



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗΣ

Βιοϊατρική Τεχνολογία
9^ο Εξάμηνο
Μάθημα 2^ο

Διδάσκων: Καθηγητής Αλέξανδρος Ρήγας
Συνεπικουρία: Σπύρογλου Ιωάννης

Κεφάλαιο 1: Ακτίνες – Χ

- Ανακαλύφθηκαν από τον Roentgen το 1895.(Βραβείο Νόμπελ)
- Αποτελεί το πιο σπουδαίο και ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο στην κλινική Ιατρική για σχεδόν ένα αιώνα.
- Οι ακτίνες – Χ είναι μία μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως ακριβώς τα ραδιοκύματα ή το φως.
- Υπάρχουν όμως σημαντικές διαφορές.

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

- Ο πίνακας 1 περιγράφει το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Table 1
Electromagnetic wave spectrum

Energy (eV)	Frequency (Hz)		Wavelength (m)
4×10^{-11}	10^4	AM radio waves	10^4
4×10^{-10}	10^5		10^3
4×10^{-9}	10^6		10^2
4×10^{-8}	10^7	Short radio waves FM radio waves and TV	10^1
4×10^{-7}	10^8		10^0
4×10^{-6}	10^9	Microwaves and radar	10^{-1}
4×10^{-5}	10^{10}		10^{-2}
4×10^{-4}	10^{11}		10^{-3}
4×10^{-3}	10^{12}	Infrared light	10^{-4}
4×10^{-2}	10^{13}		10^{-5}
4×10^{-1}	10^{14}	Visible light	10^{-6}
4×10^0	10^{15}		10^{-7}
4×10^1	10^{16}	Ultraviolet light	10^{-8}
4×10^2	10^{17}		10^{-9}
4×10^3	10^{18}	X-ray	10^{-10}
4×10^4	10^{19}		10^{-11}
4×10^5	10^{20}		10^{-12}
4×10^6	10^{21}	Gamma ray	10^{-13}
4×10^7	10^{22}		10^{-14}
		Cosmic ray	

- Ακτίνες – Χ
 - Φως
 - Ραδιοκύματα
 - Μικροκύματα
 - κ.λ.π.
- Αποτελούν γνωστά
μέλη του φάσματος
ΗΜ ακτινοβολίας.

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

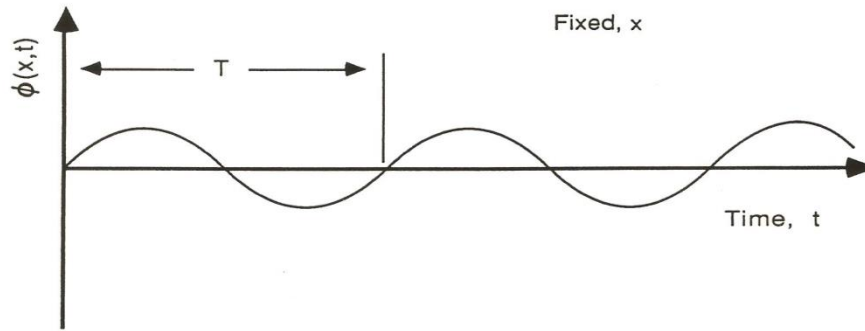
- Η ΗΜ ακτινοβολία μεταδίδεται σαν ένα κύμα που χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό παραμέτρων, όπως το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο, η διηλεκτρική σταθερά κ.λ.π
- Αν θεωρήσουμε μία επίπεδη μονοχρωματική ακτινοβολία, το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο είναι συναρτήσεις του χρόνου και του χώρου και μπορούν να παρασταθούν από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\varphi(x, t) = \varphi_0 \sin(\omega t - kx) \text{ (Σχήμα 1.1)}$$

