

### 3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΎΛΗ

Η ανίχνευση τόσο της σωματιδιακής όσο και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βασίζεται στην αλληλεπίδρασή της με την ύλη. Η ευκολία ανίχνευσης εξαρτάται από τον βαθμό αυτής της αλληλεπίδρασης. Γενικά μπορεί να λεχθεί, ότι και η σωματιδιακή και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια της ύλης προκαλώντας φαινόμενα διεγέρσεως και ιονισμού.



Η αλληλεπίδραση με τους πυρήνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στην ανίχνευση των νετρονίων, τα οποία δεν διαθέτουν ηλεκτρικό φορτίο και μπορούν να τους πλησιάσουν ανενόχλητα.

#### 3.1 Η αλληλεπίδραση των φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη

Η αλληλεπίδραση των φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη είναι ισχυρή και, συνήθως, οδηγεί στην πλήρη απορρόφησή τους. Τα φορτισμένα σωματίδια χάνουν την ενέργειά τους με ηλεκτροστατικού τύπου αλληλεπιδράσεις (κρούσεις) με τα ηλεκτρόνια της ύλης προκαλώντας φαινόμενα ιονισμού.

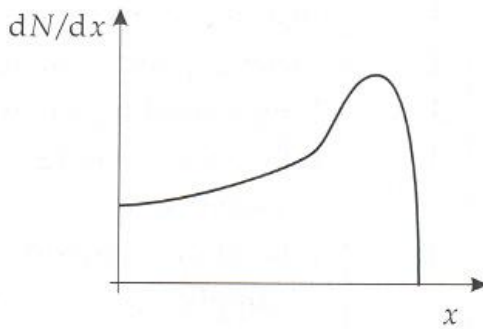
Η απώλεια ενέργειας ενός φορτισμένου σωματιδίου σ' ένα συγκεκριμένο μέσο εκφράζεται με την **ισχύ πέδησης** (*stopping power*)

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

Η ισχύς πέδησης, που εξαρτάται τόσο από τη μάζα, την ενέργεια και το φορτίο του σωματιδίου όσο και από τη σύσταση του απορροφητή, εκφράζεται σε μονάδες (MeV/cm). Η διαίρεση με το ειδικό βάρος του απορροφητή (σε g/cm<sup>3</sup>) δίνει την ισχύ πέδησης ως προς την επιφανειακή πυκνότητα (MeV/(g/cm<sup>2</sup>)). Η ισχύς πέδησης των φορτισμένων σωματιδίων στα διάφορα υλικά είναι καθορισμένη και μπορεί να υπολογισθεί ή να

ληφθεί από πίνακες.

Ένας άλλος τρόπος εκφράσεως των αποτελεσμάτων της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη είναι ο **ειδικός ιονισμός** (*specific ionization*), που δίνει τον αριθμό των ιόντων, που παράγεται ανά μήκος της διαδρομής (π.χ. ανά mm) ενός σωματιδίου σ' ένα συγκεκριμένο μέσο. Το *Διάγρ. 3-1* παρουσιάζει τον ειδικό ιονισμό ενός βαρέως φορτισμένου σωματιδίου σε συνάρτηση της διαδρομής του ( $x$ ) (**καμπύλη Bragg**).

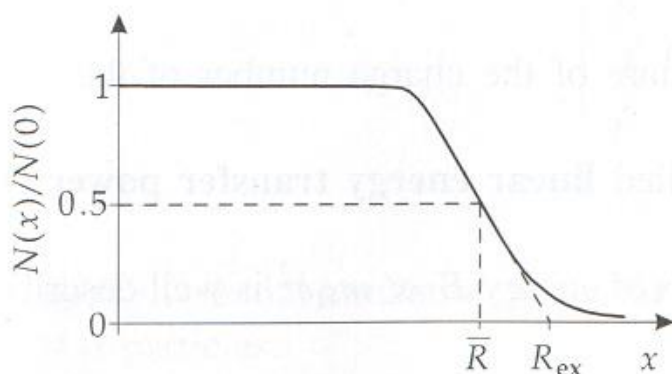


*Διάγρ. 3-1* Ειδικός ιονισμός ενός φορτισμένου σωματιδίου ως προς τη διαδρομή του ( $x$ ) σ' ένα μέσο (**καμπύλη Bragg**).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση ενέργεια σχηματισμού ενός ζεύγους ιόντων στον αέρα είναι της τάξεως των 35 eV, η αλληλεπίδραση, για παράδειγμα, ενός σωματιδίου-α με κινητική ενέργεια 10.54 MeV (ακτινοβολία-α του  $^{210}\text{Po}$ ) μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό περίπου 300 χιλιάδων ζευγών ιόντων κατά τη διάρκεια της διαδρομής του στην ύλη.

