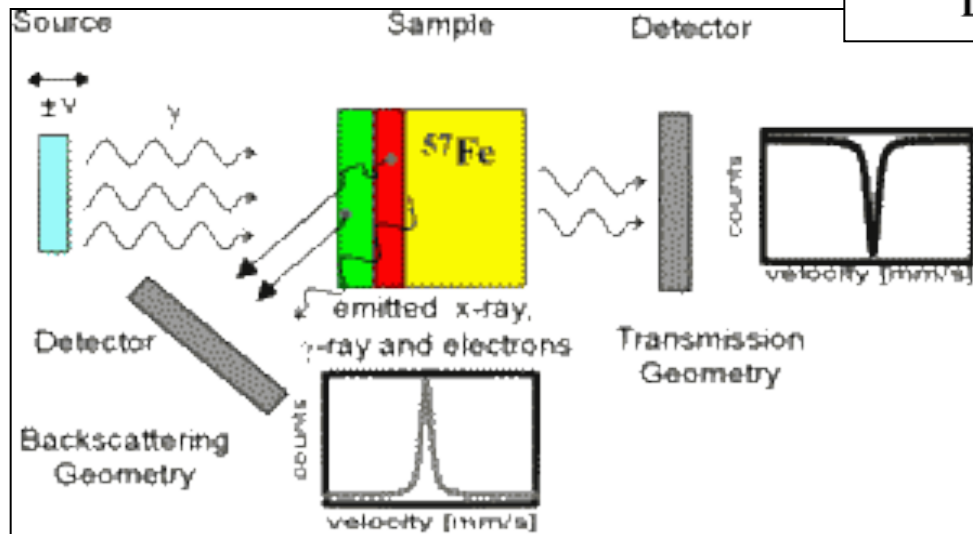
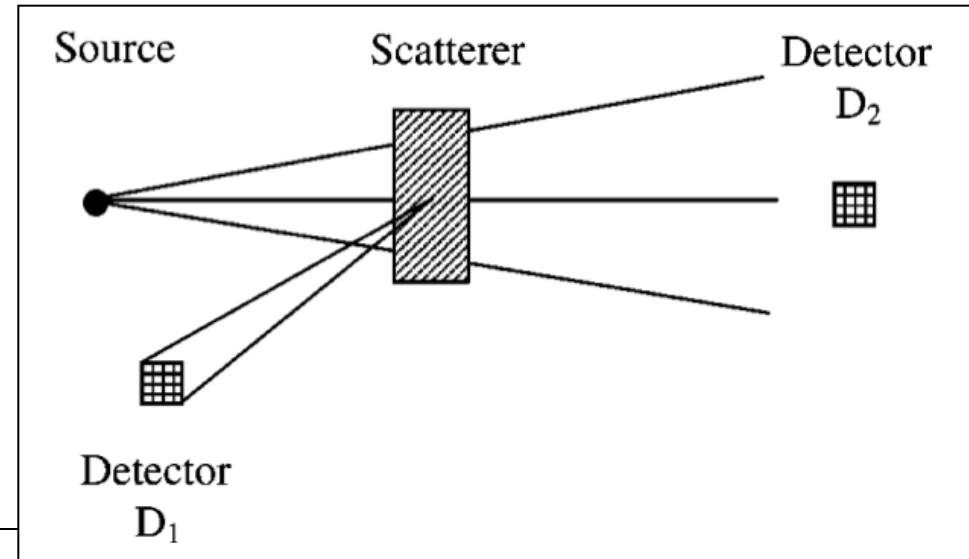
$$E_R \sim E_{ph}^2 / 2mc^2$$

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



Πυρηνικός συντονισμός

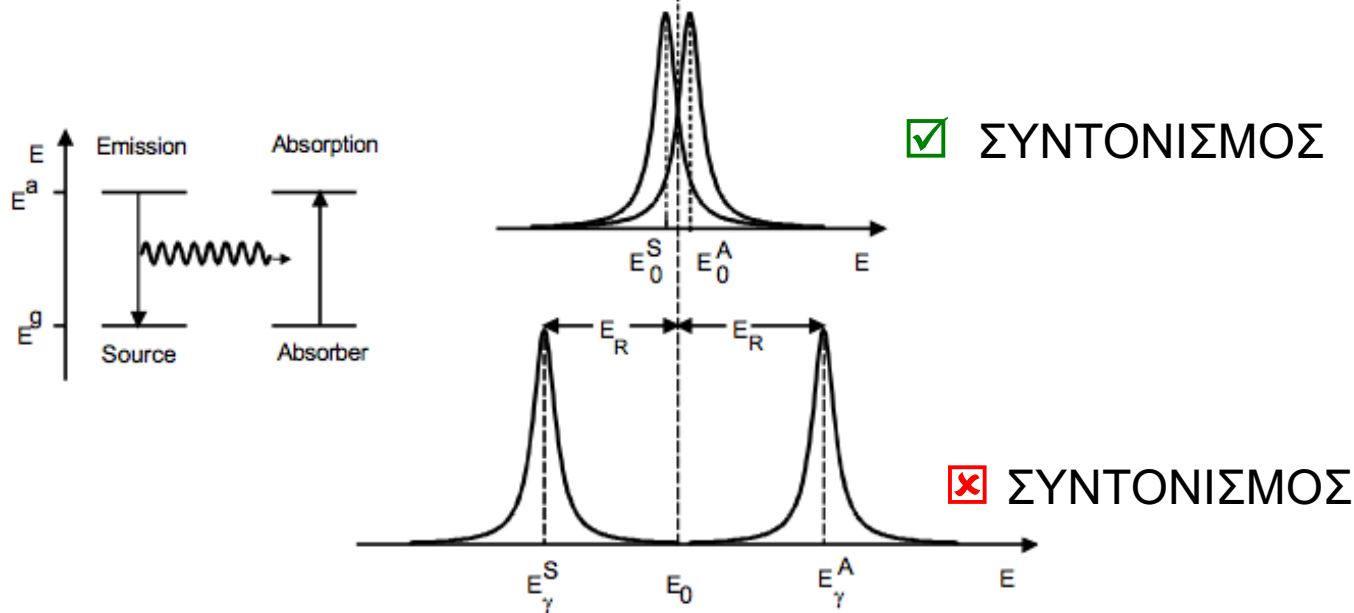
*Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση
φθορισμό συντονισμού ή/και
απορρόφηση συντονισμού*



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

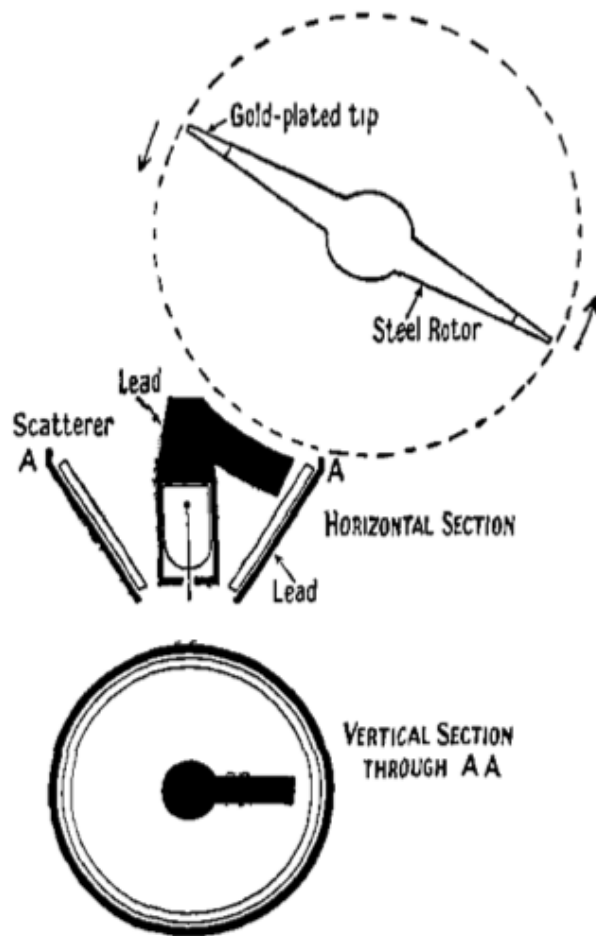


Figure 1. (Not to scale)