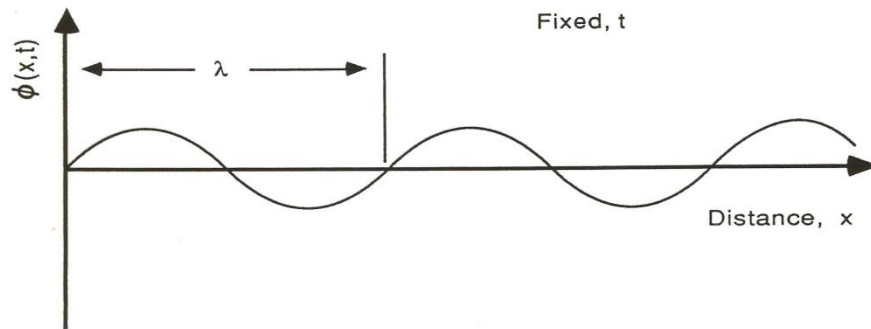
Όπου φ είναι το ηλεκτρικό πεδίο, x είναι η απόσταση που έχει διανύσει το κύμα, t είναι ο χρόνος και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα.

- Επίσης $\omega = 2\pi f$ όπου f είναι η συχνότητα και k είναι ο αριθμός του κύματος, ο οποίος δίνεται από το λόγο $2\pi/\lambda$ όπου λ το μήκος κύματος.

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία



(a)



(b)

Σχήμα 1.1. Ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό κύμα
α) σαν μια συνάρτηση του χρόνου για μια σταθερή τιμή της απόστασης
β) σαν μια συνάρτηση της απόστασης σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

- Το μήκος κύματος λ ορίζεται ως η απόσταση στην οποία συμβαίνει ένας κύκλος. Η περίοδος T είναι ο χρόνος που απαιτείται για να συμβεί ένας κύκλος.
- Οπότε ισχύει ότι $Tc = \lambda$, όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του ΗΜ κύματος.
- Στο κενό $c = 3 \times 10^8 m/sec$. Επειδή $f = \frac{1}{T}$, έχουμε:

$$f\lambda = c \quad (1.2)$$


1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

- Η σχέση (1.1) είναι μία λύση της εξίσωσης κύματος:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},$$

- Όπου $c = \left(\frac{1}{\mu\varepsilon}\right)^{1/2}$,
- μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου και είναι ίση με $1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ στον ελεύθερο χώρο
- ε είναι η διηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου και είναι ίση με $8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ στον ελεύθερο χώρο.
- Η γενική λύση της εξίσωσης κύματος είναι της μορφής $f\left(t \pm \frac{x}{c}\right)$.
- Η σχέση (1.1) είναι ειδική μορφή της λύσης της εξίσωσης κύματος.

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

- Η κύρια διαφορά μεταξύ ακτίνων – X και φωτός ή ραδιοκυμάτων εντοπίζεται στη συχνότητα τους ή στο μήκος κύματος.
- Διαγνωστικές ακτίνες – X  Μήκος κύματος: 100nm – 0.01nm (είναι πολύ μικρότερο)
- Σε αντίθεση με το φως ή τα ραδιοκύματα, η διάδοση της ακτινοβολίας των ακτίνων – X είναι δύσκολο να ερμηνευθεί την χειριζόμαστε μόνο ως κύμα. Άρα είναι αναγκαίο κάποιες φορές να θεωρήσουμε την ακτινοβολία των ακτίνων – X και με τις δύο μορφές:
 - ως κύμα και ως σωματίδια

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

- Κυματική Μορφή: Χρήσιμη στην επεξήγηση φαινομένων όπως η αντανάκλαση, η σκέδαση, η εκτροπή και η διάθλαση.
- Στη Σωματική μορφή η ακτινοβολία των ακτίνων – X θεωρείται ότι αποτελείται από σωματίδια που ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός και μεταφέρουν ενέργεια που δίνεται από την σχέση:

$$E = hf$$

Όπου h η σταθερά του Planck ($4.13 \times 10^{-15} eV \cdot sec$)

($1eV = 1.6 \times 10^{-19} Joules$)

- Αυτά τα σωματίδια ονομάζονται φωτόνια.
 - Ένα φωτόνιο που έχει μία ενέργεια μεγαλύτερη από λίγα eV είναι ικανή να προκαλέσει ιονισμό στα άτομα και τα μόρια και για το λόγο αυτό ονομάζεται ιονίζουσα ακτινοβολία.