Η τιμή της τελικής εμβέλειας των φορτισμένων σωματιδίων παρουσιάζει κάποια κατανομή, λόγω της στατιστικής των διεργασιών απώλειας της ενέργειας. Οι αποκλίσεις αυτές δημιουργούν μία **διασπορά εμβέλειας** (*range straggling*). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται συνήθως η **μέση εμβέλεια** ( $\bar{R}$ , *mean range*) ή η **προεκταμένη εμβέλεια** ( $R_{ex}$ , *extrapolated range*), που συνδέονται και με τη σχέση

$$R_{ex} = 1.1\bar{R}$$



Διάγρ. 3-2 Μέση και προεκταμένη εμβέλεια ενός φορτισμένου σωματιδίου στην ύλη.

Η μέση και η προεκταμένη εμβέλεια για την απορρόφηση σωματιδίων-α από την ύλη δίνονται γραφικά στο Διάγρ. 3-2. Όταν ο απορροφητής δεν είναι ένα καθαρό στοιχείο είναι ένα σύνθετο υλικό τότε η εμβέλεια μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$\frac{1}{R_{ολ}} = \frac{W_1}{R_1} + \frac{W_2}{R_2} + \dots + \frac{W_n}{R_n}$$

όπου  $W$  το κλάσμα βάρους των επιμέρους στοιχείων στον απορροφητή και  $R$  οι αντίστοιχες εμβέλεις.

Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-β με την ύλη είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της ακτινοβολίας-α της ίδιας ενέργειας. Η εμβέλεια της ακτινοβολίας-α ενέργειας 7.68 MeV του  $^{214}\text{Po}$  στο αλουμίνιο είναι περίπου 41  $\mu\text{m}$ , η εμβέλεια ακτινοβολίας-β αντίστοιχης ενέργειας είναι 1.33 cm. Αυτό οφείλεται στην κατά πολύ μικρότερη μάζα των σωματιδίων-β (ηλεκτρονίων) σε σύγκριση μ' αυτή των σωματιδίων-α. Ο ειδικός ιονισμός των ηλεκτρονίων σ' έναν απορροφητή είναι μεταξύ 4 και 8 ζευγών ιόντων ανά mm διαδρομής τους.

Για την απορρόφηση της ακτινοβολίας-β χρησιμοποιούνται συνήθως στερεά (π.χ. αλουμίνιο, plexiglas). Η απορρόφηση ακολουθεί μια, κατά

