

Τεχνικές βασισμένες στις ακτίνες-Χ

Η παραγωγή και η φύση των ακτίνων-Χ

Οι ακτίνες-Χ καλύπτουν ένα ορισμένο εύρος εντός του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πιο συγκεκριμένα για τους σκοπούς της διαγνωστικής απεικόνισης, το χρήσιμο μήκος κύματος κυμαίνεται μεταξύ των 0,06 και 0,006 nm. Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με το ορατό φως, οι ακτίνες-Χ δεν μπορούν να εκτραπούν από φακούς ή αντίστοιχες διατάξεις και, ως εκ τούτου, η περιθλαση και η κυματική οπτική είναι δυνατόν να αγνοηθούν. Επομένως, οι ακτίνες-Χ μπορούν να θεωρηθούν ως μια γραμμικά διαδιδόμενη ροή αδιάσπαστων κβάντων ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια. Κατά συνέπεια, οι ακτίνες-Χ χαρακτηρίζονται από τις ενέργειες των φωτονίων και όχι από το μήκος κύματός τους ή τη συχνότητα των κυμάτων. Επιπροσθέτως, λόγω του ότι οι ακτίνες-Χ παράγονται από μετατροπή ενέργειας επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων εντός ηλεκτρικού πεδίου της τάξης των κιλοβόλτ (kV), η καταλληλότερη μονάδα μέτρησης της ενέργειας των φωτονίων είναι το κιλοηλεκτρονιοβόλτ (keV) με εύρος από 20–200 keV (Εικόνα 1).

Η λυχνία ακτίνων-Χ

Στη διαγνωστική απεικόνιση, η πηγή των ακτίνων X είναι η ακτινολογική λυχνία (Εικόνα 2) εντός της οποίας μια στενή

Η ταχύτητα διάδοσης (c) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σταθερή (στο κενό): $3 \times 10^{17} \text{ nm} \times \text{sec}^{-1}$, και σχετίζεται με το μήκος κύματος (λ) και τη συχνότητα του (v) σύμφωνα με τη σχέση:

$$c = \lambda \times v.$$

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται ως διακριτά κβάντα ενέργειας (φωτόνια). Η ενέργεια (E) του φωτονίου σχετίζεται με τη συχνότητά του (v) σύμφωνα με τη σχέση: $E = h \times c = \frac{h \times c}{\lambda}$, όπου h είναι η σταθερά του Planck. Εάν η ενέργεια εκφράζεται σε keV και το μήκος κύματος (λ) σε νανόμετρα, η σχέση γίνεται: $E = \frac{1,24}{\lambda}$. Ένα ηλεκτρονιοβόλτ (eV) είναι το ποσό της κινητικής ενέργειας που αποκτάται από ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο όταν αυτό επιταχύνεται εντός διαφοράς δυναμικού ενός βολτ στο κενό. $1.000 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$.

Δέσμη ηλεκτρονίων, εκπεμπόμενη από ένα ηλεκτρικά θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου (κάθοδος), επιταχύνεται στο κενό και εστιάζεται ηλεκτροστατικά, προκειμένου να προσπέσει ακολούθως στον στόχο της ανόδου, και στη συνέχεια να εκπεμφθεί ένα μικρό ποσοστό (0,2-2%) από την προσπίπτουσα ενέργεια των ηλεκτρονίων ως ακτίνες-Χ. Η εναπομένουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω στην άνοδο, η οποία διαθέτει υψηλή θερμοχωρητικότητα και κατασκευάζεται συνήθως από κράμα βολφραμίου. Επιπροσθέτως, η άνοδος έχει σχήμα δίσκου ο οποίος και περιστρέφεται με σκοπό την κατανομή του θερμικού φορτίου σε ακόμα μεγαλύτερη επιφάνεια.

Η ενέργεια των ακτίνων-X ελέγχεται πρωτίστως από την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου, την τάση επιτάχυνσης. Η υψηλή αυτή τάση παράγεται μέσω ανόρθωσης και μετασχηματισμού υψηλής τάσης του κοινού εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) καθώς και αλλαγής της συχνότητάς του από τα 50–60 Hz στα 50.000 Hz AC. Παρ' όλα αυτά, η εξομάλυνση δεν είναι πλήρης και, ως εκ τούτου, η υψηλή τάση

εμφανίζει διακυμάνσεις. Ο παράγοντας διακύμανσης (ripple) αποδίδεται ως η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής εκφρασμένη ως ποσοστό της μέγιστης τιμής τάσης, και ανέρχεται σε 5–10% στις περισσότερες γεννήτριες υψηλής τάσης. Η επιλογή υψηλής τάσης σε μια μονάδα ακτίνων-X συνήθως αναφέρεται στη μέγιστη τιμή τάσης και εκφράζεται σε kVp ούτως ώστε να υποδεικνύεται η προαναφερθείσα διακύμανση.