- Παράδειγμα:

Θεωρούμε ένα φωτόνιο μιας ακτινοβολίας ακτίνων – X με $\lambda=1nm$. Η ενέργεια του φωτονίου είναι η εξής:

$$E = hf = 4.13 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8 / 10^{-9} = 1.2 \times 10^3 eV$$

- Άρα οι ακτίνες – X είναι μία ιονίζουσα ακτινοβολία.

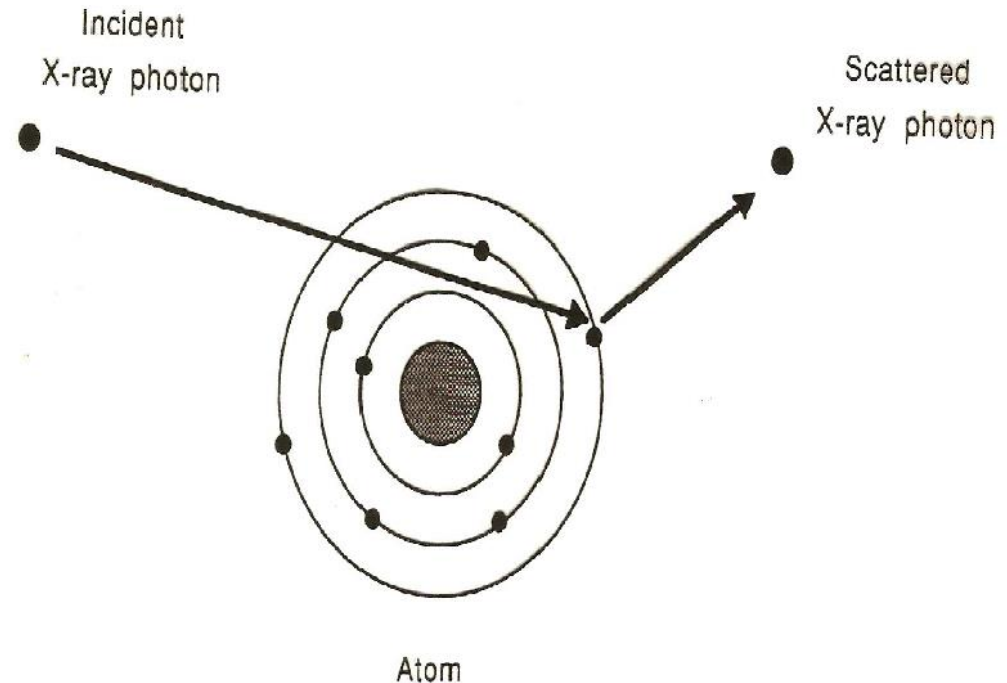
1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

- Οι ακτίνες – Χ μπορούν να αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια και τους πυρήνες των ατόμων.
- Οι διαγνωστικές ακτίνες – Χ (από 5-120 keV) αλληλεπιδρούν μόνο με ηλεκτρόνια λόγω χαμηλών επιπέδων ενέργειας.
- Υπάρχουν 5 τρόποι με τους οποίους τα φωτόνια των ακτίνων – Χ μπορούν να αλληλεπιδρούν με άτομα ή μόρια της ύλης:
 - Σκέδαση συμφωνίας (coherent scattering)
 - Φωτοηλεκτρική επίδραση (photoelectric effect)
 - Σκέδαση Compton (Compton Scattering)
 - Παραγωγή ζεύγους (pair production)
 - Φωτοδιάσπαση ή Φωτοαποσύνθεση (photodisintegration)

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

1) Σκέδαση Συμφωνίας:

Όταν ένα φωτόνιο συγκρούεται με ένα άλλο σωματίδιο, το φωτόνιο ανακλάται σε μία άλλη κατεύθυνση χάνοντας λίγη ενέργεια και επομένως υπάρχει αμελητέα μεταβολή στο μήκος κύματος. Αυτή η μορφή αλληλεπίδρασης ονομάζεται σκέδαση συμφωνίας.