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

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

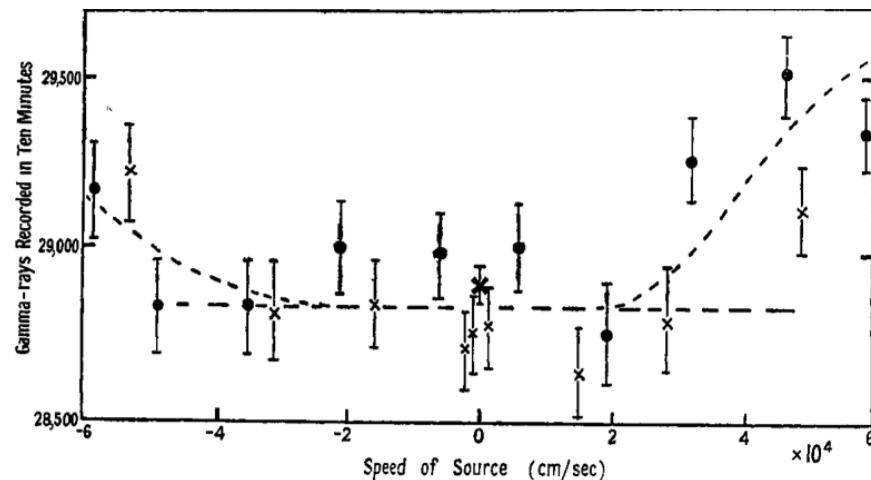


Figure 2. Effect of speed of source on rate of recording of scattered gamma-rays. Negative speeds indicate rotation in opposite sense to that shown in Figure 1.

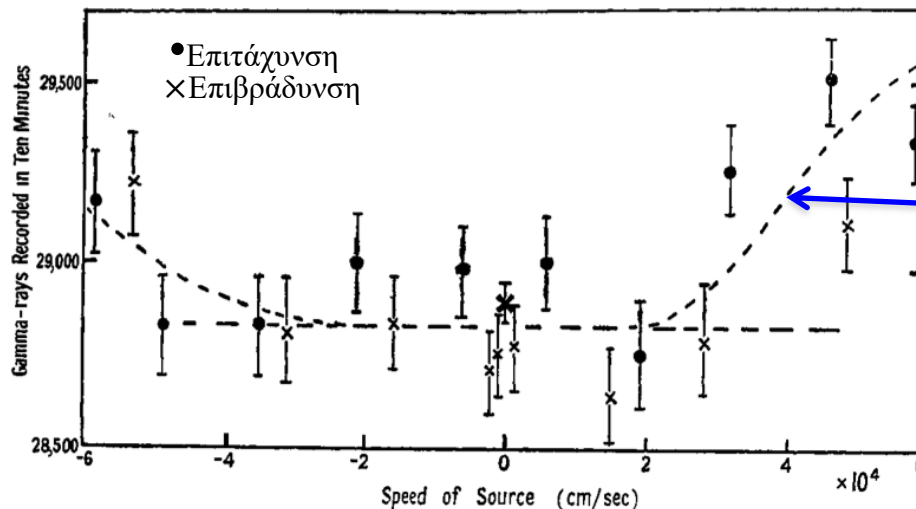
Κατέγραψε μικρή αύξηση στην ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Πείραμα Moon

Πηγή ^{198}Au (β) $\rightarrow$ ^{198}Hg
 ^{198}Hg γ - 411 keV
Σκεδαστής Hg

Επιλογή ισοτόπου

- Σε φυσική αυθονία για σκεδαστής
- Να έχει διεγερμένες καταστάσεις για να χρησιμοποιηθεί ως πηγή γ .
- Αποδιέγερση στη βασική στάθμη
- Μεγάλο εύρος Γ (5×10^{-6} eV, $\tau = 8 \times 10^{-11}$ s).
- Απαιτούμενη ταχύτητα 32 E/A μέχρι 5 cm/s (εφικτή τεχνολογικά)

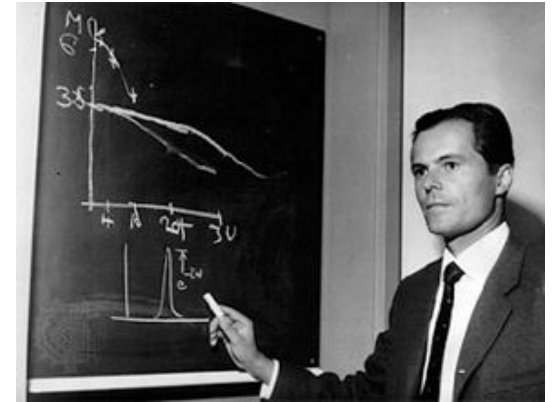


Κατέγραψε μικρή αύξηση στην ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

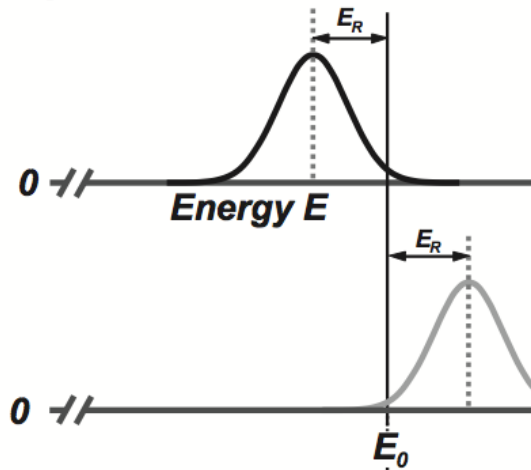
Figure 2. Effect of speed of source on rate of recording of scattered gamma-rays. Negative speeds indicate rotation in opposite sense to that shown in Figure 1.

Rudolf L. Mössbauer

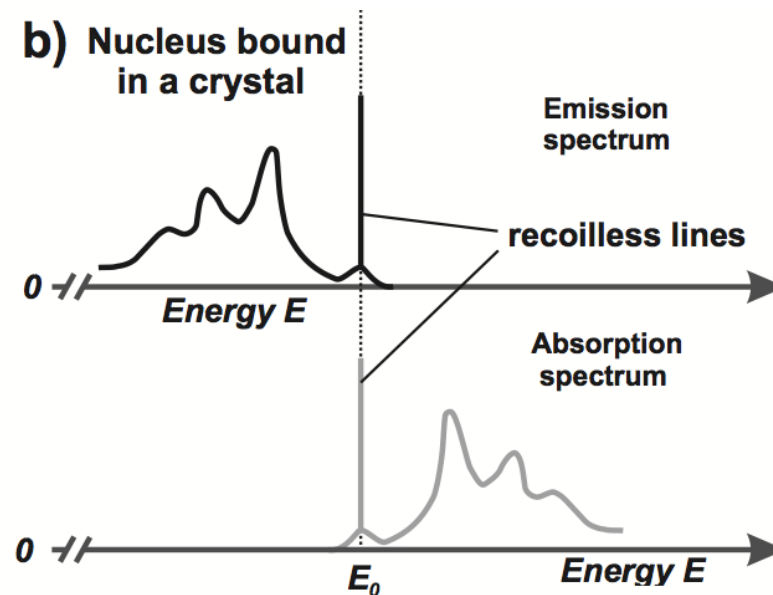
Ο Mössbauer ανακάλυψε ότι σε **χαμηλές θερμοκρασίες**, όταν ένας πυρήνας που βρίσκεται στο πλέγμα ενός κρυστάλλου και εκπέμπει ένα γ-φωτόνιο, η ενέργεια ανάκρουσης γίνεται ελάχιστη και σε κάποιες περιπτώσεις ο κρύσταλλος δεν μπορεί να απορροφήσει ενέργεια και άρα η ενέργεια ανάκρουσης μηδενίζεται.