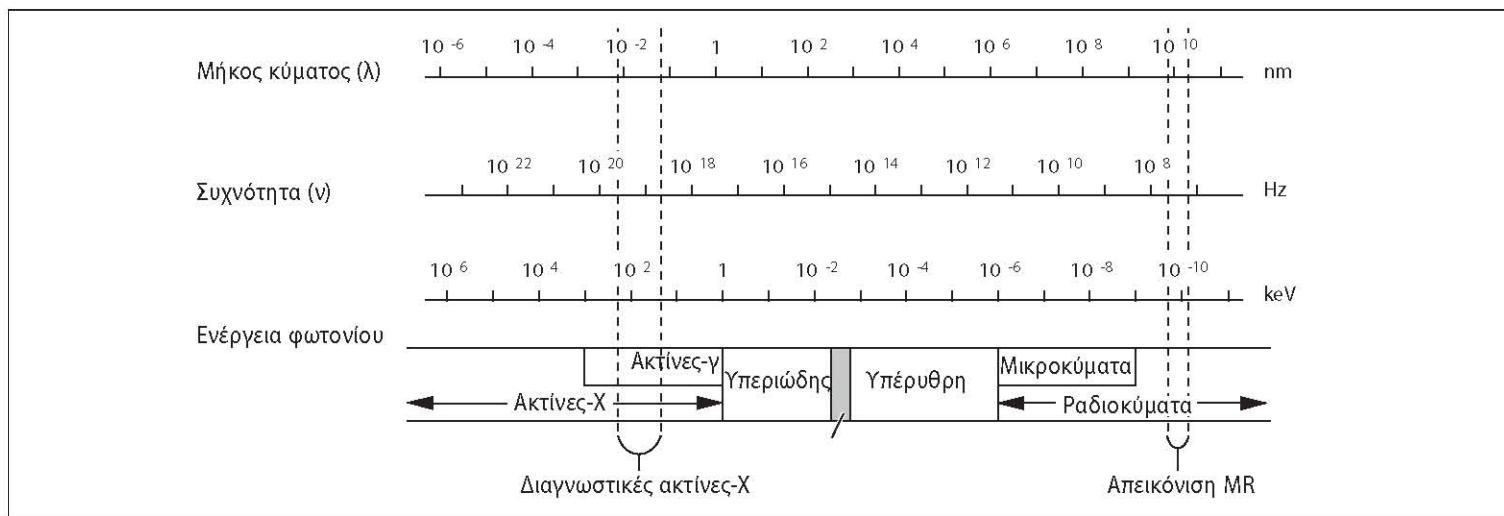
Η ένταση των ακτίνων-X για συγκεκριμένη τιμή τάσης καθορίζεται από τον αριθμό των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων στην άνοδο, δηλαδή του ρεύματος που μεταφέρεται από τα ηλεκτρόνια διαμέσου του κενού από την άνοδο στην κάθοδο, το ρεύμα λυχνίας δηλαδή το οποίο εκφράζεται σε milliamperes (mA). Για τάση επιτάχυνσης πάνω από 40 kV (τάση κορεσμού), το ρεύμα της λυχνίας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία του νήματος της καθόδου, η οποία με τη σειρά της ρυθμίζεται από ένα άλλο ρεύμα (το ρεύμα του νήματος) το οποίο διαρρέει το νήμα της λυχνίας.

Η ποσότητα των παραγόμενων ακτίνων-X είναι ανάλογη του χρόνου ροής των ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο και εκφράζεται σε milliamperes × seconds (mAs).

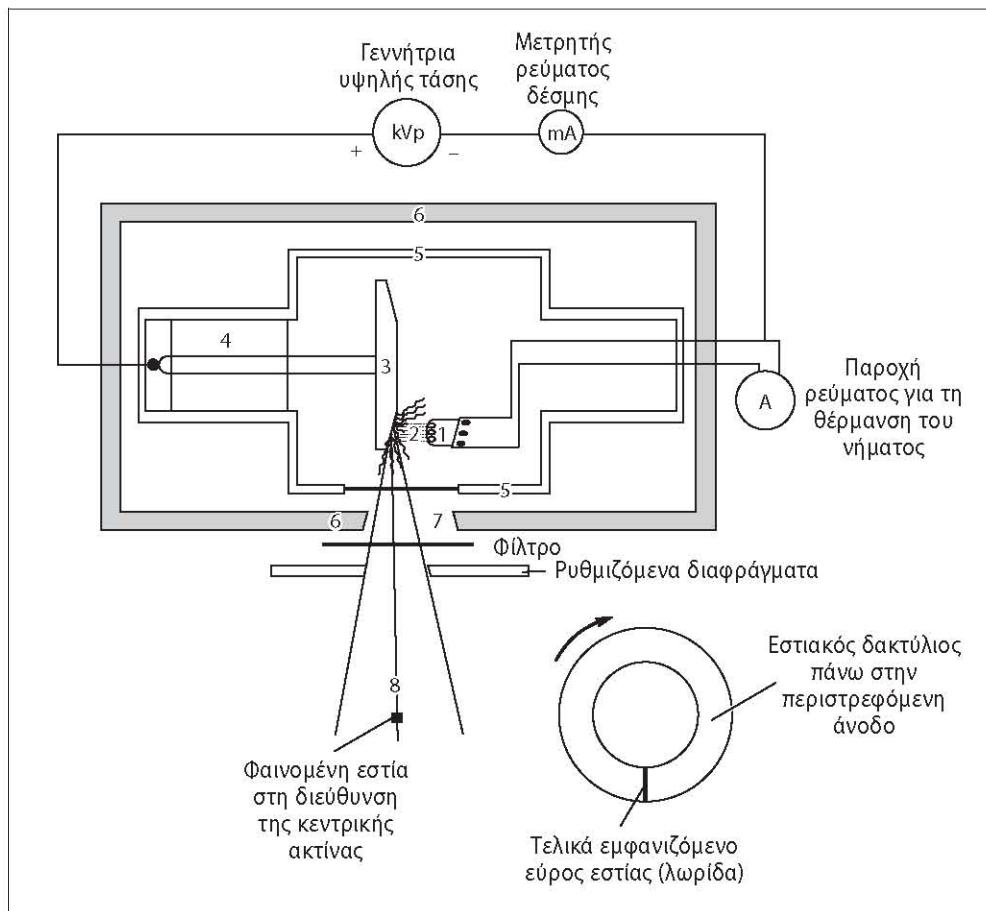
Τα εκπεμπόμενα από την άνοδο φωτόνια κατανέμονται με μεταβλητή ένταση επί ενός φάσματος που έχει μέγιστη τιμή προσδιοριζόμενη από την τάση επιτάχυνσης. Επομένως, η δέσμη των ακτίνων-X είναι πολυχρωματική. Δηλαδή, ακόμα και αν η τάση επιτάχυνσης είναι σταθερή (χωρίς διακυμάνσεις), η δέσμη των ακτίνων-X εξακολουθεί να είναι πολυχρωματική λόγω της παραγωγής ακτινοβολίας πέδησης (*bremssstrahlung*). Η ακτινοβολία αυτή είναι αποτέλεσμα της επιβράδυνσης των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τα ηλεκτρικά πεδία των ατόμων του υλικού της ανόδου.