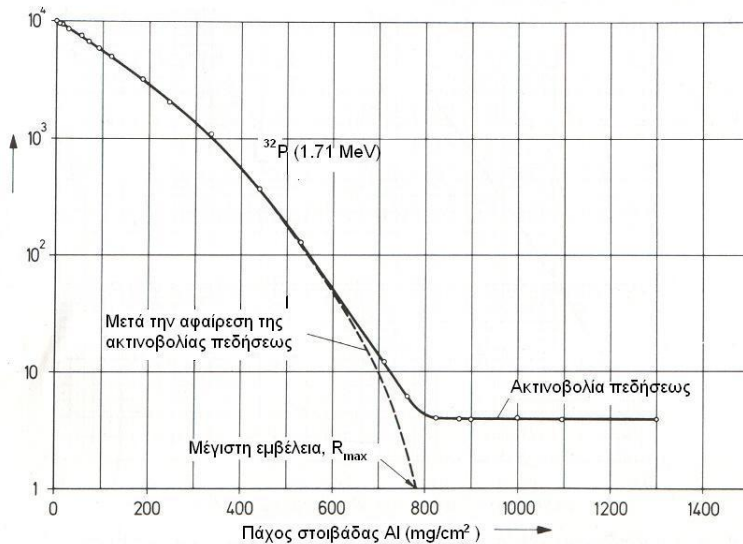
προσέγγιση, εκθετική συνάρτηση

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

όπου  $I_0$  και  $I$  είναι η αρχική και τελική ένταση της ακτινοβολίας,  $d$  το πάχος της στοιβάδας του απορροφητή και  $\mu$  ο συντελεστής απορρόφησης του. Από τα πειραματικά δεδομένα απορρόφησης της ακτινοβολίας-β από διάφορα πάχη ενός απορροφητικού υλικού (Διάγρ. 3-3) είναι δυνατό να ληφθεί η μέγιστη εμβέλεια της ( $R_{\max}$ ) και μετά, από διαγράμματα, η μέγιστη ενέργειά της ( $E_{\max}$ ). Η μέγιστη εμβέλεια ( $R_{\max}$ ) και μέγιστη ενέργεια ( $E_{\max}$ ) της ακτινοβολίας-β, που εκπέμπει ένα νουκλίδιο συνδέονται και με διάφορες εμπειρικές εξισώσεις, όπως αυτές του **Glendenin**

$$E_{\max} = 1.92 R_{\max}^{0.725} \quad (\text{για } 0.03 \text{ g/cm}^2 < R_{\max} < 0.03 \text{ g/cm}^2) \text{ και}$$

$$E_{\max} = 1.85 R_{\max} + 0.245 \quad (\text{για } R_{\max} > 0.3 \text{ g/cm}^2)$$



Διάγρ. 3-3 Απορρόφηση της ακτινοβολίας του  $^{32}\text{P}$  ( $E_{\max}=1.71 \text{ MeV}$ ) από το αλουμίνιο.

Για τον υπολογισμό της ισχύος πέδησης σωματιδίων-β ενέργειας υψηλότερης του 1 MeV στην ύλη πρέπει να ληφθεί υπόψη και μεταβολή της μάζας τους με την ταχύτητα τους σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας. Η σχετικιστική μάζα τους δίνεται από τη σχέση

$$M_{\text{σχετ}} = \frac{M_{\text{ηρεμ}}}{\left(1 - v^2/c^2\right)^{1/2}}$$

όπου  $M_{\text{σχετ}}$  και  $M_{\text{ηρεμ}}$  η σχετικιστική και μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου,  $v$  η ταχύτητα του ηλεκτρονίου και  $c$  η ταχύτητα του φωτός.

Κατά τη μελέτη της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας-β με διάφορα υλικά και κατά τη μέτρηση της ακτινοβολίας-β πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η **οπισθοσκέδαση** των ηλεκτρονίων. Τα σωματίδια-β ακολουθούν κατά τη διέλευσή τους μέσα σ' ένα μέσο μία μη ευθύγραμμη πορεία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χάνουν την ενέργειά τους συγκρουόμενα με σωματίδια της ίδιας μάζας (τα ηλεκτρόνια των συστατικών του απορροφητή). Αν επιλεγθούν ως υποστρώματα ενός β-ραδιενεργού παρασκευάσματος υλικά διαφόρου ατομικού αριθμού  $Z$  και πάχους, θα παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός καταγραφής των σωματιδίων-β από ένα ανιχνευτικό σύστημα αυξάνει αυξανόμενου του ατομικού αριθμού και του πάχους του υποστρώματος. Αυτό οφείλεται στις διαδοχικές ανακλάσεις των ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα.

Τα ποζιτρόνια υψηλής ενέργειας χάνουν αρχικά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους με ελαστικές και μη ελαστικές κρούσεις με τα συστατικά του απορροφητή. Κατά τη διάρκεια αυτών των κρούσεων σχηματίζονται ζεύγη ιόντων, όπως και στην περίπτωση των ηλεκτρονίων. Αφυλοποίηση λαμβάνει χώρα μόνον όταν το ποζιτρόνιο έχει χάσει το μεγαλύτερο μέρος της αρχικής του κινητικής ενέργειας.

Πριν την αφυλοποίηση το ποζιτρόνιο μπορεί να δημιουργήσει μ' ένα ηλεκτρόνιο μία βραχύβια κατάσταση παρόμοια με εκείνη ενός ατόμου, που ονομάζεται **ποζιτρονιακό άτομο** (*positronium*, **Ps**). Το ποζιτρόνιο στο ποζιτρονιακό άτομο παίρνει τη θέση του πρωτονίου του πυρήνα. Η μορφή του ποζιτρονιακού ατόμου με παράλληλο σπιν του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου ονομάζεται **όρθο-Ps**, ενώ αυτή με αντιπαράλληλα **πάρα-Ps**. Παρά τη μικρή διάρκεια ζωής των δύο αυτών εξωτικών ατόμων (διάρκεια ζωής όρθο-Ps περίπου  $10^{-7}$  s και πάρα-Ps  $10^{-10}$  s) η χημεία τους έχει ήδη ερευνηθεί.

