

ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein:

- Οι φυσικοί νόμοι παραμένουν αναλλοίωτοι σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς, δηλαδή ένα σύστημα αναφοράς που είτε παραμένει ακίνητο είτε κινείται με σταθερή ταχύτητα.
- Η ταχύτητα του φωτός είναι ανεξάρτητη από την όποια κίνηση της πηγής του και έχει την ίδια τιμή σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Το γεγονός ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι η μέγιστη ταχύτητα στο σύμπαν και λαμβάνει την ίδια τιμή σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς, έχει ως συνέπεια:

- Η χρονική διάρκεια γεγονότος που μετράται από κινούμενο αδρανειακό παρατηρητή είναι μεγαλύτερη από τον **ιδιοχρόνο Δt_0** , δηλαδή το χρόνο που μετρά, για το ίδιο γεγονός, ένας ακίνητος αδρανειακός παρατηρητής. Το φαινόμενο ονομάζεται **διαστολή χρόνου**.
- Ο χρόνος επιδρά στη μέτρηση του μήκους, με αποτέλεσμα το γεγονός ότι δεν είναι αναλλοίωτος, σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς, να έχει ως συνέπεια τη **συστολή μήκους**, δηλαδή τη μέτρηση μικρότερου μήκους από έναν κινούμενο αδρανειακό παρατηρητή σε σύγκριση με το **ιδιομήκος l_0** , δηλαδή το μήκος που μετράται σε ένα ακίνητο σύστημα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, για ταχύτητες πολύ μικρότερες από αυτή του φωτός, ο χρόνος και το μήκος είναι αναλλοίωτα σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Αυτό είναι σύμφωνο με τις παραδοχές της κλασικής θεωρίας.

Με αντίστοιχο τρόπο εκφράζονται και άλλα φυσικά μεγέθη, τα οποία δεν είναι αναλλοίωτα σε κάθε αδρανειακό σύστημα, έτσι ώστε να ισχύουν αναλλοίωτοι οι νόμοι της μηχανικής.

Τέτοια μεγέθη είναι η ορμή και η κινητική ενέργεια κινούμενου σωματιδίου που γενικεύονται με τρόπο ώστε να ισχύει:

$$E = K + MC^2.$$

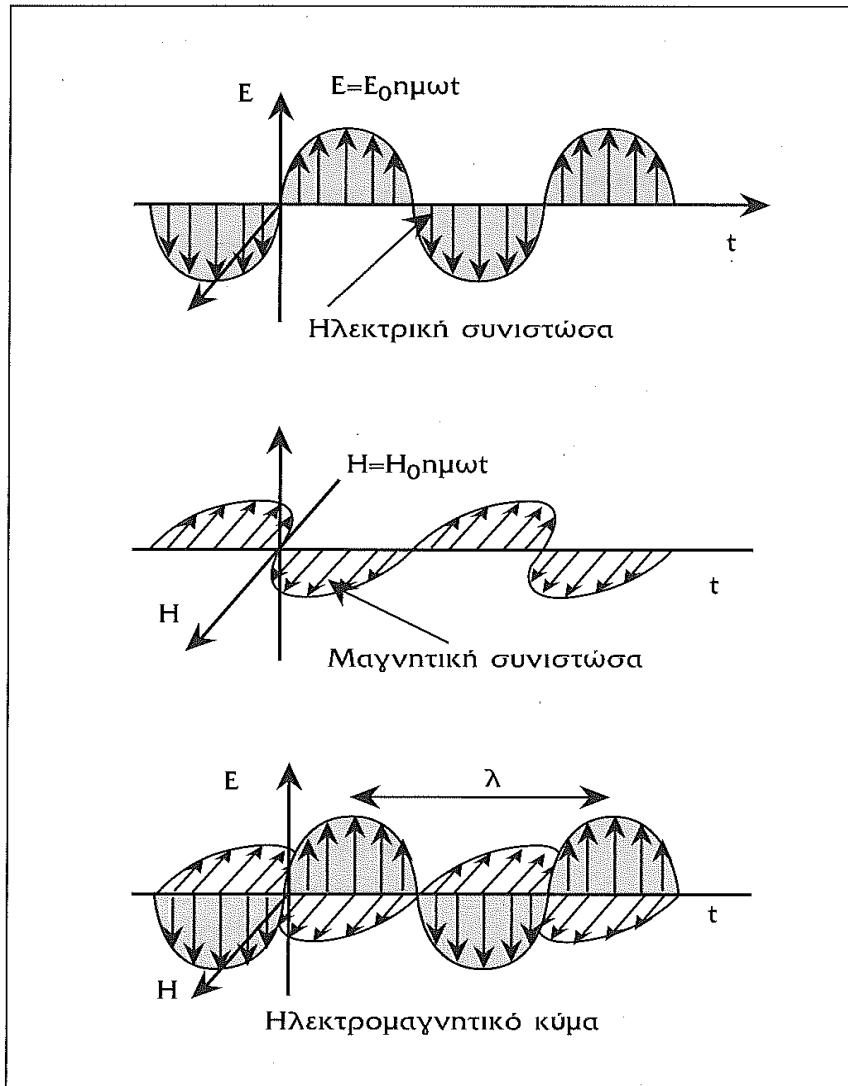
Στην πιο πάνω σχέση ως K ορίζεται η κινητική ενέργεια και M η μάζα ηρεμίας, ενώ E είναι η **σχετικιστική ενέργεια**, του σωματιδίου. Κάθε σωματίδιο που ηρεμεί περικλείει ισοδύναμη με τη μάζα του **ενέργεια ηρεμίας**, η οποία μπορεί να μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως κατά την εξαύλωση.

Μετατροπή της ύλης σε ενέργεια μπορεί να γίνει κατά τις **χημικές αντιδράσεις**, αλλά η εκλυόμενη ενέργεια είναι της τάξης των eV και η μετατροπή μάζας είναι σχεδόν αμελητέα. Αντιθέτως, στις **πυρηνικές αντιδράσεις**, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η μεταβολή της μάζας ηρεμίας των αντιδρώντων που είναι ίση με το ισοζύγιο των κινητικών ενεργειών πριν και μετά την αντίδραση. Αυτό διότι η ενέργεια σύνδεσης που περικλείεται στον πυρήνα είναι της τάξης MeV – GeV.

Γενικό συμπέρασμα είναι ότι οι κλασικές αρχές διατήρησης μάζας & ενέργειας ισχύουν ως ειδικές περιπτώσεις μιας ευρύτερης αρχής διατήρησης της ενέργειας και της μάζας ηρεμίας.

ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

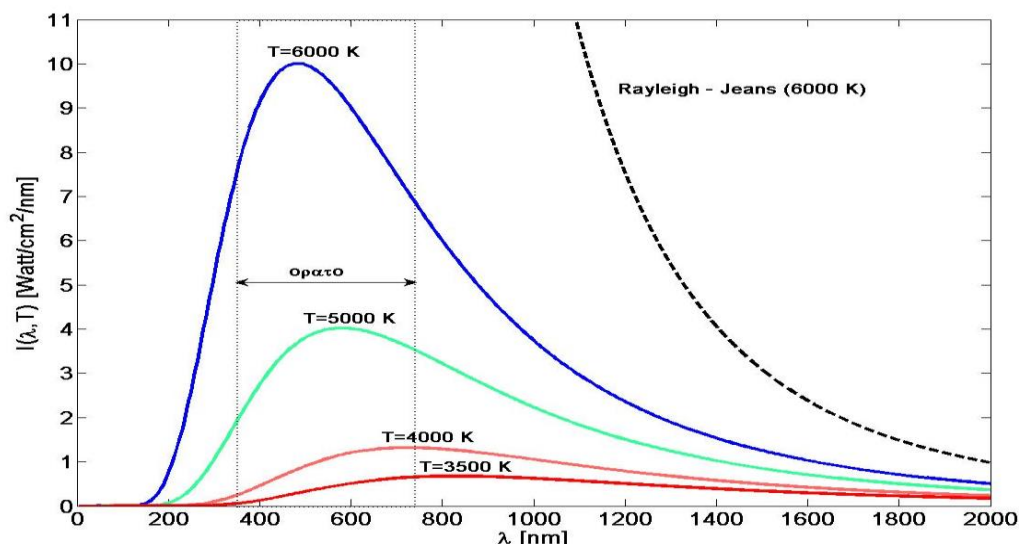
Ως ακτινοβολία, γενικά, ορίζεται η μετάδοση ενέργειας στο χώρο, ενώ με τον όρο **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**, ορίζεται η μεταφορά ενέργειας στο χώρο μέσω της διάδοσης χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών & μαγνητικών πεδίων. Πρόκειται για ηλεκτρικά & μαγνητικά πεδία που παράγονται από παλλόμενα ηλεκτρικά φορτία και διαδίδονται ταυτόχρονα στο χώρο με την ίδια ταχύτητα και συχνότητα ίση με αυτή της ταλάντωσης των ηλεκτρικών φορτίων.



Τα ηλεκτρομαγνητικά είναι **αρμονικά κύματα**, δηλαδή οι εντάσεις E και H της ηλεκτρικής και της μαγνητικής συνιστώσας τους μεταβάλλονται στο χώρο και το χρόνο ημιτονοειδώς και, επιπλέον είναι κάθετες μεταξύ τους αλλά και στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Η απόσταση κατά την οποία οι συνιστώσες συμπληρώνουν μια πλήρη εναλλαγή ονομάζεται **μήκος κύματος λ** , ενώ ισχύει: $c = f \lambda$.

Με βάση την κλασική παραδοχή ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια απορροφάται και εκπέμπεται με συνεχή τρόπο, έγινε προσπάθεια να υπολογισθεί η κατανομή της με πειράματα σε ένα ιδανικό σώμα που εκπέμπει και απορροφά όλα τα μήκη κύματος, **μέλαν σώμα**. Το φάσμα ενός τέτοιου σώματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Η καμπύλη εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας:

- Η μέγιστη ένταση, του φάσματος μετατοπίζεται αντιστρόφως ανάλογα με τη θερμοκρασία, **νόμος Wien**:

$$\lambda_{\max} T = \text{σταθερό.}$$

- Η ολική ένταση είναι ανάλογη του T^4 , νόμος **Stefan – Boltzmann**:

$$I = \sigma T^4.$$

Οι **Rayleigh & Jeans**, μελέτησαν το φάσμα του μέλανος σώματος βασιζόμενοι στις παραδοχές της κλασικής θεωρίας και κατέληξαν σε μια καμπύλη που αποδίδει σωστά το φάσμα για μεγάλα λ και απειρίζεται για μικρές τιμές του μήκους κύματος, δηλαδή δίνει άπειρες τιμές της έντασης στα μικρά μήκη κύματος, γεγονός που είναι άτοπο.

Ο **Planck**, υπέθεσε ότι η ενέργεια των H/M κυμάτων μεταδίδεται με διακριτό τρόπο, δηλαδή είναι κβαντισμένη σε ακέραια πολλαπλάσια μιας στοιχειώδους ποσότητας:

$$E = h f = hc / \lambda.$$

Με βάση αυτή την παραδοχή, ο Planck μπόρεσε να αποδώσει σωστά το φάσμα του μέλανος σώματος.

Κατά συνέπεια, η ύλη εκπέμπει και απορροφά H/M ενέργεια με ασυνεχή τρόπο, κατά κβάντα που ονομάζονται φωτόνια, ενώ κάθε φωτόνιο μεταφέρει ενέργεια $E = h f$.

Οι δύο προαναφερθέντες νόμοι συμφωνούν στα μεγάλα μήκη κύματος, δηλαδή στις σχετικά χαμηλές ενέργειες, στις οποίες η κβάντωση είναι μικρή και μπορεί να θεωρηθεί ότι η ενέργεια μεταφέρεται με συνεχή τρόπο.

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δέσμη φωτονίων προσπίπτει σε μεταλλικό σώμα και εκπέμπονται ηλεκτρόνια, **φωτοηλεκτρόνια**, τα οποία μπορούν υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού να σχηματίσουν το **φωτοηλεκτρικό ρεύμα**.

Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, τα φωτόνια που είναι στοιχειώδη H/M κύματα ασκούν αρμονική δύναμη στα ηλεκτρόνια του μετάλλου και τους μεταφέρουν ενέργεια η οποία, κατά την **κλασική θεωρία**, απορροφάται με συνεχή τρόπο. και με αύξηση της έντασης της δέσμης φωτονίων, δηλαδή της ενέργειας που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, αυξάνεται το φωτοηλεκτρικό ρεύμα, αλλά όχι και η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων η οποία εξαρτάται από την συχνότητα των φωτονίων. Επίσης, η εξαγωγή των φωτοηλεκτρονίων συμβαίνει εάν η συχνότητα των φωτονίων είναι:

$$f > f_{\min}$$

Ο **Einstein**, βασιζόμενος στην αξιωματική παραδοχή του Planck ότι μία δέσμη φωτός αποτελείται από ενεργειακά πακέτα τα φωτόνια που το κάθε ένα έχει ενέργεια $E = hf$, διατύπωσε την υπόθεση ότι η απορρόφηση ενέργειας από τα ηλεκτρόνια γίνεται ασυνεχώς, κατά κβάντα. Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου, **έργο εξαγωγής W** , το ηλεκτρόνιο απορροφά την ενέργεια και ελευθερώνεται από το άτομο με κινητική ενέργεια:

$$T_e = hf - W.$$

Η κινητική ενέργεια του φωτοηλεκτρονίου εξαρτάται από την συχνότητα της H/M ακτινοβολίας και η αύξηση της έντασης είναι αποτέλεσμα αύξησης της ροής των φωτονίων.