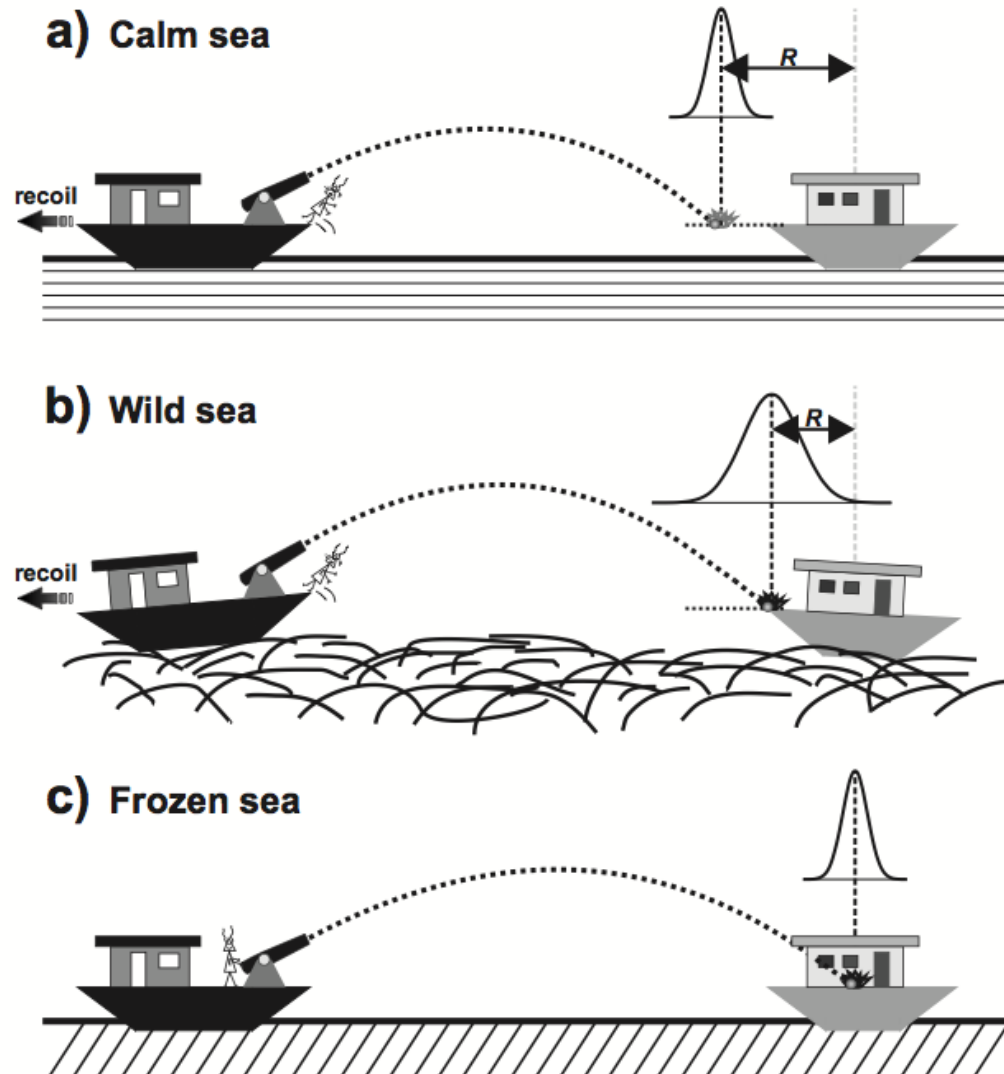
a) Freely recoiling nucleus



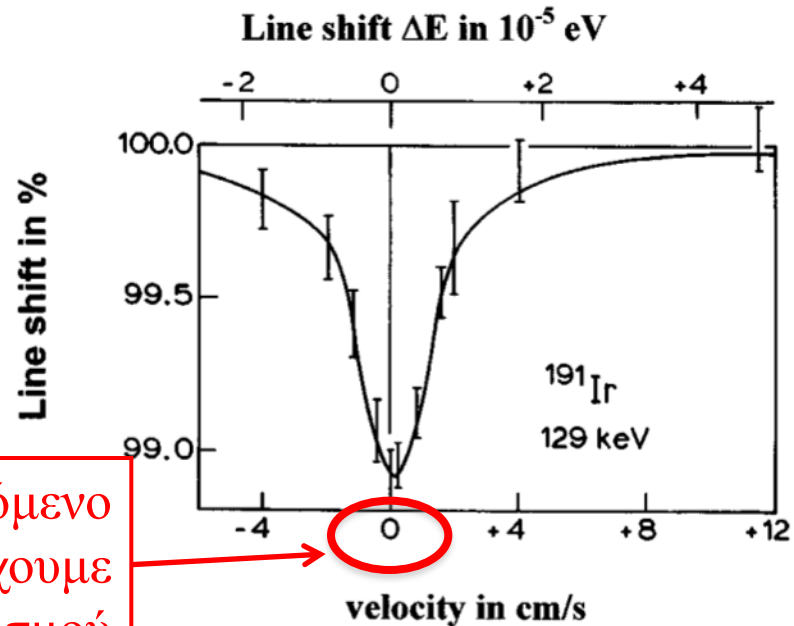
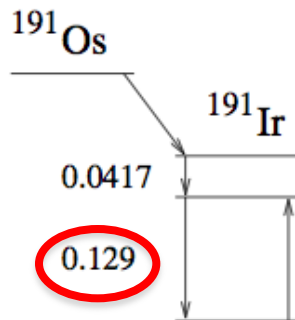
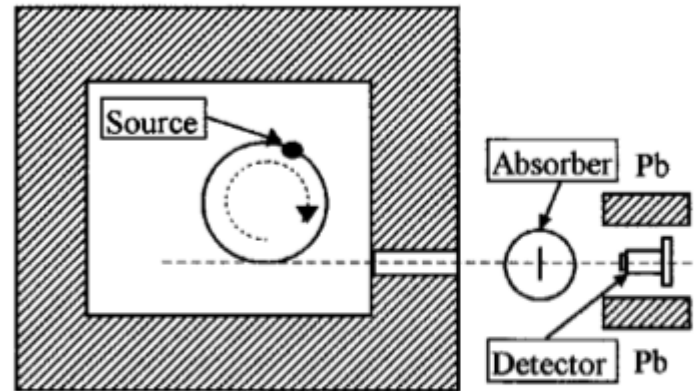
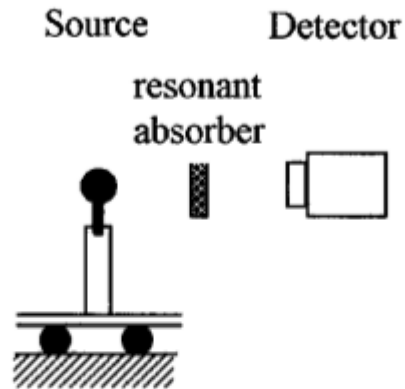
b) Nucleus bound in a crystal