### 3.1.1 Η ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung)

Η ακτινοβολία πέδησης (*Bremsstrahlung*) προκύπτει όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο επιταχύνεται ή επιβραδύνεται από ένα πεδίο. Η διαφορά ενέργειας εκπέμπεται υπό τη μορφή μίας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο βρεθεί στο πεδίο ηλεκτρικών δυνάμεων ενός πυρήνα με ατομικό αριθμό  $Z$  υφίσταται επιβράδυνση και αποδίδει ανά μονάδα χρόνου ενέργεια, που σύμφωνα με την κλασική θεωρία ισούται με

$$\frac{dE}{dt} = \frac{Z^2}{m^2} \quad (\text{m: η μάζα του σωματιδίου})$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης είναι εντονότερη όταν αλληλεπιδρούν φορτισμένα σωματίδια μικρής μάζας, όπως τα ηλεκτρόνια, με υλικά μέσου ή μεγάλου  $Z$ . Η εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης κατά την αλληλεπίδραση βαρέων φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη είναι μικρή. Η ακτινοβολία πέδησης παρουσιάζει συνεχές ενεργειακό φάσμα.

Στην περίπτωση των ηλεκτρονίων η σχέση

$$\frac{\Delta E_{\text{Bremsstrahlung}}}{\Delta E_{\text{ιονισμό}}} = \frac{E_e Z_{\text{απορροφητή}}}{800}$$

δίνει τον λόγο απώλειας ενέργειας με εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης ως προς την απώλεια ενέργειας με ιονισμό.

Η εκπομπή της ακτινοβολίας πέδησης πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της θωράκισης πηγών ακτινοβολίας-β.

### 3.1.2 Η ακτινοβολία Čerenkov

Όταν φορτισμένα σωματίδια κινούνται σ' ένα διαφανές μέσο με ταχύτητα  $v$  μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο μέσο αυτό ( $v > c/n$ , όπου  $n$  ο δείκτης διαθλάσεως του μέσου), παρατηρείται η εκπομπή μίας

ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, της **ακτινοβολίας Čerenkov**.

Η παραγωγή αυτής της ακτινοβολίας μπορεί να ερμηνευθεί με τις κλασικές μεθόδους. Ένα φορτισμένο σωματίδιο δημιουργεί, κατά τη διέλευσή του, μία πόλωση των ατόμων της ύλης απωθώντας τα ομώνυμά του φορτία και έλκοντας τα ετερόνυμα. Έτσι μετατρέπονται τα άτομα ενός διηλεκτρικού σε μικρά δίπολα. Αν ένα σωματίδιο κινείται με μεγάλη ταχύτητα μέσα στην ύλη, τα σωματίδια που αφήνει πίσω του είναι, για μικρό χρονικό διάστημα, πολωμένα ενώ αυτά που βρίσκονται μπροστά του μη πολωμένα. Η βαθμιαία αυτή πόλωση, που μεταδίδεται στο μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός, προκαλεί την εκπομπή της ακτινοβολίας Čerenkov.

Η διάδοση της ακτινοβολίας Čerenkov, που έχει ένα έντονο μπλε χρώμα, παρουσιάζει ομοιότητες με τον “κώνο του Mach”. Από τη γωνία εκπομπής  $\alpha$  ( $\cos \alpha = c/nv$ ) μπορεί να υπολογισθεί η ενέργεια των σωματιδίων και από τον αριθμό των φωτονίων, που εκπέμπονται, ο αριθμός των σωματιδίων.