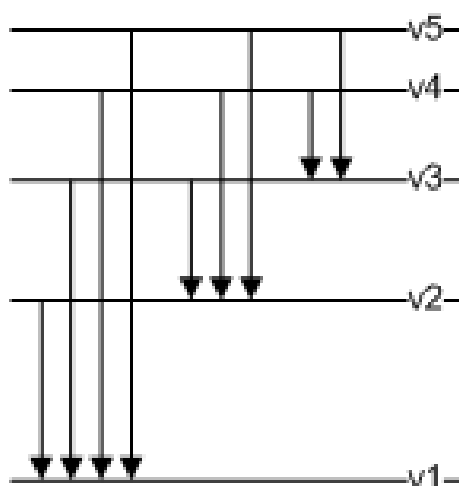
Η κλασική θεωρία δεν καταρρίπτεται, διότι στις **χαμηλές ενέργειες**, η εκπομπή και απορρόφηση φωτονίων γίνεται, κατά προσέγγιση, με συνεχή τρόπο. Αλλά, στις λεγόμενες **υψηλές ενέργειες**, εκδηλώνεται ο **κβαντικός χαρακτήρας**, με τον οποίο αλληλεπιδρούν η H/M ακτινοβολία και η ύλη.

Η εξίσωση $E = hf$, του Planck, είναι συνάρτηση ενός κυματικού μεγέθους όπως η συχνότητα f με την ενέργεια E του φωτονίου. Από την εξίσωση αυτή προκύπτει η σχέση $p = h / \lambda$ που είναι συνάρτηση ενός καθαρά σωματιδιακού μεγέθους όπως η ορμή p και ενός κυματικού μεγέθους όπως το μήκος κύματος λ .

Ατομικό Πρότυπο του Bohr

Τα ατομικά φάσματα εκπομπής και απορρόφησης είναι **γραμμικά φάσματα**, τα οποία αποτελούνται από διακριτές γραμμές που αντιστοιχούν σε ορισμένες συχνότητες, χαρακτηριστικές του συγκεκριμένου ατόμου.

Σύμφωνα με τη **συνδυαστική αρχή**, φασματικές γραμμές ενός ατόμου είναι δυνατό να υπολογισθούν ως διαφορές ακολουθίας συχνοτήτων που είναι χαρακτηριστικές του ατόμου, **φασματικοί όροι**. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μία ακολουθία πέντε φασματικών όρων:



Επιπλέον, από το πείραμα του **Rutherford**, αποδείχθηκε ότι τα ηλεκτρόνια που είναι αρνητικά φορτισμένα κατανέμονται σε μια περιοχή στο κέντρο της οποίας, **πυρήνας**, είναι συγκεντρωμένο **θετικό φορτίο**. Ο πυρήνας έχει ακτίνα περίπου 100.000 φορές μικρότερη από αυτήν του ατόμου.

Κατά την **κλασική θεωρία**, τα κινούμενα φορτία εκπέμπουν και απορροφούν την Η/Μ ακτινοβολία με συνεχή τρόπο. Αν αυτό ίσχυε για τα ατομικά ηλεκτρόνια, τα οποία εκπέμπουν Η/Μ ακτινοβολία εξαιτίας της κίνησής τους και απορροφούν ενέργεια λόγω συγκρούσεων με γειτονικά άτομα τότε το άτομο θα αντιμετώπιζε **πρόβλημα σταθερότητας**.

Καθώς η ενέργεια ενός φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας, οι ακολουθίες συχνοτήτων είναι και ακολουθίες ενεργειών, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_n = E_1 / n^2.$$

Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια της Η/Μ ακτινοβολίας εκπέμπεται & απορροφάται, από το άτομο, με διακριτό τρόπο γεγονός που επιβεβαιώνεται από την αρχή κβάντωσης του Planck.

Επίσης, αποδεικνύεται ότι η ενέργεια του ηλεκτρονίου σε ένα άτομο υδρογόνου εξαρτάται από την ακτίνα της τροχιάς, στην οποία βρίσκεται. Αυτό σημαίνει ότι και η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντισμένη σύμφωνα με τη σχέση:

$$L = n h / 2\pi.$$

Συνέπεια των προηγούμενων διαπιστώσεων είναι τα εξής:

- Κάθε ηλεκτρόνιο μπορεί να βρίσκεται σε επιτρεπόμενες κυκλικές τροχιές, γύρω από τον πυρήνα, με σταθερή ενέργεια, έτσι ώστε η στροφορμή του να είναι κβαντισμένη και ακέραιο πολλαπλάσιο του $h/2\pi$.
- Κατά τη μετάβαση του ηλεκτρονίου από μια τροχιά σε άλλη εκπέμπεται ή απορροφάται H/M ακτινοβολία.

Με αυτά τα αξιώματα τεκμηριώνεται η σταθερότητα του ατόμου και η ύπαρξη συγκροτημένης ύλης.

Αρχή του De Broglie – Αρχή της Αβεβαιότητας

Όλες οι μορφές της ύλης μπορούν να συμπεριφερθούν ως σωματίδια, αλλά και ως κύματα, δηλαδή παύει να υφίσταται η κλασική διάκριση σε ύλη & κύματα.

Σε πλήρη αντιστοιχία με τα μηχανικά κύματα, μέσω των οποίων διαδίδεται μια μηχανική ταλάντωση στα μόρια ελαστικού υλικού, το H/M κύμα ισοδυναμεί με διάδοση ηλεκτρικού & μαγνητικού πεδίου με αρμονική μορφή και χωρίς να είναι αναγκαία η ύπαρξη υλικού. Οι εντάσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένη κυματική εξίσωση.

Η λύση της κυματικής εξίσωσης του ηλεκτρονίου δεν είναι κάποιο συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος, αλλά μία συνάρτηση, **κυματοσυνάρτηση**, με την οποία μπορεί να υπολογισθεί η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο σε ορισμένη θέση.

Εφόσον μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα το ηλεκτρόνιο να βρίσκεται σε κάποια θέση με ορισμένη ορμή και όχι την ακριβή θέση και ορμή, εισάγεται η έννοια της αβεβαιότητας στον καθορισμό αυτών των μεγεθών. Σύμφωνα με τον **Heisenberg**, το γινόμενο της αβεβαιότητας της θέσης με αυτήν της ορμής σε μία διάσταση δεν μπορεί να είναι μικρότερο από την ποσότητα $h / 2\pi$. Δηλαδή:

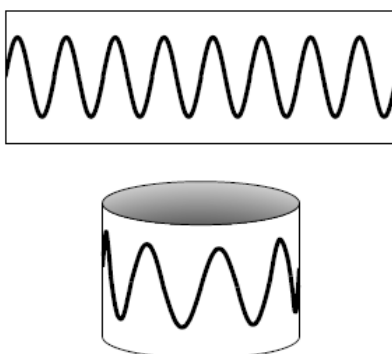
$$\Delta x \Delta p \geq h / 2\pi.$$

Προφανώς το πρότυπο του Bohr είναι ασύμβατο με την αρχή της αβεβαιότητας, διότι υποστηρίζει ότι σε μία τροχιά του ηλεκτρονίου μπορεί να υπολογισθεί με ακρίβεια και η ορμή του.

Θα μπορούσε να υποθεθεί ότι είναι αδύνατο να υπολογισθεί η στροφορμή ενός ηλεκτρονίου. Αυτό δεν ισχύει, διότι η αρχή της απροσδιοριστίας ισχύει στην ίδια διάσταση ενώ για τον υπολογισμό της στροφορμής απαιτείται ο προσδιορισμός της θέσης και της ορμής σε διαφορετικές διαστάσεις.

➤ **Κβαντομηχανικό Πρότυπο του Ατόμου**

Εφόσον η κίνηση του ηλεκτρονίου γίνεται σε μία οριοθετημένη περιοχή, το κύμα De Broglie του σωματιδίου μπορεί να προσομοιωθεί με ένα στάσιμο κύμα, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την εισαγωγή μιας κυματικής εξίσωσης, από την οποία μπορεί να προσδιορισθεί η πιθανότητα ενέργειας και στροφορμής. Πρόκειται για την εξίσωση του **Schrödinger**:

$$E \psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + V(x)\psi(x)$$

Με τη βοήθεια της έννοιας του δυναμικού:

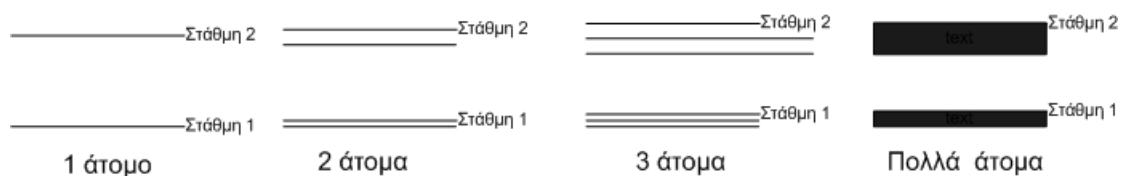
$$V(x) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{x}$$

υπολογίζονται οι κυματοσυναρτήσεις Ψ που αποτελούν λύσεις της εξίσωσης και από την **ποσότητα Ψ^2** , υπολογίζεται η πιθανότητα της ενέργειας και της θέσης για το ηλεκτρόνιο.

Μόρια & Συμπυκνωμένη Ύλη

Οι ενεργειακές στάθμες στα μόρια είναι διαφορετικές από αυτές των ελεύθερων ατόμων, δηλαδή δεν μπορούν να υπολογισθούν με την υπέρθεση των ατομικών φασμάτων, εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχει η δυνατότητα ταλάντωσης και περιστροφικής κίνησης με αποτέλεσμα περισσότερες ενεργειακές στάθμες από αυτές των ελεύθερων ατόμων που βρίσκονται στο μόριο.

Στα **υγρά & αέρια**, οι χημικοί δεσμοί είναι ασθενείς, ενώ στα **στερεά**, συγκροτούνται κρύσταλλοι με ισχυρούς ομοιοπολικούς ή ιοντικούς δεσμούς και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κάθε ενεργειακό επίπεδο να περιέχει στάθμες με μικρές διαφορές.



Το φάσμα των στερεών σωμάτων αποτελείται από ενεργειακές ζώνες μεταξύ των οποίων υπάρχουν απαγορευμένες περιοχές. Στα στερεά και για υψηλές ενέργειες η απορρόφηση γίνεται κατά κβάντα ενώ για τις χαμηλές ενέργειες η εκπομπή και απορρόφηση γίνεται συνεχώς.

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΟΜΗ

Ο πυρήνας είναι μια περιοχή στο κέντρο του ατόμου, στην οποία βρίσκονται τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Τα νετρόνια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα ενώ τα πρωτόνια φέρουν θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Η ηλεκτροστατική άπωση, μεταξύ των πρωτονίων, εξουδετερώνεται από την **ισχυρή πυρηνική δύναμη**, η οποία συγκρατεί τα πρωτόνια και τα νετρόνια, νουκλεόνια, σε ένα συνεκτικό σύστημα.

Ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα, **ατομικός αριθμός Z**, καθορίζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων και τις χημικές ιδιότητες του ατόμου. Ο ατομικός αριθμός $-Z$ είναι δεδομένος για κάθε στοιχείο, ενώ ο αριθμός νετρονίων μπορεί να είναι διαφορετικός για νουκλίδια, **ισότοπα**, του ίδιου στοιχείου.

Ο συνολικός αριθμός νουκλεονίων, πρωτονίων και νετρονίων, του πυρήνα καλείται **μαζικός αριθμός A**. Ισχύει:

$$A = Z + N.$$

Νουκλίδια διαφορετικών στοιχείων μπορεί να έχουν ίδιο μαζικό αριθμό, **ισοβαρή**.