Φωτόνια με ενέργειες μικρότερες των 20 keV δεν συμβάλλουν στις περισσότερες ακτινολογικές εξετάσεις επειδή δεν διαπερνούν το εξεταζόμενο μέρος του σώματος. Επιπροσθέτως, τα φωτόνια αυτά είναι και επιζήμια επειδή η ενέργειά τους απορροφάται επιφανειακά από τον ακτινοβολούμενο ιστό και ειδικά το δέρμα. Η εξουδετέρωση των φωτονίων χαμηλής ενέργειας επιτυγχάνεται με την παρεμβολή φίλτρων αλουμινίου ή χαλκού στη δέσμη (Εικόνα 3). Η παρεμβολή των εν λόγω φίλτρων αυξάνει τη μέση ενέργεια των φωτονίων, με αποτέλεσμα τη σκλήρυνση της δέσμης. Στη μαστογραφία αξιοποιούνται τα χαμηλότερης ενέργειας φωτόνια της διαγνωστικής απεικόνισης, περίπου 25-30 keV, για την ανίχνευση πολύ μικρών διαφορών στην απορρόφηση ακτίνων-X μεταξύ

Η λυχνία ακτίνων-X περιβάλλεται από ένα θωρακισμένο μολύβδινο περιβλήμα, επιτρέποντας τη διέλευση των ακτίνων-X μέσω ενός παραθύρου. Το σχήμα και το μέγεθος του παραθύρου καλείται *άνοιγμα (aperture)* και μπορεί να μεταβάλλεται μέσω ρυθμιζόμενων διαφραγμάτων (Εικόνα 2). Οι ακτίνες-X εξέρχονται από τη λυχνία ως μια αποκλίνουσα δέσμη προερχόμενη από την περιοχή όπου η δέσμη των ηλεκτρονίων προσέκρουσε στην άνοδο, την εστία, και περιορίζονται από το άνοιγμα εξόδου της λυχνίας. Ο άξονας της δέσμης καλείται *κεντρική ακτίνα*, και η προβολή της εστίας στη διεύθυνση της κεντρικής ακτίνας καλείται *ενεργός εστιακή κηλίδα ή φαινομένη εστία (effective focal spot)*. Όσο μικρότερες οι διαστάσεις της εστίας, τόσο καλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα της ακτινογραφικής εικόνας. Το σύνηθες εμβαδόν της είναι 1 mm^2 ή και μικρότερο, ενώ στη μαστογραφία είναι $0,1 \text{ mm}^2$ ώστε να μπορούν να ανιχνεύονται μικροσκοπικές εναποθέσεις ασβεστίου που συχνά εμπεριέχονται σε κακοήθεις όγκους του μαστού.



Εικόνα 1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, για δεδομένο μήκος κύματος, συχνότητα και ενέργεια φωτονίων.



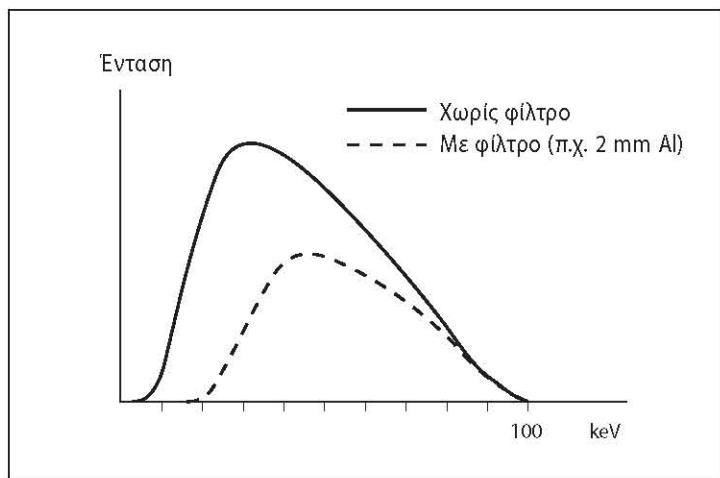
Η δέσμη των ακτίνων-Χ πρέπει πάντα να περιορίζεται από τα διαφράγματα βάθους, γνωστά και ως κατευθυντήρες (collimators), ώστε να ακτινοβολείται μόνο η απαιτούμενη για διαγνωστικούς σκοπούς ανατομική περιοχή και να ελαχιστοποιείται κατά αυτόν τον τρόπο η ακτινολογική έκθεση. Η προσαρμογή αυτή καλείται ευθυγράμμιση (collimation).

Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη

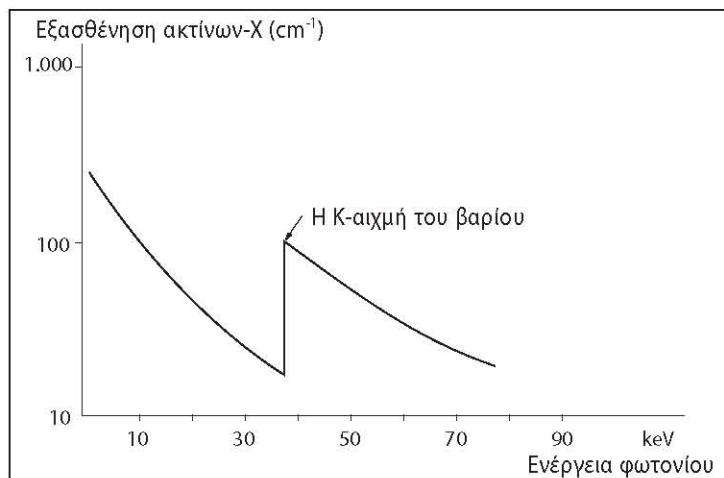
Στις χρησιμοποιούμενες από τη διαγνωστική απεικόνιση ενέργειες διακρίνονται τρεις μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη: η ελαστική σκέδαση, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η ανελαστική (Compton) σκέδαση.

Ελαστική σκέδαση είναι εκείνη η αλληλεπίδραση όπου τα φωτόνια υφίστανται αλλαγή διεύθυνσης χωρίς απώλεια ενέργειας. Το είδος αυτής της σκέδασης συναντάται σε όλες τις ενέργειες που χρησιμοποιούνται στην ακτινοδιαγνωστική αλλά καταλαμβάνει ένα μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής σκέδασης.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Εικόνα 4) είναι εκείνη η αλληλεπίδραση όπου το προσπίπτον φωτόνιο αποδίδει όλη του την ενέργεια σε ένα άτομο της ύλης, το οποίο με τη σειρά του απελευθερώνει την προσλαμβάνουσα ενέργεια με τη μορφή ενός ηλεκτρονίου, το φωτοηλεκτρόνιο, το οποίο εξέρχεται από εσωτερική στιβάδα του άτομου με υψηλή ταχύτητα. Η κενή θέση του φωτοηλεκτρονίου καταλαμβάνεται από ένα ηλεκτρόνιο εξωτερικής στιβάδας εκπέμποντας ένα νέο φωτόνιο ακτίνων-Χ σε τυχαία

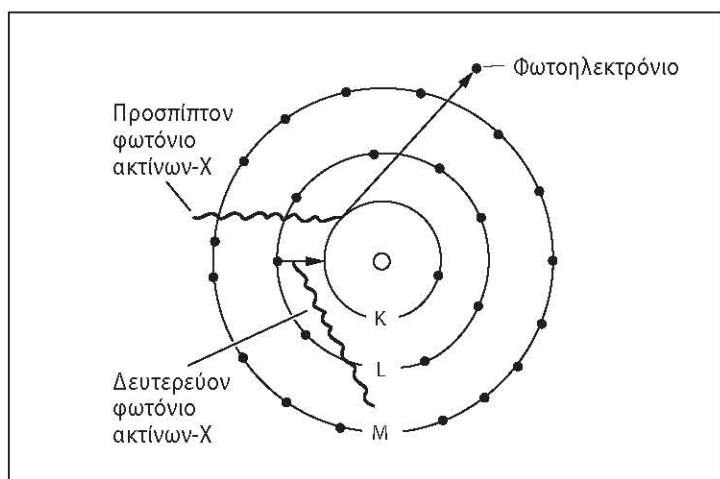


Εικόνα 3 Η επίδραση του φίλτρου στην κατανομή των φωτονιακών ενέργειών σε μια δέσμη ακτίνων-Χ παραγόμενη από τάση 100 kVp. Ακόμη και χωρίς φίλτρο η δέσμη «φιλτράρεται» κατά το πέρασμά της από το τοίχωμα της λυχνίας ακτίνων-Χ οπότε και απορρίπτονται οι χαμηλότερες ενέργειες. Επιπρόσθιο φίλτρο μειώνει τη συνολική ένταση της δέσμης αλλά αυξάνει τη μέση ενέργεια των φωτονίων.



Εικόνα 5 Το φαινόμενο της Κ-αιχμής.

Η απορρόφηση των ακτίνων-Χ αυξάνεται απότομα όταν, για δεδομένο στοιχείο, η ενέργεια των φωτονίων είναι ίση με την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων της Κ-στιβάδας του συγκεκριμένου στοιχείου.



Εικόνα 4 Η φωτοηλεκτρική αλληλεπίδραση.