### 3.2 Η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη.

Με τον όρο ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εννοούνται η ακτινοβολία- $\gamma$  και οι ακτίνες- $X$ . Τα δύο αυτά είδη ακτινοβολίας έχουν την ίδια υφή (φωτόνια) και τύπο αλληλεπίδρασης αλλά διαφορετική προέλευση. Η ακτινοβολία- $\gamma$  προέρχεται από την αποδιέγερση των πυρήνων ενώ οι ακτίνες- $X$  από τις στοιβάδες των ηλεκτρονίων των ατόμων. Η ενέργεια της ακτινοβολίας- $\gamma$  κυμαίνεται μεταξύ 10 keV και  $10^4$  MeV (μήκος κύματος 0.1 nm ως  $10^{-7}$  nm), ενώ των ακτίνων- $X$  μεταξύ 100 eV και 0.1 MeV (μήκος κύματος 10 nm ως 0.01 nm).

Γενικά, η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη είναι μικρή. Τα φωτόνια δεν διαθέτουν φορτίο και γι' αυτό παρουσιάζουν διαφορετικούς τρόπους αλληλεπίδρασης με την ύλη σε σύγκριση με τα φορτισμένα σωματίδια. Τα φωτόνια αποδίδουν όλη ή τουλάχιστον το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους με μία μόνο αλληλεπίδραση.

Η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ακολουθεί τον εκθετικό νόμο

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

όπου  $I_0$  και  $I$  η αρχική και τελική ένταση της ακτινοβολίας,  $d$  το πάχος της στοιβάδας του απορροφητή και  $\mu$  ο συντελεστής απορροφήσεως του, που μπορεί να εκφράζεται σε  $\text{cm}^{-1}$  ( $\mu_{\gamma\rho}$ , γραμμικός συντελεστής απορροφήσεως, *linear absorption coefficient*) ή σε  $\text{cm}^2/\text{g}$  ( $\mu_{\mu\alpha\zeta}$ , μαζικός συντελεστής απορροφήσεως, *mass absorption coefficient*) ανάλογα με το αν το πάχος  $d$  δίνεται σε  $\text{cm}$  ή σε  $\text{g}/\text{cm}^2$ . Οι δύο συντελεστές συνδέονται μεταξύ τους με το ειδικό βάρος ( $\rho$ ) του υλικού

$$\mu_{\gamma\rho} = \rho \mu_{\mu\alpha\zeta}$$

Με τον όρο **στοιβάδα ημιαπορροφήσεως** ( $d_{1/2}$ , *half-thickness*) χαρακτηρίζεται το πάχος της στοιβάδας ενός απορροφητή, που είναι απαραίτητο για την απορρόφηση του μισού αριθμού των προσπιπτόντων φωτονίων

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Η απορρόφηση των φωτονίων από την ύλη ακολουθεί τρεις μηχανισμούς αλληλεπίδρασης

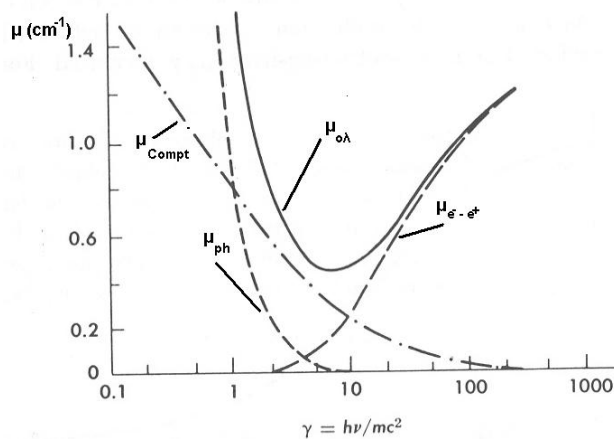
1. το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** (*photoelectric effect*)
2. τη **σκέδαση Compton** (*Compton scattering*) και
3. τη **δίδυμη γένεση** (*pair production*)

Έτσι ο συντελεστής απορροφήσεως ισούται με το άθροισμα των συντελεστών για τα τρία επιμέρους φαινόμενα