Στον Πίνακα που ακολουθεί, αναγράφονται η μάζα και το φορτίο των διαφόρων υποατομικών σωματιδίων:

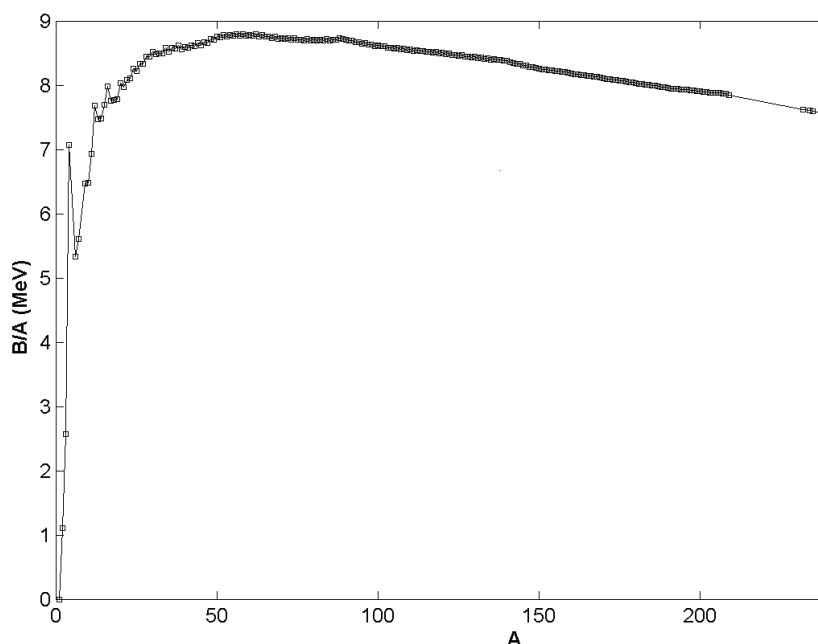
Πίνακας 1	Φορτίο μάζα και ενέργεια ηρεμίας των τριών βασικότερων υποατομικών σωματιδίων.			
	Φορτίο	Μάζα (kg)	Μάζα (u)	Ενέργεια ηρεμίας (MeV/c ²)
Ηλεκτρόνιο	-e	9,109 10 ⁻³¹	5,48597 10 ⁻⁴	0,511
Πρωτόνιο	+e	1,672 10 ⁻²⁷	1,008665	938,27
Νετρόνιο	0	1,674 10 ⁻²⁷	1,007277	939,57

Είναι προφανές ότι η μάζα του ατόμου είναι σχεδόν ίση με τη μάζα του πυρήνα.

Η συνολική ελκτική δυναμική ενέργεια που περικλείεται στον πυρήνα καλείται **ενέργεια σύνδεσης**, Δεδομένου ότι η μάζα του πυρήνα είναι πάντα μικρότερη από τη συνολική μάζα των ελεύθερων νουκλεονίων που τον συγκροτούν, **έλλειμμα μάζας**, η ενέργεια σύνδεσης μπορεί να υπολογισθεί ως η ισοδύναμη ενέργεια που αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας.

Η ισχυρή πυρηνική δύναμη έχει **μικρή εμβέλεια**, δηλαδή ασκείται μόνο μεταξύ γειτονικών νουκλεονίων, με αποτέλεσμα η ενέργεια σύνδεσης να ισοκατανέμεται στα νουκλεόνια. Ως **ενέργεια σύνδεσης**, ανά **νουκλεόνιο**, B/A , ορίζεται η μέση ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί για την απομάκρυνση του. Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αποτελεί κριτήριο για την σταθερότητα του πυρήνα.

Στο Διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της B/A σε σχέση με το μαζικό αριθμό:



Είναι προφανές ότι η B/A μεγιστοποιείται για πυρήνες με μαζικό αριθμό που λαμβάνει τιμές από 56 έως 62, ενώ για τα υπόλοιπα νουκλίδια είναι μικρότερη. Εξαιρετική, αποτελεί ο πυρήνας του He που εμφανίζεται με υψηλή B/A και είναι εξαιρετικά σταθερός.

Πρότυπο της Υγρής Σταγόνας

Η ισχυρή πυρηνική δύναμη μεταβάλλεται, ως προς την απόσταση μεταξύ των νουκλεονίων, όπως η **δύναμη Van der Waals**, η οποία ασκείται μεταξύ των μορίων των υγρών.

Με βάση αυτή την αντιστοιχία, αποδεικνύεται ότι ο πυρήνας έχει **σφαιρικό σχήμα**, παρόμοιο με αυτό μιας υγρής σταγόνας. Η ακτίνα του πυρήνα υπολογίζεται από την πειραματική σχέση:

$$R = R_0 A^{1/3}.$$

Όπως και στην υγρή σταγόνα, η πυκνότητα ρ του πυρήνα είναι σταθερή.

Με βάση το πρότυπο της υγρής σταγόνας και σε αντιστοιχία με τη λανθάνουσα θερμότητα συμπίκνωσης, Η ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα μπορεί να προσδιορισθεί από την **ημιεμπειρική εξίσωση**, του **Weizsacker**, σύμφωνα με την οποία:

$$B = a_{\text{volume}}A - a_{\text{surface}}A^{2/3} - a_{\text{coulomb}}\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{\text{asymmetry}}\frac{(A-2Z)^2}{A}$$

Στην προηγούμενη εξίσωση:

- Ο **πρώτος όρος**, αντιστοιχεί στην **ενέργεια όγκου**, δηλαδή ενέργεια που προέρχεται από τις έλξεις μεταξύ των νουκλεονίων.
- Ο **δεύτερος όρος**, αντιστοιχεί στην **ενέργεια επιφάνειας**, δηλαδή την μείωση της αναμενόμενης ενέργειας όγκου εξαιτίας των επιφανειακών νουκλεονίων που περιβάλλονται από λιγότερα γειτονικά νουκλεόνια.
- Ο **τρίτος όρος**, αντιστοιχεί στην **ηλεκτροστατική δυναμική ενέργεια**, δηλαδή μείωση της αναμενόμενης ενέργειας όγκου εξαιτίας της άπωσης μεταξύ των πρωτονίων του πυρήνα.
- Ο **τέταρτος όρος**, αντιστοιχεί στην **ενέργεια ασυμμετρίας**, δηλαδή την μείωση της αναμενόμενης ενέργειας όγκου που οφείλεται σε πλεόνασμα νετρονίων ή πρωτονίων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ισχυρή πυρηνική δύναμη ευνοεί το σχηματισμό δεσμού μεταξύ ζευγών πρωτονίων ή νετρονίων και, στη συνέχεια, σχηματισμό δεσμών ανάμεσα σε ζεύγη νετρονίων και πρωτονίων.

Πρότυπο των Φλοιών

Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό:

- Τα νουκλεόνια κατανέμονται σε **ενεργειακές στάθμες**, παρόμοιες με αυτές των ηλεκτρονίων του ατόμου.
- Τα νουκλεόνια βρίσκονται σε κίνηση και τα τροχιακά τους καθορίζονται από την **εξίσωση Schrodinger**, ενώ αντιστοιχούν σε κβαντισμένες τιμές ενέργειας που ορίζονται από αντίστοιχους κβαντικούς αριθμούς.

Είναι προφανές ότι εάν προσφερθεί ενέργεια στον πυρήνα, αυτός θα μεταβεί σε μια **διεγερμένη κατάσταση**, από την οποία επιστρέφει στη **βασική στάθμη**, με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

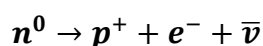
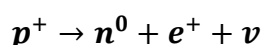
Με βάση τα προηγούμενα συμπεράσματα σχετικά με τη δομή του πυρήνα:

- **Μεγάλα νουκλίδια**, μπορεί να διασπώνται αυθόρμητα σε δύο ισοδύναμους πυρήνες που βρίσκονται στην περιοχή μέγιστης B/A, **σχάση**. Εναλλακτικά, της σχάσης και λόγω της εξαιρετικής σταθερότητας των πυρήνων ηλίου, είναι πιθανότερο να γίνει σταδιακή μετάβαση του νουκλιδίου προς την περιοχή της μέγιστης B/A με διαδοχικές αποβολές πυρήνων ηλίου, **διάσπαση α**.
- **Μικρά νουκλίδια**, συνενώνονται σε μεγαλύτερα νουκλίδια με μαζικό αριθμό πλησιέστερα στην περιοχή μέγιστης σταθερότητας, **σύντηξη**.

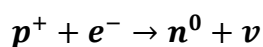
Ανάμεσα σε **ισοβαρή νουκλίδια**, σταθερότερο είναι εκείνο που εμφανίζει ίσο αριθμό πρωτονίων & νετρονίων, για ελαφρά νουκλίδια, ή το ελάχιστο πλεόνασμα νετρονίων, για τα βαριά νουκλίδια, στα οποία είναι απαραίτητο ένα πλεόνασμα νετρονίων για να εξουδετερωθεί η ηλεκτροστατική άπωση που ασκείται μεταξύ των πρωτονίων.

Αν σε κάποιο νουκλίδιο εμφανίζεται πλεόνασμα πρωτονίων ή νετρονίων, τότε μπορεί να συμβεί αποβολή πρωτονίου ή νετρονίου αντίστοιχα, με μικρή πιθανότητα και μόνο σε τεχνητά νουκλίδια με πολύ μεγάλο πλεόνασμα.

Αυτό που είναι πιθανότερο να συμβεί είναι η μετατροπή πρωτονίου σε νετρόνιο και αντίστροφα, εξαιτίας της ασθενούς πυρηνικής δύναμης.



Εναλλακτικά της μετατροπής ενός πρωτονίου σε νετρόνιο, με εκπομπή ποζιτρονίου, μπορεί να συμβεί σύλληψη από το πρωτόνιο ενός ηλεκτρονίου της K – στοιβάδας και μετατροπή σε νετρόνιο:



Οι προηγούμενες διαδικασίες, εκτός από την εκπομπή νετρονίου, καταλήγουν σε μεταβολή του Z και, άρα, αποτελούν **μεταστοιχειώσεις**. Εκτός από τη σύντηξη που απαιτεί τη διάθεση ενός αρχικού ποσού ενέργειας ώστε να εξουδετερωθεί η άπωση μεταξύ των αρχικών πυρήνων, οι υπόλοιπες διαδικασίες γίνονται αυθόρμητα αρκεί τα θυγατρικά να έχουν μικρότερη μάζα ηρεμίας σε σχέση με τα αρχικά νουκλίδια.

Η σχάση, ενώ μπορεί να συμβεί αυθόρμητα, συνήθως και για πρακτικούς λόγους, προκαλείται με βομβαρδισμό των αρχικών νουκλιδίων με νετρόνια.

Οι αυθόρμητες μεταστοιχειώσεις ασταθών νουκλιδίων σε νουκλίδια με χαμηλότερη ενέργεια ηρεμίας καλούνται **ραδιενεργές διασπάσεις**.

Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ μητρικών και θυγατρικών νουκλιδίων κατανέμεται, με βάση τις **αρχές διατήρησης ενέργειας & ορμής**, ανάμεσα στους θυγατρικούς πυρήνες και τα εκπεμπόμενα σωματίδια υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας.

Τα σωματίδια που εκπέμπονται στις ραδιενεργές διασπάσεις μεταφέρουν κινητική ενέργεια στην ύλη υπό τη μορφή ακτινοβολίας φορτισμένων σωματιδίων, ενώ μπορεί να είναι:

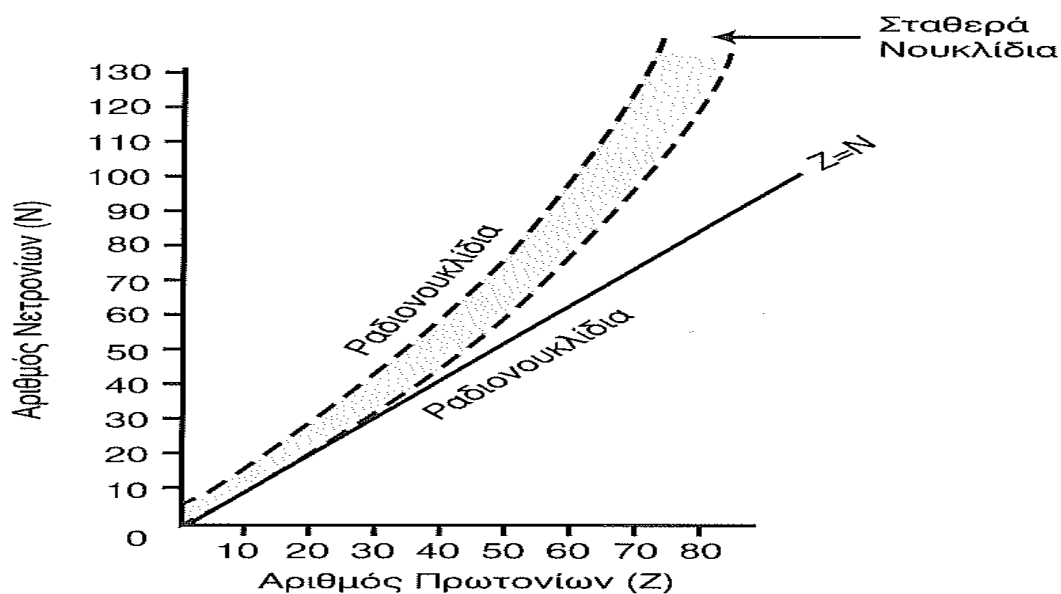
- πυρήνες He, σωματίδια α , οι οποίοι εκπέμπονται από ασταθείς πυρήνες με μεγάλο μαζικό αριθμό, **διάσπαση α** .
- ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια, σωματίδια β , τα οποία εκπέμπονται από πυρήνες που διαθέτουν πλεόνασμα νετρονίων ή πρωτονίων αντίστοιχα, **διάσπαση β** .

Στις ραδιενεργές διασπάσεις περιλαμβάνεται, αν και δεν αποτελεί μεταστοιχείωση, η **διάσπαση γ** , δηλαδή η εκπομπή φωτονίων που συμβαίνει όταν αποδιεγείρεται ένας μετασταθής πυρήνας. Τα εκπεμπόμενα φωτόνια ονομάζονται ακτινοβολία γ .