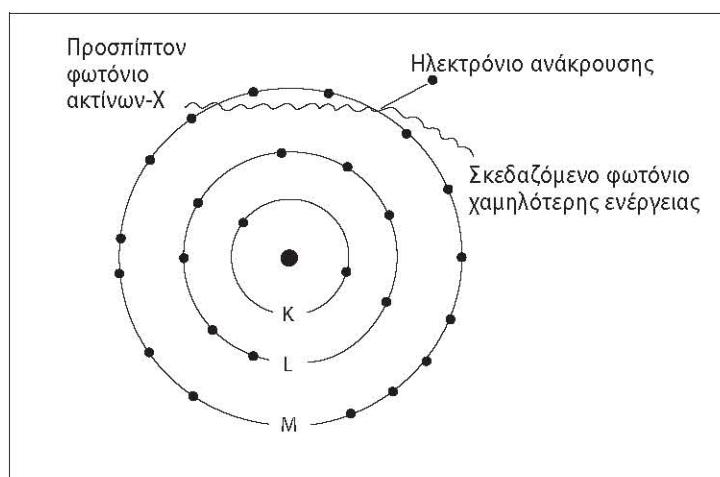
διεύθυνση και με ενέργεια χαρακτηριστική για το συγκεκριμένο στοιχείο. Το δευτερεύον φωτόνιο είναι χαμηλότερης ενέργειας από το προσπίπτον, εμφανίζεται ως δευτερεύοντα ακτινοβολία και απορροφάται κυρίως από νέες αλληλεπιδράσεις. Το άτομο παραπέμπει ιονισμένο, ενώ το απελευθερωμένο ηλεκτρόνιο συγκρούεται με άλλα άτομα και προκαλεί ένα μεγάλο αριθμό από δευτερογενείς ιονισμούς. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο λαμβάνει χώρα όταν η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου εσωτερικής στιβάδας. Πιο συγκεκριμένα, εντός του ακτινοδιαγνωστικά σχετιζόμενου εύρους ενέργειών, μόνο τα δύο ηλεκτρόνια της εσωτερικής Κ-στιβάδας έχουν ενέργεια σύνδεσης επαρκώς υψηλή ώστε να δεσμεύσουν τις φωτοηλεκτρικές αντιδράσεις. Η ενέργεια του φωτονίου που είναι μόλις επαρκής ώστε να απελευθερωθεί ένα φωτοηλεκτρόνιο από την Κ-στιβάδα συμβολίζεται ως Κ-αιχμή επειδή η εξασθένηση των ακτίνων-Χ αυξάνεται απότομα στο συγκεκριμένο ενέργειακό επίπεδο (Εικόνα 5). Οι Κ-αιχμές έχουν χαρακτηριστική τιμή για κάθε διαφορετικό στοιχείο (Πίνακας 1). Λόγω της σύστασης των μαλακών ιστών από ελαφρά στοιχεία (C, N, O), η φωτοηλεκτρική απορρόφηση γίνεται ποσοτικά ασήμαντη για ενέργειες πάνω από τα 35 keV. Όμως, επειδή η ενέργεια σύν-

Πίνακας 1

Στοιχείο	Κ-αιχμή (keV)
Άνθρακας	0,3
Άζωτο	0,4
Οξυγόνο	0,5
Φώσφορος	2,1
Ασβέστιο	4,0
Ιώδιο	33,2
Βάριο	37,4
Μόλυβδος	88,1
Σίδηρος	7,1

δεσης των ηλεκτρονίων της Κ-στιβάδας είναι υψηλότερη σε βαρύτερα στοιχεία (όπως το ασβέστιο), το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παραπέμπει ποσοτικά σημαντικό κατά την απεικόνιση οστών με ενέργειες έως τα 50 keV. Το βάριο και το ιώδιο έχουν την Κ-αιχμή στην ενέργεια των 37 keV και 33 keV, αντίστοιχα, και είναι αυτές οι υψηλές Κ-αιχμές που αξιοποιούνται όταν το βάριο και το ιώδιο χρησιμοποιούνται ως σκιαγραφικά μέσα.

Η ανελαστική (Compton) σκέδαση (Εικόνα 6) είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των προσπιπτόντων φωτονίων με τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας του ατόμου τα οποία και αποβάλλονται (ηλεκτρόνια ανάκρουσης) ενώ το άτομο ιονίζεται. Κατά την ανελαστική σκέδαση, το προσπίπτον φωτόνιο, μετά τη μεταφορά μέρους της ενέργειάς του στο ηλεκτρόνιο, συνεχίζει την πορεία του με ελαττωμένη ενέργεια και αλλαγή διεύθυνσης. Κάθε φωτόνιο μπορεί να συμμετέχει σε αρκετές τέτοιες διαδικασίες ανελαστικής σκέδασης κατά τη διαδρομή του εντός του ακτινοβολούμενου ιστού μέχρι τελικά να αποδώσει όλη του την ενέργεια και να απορροφηθεί από αυτόν. Η ανελαστική σκέδαση είναι το κυριαρχο φαινόμενο σκέδασης στην ακτινοδιαγνωστική. Εξαρτάται πρωτίστως από τον αριθμό των ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου ιστού και σχετίζεται σχεδόν γραμμικά με την πυκνότητα μάζας των ιστών. Είναι ανεξάρτητο του ατομικού αριθμού, γ' αυτό και η αντίθεση μεταξύ οστών και μαλακού ιστού ελαττώνεται σε υψηλότερες ενέργειες, όπου και εκλείπει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.