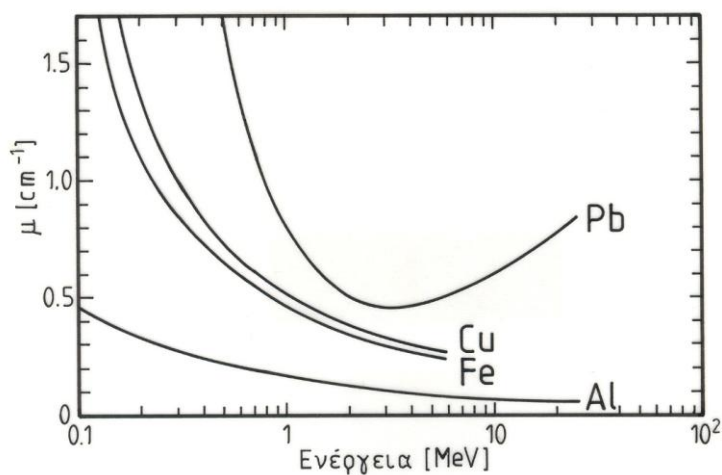
$$\mu_{\text{ολ}} = \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{Compt}} + \mu_{e^-e^+}$$

Στο *Διάγρ. 3-4* δίνονται οι επιμέρους και ο ολικός συντελεστής απορροφήσεως του μολύβδου για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαφόρων ενεργειών, ενώ στο *Διάγρ. 3-5* οι ολικοί συντελεστές για διάφορα μέταλλα.





Διάγρ. 3-4: Επιμέρους και ολικός συντελεστής απορρόφησης του μολύβδου για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαφόρων ενεργειών.



Διάγρ. 3-5: Ολικός συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας-γ από διάφορα μέταλλα.

### 3.2.1 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο το φωτόνιο αποδίδει με μία κρούση όλη την ενέργειά του σ' ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο του υλικού με το οποίο αλληλεπιδρά (Διάγρ. 3-6). Το ηλεκτρόνιο (**φωτοηλεκτρόνιο**) εγκαταλείπει το άτομο με κινητική ενέργεια ίση με την ενέργεια του φωτονίου μειωμένη κατά την ενέργεια συνδέσεώς του

$$E_e = h\nu - E_{\text{συνδ}}$$

Η ενέργεια συνδέσεως του ηλεκτρονίου εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό του πυρήνα και από τη στοιβάδα στην οποία ανήκει. Επειδή ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να διεγερθεί μόνον όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι επαρκής για να το ανεβάσει σε μία στοιβάδα μικρότερης ενέργειας συνδέσεως, η καμπύλη απορρόφησης των φωτονίων από ένα υλικό (ή η ενεργός διατομή) παρουσιάζει, κατά την προσέγγιση της ενέργειας συνδέσεως μίας στοιβάδας, χαρακτηριστικά μέγιστα (*ακμές, edges*). Σε μεγάλες ενέργειες, πέραν της *K-ακμής* που αντιστοιχεί στην ενέργεια συνδέσεως της K-στοιβάδας ηλεκτρονίων, ελαττώνεται σημαντικά η απορρόφηση των φωτονίων από το συγκεκριμένο μέσο.

Η πιθανότητα απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σύμφωνα με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αυξάνει αυξανόμενου του ατομικού αριθμού του απορροφητή και ελαττώνεται αυξανόμενης της ενέργειας της ακτινοβολίας

$$P_{\text{Ph}} = k \frac{Z_{\text{απορ}}^5}{E_\gamma^{7/2}}$$

Ο μηχανισμός αυτός αλληλεπιδράσεως της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία στην απορρόφηση φωτονίων χαμηλής ενέργειας από βαριά στοιχεία (π.χ. μόλυβδος, βισμούθιο).

### 3.2.2 Η σκέδαση Compton

Ο σημαντικότερος τρόπος αλληλεπίδρασης φωτονίων μέσης ενέργειας με την ύλη είναι η σκέδαση Compton. Σύμφωνα μ' αυτόν τον μηχανισμό το φωτόνιο αποδίδει μόνο μόνον ένα τμήμα της ενέργειάς του σ' ένα από τα τροχιακά ηλεκτρόνια και συνεχίζει την πορεία του με μειωμένη ενέργεια και αλληλεπιδρά περαιτέρω με τον απορροφητή. Το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο προέλευσής του με ενέργεια ίση με την ενέργεια, που του απέδωσε το φωτόνιο, μειωμένη κατά την ενέργεια συνδέσεώς του (Διάγρ. 3-7).