Ένας ασταθής πυρήνας είναι δυνατό, εφόσον ισχύουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις, να μεταστοιχείωνεται ακολουθώντας περισσότερες από ενός είδους διασπάσεις, αλλά με διαφορετική πιθανότητα για κάθε μια από αυτές. Επίσης, ο θυγατρικός πυρήνας μπορεί να είναι και αυτός ραδιενεργός, με αποτέλεσμα να σημειώνεται μια σειρά διασπάσεων που καταλήγει σε έναν σταθερό πυρήνα.

Το φαινόμενο της αυτόματης & ανεξαρτήτως συνθηκών εκπομπής ακτινοβολίας από δεδομένα στοιχεία, οι Pierre & Marie Curie το ονόμασαν **ραδιενέργεια**.

Ο Χάρτης των Νουκλιδίων, ή **Διάγραμμα Segre**, αποτελεί έναν τρόπο παρουσίασης των γνωστών νουκλιδίων σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων (αριθμός p – αριθμός n).



Στο Χάρτη των Νουκλιδίων:

- τα ισότοπα βρίσκονται σε κατακόρυφες γραμμές,
- τα ισότονα βρίσκονται σε οριζόντιες γραμμές,
- τα ισοβαρή βρίσκονται σε γραμμές κάθετες προς την διχοτόμο $N = Z$.

Τα σταθερά νουκλίδια βρίσκονται στη λεγόμενη «κοιλιάδα σταθερότητας», προς την οποία κατευθύνονται με τις ραδιενεργές διασπάσεις τα ασταθή νουκλίδια. Η περιοχή αυτή συμπίπτει με τη διχοτόμο $N = Z$ για τα ελαφρά νουκλίδια, όταν $A < 20$, ενώ για τα μεγαλύτερα νουκλίδια συγκλίνει προς τον άξονα των νετρονίων.

Ραδιενεργές Διασπάσεις

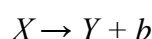
Σε μια ραδιενεργό διάσπαση ένα ασταθές νουκλίδιο μεταστοιχειώνεται αυθόρμητα σε κάποιο άλλο σταθερότερο νουκλίδιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός σωματιδίου που μπορεί να είναι πυρήνας He, ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο.

Σε κάθε ραδιενεργό διάσπαση ισχύουν οι **αρχές διατήρησης**:

- της Ενέργειας,
- της Ορμής – Στροφορμής,
- του Ηλεκτρικού Φορτίου,
- του συνολικού Αριθμού Νουκλεονίων και του Λεπτονικού Αριθμού.

Βάσει των προηγούμενων αρχών υπολογίζονται οι επιμέρους κινητικές ενέργειες τόσο του θυγατρικού πυρήνα, όσο και του εκπεμπόμενου σωματιδίου.

✓ *Αν θεωρήσουμε μια οποιαδήποτε ραδιενεργό διάσπαση:*



Από τη διατήρηση της Ενέργειας, υπό τη συνθήκη ότι ο μητρικός πυρήνας είναι ακίνητος, υπολογίζεται η μεταβολή της συνολικής ενέργειας ηρεμίας:

$$Q = M_X C^2 - (M_Y C^2 + M_b C^2) = K_Y + K_b > 0$$

Από τη διατήρηση της Ορμής υπολογίζεται ο λόγος των κινητικών ενεργειών των προϊόντων της διάσπασης:

$$K_Y / K_b = M_b / M_Y$$

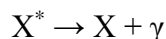
Κατά τη **διάσπαση – α**, ένας μητρικός πυρήνας, με μεγάλο A , μεταστοιχειώνεται σε έναν θυγατρικό εκπέμποντα πυρήνα He – **σωμάτιο α**. Η διαφορά της συνολικής ενέργειας ηρεμίας κατανέμεται μεταξύ του θυγατρικού πυρήνα και του εκπεμπόμενου πυρήνα He. Ο θυγατρικός πυρήνας παράγεται με μια, έστω και χαμηλή, κινητική ενέργεια – ενέργεια ανάκρουσης, ενώ το ενεργειακό φάσμα των εκπεμπόμενων σωματιδίων – α είναι γραμμικό.

Κατά τη **διάσπαση β^-** , ένας μητρικός πυρήνας, με πλεόνασμα n , μεταστοιχειώνεται σε έναν θυγατρικό πυρήνα εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο – **σωμάτιο β^-** . Η διαφορά της συνολικής ενέργειας ηρεμίας εκλύεται ως κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου και το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα είναι συνεχές.

Κατά τη **διάσπαση β^+** , ένας μητρικός πυρήνας, με πλεόνασμα p , μεταστοιχειώνεται σε έναν θυγατρικό πυρήνα εκπέμποντας ένα ποζιτρόνιο – **σωμάτιο β^+** . Η διαφορά της συνολικής ενέργειας ηρεμίας εκλύεται ως κινητική ενέργεια του ποζιτρονίου και το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα είναι συνεχές. Για να συμβεί μεταστοιχείωση ενός ασταθούς πυρήνα σε έναν γειτονικό ισοβαρή πυρήνα με διάσπαση β^+ , θα πρέπει η ενέργεια ηρεμίας του θυγατρικού να διαφέρει από αυτήν του μητρικού πυρήνα κατά 1,02 MeV. Αν δεν ισχύει αυτό, τότε ο μητρικός πυρήνας μεταστοιχειώνεται στο θυγατρικό με **σύλληψη ηλεκτρονίου**, από την K – στοιβάδα, η οποία ακολουθείται από εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίου Auger.

γ - διάσπαση

Αν ένας πυρήνας βρεθεί σε διεγερμένη κατάσταση, **μετασταθής πυρήνας**, τότε θα συμβεί ανακατανομή των νουκλεονίων του ώστε να επιστρέψει στη βασική στάθμη και η πλεονάζουσα ενέργεια θα εκπεμφθεί ως **φωτόνιο γ** :



Η διάσπαση γ δεν αποτελεί μεταστοιχείωση, αλλά αποδιέγερση ενός μετασταθούς πυρήνα που μπορεί να γίνει σε ένα ή και περισσότερα «βήματα».

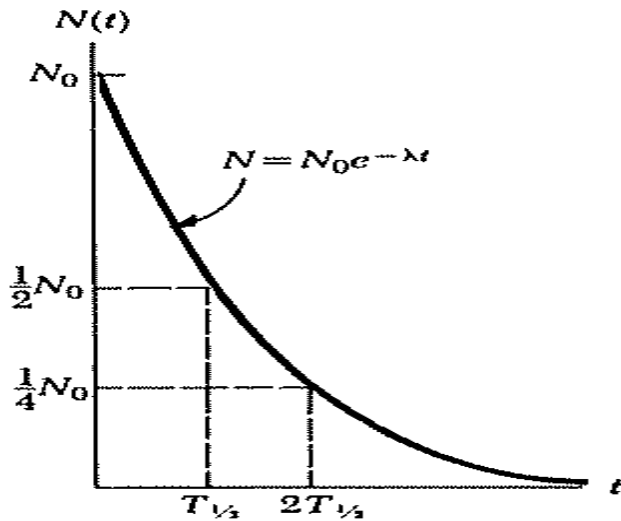
Ένας μετασταθής πυρήνας είναι πιθανό να αποδιεγερθεί με **εσωτερική μετατροπή**, δηλαδή μεταφέροντας την πλεονάζουσα ενέργεια του σε ένα ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας που θα εγκαταλείψει το άτομο. Η εσωτερική μετατροπή ακολουθείται από εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίου Auger.

Εκθετικός Νόμος των Ραδιενεργών Διασπάσεων

Σε ένα δείγμα ραδιενεργών πυρήνων ο αριθμός των διασπάσεων που συμβαίνουν ανά μονάδα χρόνου ορίζεται ως **ενεργότητα**, του δείγματος. Η ενεργότητα είναι ανάλογη του πλήθους των πυρήνων του δείγματος και δεν εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ισχύει:

$$A(t) = -dN/dt = \lambda N(t) \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ και } A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Η **σταθερά διάσπασης λ** , δεδομένου ότι ισούται με το ποσοστό των πυρήνων που διασπώνται ανά μονάδα χρόνου, εκφράζει την πιθανότητα διάσπασης ενός πυρήνα στη μονάδα του χρόνου.



Το χρονικό διάστημα στο οποίο το πλήθος, άρα και η ενεργότητα του δείγματος μειώνεται κατά το ήμισυ ονομάζεται **χρόνος υποδιπλασιασμού**, ή **χρόνος ημιζωής**. Ισχύει:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Ο **μέσος χρόνος ζωής**, ενός ραδιενεργού πυρήνα, υπολογίζεται από τη σχέση $\tau = 1/\lambda$.

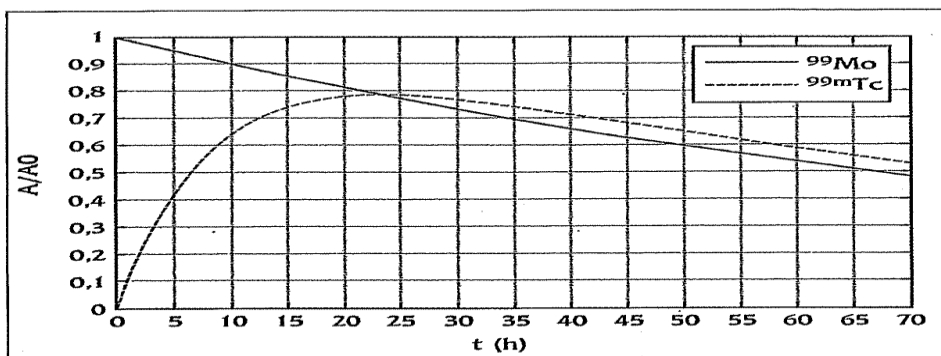
Ραδιενεργός Ισορροπία

Ο αριθμός των παραγόμενων θυγατρικών πυρήνων:

- όταν το θυγατρικό νουκλίδιο είναι σταθερό ισούται με τον αριθμό μητρικών πυρήνων που διασπώνται,
- αν το θυγατρικό νουκλίδιο είναι και αυτό ραδιενεργό, τότε υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ του ρυθμού διάσπασης των μητρικών και των θυγατρικών πυρήνων.

Στη δεύτερη περίπτωση, η μέγιστη ενεργότητα των θυγατρικών πυρήνων εμφανίζεται όταν εξισωθούν οι ρυθμοί διάσπασης των μητρικών και των θυγατρικών πυρήνων, δηλαδή όταν μητρικοί & θυγατρικοί πυρήνες βρεθούν σε **ραδιενεργό ισορροπία**.

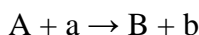
Το φαινόμενο της ραδιενεργού ισορροπίας αξιοποιείται σε εφαρμογές της πυρηνικής ιατρικής, όπως κατά την παραγωγή Τεχνητίου – Tc στη γεννήτρια Mo / Tc.



ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Όταν δύο πυρήνες ή ένας πυρήνας και ένα σωματίδιο βρεθούν σε απόσταση τέτοια ώστε να αλληλεπιδράσουν με την ισχυρή πυρηνική δύναμη, γίνεται ανακατανομή των νουκλεονίων με αποτέλεσμα το σχηματισμό νέων πυρήνων και εκπομπή σωματιδίων.

Σε κάθε πυρηνική αντίδραση:



ισχύουν οι αρχές διατήρησης Ενέργειας, Ορμής – Στροφορμής, Ηλεκτρικού Φορτίου, αλλά και του συνολικού Αριθμού Νουκλεονίων.

Από τη διατήρηση της Ενέργειας, υπό τη συνθήκη ότι ο πυρήνας A είναι ακίνητος, υπολογίζεται η μεταβολή της συνολικής ενέργειας ηρεμίας:

$$Q = M_a C^2 + M_A C^2 - (M_B C^2 + M_b C^2) = K_B + K_b - K_a$$

- Αν $Q > 0$, τότε η αντίδραση είναι αυθόρμητη και **εξώθερμη**.
- Αν $Q < 0$, τότε η αντίδραση είναι **ενδόθερμη**, ενώ μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνον όταν η κινητική ενέργεια του σωματιδίου a είναι μεγαλύτερη από μια τιμή κατωφλίου.
- Αν $Q = 0$, τότε συμβαίνει **ελαστική σκέδαση**, δηλαδή τα αντιδρώντα μένουν αναλλοίωτα μετά την αντίδραση και συμβαίνει μεταφορά κινητικής ενέργειας χωρίς μεταβολή των επιμέρους ενεργειών ηρεμίας.

Οι **ραδιενεργές διασπάσεις**, ενώ θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στις αυθόρμητες πυρηνικές αντιδράσεις, μελετώνται ξεχωριστά διότι δεν είναι δυνατό να ελεγχθούν.

Ιατρικές Εφαρμογές των Πυρηνικών Αντιδράσεων

Μέσω διαφόρων πυρηνικών αντιδράσεων παράγονται τεχνητά ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιούνται σε διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές της Ιατρικής.

- Με αντιδράσεις σε **δέσμες νετρονίων**, συνήθως (n, γ), παράγονται νουκλίδια με πλεόνασμα νετρονίων.
- Με αντιδράσεις σε **δέσμες πρωτονίων**, συνήθως (p, n) ή (p, α), παράγονται νουκλίδια με πλεόνασμα πρωτονίων.