Εικόνα 6 Ανελαστική (Compton) σκέδαση.

Τόσο το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο όσο και η ανελαστική σκέδαση έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ηλεκτρονίων από το άτομο. Αυτό μπορεί να προκαλέσει τη διάσπαση χημικών δεσμών, και επειδή τα ιονισμένα άτομα (και ιδιαιτέρως του C, N και O) γίνονται εξαιρετικά δραστικά από χημική άποψη δημιουργούνται και νέοι εχθρικοί ως προς τον ιστό χημικοί δεσμοί. Αυτή η ικανότητα των ακτίνων-Χ να προκαλούν ιονισμούς τις κατατάσσει στην οικογένεια των ιονιζουσών ακτινοβολιών, και είναι αυτοί οι ιονισμοί και οι οφειλόμενες σε αυτούς χημικές αντιδράσεις που προκαλούν τη βιολογική φθορά κατά την ακτινοβόληση.

Η διαφορική ικανότητα των διαφόρων ιστών να σκεδάζουν και να απορροφούν τα φωτόνια των ακτίνων-Χ, ανεξαρτήτως του μηχανισμού αλληλεπίδρασης, δίνεται μέσω του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης (cm^{-1}) ο οποίος εκφράζει την κλασματική ελάττωση της έντασης της δέσμης κατά μήκος της γραμμικής πορείας της και μετά τη διέλευσή της από ένα εκατοστό ιστού. Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για δεδομένο ιστό εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων των ακτίνων-Χ, και είναι υψηλός για τις χαμηλές ενέργειες εφόσον εκεί επικρατεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και σταθεροποιείται στις υψη-

Μονάδες μέτρησης απορροφούμενης δόσης και βιολογικών αποτελεσμάτων ιοντίζουσας ακτινοβολίας

Η ποσότητα της απορροφούμενης ενέργειας από έναν ιστό εκφράζεται σε μονάδες (Gy), και ισούται με την απορρόφηση $1 \text{ joule} \times \text{kg}^{-1}$. Η παλαιότερη μονάδα μέτρησης για την απορροφούμενη δόση ήταν το rad, το οποίο σχετίζεται με το Gy μέσω της σχέσης $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

Η μονάδα μέτρησης των βιολογικών αποτελεσμάτων (φθοράς) της ιοντίζουσας ακτινοβολίας (η ισοδύναμη δόση) είναι το sievert (Sv) και ισούται με την απορροφούμενη δόση πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή βαρύτητας που εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής βαρύτητας για τις διαγνωστικές ακτίνες-Χ και για τα ισότοπα που εκπέμπουν ακτίνες-γ είναι περίπου 1, ενώ είναι 10-20 για την ακτινοβολία α και 1-2 για την ακτινοβολία β, εξαρτώμενος από την ενέργεια. Παρόλο που οι ακτινοβολίες α και β διαπερνούν ελάχιστα τον ιστό, μπορούν να επιφέρουν σοβαρή φθορά εφόσον εκπέμπονται από ισότοπα που είναι παρόντα μέσα στο σώμα και έχουν αυξημένη συγκέντρωση σε δεδομένο ιστό, όπως για παράδειγμα ο μυελός των οστών. Η παλαιότερη μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης ήταν το rem, το οποίο σχετίζεται με το sievert μέσω της σχέσης: $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

λότερες ενέργειες όπου κυριαρχεί η σκέδαση Compton, και ως εκ τούτου η πυκνότητα μάζας και όχι η ατομική σύσταση του ιστού καθίσταται σε αυτή την περίπτωση ο πρώτος καθοριστικός παράγοντας της εξασθένησης (Εικόνες 7 και 8).