Φαινόμενο Mössbauer



Φαινόμενο Mössbauer



Δεν χρειάζεται το φαινόμενο
Doppler για να έχουμε
απορρόφηση συντονισμού

Φαινόμενο Mössbauer

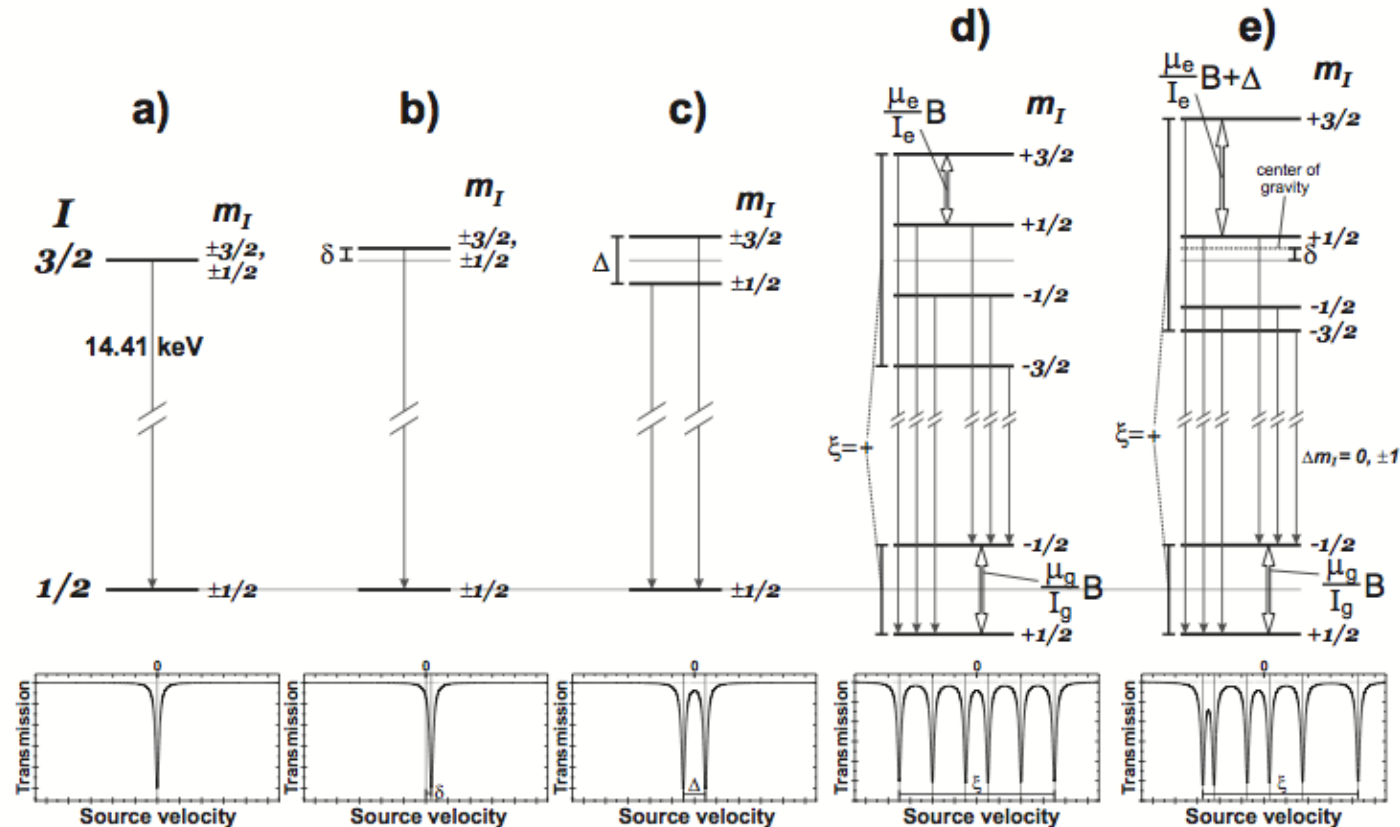
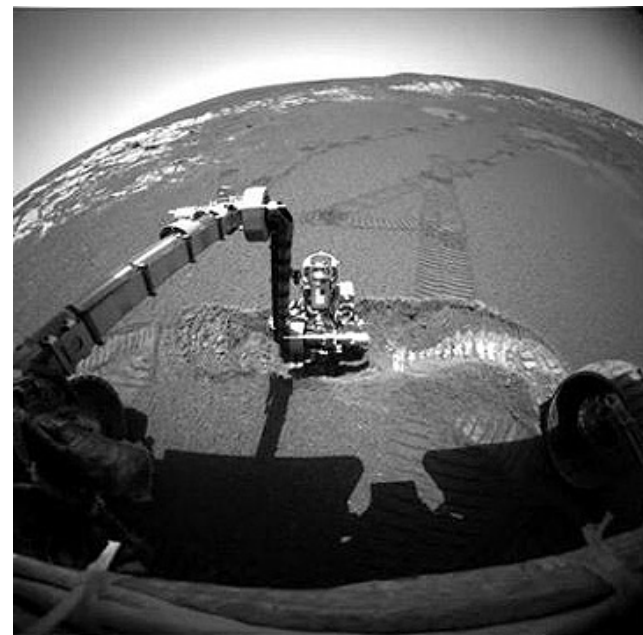
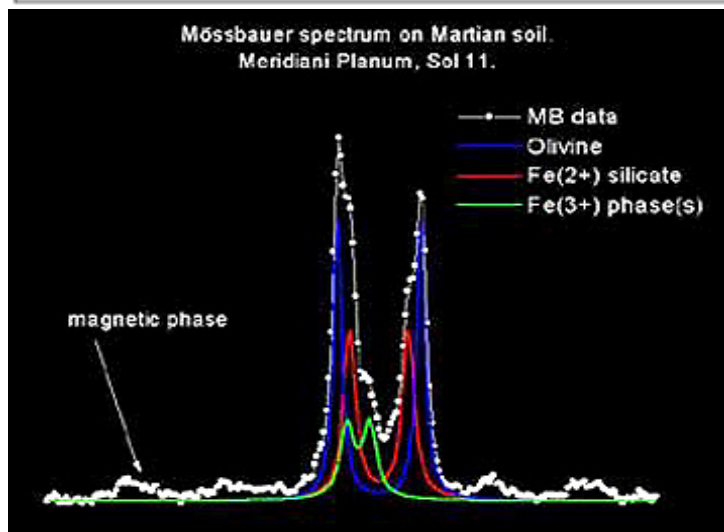
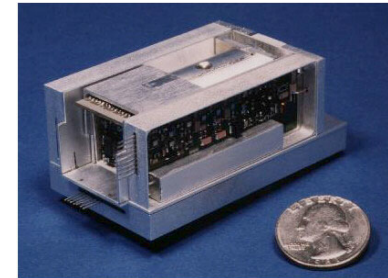