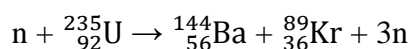
Εξαιτίας του ουδέτερου ηλεκτρικού φορτίου των νετρονίων οι αντιδράσεις σε δέσμες νετρονίων είναι εξώθερμες, σε αντίθεση με τις αντιδράσεις σε δέσμες πρωτονίων που μπορεί να είναι και ενδόθερμες διότι, εξαιτίας του θετικού ηλεκτρικού φορτίου των πρωτονίων, για να πραγματοποιηθούν πρέπει τα πρωτόνια – βλήματα να διαθέτουν τόση κινητική ενέργεια ώστε να μπορούν υπερνικήσουν το απωστικό ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα – στόχου.

Ενεργός Διατομή

Όταν μια δέσμη σωματιδίων προσπίπτει ομοιόμορφα σε δείγμα πυρήνων ενός υλικού, η πιθανότητα να συμβεί αντίδραση είναι ανάλογη του αριθμού πυρήνων ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού και η σταθερά αναλογίας ονομάζεται **ενεργός διατομή – σ**. Η ενεργός διατομή μπορεί να προσομοιωθεί με τη συνολική επιφάνεια που προβάλλουν οι πυρήνες – στόχοι στα σωματίδια – βλήματα.

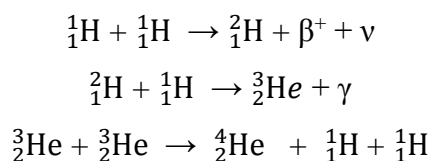
Αντιδράσεις Σχάσης & Σύντηξης

Η **σχάση**, είναι διεργασία κατά την οποία ένας ασταθής πυρήνας μεγάλου μαζικού αριθμού διασπάται σε περίπου ισοδύναμα μέρη είτε αυθόρμητα, όταν υπάρχει μεγάλο πλεόνασμα νετρονίων, είτε με βομβαρδισμό από νετρόνια:



Κατά την σχάση εκλύονται μεγάλα ποσά ενέργειας, ενώ παράγονται νετρόνια που μπορούν να συντηρήσουν την αντίδραση, η οποία ελέγχεται έτσι ώστε μόνον ένα από τα παραγόμενα νετρόνια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συντήρηση της.

Κατά την **σύντηξη**, δύο ή περισσότεροι πυρήνες με μικρό μαζικό αριθμό συνθέτουν έναν βαρύτερο πυρήνα, με ταυτόχρονη έκλυση σημαντικού ποσού ενέργειας. Για να ενεργοποιηθεί η ισχυρή πυρηνική δύναμη και να πραγματοποιηθεί η σύντηξη, θα πρέπει να υπερνικηθούν τα απωστικά ηλεκτρικά πεδία των αρχικών πυρήνων. Για το λόγο αυτό για τη σύντηξη απαιτείται η δαπάνη ενός ποσού ενέργειας που είναι κατά πολύ μικρότερο από το ποσό ενέργειας το οποίο εκλύεται με την ολοκλήρωση της. Ένα κλασικό παράδειγμα σύντηξης είναι:



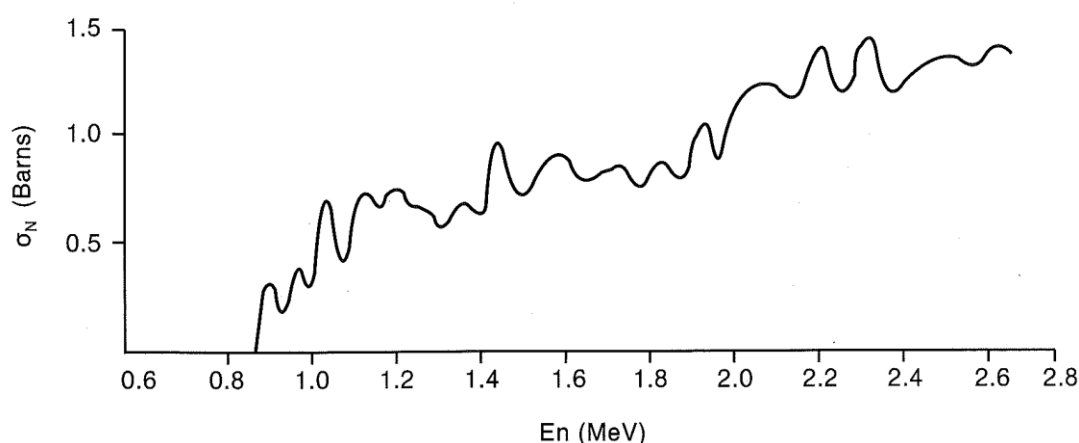
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ & ΥΛΗΣ

Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν κυρίως με τον πυρήνα και παράγουν βαριά φορτισμένα σωματίδια που προκαλούν περαιτέρω ιονισμούς, ενώ ταξινομούνται με κριτήριο την ενέργεια τους σε θερμικά, επιθερμικά, ενδιάμεσα και ταχεία.

Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα ως εξής:

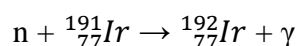
- **Σχάση**, κατά την οποία ο πυρήνας θρυμματίζεται σε μικρότερους πυρήνες, ενώ εκπέμπονται νετρόνια που μπορούν να συντηρήσουν την αντίδραση.
- **Ελαστική Σκέδαση**, κατά την οποία μεταφέρεται στον πυρήνα μέρος της κινητικής ενέργειας του νετρονίου, ενώ η κινητική ενέργεια του συστήματος παραμένει αμετάβλητη.
- **Ανελαστική Σκέδαση**, κατά την οποία το νετρόνιο διαπερνά τον πυρήνα, δηλαδή συλλαμβάνεται προσωρινά. Μετά την αλληλεπίδραση ο πυρήνας είναι διεγερμένος και, ως εκ τούτου, εκπέμπει γ – ακτινοβολία.
- **Μη Ελαστική Σκέδαση**, κατά την οποία το νετρόνιο συλλαμβάνεται από τον πυρήνα και εκπέμπονται βαριά φορτισμένα σωματίδια. Πρόκειται κυρίως για αντιδράσεις (n,α) ή (n,p) .
- **Σύλληψη**, κατά την οποία το νετρόνιο ενσωματώνεται στον πυρήνα χωρίς να εκπέμπονται σωματίδια. Μετά την σύλληψη ο πυρήνας είναι διεγερμένος και εκπέμπει γ – ακτινοβολία, αντίδραση (n,γ) .

Η ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης των νετρονίων με πυρήνες ενός υλικού, σε σχέση με την ενέργεια των νετρονίων, εμφανίζει μη ομαλή μεταβολή:



Αντιδράσεις (n,p) , **νετρονικές ενεργοποιήσεις**, βρίσκουν εφαρμογές στην παραγωγή τεχνητών ραδιοϊσοτόπων.

Σημαντική είναι και η αντίδραση παραγωγής ^{192}Ir για βραχυθεραπεία:



ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ & ΥΛΗΣ

Ως **ακτινοβολία**, ορίζεται η διάδοση ενέργειας. Κατά τη διάδοσή μιας ακτινοβολίας σε υλικό σημειώνεται μεταφορά ενέργειας στους δομικούς λίθους του υλικού, άτομα ή μόρια, με διάφορους μηχανισμούς που καθορίζονται από το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας.

Μια βασική διάκριση των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας, με κριτήριο εάν παράγουν ή όχι ιόντα κατά την αλληλεπίδραση τους με την ύλη, είναι σε:

- **Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες**, όταν αλληλεπιδρούν με τα άτομα του υλικού με αποτέλεσμα την παραγωγή φορτισμένων σωματιδίων, **ιόντα**, τα οποία μπορεί να είναι ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, σωματία α , πρωτόνια, διάφορα φορτισμένα μόρια, άτομα ή συγκροτήματα ατόμων.
- **Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες**, οι οποίες μεταφέρουν ενέργεια στην ύλη με θερμικούς μηχανισμούς και χωρίς να παράγουν φορτισμένα σωματίδια.

Όταν μια ιοντίζουσα ακτινοβολία παράγει φορτισμένα σωματίδια που διαθέτουν επαρκή κινητική ενέργεια ώστε να προκαλούν περαιτέρω ιοντισμούς, δευτερογενείς, ονομάζεται **έμμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία**.

Μια ακτινοβολία, ιοντίζουσα ή μη ιοντίζουσα, μπορεί να είναι:

- **Σωματιδιακή**, όταν μεταφέρει κινητική ενέργεια σωματιδίων που κινούνται μέσα σε κάποιο υλικό και αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια ή τους πυρήνες των ατόμων του υλικού.
- **Κυματική**, όταν μεταφέρει ηλεκτρομαγνητική ή μηχανική ενέργεια στην ύλη ή ακόμη και στο κενό, χωρίς να σημειώνεται μεταφορά μάζας.

Μια **σωματιδιακή ακτινοβολία**, μπορεί να είναι:

- ακτινοβολία νετρονίων,
- ακτινοβολία φορτισμένων σωματιδίων.

Μια **κυματική ακτινοβολία**, μπορεί να είναι:

- μηχανικό κύμα όπως οι υπέρηχοι,
- ηλεκτρομαγνητικό κύμα όπως τα ραδιοκύματα, η γ – ακτινοβολία, αλλά και οι ακτίνες – X.

Τα μηχανικά κύματα, όπως ο ήχος, αλλά και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαμηλών συχνοτήτων, όπως τα ραδιοκύματα, ανήκουν στις μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες, ενώ οι σωματιδιακές ακτινοβολίες, όπως νετρόνια και φορτισμένα σωματίδια, αλλά και ακτινοβολίες φωτονίων – γ ή X είναι ιοντίζουσες.

Η **H/M ακτινοβολία**, δημιουργείται με την παραγωγή και διάδοση H/M κυμάτων στο χώρο και πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ τα μηχανικά κύματα διαδίδονται μόνον εντός ελαστικού υλικού, τα H/M κύματα διαδίδονται όχι μόνο στην ύλη αλλά και στο κενό. Η H/M ακτινοβολία διαδίδεται κατά κβάντα ενέργειας και για να απορροφηθεί από κάποιο υλικό θα πρέπει η ενέργεια των φωτονίων να είναι ισόποση με την ενεργειακή διαφορά δύο καταστάσεων.

Το φάσμα της H/M ακτινοβολίας χωρίζεται στις εξής περιοχές:

- **Ραδιοκύματα**, τα οποία παράγονται με ταλαντώσεις ηλεκτρικού φορτίου, ενώ εμφανίζουν περιορισμένη απορρόφηση.
- **Υπέρυθρο Φως**, το οποίο παράγεται με μοριακές ταλαντώσεις και διέγερση ηλεκτρονίων εξωτερικών στοιβάδων, ενώ εμφανίζει σημαντική απορρόφηση.
- **Ορατό Φως**, το οποίο εκπέμπεται από εξαιρετικά θερμά σώματα όπως είναι ο Ήλιος και παράγεται με διέγερση ηλεκτρονίων εξωτερικών στοιβάδων, ενώ εμφανίζει έντονη απορρόφηση.
- **Υπεριώδες Φως**, το οποίο εκπέμπεται με μηχανισμούς παρόμοιους με αυτούς του ορατού φωτός, ενώ εμφανίζει εξαιρετικά έντονη απορρόφηση.
- **Ιοντίζουσα Ακτινοβολία $\gamma - X$** , για την οποία η απορρόφηση μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας των φωτονίων.

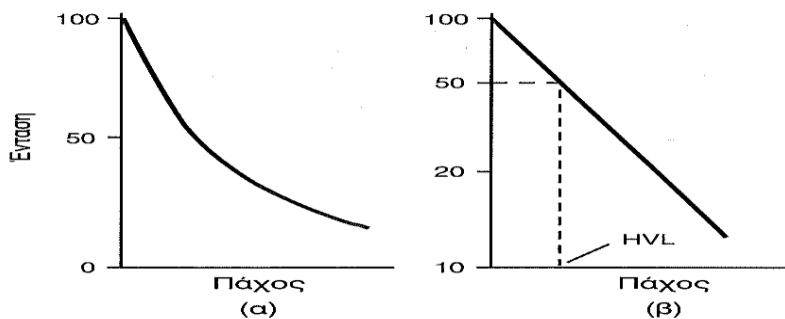
Είναι προφανές ότι από τα Ραδιοκύματα έως και το Υπεριώδες Φως η απορρόφηση αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην περιοχή των φωτονίων $\gamma - X$.