Η πιθανότητα αλληλεπιδράσεως της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη σύμφωνα μ' αυτόν τον μηχανισμό είναι ανάλογη του ατομικού αριθμού του απορροφητή (δηλαδή προς τον αριθμό των διαθέσιμων τροχιακών ηλεκτρονίων) και αντιστρόφως ανάλογη με την ενέργεια της ακτινοβολίας

$$P_{Compt} = k \frac{Z_{απορ}}{E_{\gamma}}$$

Η διεργασία αυτή μπορεί να περιγραφεί με τους νόμους της κλασικής φυσικής. Η ενέργεια του φωτονίου ( $E_{\gamma}'$ ) μετά από την κρούση του με ένα ηλεκτρόνιο δίνεται από τη σχέση

$$E_{\gamma}' = E_{\gamma} \frac{1}{1 + q E_{\gamma}}$$

όπου  $q = (1 - \cos \rho) / m_0 c^2$  (το  $\rho$  παριστάνει τη γωνία σκέδασης,  $m_0$  τη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου και  $c$  την ταχύτητα του φωτός). Επειδή η γωνία  $\rho$  μπορεί να είναι διαφορετική σε κάθε κρούση, η ενέργεια, που μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο λαμβάνει κι αυτή διάφορες τιμές. Έτσι τα ηλεκτρόνια Compton παρουσιάζουν ένα συνεχές ενεργειακό φάσμα και όχι χαρακτηριστικές ενέργειες.

### 3.2.3 Η δίδυμη γένεση

Όταν τα φωτόνια έχουν κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από το ισοδύναμο σε

ενέργεια της μάζας ηρεμίας δύο ηλεκτρονίων ( $2 \times 511 \text{ keV}$ ) τότε προκύπτει στο ηλεκτρικό πεδίο ενός πυρήνα ένα ζεύγος ενός ποζιτρονίου και ενός ηλεκτρονίου. Το ποζιτρόνιο, που παράγεται κατ' αυτόν τον τρόπο, επιβραδύνεται στο απορροφητικό υλικό και τελικά υφίσταται αφυλοποίηση παράγοντας, όπως στη  $\beta^+$ -διάσπαση, δύο φωτόνια ενέργειας  $511 \text{ keV}$  το καθένα.

Η πιθανότητα απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με δίδυμη γένεση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του ατομικού αριθμού του απορροφητή

$$P_{e^+e^-} = k \cdot Z^2 \cdot E_\gamma^2$$

Η δίδυμη γένεση αποτελεί τον κύριο μηχανισμό απορρόφησης φωτονίων μεγάλης ενέργειας από την ύλη. Όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από  $2 \times 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$ , το υπόλοιπο της ενέργειας, μετά τη δημιουργία του ζεύγους ποζιτρονίου – ηλεκτρονίου, δίνεται στα δύο σωματίδια με τη μορφή κινητικής ενέργειας.

### 3.3 Η αλληλεπίδραση των νετρονίων με την ύλη

Τα νετρόνια, λόγω της ηλεκτρικής τους ουδετερότητας, αλληλεπιδρούν με την ύλη με τελείως διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα φορτισμένα σωματίδια και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν σχεδόν αποκλειστικά με τους πυρήνες των ατόμων του απορροφητικού μέσου παρά με τα ηλεκτρόνια. Οι πυρηνικές αυτές αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνουν ελαστικούς και μη ελαστικούς σκεδασμούς καθώς επίσης πυρηνικές αντιδράσεις (βλ. Κεφ. 5). Σ' έναν ελαστικό σκεδασμό το άθροισμα των κινητικών ενεργειών του νετρονίου και του πυρήνα πριν και μετά το σκεδασμό είναι ίσο. Όταν μετά το σκεδασμό ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του νετρονίου παραμένει ως ενέργεια διεγέρσεως στον πυρήνα, τότε πρόκειται για ένα μη ελαστικό σκεδασμό.

Η απώλεια ενέργειας σ' έναν ελαστικό σκεδασμό είναι, σύμφωνα με την κλασική μηχανική, μεγαλύτερη όταν το σκεδαζόμενο σωματίδιο και ο σκεδαστής έχουν σχεδόν την ίδια μάζα. Γι' αυτό το λόγο τα νετρόνια χάνουν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς τους σκεδαζόμενα με ελαφρούς πυρήνες και ιδιαίτερα πυρήνες υδρογόνου. Γι' αυτό υλικά, που περιέχουν μεγάλη

ποσότητα υδρογόνου (π.χ. το νερό, η παραφίνη) θεωρούνται πολύ καλοί απορροφητές νετρονίων.