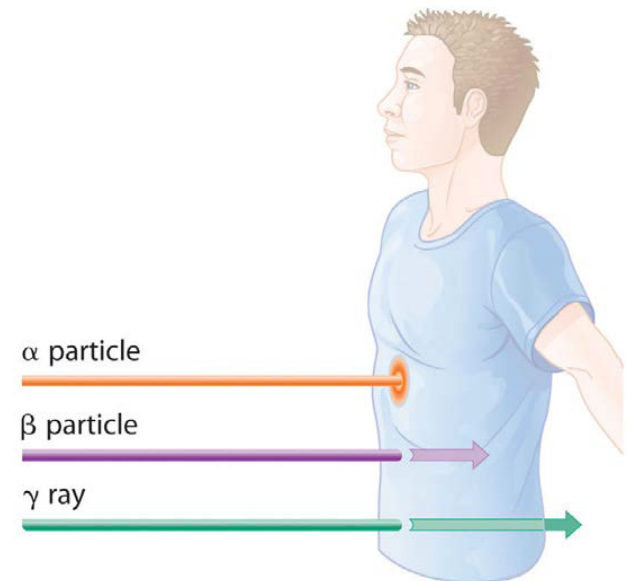
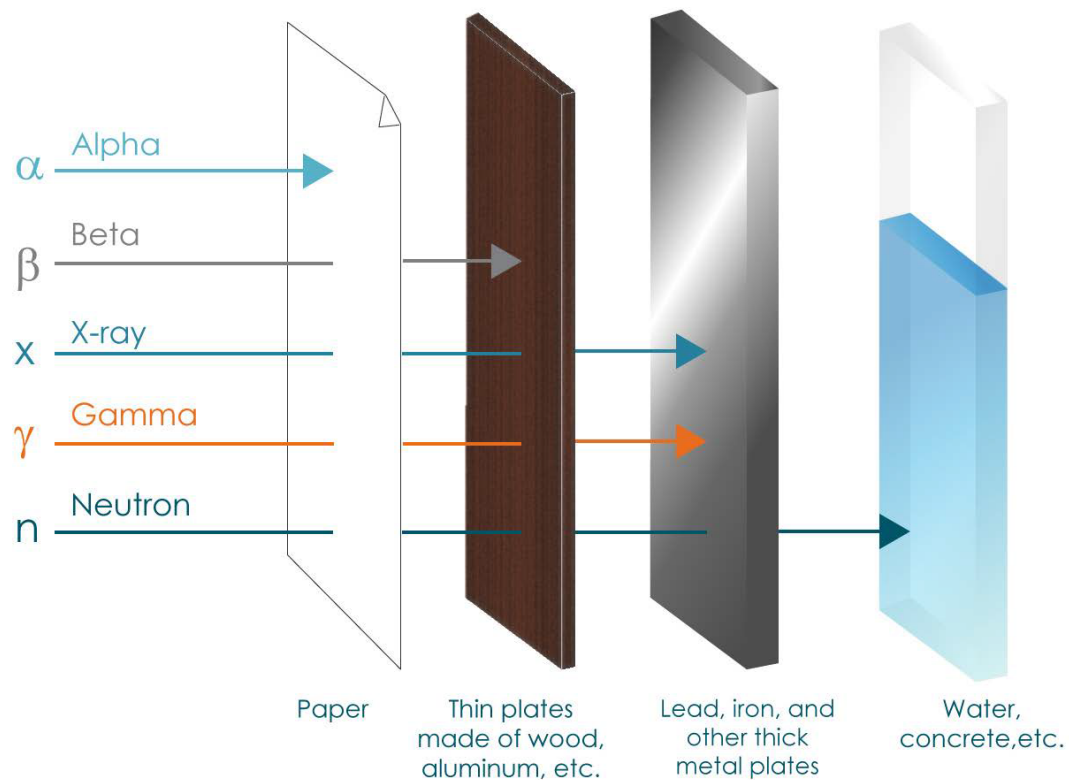
Figure 6.6: Nuclear energy level splittings (top) and corresponding Mössbauer spectra (bottom) for ^{57}Fe in case of: **a)** an isolated nucleus, **b)** only an electric monopole interaction, **c)** only a quadrupole interaction, **d)** only a magnetic dipole interaction and **e)** all interactions 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

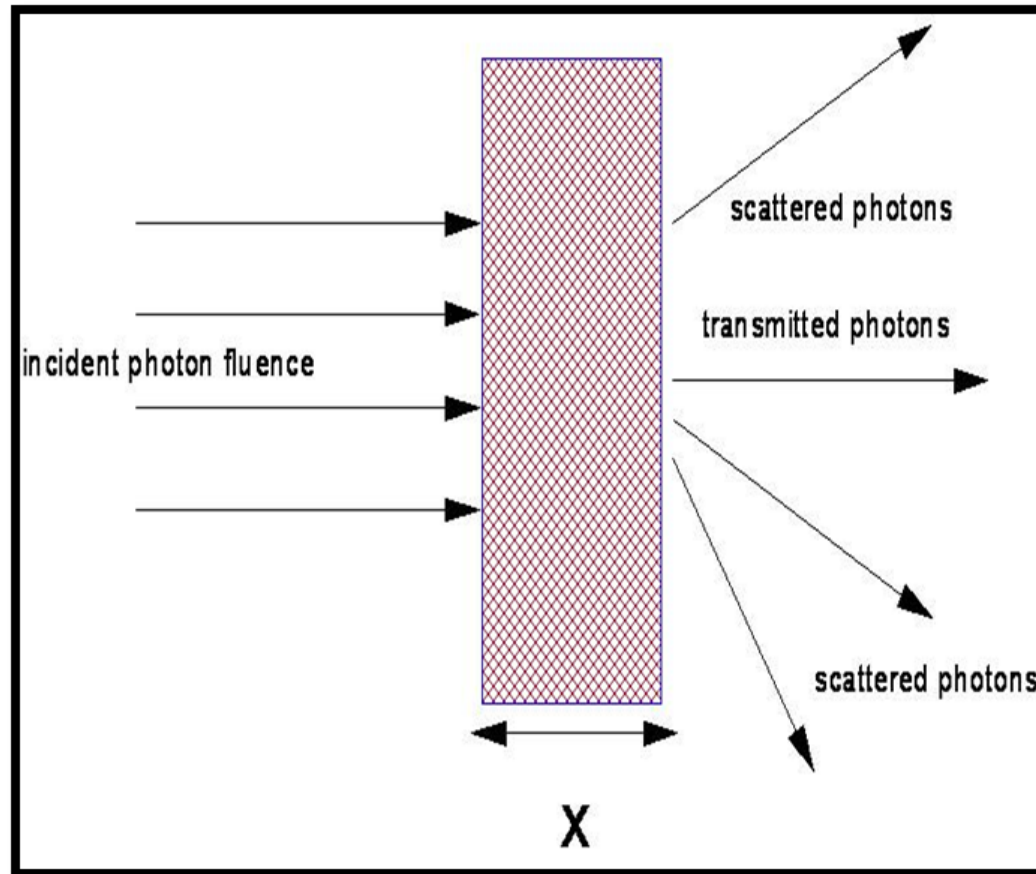
- Nuclear and Solid State Physics
- Biology
- Chemistry
- Materials Science
- Geology
- Archeology
- Forensic Science
- Paleontology
- Mineralogy
- Metallurgy
- Space Science (on Mars Exploration Rovers)



Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας - ύλης



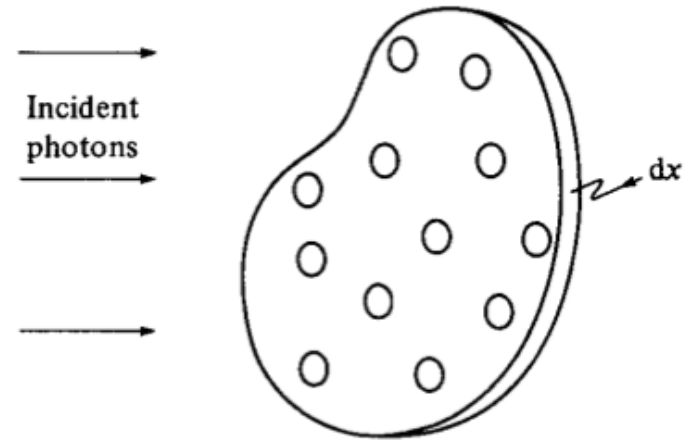
Αλληλεπίδραση γ - ύλης



Αλληλεπίδραση γ - ύλης

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

Δέσμη n φωτονίων, "χάνονται" dn



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

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

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 γ - ύλης

Ύλη> στοιχεία> άτομα

- Ατομική δομή

- Ένα άτομο αποτελείται από έναν θετικά φορτισμένο πυρήνα που περιβάλλεται από ένα σύννεφο αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων.
- Ακτίνα ατόμου $\sim 10^{-10}$ m, ακτίνα πυρήνα $\sim 10^{-15}$ m.
- Ένα άτομο καθορίζεται από τον τύπο $A Z X$,
 - A είναι ο αριθμός μάζας (αριθμός πρωτονίων + νετρόνια),
 - Z είναι ο ατομικός αριθμός (αριθμός πρωτονίων).