- ✓ *Είναι γνωστό ότι η H/M ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας απορροφάται θερμικά από τα μόρια της ύλης και δεν προκαλεί ιοντισμούς, ενώ τα φωτόνια με υψηλή ενέργεια μπορούν να προκαλούν ιοντισμούς.*

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΑΣ Η/Μ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ & ΥΛΗΣ

Έστω μια λεπτή, μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων που διαδίδονται παράλληλα σε ομογενές υλικό. Ως ένταση – I , της δέσμης, ορίζεται η ενέργεια που μεταφέρεται από τη δέσμη ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου και προφανώς για μια δέσμη φωτονίων δεδομένης ενέργειας η ένταση είναι ανάλογη του αριθμού των φωτονίων. Σύμφωνα με το νόμο εκθετικής εξασθένησης, κατά τη διέλευση μιας λεπτής, μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων που διαδίδονται παράλληλα σε ομογενές υλικό και εξαιτίας της αλληλεπίδρασης φωτονίων με τα άτομα του υλικού, η ένταση της δέσμης μειώνεται εκθετικά ως προς το μήκος διαδρομής της δέσμης μέσα στο υλικό:

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

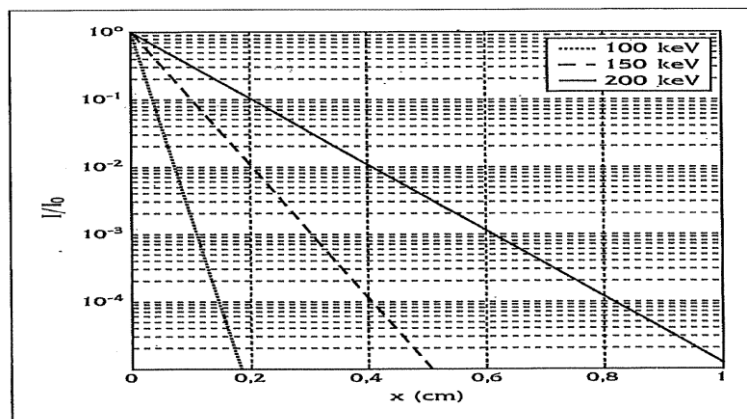


Η σταθερά μ ονομάζεται γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, ενώ ορίζεται ως το ποσοστό φωτονίων που αλληλεπιδρούν με το υλικό ανά μονάδα μήκους διαδρομής και εκφράζει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου της δέσμης ανά μονάδα μήκους διαδρομής μέσα στο υλικό.

Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης – μ , εξαρτάται από:

- την ενέργεια των φωτονίων της δέσμης,
- την πυκνότητα και τον ατομικό αριθμό του υλικού.

Για δεδομένο υλικό σταθερής πυκνότητας ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης – μ μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας των φωτονίων της δέσμης.



- Ως **πάχος υποδιπλασιασμού – HVL**, ορίζεται το μήκος διαδρομής για το οποίο η ένταση μειώνεται στο ήμισυ της αρχικής:

$$HVL = \ln 2 / \mu$$

- Ως **πάχος υποδεκαπλασιασμού – TVL**, ορίζεται το μήκος διαδρομής για το οποίο η ένταση μειώνεται στο ένα δέκατο της αρχικής:

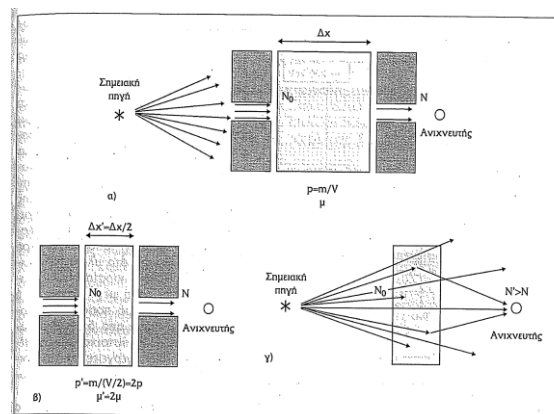
$$TVL = \ln 10 / \mu$$

Προφανώς, τόσο το HVL όσο και το TVL αυξάνονται όταν αυξάνεται η ενέργεια των φωτονίων της δέσμης.

Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης – μ αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού. Η εξάρτηση από την πυκνότητα καθιστά τον συντελεστή μ δύσχρηστο και για το λόγο αυτό ορίζεται ο **μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ/ρ** , ως το πηλίκο του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης – μ προς την πυκνότητα – ρ του υλικού, ο οποίος εκφράζει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου ανά μονάδα μάζας του υλικού.

Ο νόμος της εκθετικής εξασθένησης ισχύει υπό τις εξής προϋποθέσεις:

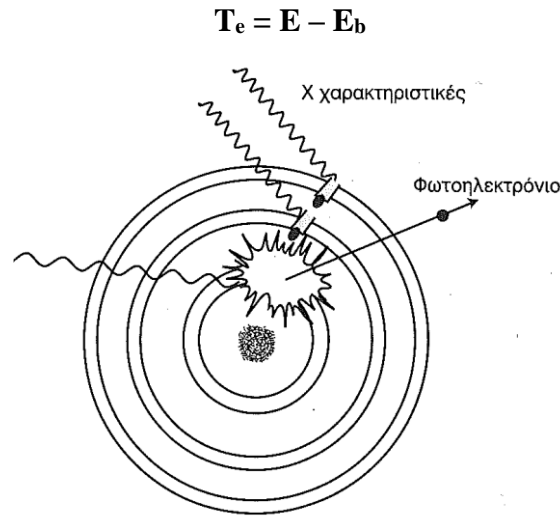
- Λεπτή, παράλληλη δέσμη φωτονίων. Εάν δεν ισχύει αυτό, δηλαδή όταν δεν υπάρχουν «συνθήκες καλής γεωμετρίας», δημιουργείται επαύξηση της δέσμης διότι φωτόνια που αλληλεπιδρούν με σκέδαση μπορεί να μετρηθούν από το σύστημα ανίχνευσης της εξερχόμενης δέσμης με αποτέλεσμα την απόκλιση από την εκθετική συμπεριφορά.



- Ομογενές υλικό. Όταν μια δέσμη φωτονίων διαδίδεται σε υλικό με άτομα που έχουν διαφορετικό Z , ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης – μ/ρ υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους μ/ρ σταθμισμένων με την κατά βάρος σύσταση.
- Μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων. Σε μια πολυενεργειακή δέσμη, τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας μειώνονται συντομότερα με αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης ενέργειας των φωτονίων της δέσμης.

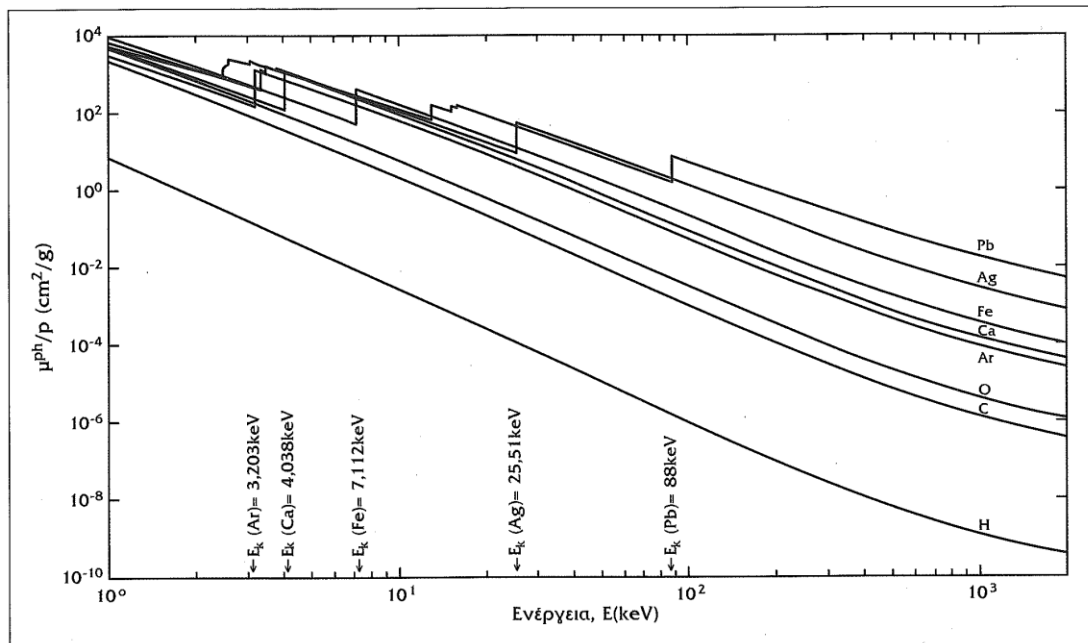
Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με άτομο και εκπέμπεται ηλεκτρόνιο – **φωτοηλεκτρόνιο**, με κινητική ενέργεια:



Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:

- αυξάνεται με τον ατομικό αριθμό
- μειώνεται με την ενέργεια του φωτονίου

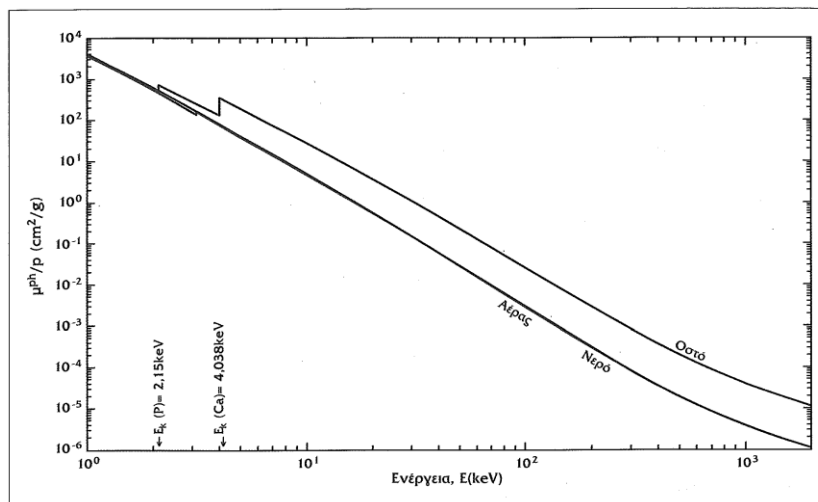


Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο η ενέργεια του φωτονίου απορροφάται πλήρως από το άτομο και το φωτοηλεκτρόνιο εκπέμπεται από κάποια στοιβάδα μόνον όταν η ενέργεια E του φωτονίου είναι, έστω οριακά, μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης E_b του ηλεκτρονίου στη συγκεκριμένη στοιβάδα. Αυτό έχει συνέπεια, για στοιχεία υψηλού Z , την εμφάνιση ασυνεχειών που αντιστοιχούν στις ενέργειες σύνδεσης των διαφόρων στοιβάδων, ενώ για στοιχεία χαμηλού Z δεν υπάρχουν ασυνέχειες.

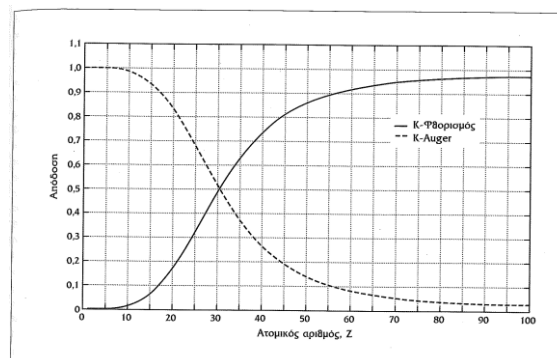
Η εμφάνιση ασυνεχειών εξηγείται από το γεγονός ότι αν η ενέργεια του φωτονίου είναι, έστω και οριακά, μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης μιας στοιβάδας τότε ελευθερώνεται ηλεκτρόνιο από τη στοιβάδα ενώ εάν η ενέργεια του φωτονίου γίνει, έστω και οριακά, μικρότερη από την ενέργεια σύνδεσης της στοιβάδας δεν μπορεί να συμβεί αυτό με συνέπεια την απότομη μείωση της πιθανότητας αλληλεπίδρασης.

Επίσης, φαίνεται ότι οι αιχμές είναι εντονότερες για την K – στοιβάδα σε σύγκριση με τις αιχμές των άλλων στοιβάδων και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με φωτοηλεκτρικό είναι μεγαλύτερη για τα ηλεκτρόνια εσωτερικών στοιβάδων και ιδιαίτερα της K – στοιβάδας.

Ειδικότερα για τα βιολογικά υλικά πρέπει να σημειωθεί ότι μια μικρή μεταβολή του Z συνεπάγεται σημαντική μεταβολή στην πιθανότητα αλληλεπίδρασης:



Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει ιονισμός του ατόμου διότι εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας και, κατά συνέπεια, το άτομο μεταβαίνει σε μια διεγερμένη κατάσταση. Η αποδιέγερση του ατόμου γίνεται με μετάπτωση ενός ε εξωτερικής στοιβάδας που ακολουθείται από εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίου Auger.

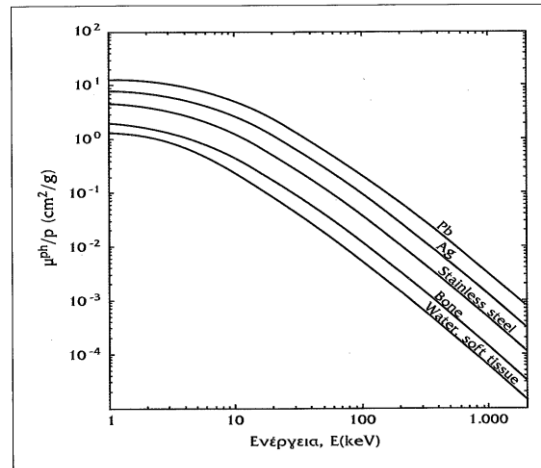


Για τα βιολογικά υλικά πιθανότερη είναι η εκπομπή ηλεκτρονίου Auger.

Σύμφωνη Σκέδαση – Rayleigh

Κατά τη σύμφωνη σκέδαση ενός φωτονίου με το άτομο παράγεται ένα δευτερογενές φωτόνιο που κινείται σχεδόν στην ίδια διεύθυνση με το πρωτογενές φωτόνιο και έχει την ίδια ενέργεια με αυτό.