Σκέδαση συμφωνίας ενός φωτονίου ακτίνων-Χ από ένα άτομο

Η σκέδαση συμφωνίας συμβαίνει σε ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας που δεν είναι αρκετά ισχυρή για να αποσπάσει τα ηλεκτρόνια από την τροχιά τους ή να προκαλέσει ιονισμό στα άτομα.

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

2) Φωτοηλεκτρική Επίδραση:

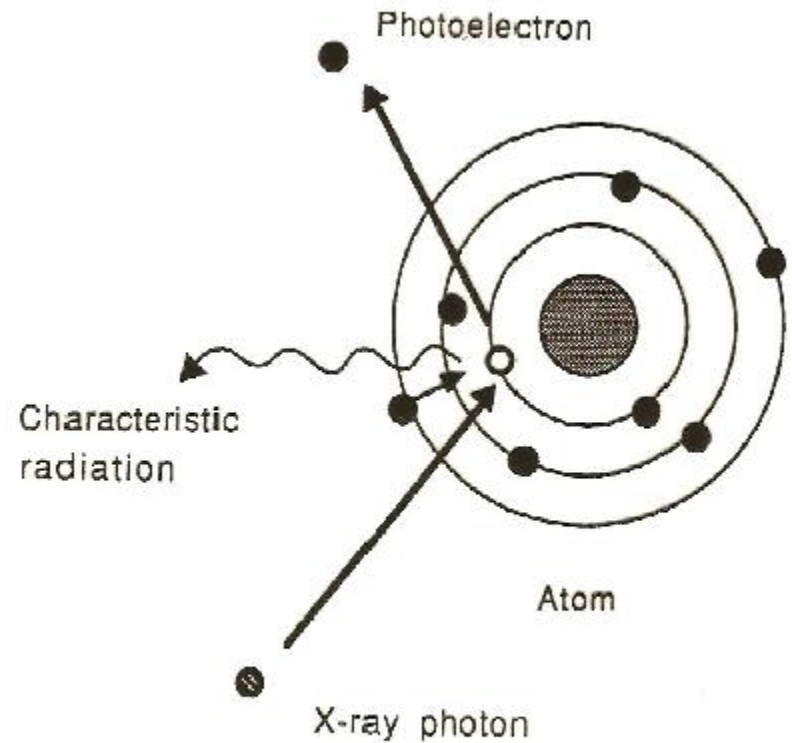
- Το άτομο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ενεργειακό πηγάδι όπου ο πυρήνας βρίσκεται στο βάθος του πηγαδιού σε σχέση με τα ηλεκτρόνια.
- Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται πιο κοντά στον πυρήνα απαιτούν μεγαλύτερη ενέργεια για να αποσπαστούν από τις τροχιές τους και να γίνουν ελεύθερα. Το αντίθετο συμβαίνει για αυτά που βρίσκονται μακκρύτερα από τον πυρήνα.
- Το βάθος της ενέργειας του πηγαδιού καθορίζεται από τον ατομικό αριθμό.

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Υλης

- Παράδειγμα Ιωδίου:
- Ατομικός αριθμός = 53.
- Τα ηλεκτρόνια των στοιβάδων Κ,Λ,Μ έχουν επίπεδα ενέργειας σύνδεσης -33.2, -4.3, -0.6 keV αντίστοιχα.
- Έτσι, για ένα ηλεκτρόνιο στην Κ χρειάζεται ενέργεια 33.2 keV για να αποσπαστεί από τον πύρήνα.
- Το Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