- Ατομικές Ενεργειακές Στάθμες

- Η ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων σε διάφορες τροχιές εξαρτάται από το μέγεθος της έλξης Coulomb μεταξύ του θετικά φορτισμένου πυρήνα και των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων.
- Όσο πιο κοντά είναι η τροχιά στον πυρήνα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης.
- Ο μέγιστος δυνατός αριθμός ηλεκτρονίων σε οποιαδήποτε τροχιά δίνεται από το $2n^2$

Αλληλεπίδραση γ - ύλης

- Όταν μια δέσμη ακτίνων-Χ ή φωτονίων γ διέρχεται από ένα μέσο, μπορούν να πραγματοποιηθούν αλληλεπιδράσεις μεταξύ φωτονίων και ύλης με μεταφορά ενέργειας στο μέσο.
- Το αρχικό βήμα στη μεταφορά ενέργειας περιλαμβάνει την εκπομπή ηλεκτρονίων από τα άτομα του απορροφητικού μέσου
- Εξωτερικό ηλεκτρόνιο $\rightarrow$ ιονισμός $\rightarrow$ επαναφορά σε κανονική κατάσταση + υπέρυθρη (χαμηλή ενέργεια)
- Εσωτερικό ηλεκτρόνιο $\rightarrow$ διέγερση + ελεύθερο εξωτερικό ηλεκτρόνιο παίρνει τη θέση του + χαρακτηριστικές ακτίνες Χ –
 - Οι χαρακτηριστικές ακτίνες Χ παράγουν ηλεκτρόνιο Auger
 - Αυτά τα ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας μεταφέρουν την ενέργειά τους παράγοντας ιονισμό και διέγερση των ατόμων κατά μήκος της διαδρομής τους

Αλληλεπίδραση γ - ύλης

- Τα φωτόνια είναι ΕΜΜΕΣΑ ιονιστική ακτινοβολία
- Αλληλεπιδρά με τα άτομα ενός υλικού ή απορροφητή για να παράγετε ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας με 3 κύριες διεργασίες
 - Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
 - Φαινόμενο Compton
 - Παραγωγή ζεύγους

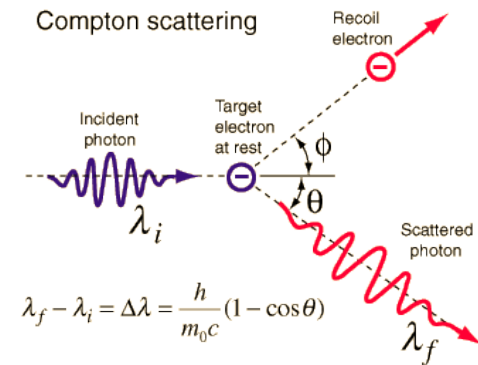
Φωτόνια στην ύλη

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

- Δύδιμη γέννηση

- Απορρόφηση του γ 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_{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 (αυξάνεται με το Z)

“Δέσμια” και “ελεύθερα” ηλεκτρόνια

- Αυστηρά μιλώντας συνήθως δεν υπάρχουν «ελεύθερα» ηλεκτρόνια στην ύλη
- Κάθε ηλεκτρόνιο είναι δέσμιο στο άτομο από την ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ του ίδιου και του θετικού φορτίου στον πυρήνα.
- Μπορεί να είναι «ελεύθερο» μόνο εάν δεχθεί αρκετή ενέργεια για να ξεπεράσει αυτή τη δύναμη δέσμευσης
- Για τα εξωτερικά ηλεκτρόνια οποιουδήποτε ατόμου, η ενέργεια σύνδεσης είναι μόνο μερικά eV, η οποία είναι μικρή σε σύγκριση με τα εσωτερικά ηλεκτρόνια και πολύ μικρή σε σύγκριση με την ενέργεια των φωτονίων ακτίνων Χ
- Αυτό οδηγεί στην ιδέα ότι, ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να θεωρηθεί «ελεύθερο» όταν η ενέργεια σύνδεσης είναι μικρή σε σύγκριση με την ενέργεια των φωτονίων με τα οποία αλληλεπιδρά

Ελαστική σκέδαση (*coherent, Thomson, Rayleigh*)

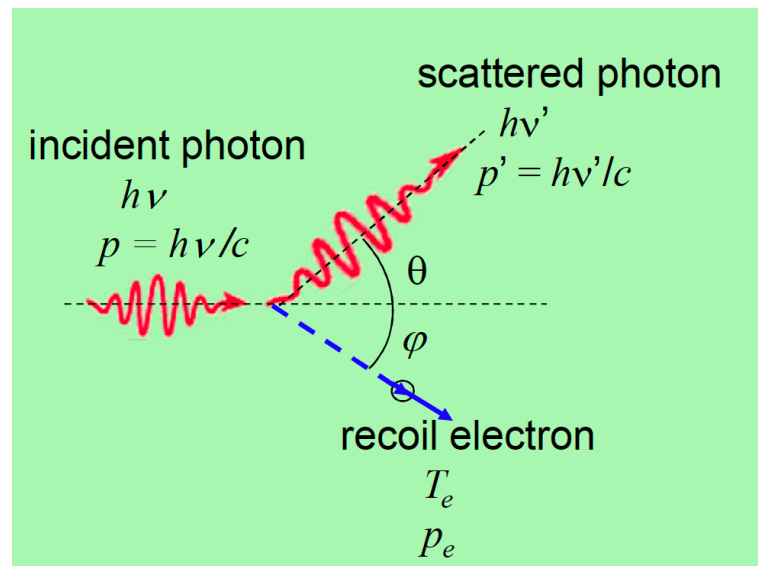
- Περιγράφεται ευκολότερα θεωρώντας την ακτινοβολία ως κύματα παρά φωτονία
- Η αλληλεπίδραση γίνεται με δέσμια ηλεκτρόνια
- Η ακτινοβολία εκτρέπεται χωρίς απώλεια ενέργειας
- Το ηλεκτρικό πεδίο του προσπίπτοντος κύματος επιταχύνει το σωματίδιο, προκαλώντας το με τη σειρά του να εκπέμπει ακτινοβολία στην ίδια συχνότητα με το προσπίπτον κύμα, και έτσι, σκεδάζεται το κύμα.