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με σύμφωνη σκέδαση μειώνεται με την ενέργεια του φωτονίου και αυξάνεται με τον ατομικό αριθμό του υλικού.

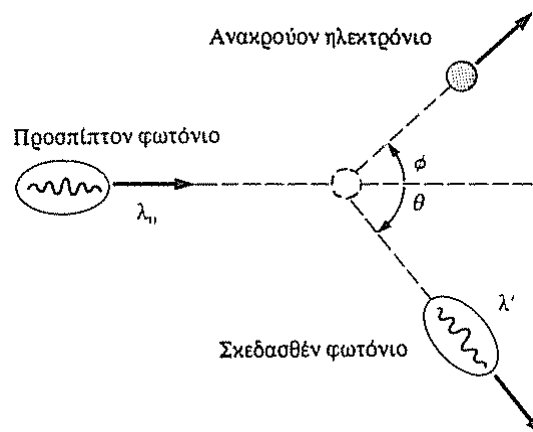


Η σύμφωνη σκέδαση είναι πιθανή για ενέργειες που υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ενώ δεν συνεπάγεται τη μεταφορά ενέργειας στο άτομο. Το γεγονός αυτό καθιστά τη σύμφωνη σκέδαση μη σημαντική συνιστώσα της αλληλεπίδρασης ιοντίζουσας H/M ακτινοβολίας και ύλης.

Ασύμφωνη Σκέδαση – Compton

Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, δηλαδή ηλεκτρόνιο με κατά πολύ μικρότερη ενέργεια σύνδεσης από την ενέργεια του φωτονίου, με αποτέλεσμα την σκέδαση του φωτονίου με ενέργεια E_{sc} , μικρότερη από την αρχική ενέργεια E , ενώ το ηλεκτρόνιο κινείται με ενέργεια:

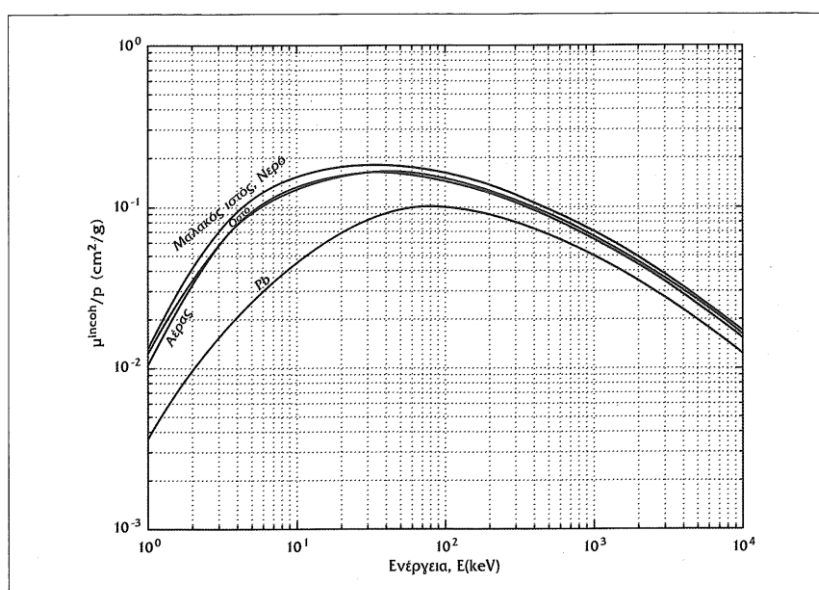
$$T_e = E - E_{sc}$$



Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης ακολουθεί την στατιστική κατανομή Klein – Nishina, από την οποία εξάγεται ότι:

- η **γωνία σκέδασης θ** , η οποία ορίζεται από τη διεύθυνση του σκεδασμένου φωτονίου, μειώνεται όταν αυξάνεται η ενέργεια του πρωτογενούς φωτονίου,
- η **ενέργεια T_e / E** , δηλαδή το ποσοστό της ενέργειας του αρχικού φωτονίου που μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο, αυξάνεται όταν αυξάνεται η ενέργεια του πρωτογενούς φωτονίου.

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με σκέδαση Compton, στις χαμηλές ενέργειες, είναι μικρότερη από την πιθανότητα αλληλεπίδρασης με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ενώ αυξάνεται μέχρι το επίπεδο των 100 KeV και, στη συνέχεια, μειώνεται.



Επίσης, η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με σκέδαση Compton είναι περίπου ίδια για τα ελαφρά – βιολογικά υλικά.

Δίδυμη Γένεση

Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του ατόμου με συνέπεια την απορρόφηση του και την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου.

Από την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας, προκύπτει:

$$E = 2 m_e c^2 + T_e^- + T_e^+ \Rightarrow E \geq 1.02 \text{ MeV}$$

Προφανώς για να συμβεί η δίδυμη γένεση θα πρέπει η ενέργεια E του φωτονίου να ξεπερνά ένα κατώτατο όριο που προσδιορίζεται σε περίπου 1.02 MeV.

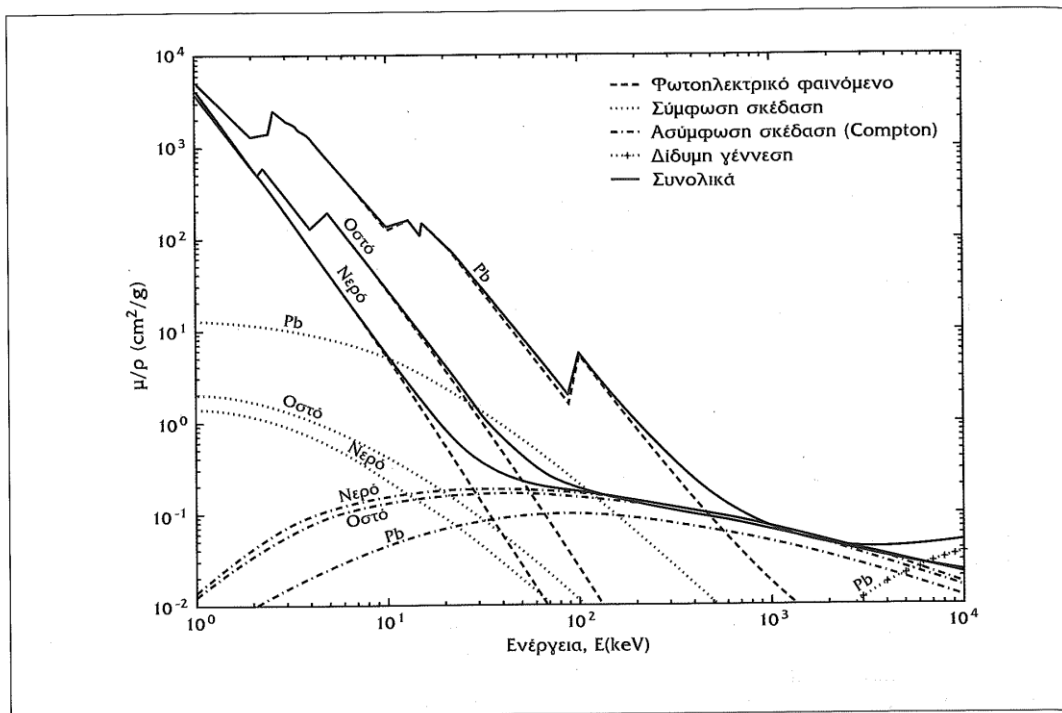
Η δίδυμη γένεση είναι ο μοναδικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης της ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας με την ύλη, κατά την οποία η πιθανότητα αλληλεπίδρασης αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση της ενέργειας του φωτονίου.

Σχετική Πιθανότητα των Φαινομένων Αλληλεπίδρασης

Ιοντίζουσας Η/Μ Ακτινοβολίας & Ύλης

Κατά τη διέλευση ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας μέσα σε κάποιο υλικό συμβαίνουν ταυτόχρονα, με διαφορετική συχνότητα εμφάνισης άρα και πιθανότητα, περισσότερα του ενός φαινόμενα αλληλεπίδρασης. Ο ολικός συντελεστής εξασθένησης προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους συντελεστών:

$$\mu = \mu^{\text{ph}} + \mu^{\text{coh}} + \mu^{\text{incoh}} + \mu^{\text{pp}}$$
$$\mu/\rho = \mu/\rho^{\text{ph}} + \mu/\rho^{\text{coh}} + \mu/\rho^{\text{incoh}} + \mu/\rho^{\text{pp}}$$



Φαίνεται ότι:

- Σε χαμηλές ενέργειες, για το σύνολο των υλικών, είναι πιθανότερο να συμβεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.
- Στις ενδιάμεσες ενέργειες, ιδιαίτερα για βιολογικά υλικά, πιθανότερη είναι η σκέδαση Compton. Αλλά, ειδικά για ενέργειες 40 – 100 KeV, η πιθανότητα να συμβεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παραμένει σημαντική.
- Στις υψηλές ενέργειες, έως τα 1.02 MeV που εμφανίζεται η δίδυμη γέννηση, η πιθανότητα να συμβεί σκέδαση Compton είναι συντριπτικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πιθανότητα για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.
- Σε εξαιρετικά υψηλές ενέργειες επικρατεί η δίδυμη γέννηση.

Τα προηγούμενα συμπεράσματα καθορίζουν, σε μεγάλο βαθμό, τα κριτήρια επιλογής των ενεργειών των ακτίνων – X που χρησιμοποιούνται στην **Ακτινοδιαγνωστική**.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ & ΥΛΗΣ

Φορτισμένα σωματίδια όπως e^- , e^+ , p^+ , σωματίδια α και βαρέα ιόντα παράγονται με διάφορους μηχανισμούς μέσα στην ύλη και, εάν έχουν κατάλληλη κινητική ενέργεια, μπορεί να αποτελέσουν ιοντίζουσα ακτινοβολία διότι εξαιτίας του φορτίου τους είναι σε θέση να αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά με τα άτομα του υλικού.

Τα φορτισμένα σωματίδια μεταφέρουν ενέργεια στην ύλη με τους εξής μηχανισμούς:

- Αλληλεπιδράσεις με τα ηλεκτρόνια των ατόμων, **σκεδάσεις**, με συνέπεια να προκαλούνται διεγέρσεις – ιοντισμοί και τελικό αποτέλεσμα την εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας.
- Αλληλεπίδραση με τους πυρήνες των ατόμων, **πέδηση**, με αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με συνεχές φάσμα.

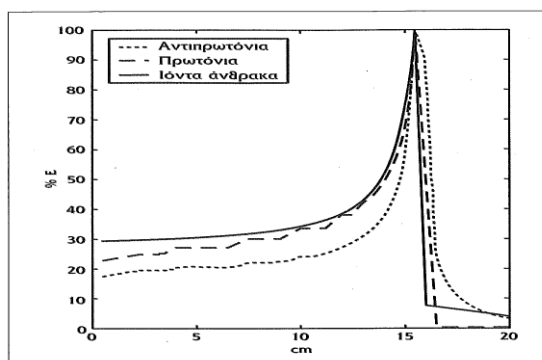
Η απώλεια κινητικής ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων ανά μονάδα μήκους διαδρομής στο υλικό καλείται ανασχετική ισχύς $\frac{dE}{dx}$. Με βάση την ανασχετική ισχύ

ορίζεται η **μαζική ανασχετική ισχύς**: $S = \frac{dE}{\rho dx}$. Η μαζική ανασχετική ισχύς εκφράζει την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μάζας του υλικού, ενώ υπολογίζεται για κάθε επιμέρους μηχανισμό αλληλεπίδρασης και ισχύει: $S = S_{col} + S_{rad}$.

Ο συντελεστής S_{col} εξαρτάται από την ενέργεια και το φορτίο των σωματιδίων, αλλά και το πηλίκο Z / AB και την μέση ενέργεια διέγερσης του υλικού.

Ο συντελεστής S_{rad} εξαρτάται από την ενέργεια των φορτισμένων σωματιδίων, αλλά και τους παράγοντες Z^2 και Z / AB του υλικού.

Η ανασχετική ισχύς εξαιτίας σκεδάσεων και ιοντισμών μεγιστοποιείται στις χαμηλές ενέργειες. Αυτό οφείλεται στο ότι η σκέδαση για φορτισμένο σωματίδιο με χαμηλή ενέργεια, το οποίο κινείται σχετικά αργά, διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα τη μεταφορά σχετικά μεγαλύτερου ποσού ενέργειας στο υλικό. Με βάση αυτή τη διαπίστωση ερμηνεύεται η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης απώλειας ενέργειας ως προς το μήκος διαδρομής στο υλικό, **καμπύλη Bragg**:



Τα ηλεκτρόνια εξαιτίας της μικρής μάζας εμφανίζουν ακανόνιστη, τυχαία διαδρομή με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιορισθεί επακριβώς το μήκος διαδρομής τους μέσα στο υλικό. Κατά συνέπεια καμπύλη Bragg μπορεί να γίνει μόνον για τα βαρέα φορτισμένα σωματίδια, όπως τα πρωτόνια.

Η μέγιστη απόσταση που διανύουν τα φορτισμένα σωματίδια, μέσα στο υλικό, μέχρι να απολέσουν το σύνολο της ενέργειας τους ονομάζεται **εμβέλεια**.