Συμβατική απεικόνιση με ακτίνες-Χ

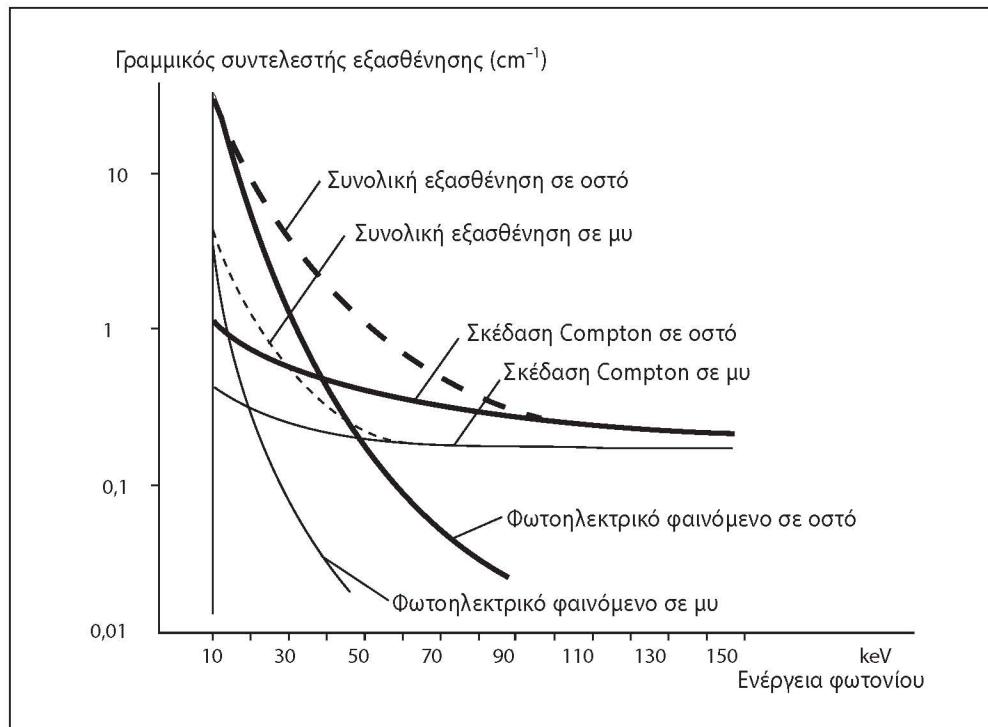
Η βασική διάταξη για τη συμβατική (κλασική) απεικόνιση είναι σχετικά απλή και παρουσιάζεται στην Εικόνα 9, όπου η εστία της λυχνίας θεωρείται ότι δρα ως σημειακή πηγή ακτίνων-Χ. Το εξεταζόμενο μέρος του σώματος αποτελείται από δομικά στοιχεία με διαφορετική αδιαφάνεια ως προς τις ακτίνες-Χ (συντελεστές εξασθένησης), και η εικόνα αποδίδει τη δισδιάστατη προβολή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου («όπως η σκιά μιας φιγούρας») ακολουθώντας τον απλό γεωμετρικό κανόνα της κεντρικής προβολής. Έτσι, η απεικόνιση των ακτίνων-Χ διαφέρει από την οπτική απεικόνιση η οποία υποδηλώνει ένα διακριτό εστιακό επίπεδο εντός του αντικειμένου καθώς και το διακριτό επίπεδο απεικόνισης αυτού.

Η δέσμη των φιλτραρισμένων ακτίνων-Χ που εξέρχονται από μια σωστά ρυθμισμένη λυχνία έχει περίπου την ίδια ένταση σε όλη τη διατομή της. Η ομοιόμορφη αυτή ένταση ελαττώνεται στη συνέχεια σύμφωνα με τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης από τη σημειακή πηγή. Ακολούθως, η δέσμη αυτή, εισερχόμενη στο σώμα του εξεταζόμενου, εξασθενεί και σύμφωνα με το πάχος και τη χημική σύσταση των δομών του αντικειμένου από το οποίο διέρχεται, λόγω της σκέδασης και της απορρόφησης κατά μήκος διαφορετικών γραμμικών διαδρομών εντός του εξεταζόμενου. Επομένως, η εξερχόμενη δέσμη ακτίνων-Χ δεν έχει την ίδια ένταση σε όλη τη διατομή της. Αυτή ακριβώς η μεταβολή της έντασης της δέσμης εντός μιας διατομής της απαρτίζει το σύνολο της πληροφορίας από τη μεταφερόμενη εικόνα που θα καταγραφεί στη συνέχεια πάνω σε ένα φωτογραφικό φίλμ, φθορίζουσα οθόνη ή ψηφιακό σύστημα καταγραφής εικόνας.

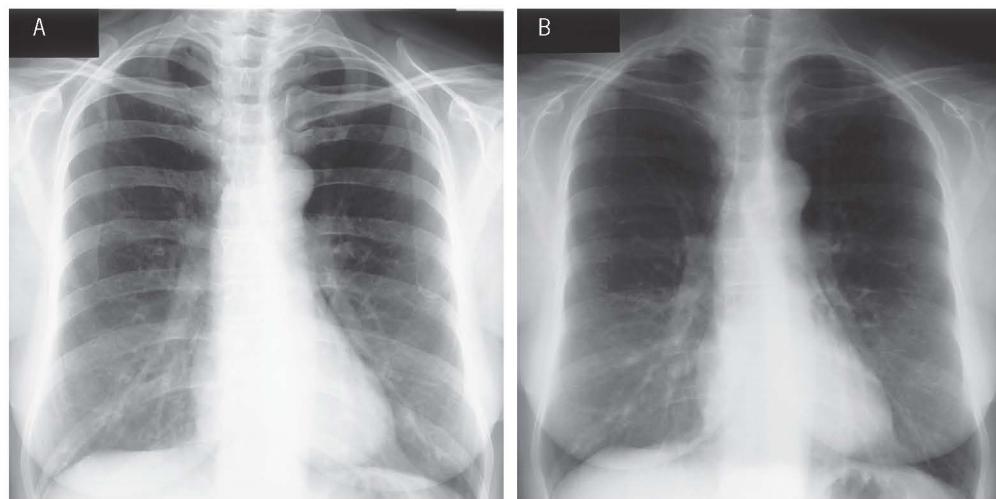
Γεωμετρία απεικόνισης

Σύμφωνα με την αρχή της κεντρικής προβολής η εικόνα είναι πάντα μεγεθυσμένη. Η μεγέθυνση αυξάνεται όταν αυξάνεται η απόσταση αντικειμένου-φίλμ (object-to-film distance, OFD) και ελαττώνεται όταν αυξάνεται η απόσταση εστίας-αντικειμένου (focus-to-object distance, FOD) (Εικόνα 9). Αυτό υποδηλώνει ότι σχετικές διαστατικές παραμορφώσεις είναι ενδογενείς στην εικόνα εφόσον εντός του αντικειμένου οι λεπτομέρειες των δομών που βρίσκονται πιο κοντά στην εστία μεγεθύνονται περισσότερο σε σχέση με τις λεπτομέρειες που είναι πιο απομακρυσμένες από την εστία (Εικόνα 9B). Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο όσο αυξάνεται το πάχος του αντικειμένου σε σχέση με την απόσταση εστίας-φίλμ (focus-to-film distance, FFD). Επίσης εγγενές στοιχείο της γεωμετρικής απεικόνισης είναι και το ότι τα στοιχεία των δομών που βρίσκονται κατά μήκος της ίδιας γραμμικής διαδρομής είναι υπερτιθέμενα όλα μαζί και η πληροφορία για το σχετικό τους βάθος δεν είναι διαθέσιμη στη σχηματιζόμενη εικόνα.