Ελαστική σκέδαση

- Δεν απορροφάται καμία ενέργεια από το υλικό
- Για μια ακτινοβολία με δέσμη είναι διαδικασία είναι ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ της δέσμης ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.
- Δεδομένου ότι η διαδικασία περιλαμβάνει δέσμια ηλεκτρόνια, εμφανίζεται περισσότερο σε υλικά υψηλού ατομικού αριθμού και επίσης περισσότερο με ακτινοβολίες χαμηλής ενέργειας
- Ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης για ελαστική σκέδαση είναι
 - $\propto Z^2$
 - $\propto 1/E$
- Συνεισφέρει ελάχιστα στην εξασθένηση

Φαινόμενο Compton

- Η αλληλεπίδραση γίνεται με ελεύθερα ηλεκτρόνια
- Σε αυτήν την αλληλεπίδραση, το ηλεκτρόνιο λαμβάνει κάποια ενέργεια από το φωτόνιο και εκπέμπεται υπό γωνία φ
- Το φωτόνιο με μειωμένη ενέργεια σκεδάζεται υπό γωνία θ
- Η γωνία μέσω της οποίας σκεδάζεται το φωτόνιο θ , η ενέργεια που χάνεται από το φωτόνιο και η ενέργεια που λαμβάνει το ηλεκτρόνιο συνδέονται μεταξύ τους



Φαινόμενο Compton

Εφαρμόζοντας τους νόμους διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, μπορούν να προκύψουν οι ακόλουθες σχέσεις

όπου m_0c^2 είναι η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (0,511 MeV)

$$\frac{h\nu'}{h\nu} = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

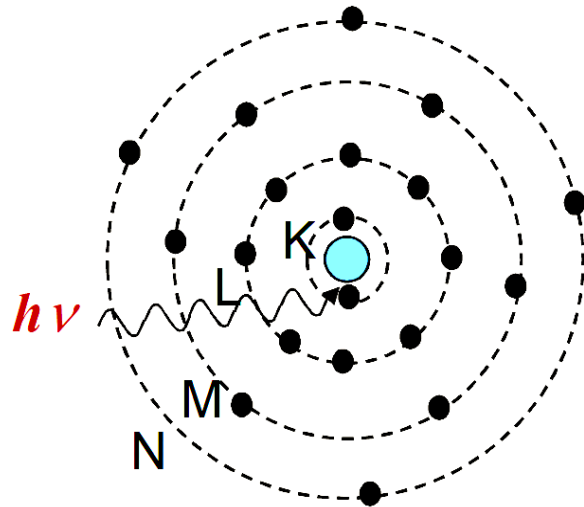
$$\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$$

$$\cot\varphi = (1 + \alpha)\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

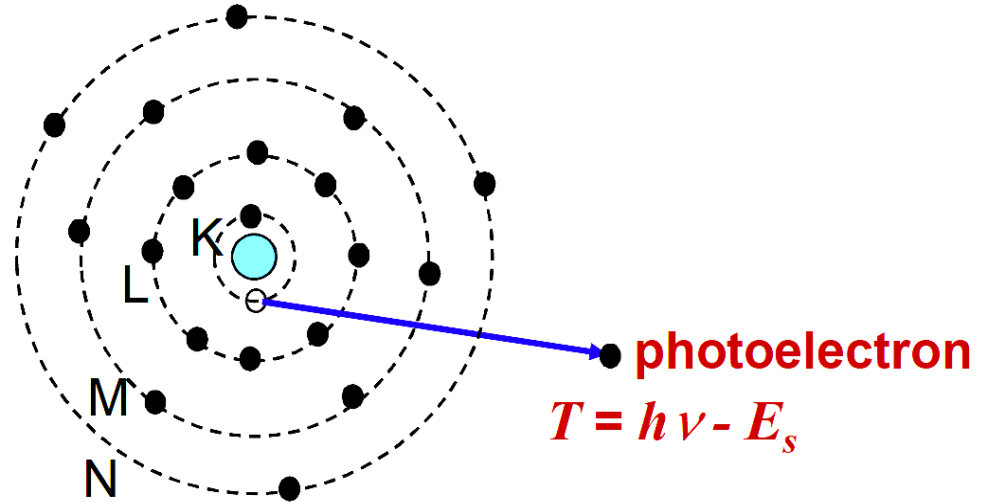
$$T_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

before collision



after collision

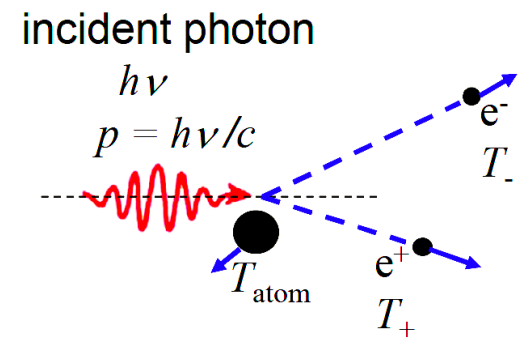


Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Το φωτονίο αλληλεπιδρά με ένα άτομο και εκπέμπεται ένα από τα τροχιακά ηλεκτρόνια του ατόμου
- Όλη η ενέργεια του φωτονίου απορροφάται από το ηλεκτρόνιο
- Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου (φωτοηλεκτρόνιο) είναι ίση με $h\nu - E_B$ (ενέργεια σύνδεσης)
- Μετά την εκπομπή του ηλεκτρονίου από το άτομο, δημιουργείται μια κενή θέση στο φλοιό, αφήνοντας έτσι το άτομο σε μια διεγερμένη κατάσταση.
- Η κενή θέση μπορεί να καλυφθεί από ένα εξωτερικό τροχιακό ηλεκτρόνιο με την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων X
- Υπάρχει επίσης δυνατότητα εκπομπής ηλεκτρονίων Auger τα οποία είναι ενεργητικά ηλεκτρόνια που παράγονται από την απορρόφηση χαρακτηριστικών ακτίνων X εσωτερικά από το άτομο

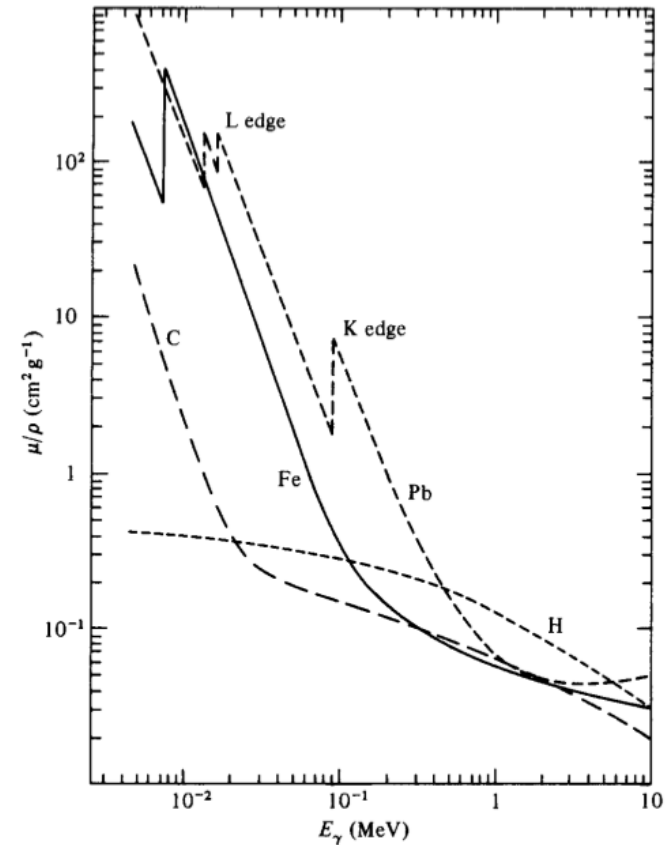
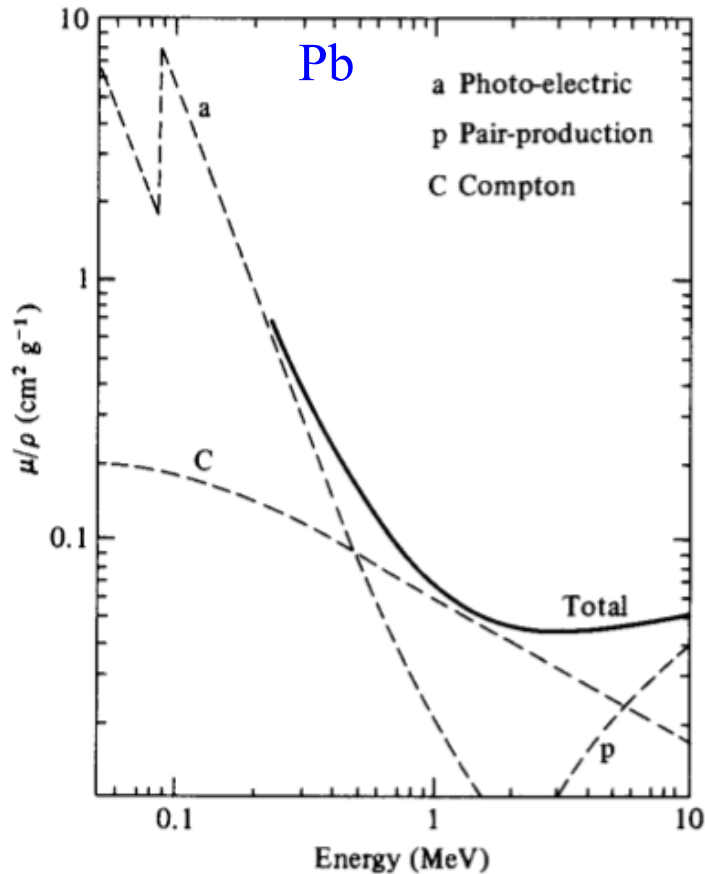
Δίδυμη Γένεση