- Ένα προσπίπτον φωτόνιο ακτίνων – Χ που μεταφέρει ενέργεια ελαφρώς μεγαλύτερη από την ενέργειά σύνδεσης ενός ηλεκτρονίου της στοιβάδας K, συγκρούεται με ένα από αυτά τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε τροχιές και το αποσπά από την τροχιά του.
- Το φωτόνιο λέγεται ότι απορροφάται, παραδίδοντας όλη την ενέργειά του. Η μεγαλύτερη ποσότητα από την ενέργεια του φωτονίου χρειάζεται για να υπερνικήσει την ενέργεια σύνδεσης και η υπόλοιπη δίνει στο ηλεκτρόνιο που αποσπάται κινητική ενέργεια. Αυτό το ηλεκτρόνιο ονομάζεται **φωτοηλεκτρόνιο**.
- Το κενό τώρα στην τροχιά θα συμπληρωθεί από ένα ηλεκτρόνιο από τις εξωτερικές στοιβάδες. Άρα το άτομο γίνεται ένα ιόν θετικά φορτισμένο.



φωτοηλεκτρική επίδραση

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

- Μετά τον ιονισμό, μία χαρακτηριστική ακτινοβολία στην μορφή ενός φωτονίου ακτίνων – Χ θα εκπεμφθεί μεταφέροντας μία ενέργεια ίση με τη διαφορά σε ενέργεια μεταξύ του ηλεκτρονίου της εξωτερικής στοιβάδας και του ηλεκτρονίου της Κ στοιβάδας.
- Η πιθανότητα για τη χαρακτηριστική ακτινοβολία είναι μία συνάρτηση του ατομικού αριθμού του ατόμου.
- Επομένως η φωτοηλεκτρική επίδραση πάντοτε επιφέρει 3 πράγματα:
 - Χαρακτηριστική ακτινοβολία
 - Ένα αρνητικό ιόν (φωτοηλεκτρόνιο)
 - Ένα θετικό ιόν
- Για το ιώδιο η χαρακτηριστική ακτινοβολία μπορεί να συμβεί σε 32.6 ή 28.9 keV αν ένα ηλεκτρόνιο της Κ αποσπαστεί από την τροχιά και επιπλέον εξαρτάται από το εάν ένα ηλεκτρόνιο από την Μ ή L καλύπτει το κενό.

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

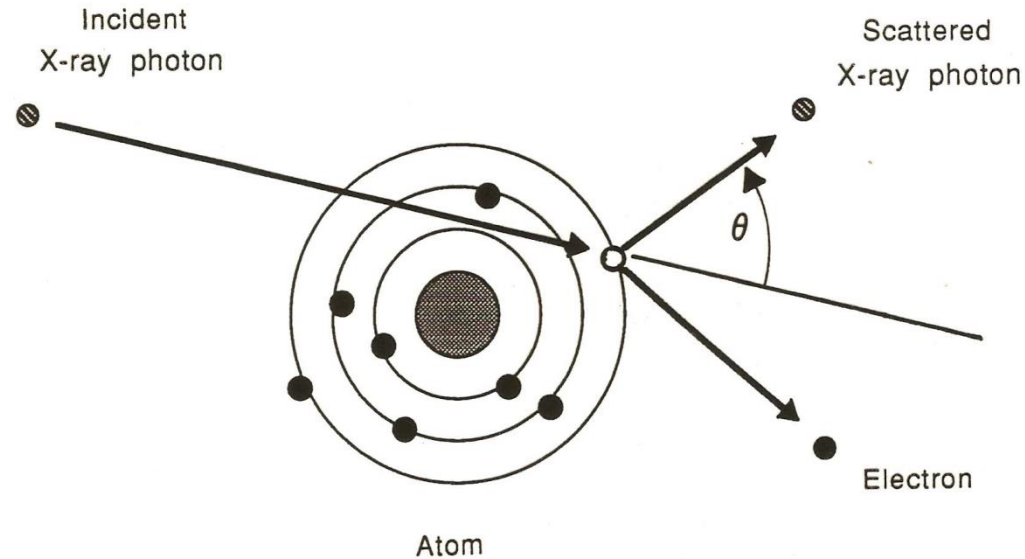
- Συμπεράσματα για Φωτοηλεκτρική επίδραση:
 - Είναι η πλέον επιθυμητή αλληλεπίδραση στην απεικόνιση των ακτίνων – Χ επειδή το φωτόνιο των ακτίνων – Χ απορροφάται πλήρως παράγοντας μικρή ακτινοβολία σκέδασης.
 - Αυτή η ακτινοβολία δεν είναι επιβλαβής στο προσωπικό που χρησιμοποιεί τον εξοπλισμό και αποτελεί μία μορφή θορύβου στην απεικόνιση που υποβαθμίζει την ποιότητα της εικόνας.