Η ευκρίνεια του περιγράμματος του απεικονιζόμενου αντικειμένου (π.χ. οστικές δοκίδες) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της εστίας καθώς επίσης και από τη σχέση της OFD σε σχέση με την FOD όσο μικραίνει η OFD και αυξάνεται η FOD, το περιγράμμα γίνεται πιο ευκρινές. Το πλάτος της ασάφειας του περιγράμματος ονομάζεται παρασκιά και ισούται με την προβολή της εστίας διαμέσου μιας μικροσκοπικής οπής τοποθετημένης στη θέση του αντικειμένου (Εικόνα 10). Όσο μικραίνει η FOD και αυξάνεται η OFD, η παρασκιά γίνεται ευρύτερη.



Εικόνα 7 Η σχετική συνεισφορά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και της σκέδασης Compton στην εξασθένηση των ακτίνων-Χ σε οστό και μυ.



Εικόνα 8 Η επίδραση της ενέργειας των ακτίνων-Χ στην αντίθεση εικόνας μεταξύ οστών και μαλακών ιστών.

Για την καταγραφή στις εικόνες (A) και (B) χρησιμοποιήθηκε τάση 50 kVp και 150 kVp, αντίστοιχα. Η χαμηλότερη ενέργεια της δέσμης στην εικόνα (A) έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη αντίθεση μεταξύ οστών και μαλακών ιστών λόγω της αυξημένης συνεισφοράς του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στην απεικόνιση των οστών στα χαμηλά kVp.

Σκεδαζόμενη ακτινοβολία

Η αλληλεπίδραση των προσπιπτουσών ακτίνων-Χ με το αντικείμενο προκαλεί τυχαία σκέδαση στα φωτόνια των ακτίνων-Χ. Η σκέδαση αυτή, από τη μία πλευρά, είναι ο μείζων παράγοντας εξασθένησης των ακτίνων επί των οποίων βασίζεται η απεικόνιση με ακτίνες-Χ και, από την άλλη πλευρά, είναι ένας επιβαρυντικός παράγοντας στην περίπτωση όπου τα σκεδαζόμενα φωτόνια καταλήξουν στο μέσο καταγραφής της εικόνας (φίλμ) επειδή απλώνονται με τυχαίο τρόπο ως θόρυβος πάνω στο πεδίο απεικόνισης αυτής και επιδεινώνουν τόσο την αντίθεση εικόνας όσο και τη διακριτική ικανότητα. Ως εκ τούτου, η απάλειψη των σκεδαζόμενων φωτονίων από το μέσο καταγραφής της εικόνας αποτελεί μείζον ζήτημα για την ακτινολογία. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα μέτρα:

- 1 Ευθυγράμμιση της δέσμης στην ελάχιστα αναγκαία προκειμένου να απεικονιστεί μόνο η ανατομική περιοχή ενδιαφέροντος, και παράλληλα να ελαχιστοποιηθεί η σκεδαζόμενη ακτινοβολία από μη σχετιζόμενες (με την περιοχή ενδιαφέροντος) ανατομικές δομές. Το μέτρο αυτό είναι επίσης σημα-

ντικό και για την ελαχιστοποίηση της ακτινικής επιβάρυνσης του εξεταζόμενου.

- 2 Ελαχιστοποίηση του μήκους διαδρομής της δέσμης εντός του εξεταζόμενου μέρους του σώματος, με κατάλληλη τοποθέτηση και συμπληρωματικά με συμπίεση (μαστογραφία).
- 3 Αύξηση του κενού (air gap) μεταξύ αντικειμένου-φίλμ ώστε να αποτραπεί στα σκεδαζόμενα φωτόνια να καταλήξουν στο φίλμ. Η προκαλούμενη κατά αυτόν τον τρόπο μεγέθυνση μπορεί να αντισταθμιστεί με την αύξηση της απόστασης εστίας-αντικειμένου.
- 4 Επιλογή κατάλληλων τιμών τάσης σε σχέση με τη σύσταση τού προς απεικόνιση αντικειμένου ώστε να αυξηθούν οι φωτοηλεκτρικές αντιδράσεις (π.χ. απεικόνιση οστών και σκιαγραφικού) και να βελτιωθεί η αντίθεση.
- 5 Χρήση αντιδιαχυτικού διαφράγματος (grid) το οποίο παρεμβάλλεται εντός της διαδρομής της δέσμης και μπροστά από το φίλμ. Πρόκειται για ένα από τα πιο αποτελεσματικά και συχνά εφαρμοζόμενα μέτρα για τον αποκλεισμό των σκεδαζόμενων φωτονίων. Κατασκευάζεται από λεπτές μολύβδινες