- Εάν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από 1,02 Mev
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του ατομικού πυρήνα και δίνει όλη την ενέργειά του στη διαδικασία δημιουργίας ενός ζεύγους ενός ηλεκτρονίου (e^-) και ενός ποζιτρονίου (e^+)
- Καθώς η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου είναι ίση με 0,511 Mev, απαιτείται ελάχιστη ενέργεια 1,02 Mev για τη δημιουργία του ζεύγους ηλεκτρονίων
- Η ενέργεια φωτονίου άνω των 1,02 Mev μοιράζεται μεταξύ των σωματιδίων ως κινητική ενέργεια
- Τα σωματίδια τείνουν να εκπέμπονται προς τα εμπρός σε σχέση με το προσπίπτοντα φωτόνιο



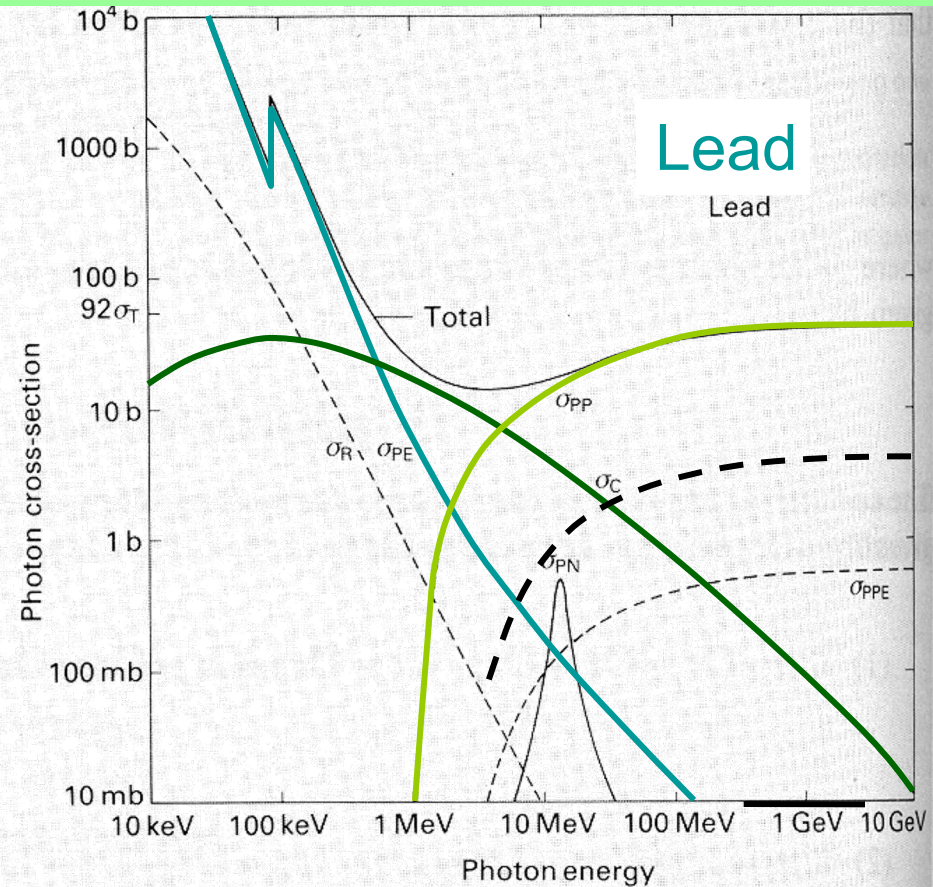
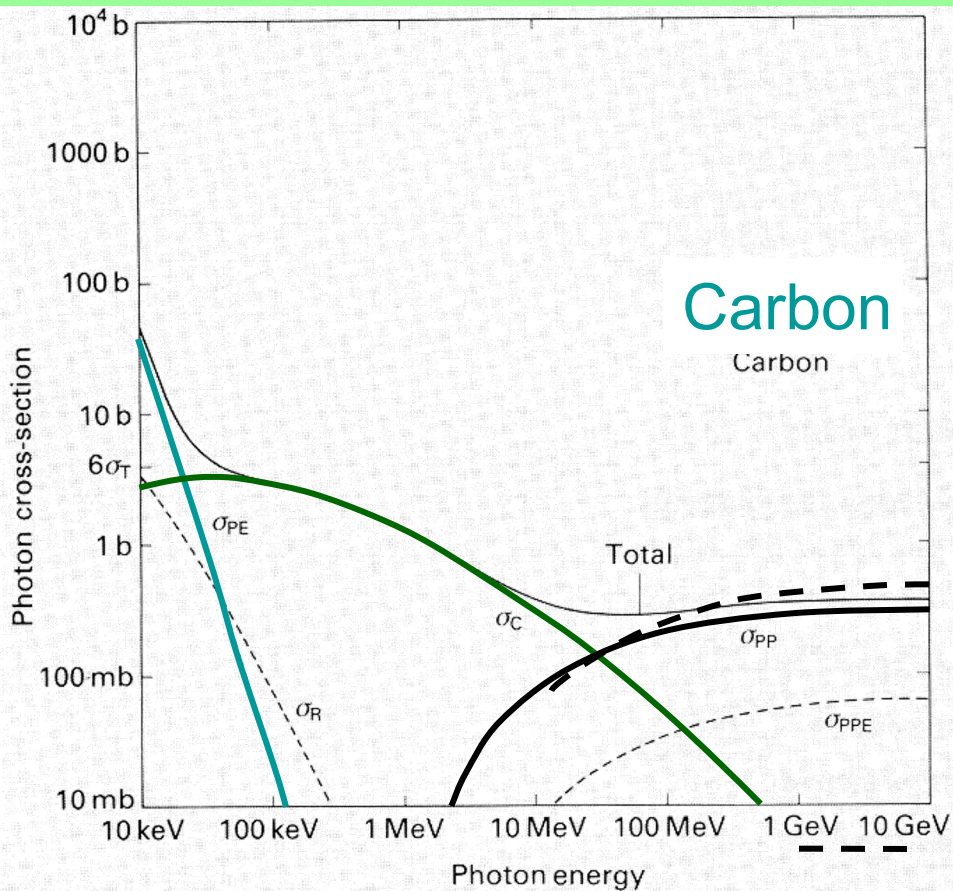
Αλληλεπίδραση γ - ύλης

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



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

Φωτόνια στην ύλη



R → Rayleigh PE → Photoeffect C → Compton
 PPE → Pair Production on atomic electrons

PP → Pair Production on nucleus
 PN → Giant Photo-Nuclear dipole resonance