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

3) Σκέδαση Compton:

- Η ακτινοβολία σκέδασης που αντιμετωπίζεται σε μία εξέταση ακτίνων – Χ προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από τη σκέδαση Compton.
- Η ακτινοβολία Compton είναι διαφορετική από τη φωτοηλεκτρική επίδραση στο γεγονός ότι μόνο μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται από το φωτόνιο μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο. Δηλαδή, το φωτόνιο υφίσταται σκέδαση από το ηλεκτρόνιο σε μία άλλη κατεύθυνση με μία ελάττωση στην ενέργεια ή μία αύξηση στο μήκος κύματος.

Η σκέδαση Compton περιγράφεται στο διπλανό σχήμα



Σκέδαση Compton ενός φωτονίου ακτίνων-Χ από ένα άτομο

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

- Το φωτόνιο συγκρούεται με ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στοιβάδας και το αποσπά από την τροχιά του.
- Το φωτόνιο ανακλάται από το ηλεκτρόνιο σε μία άλλη κατεύθυνση, διατηρώντας μέρος από την ενέργεια του.
- Η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να διατηρηθεί από το φωτόνιο που υφίσταται σκέδαση εξαρτάται από δύο παράγοντες:
 - Την αρχική ενέργεια του φωτονίου σε σχέση με την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου που βρίσκεται σε τροχιά
 - Τη γωνία σκέδασης θ σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$E' = \frac{E}{1 + \left(\frac{E}{m_e c^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

όπου E , E' και m_e είναι αντίστοιχα η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου, η ενέργεια του φωτονίου που υφίσταται σκέδαση, και η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (ισοδύναμη με 511keV της ενέργειας).

- Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι σχετικά χαμηλή, η ενέργεια που μεταφέρεται από το φωτόνιο που υφίσταται σκέδαση είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη γωνία.
- Καθώς η ενέργεια αυξάνει, τα φωτόνια υφίστανται σε μικρότερες γωνίες ή μεταφέρουν μεγαλύτερη ενέργεια στην κατεύθυνση προς τα εμπρός.

1.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτίνων – Χ και Ύλης

- Προβλήματα Σκέδασης Compton στην ακτινογραφία με ακτίνες – Χ:
 - Πρώτον παράγει το θόρυβο υπόβαθρου στο φιλμ
 - Δεύτερον, αποτελεί παράγοντα επικινδυνότητας για το προσωπικό που χρησιμοποιεί τον εξοπλισμό επειδή τα φωτόνια που υφίστανται σκέδαση περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας και μπορούν να ξεφύγουν από τον ασθενή

Σύνοψη

- Τρεις διαφορετικές αλληλεπιδράσεις μπορούν να συμβούν καθώς ένα φωτόνιο διαγνωστικών ακτίνων – Χ αντιμετωπίζει ένα άτομο.
- Ποια αλληλεπίδραση θα συμβεί εξαρτάται από την ενέργεια του φωτονίου και τις ενέργειες σύνδεσης των ηλεκτρονίων.
- Η φωτοηλεκτρική επίδραση είναι πολύ πιθανό να συμβεί όταν η ενέργεια του φωτονίου ταιριάζει με τις ενέργειες του ατόμου.