ΑΚΤΙΝΕΣ – X

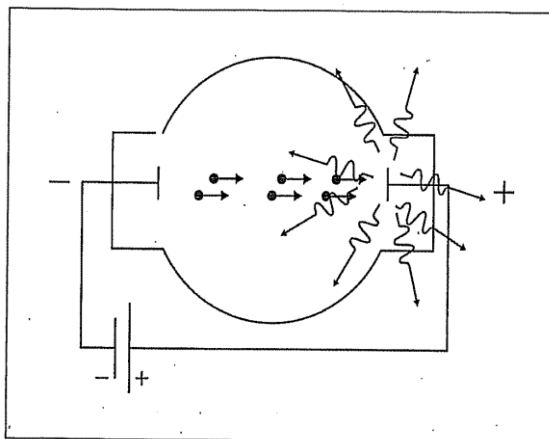
Η **ακτινοβολία – X**, είναι Η/Μ ακτινοβολία που εκπέμπεται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας προσπίπτουν σε κάποιο υλικό. Κατά την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με το υλικό παράγονται φωτόνια:

- εξαιτίας ιονισμών και διεγέρσεων των ατόμων του υλικού που προκαλούνται από σκεδάσεις των ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας με δέσμια ηλεκτρόνια των ατόμων και ακολουθούνται από εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας,
- εξαιτίας αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας με το πεδίο των πυρήνων που ακολουθείται από την εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης.

Η ενέργειες των ακτίνων – X που χρησιμοποιούνται στην ακτινοδιάγνωση είναι της τάξης των KeV και παράγονται στις Λυχνίες – X, ενώ οι αντίστοιχες ενέργειες για τις ακτίνες – X που χρησιμοποιούνται στην ακτινοθεραπεία είναι της τάξης των MeV και παράγονται σε γραμμικούς επιταχυντές.

Λυχνία – X

Μεταξύ δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων εφαρμόζεται υψηλή τάση, η οποία επιταχύνει ηλεκτρόνια που παράγονται στην κάθοδο με **θερμιονική εκπομπή**, δηλαδή εκπομπή ηλεκτρονίων εξαιτίας θέρμανσης του μετάλλου. Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται στην κάθοδο κινούνται προς την άνοδο στην οποία φθάνουν με κινητική ενέργεια που είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης υψηλής τάσης V.



Όταν τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδράσουν με το υλικό της ανόδου παράγονται φωτόνια χαρακτηριστικής ακτινοβολίας, αλλά και φωτόνια ακτινοβολίας πέδησης. Ειδικότερα:

- **χαρακτηριστική ακτινοβολία**, παράγεται όταν τα ηλεκτρόνια έχουν κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια ιονισμού των ηλεκτρονίων της ανόδου,
- ενώ η **ακτινοβολία πέδησης**, παράγεται ανεξαρτήτως της τιμής της υψηλής τάσης που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο ανά μονάδα χρόνου ορίζει το **ρεύμα**, της **λυχνίας**. Από το ρεύμα αυτό καθορίζεται ρυθμός παραγωγής φωτονίων στην άνοδο, δηλαδή η ένταση της ακτινοβολίας – X. Επίσης η ενέργεια της δέσμης των ακτίνων – X, δηλαδή η διεισδυτική τους ικανότητα, εξαρτάται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων και, άρα, από την τιμή της υψηλής τάσης V.

Για την παραγωγή ακτίνων – X υψηλής έντασης απαιτείται αποδοτική θερμιονική εκπομπή. Αυτό επιτυγχάνεται με λεπτή σπειροειδή κάθοδο. Επίσης, η κάθοδος πρέπει να εμφανίζει υψηλή θερμική αντοχή και, για το λόγο αυτό, είναι κατασκευασμένη από Βολφράμιο.

Η άνοδος είναι κατασκευασμένη, επίσης, από Βολφράμιο που έχει υψηλό ατομικό αριθμό ώστε να εκπέμπονται κατά το δυνατό περισσότερες ακτίνες – X από πέδηση. Η θερμική αντοχή της ανόδου ενισχύεται από το ότι αφενός είναι κατασκευασμένη από Βολφράμιο, αφετέρου είναι περιστρεφόμενη και το θερμικό φορτίο κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Για την εκπομπή λεπτής δέσμης ακτίνων – X η άνοδος έχει μικρό μέγεθος, αλλά όχι τόσο ώστε να μειώνεται σημαντικά η θερμική της αντοχή.

Εξαιτίας του μικρού μεγέθους της ανόδου, απαιτείται το νέφος των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την κάθοδο να κατευθύνεται προς μια μικρή περιοχή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται διάταξη εστίασης, δηλαδή μεταλλική κοιλότητα στην οποία είναι τοποθετημένη η κάθοδος και στο ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό.

Η Λυχνία – X εκπέμπει ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις και, για το λόγο αυτό, θωρακίζεται από υλικό υψηλού ατομικού αριθμού. Στη θωράκιση υπάρχει ένα μικρό παράθυρο από το οποίο εξέρχεται η ωφέλιμη δέσμη – «παράθυρο» της λυχνίας.

Για την αποφυγή ενεργειακών απωλειών, κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων προς την άνοδο, η διάταξη των ηλεκτροδίων κλείνεται σε περίβλημα μέσα στο οποίο υπάρχουν συνθήκες κενού. Στις αρχικές λυχνίες το περίβλημα ήταν γυάλινο, αλλά σε σύγχρονες λυχνίες το περίβλημα είναι μεταλλικό. Με τον τρόπο αυτό:

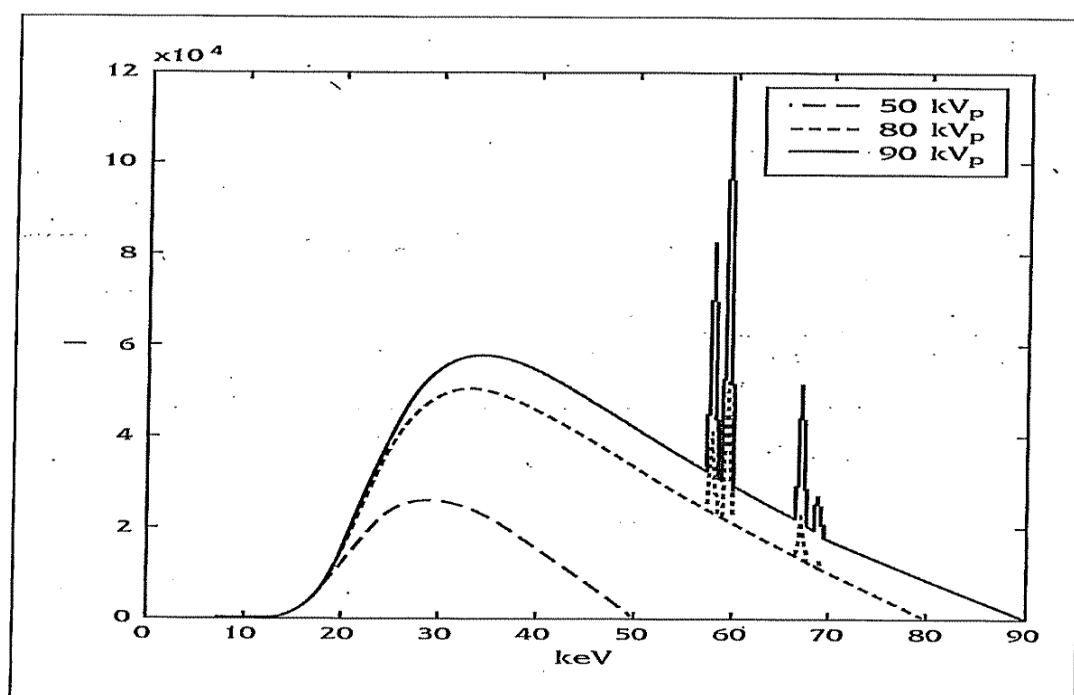
- αποφεύγονται ηλεκτρικές εκκενώσεις, εξαιτίας των επικαθίσεων Βολφραμίου που οφείλονται σε εξάχνωση της ανόδου, διότι το περίβλημα γειώνεται,
- ενισχύεται η απαγωγή της θερμότητας από το εσωτερικό της λυχνίας, διότι το μεταλλικό περίβλημα είναι καλός αγωγός της θερμότητας.

Σε λυχνίες με μεταλλικό περίβλημα η ωφέλιμη δέσμη των ακτίνων – X εξέρχεται από ένα παράθυρο υλικού με χαμηλό ατομικό αριθμό, ώστε να μην εξασθενεί η ένταση της δέσμης.

Στις **ακτινοδιαγνωστικές εφαρμογές**, απεικονίζονται διαφορές της εξερχόμενης, από τον εξεταζόμενο, έντασης ακτίνων – X που οφείλονται στην εσωτερική του δομή και, για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται **φίλτρα**, ή **ηθμοί**, συνήθως **αλουμινίου**, τα οποία αποκόπτουν τις χαμηλής ενέργειας ακτίνες – X που εισερχόμενες στον εξεταζόμενο θα απορροφούνταν εξ ολοκλήρου χωρίς να συμβάλλουν στην απεικόνιση.

Το **φάσμα**, των **ακτίνων – X**, είναι σύνθετο και προκύπτει, συνδυαστικά, από:

- το γραμμικό φάσμα των ακτίνων – X, λόγω χαρακτηριστικής ακτινοβολίας,
- το συνεχές φάσμα των ακτίνων – X, λόγω πέδησης.



- Σε σχετικά χαμηλές τιμές της τάσης, 50 KV, το φάσμα είναι συνεχές, διότι η ενέργεια των ηλεκτρονίων δεν επαρκεί για να συμβούν ιονισμοί στην άνοδο και, επομένως, η δέσμη αποτελείται από ακτίνες – X πέδησης.
- Σε υψηλότερες τιμές της τάσης, 80 – 90 KV, εμφανίζονται γραμμές εξαιτίας ακτίνων – X χαρακτηριστικής ακτινοβολίας και το φάσμα γίνεται σύνθετο.
- Το ύψος των χαρακτηριστικών είναι μεγαλύτερο όταν αυξάνεται η τάση, διότι τότε αυξάνεται και η πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να προκαλέσει ιονισμό στην K – στοιβάδα.

Σε ειδικές εφαρμογές, όπως η μαστογραφία, αντί του Βολφραμίου χρησιμοποιούνται υλικά ανόδου που εξασφαλίζουν εκπομπή ακτίνων – X κατάλληλης ενέργειας ώστε να γίνει απεικόνιση. Τέτοιο υλικό είναι το Μολυβένιο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως φίλτρο για την αποκοπή ακτίνων – X που δεν έχουν την επιθυμητή ενέργεια.

Γραμμικός Επιταχυντής

Σκοπός της ακτινοθεραπείας είναι η μεταφορά της μέγιστης δυνατής ενέργειας σε μια περιοχή του ασθενούς και η απαιτούμενη ενέργεια των ακτίνων – X είναι της τάξεως των MeV. Ακτίνες – X τόσο υψηλής ενέργειας δεν μπορούν να παραχθούν σε λυχνίες και, επομένως, χρησιμοποιούνται γραμμικοί επιταχυντές ηλεκτρονίων στους οποίους τα ηλεκτρόνια δεν επιταχύνονται από κάποια εφαρμοζόμενη τάση, αλλά από H/M πεδία υψηλής ισχύος, στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Στους γραμμικούς επιταχυντές ηλεκτρόνια επιταχύνονται σε υψηλές ενέργειες με τη χρήση πεδίων ραδιοσυχνότητας – RF και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε άμεσα, για ακτινοθεραπεία, είτε για την παραγωγή ακτίνων – X.

Πυροβόλο ηλεκτρονίων, **electron gun**, παράγει με θερμιονική εκπομπή ηλεκτρόνια υπό μορφή παλμών. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από κυματοδηγό που χρησιμοποιεί H/M πεδία ραδιοσυχνότητας – RF και, όταν αποκτήσουν την επιθυμητή ενέργεια, κατευθύνονται στην κεφαλή του επιταχυντή, όπου παράγεται η **ωφέλιμη δέσμη**, της ακτινοβολίας.

Για την **παραγωγή ακτίνων – X**, τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν σε υλικό, με υψηλό ατομικό αριθμό και ένα μέρος της ενέργειας τους να μετατρέπεται σε ακτίνες – X, ενώ, ειδικό φίλτρο – **φίλτρο επιπέδωσης**, χρησιμοποιείται ώστε:

- η δέσμη των ακτίνων – X να γίνει κατά το δυνατόν ομοιογενής ως προς την ένταση της,
- να απορροφηθούν τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας.

Το πεδίο ακτινοβολήσης του ασθενή ορίζεται από **διαφράγματα – κατευθυντήρες**, τα οποία κατασκευάζονται από υλικό υψηλού ατομικού αριθμού και πυκνότητας και βρίσκονται στην κεφαλή του επιταχυντή. Στους σύγχρονους επιταχυντές υπάρχουν τρεις κατευθυντήρες:

- ο **πρωτεύων κατευθυντήρας**, ο οποίος καθορίζει το μέγιστο διαθέσιμο πεδίο, δηλαδή τις μέγιστες διαστάσεις της δέσμης,
- ο **δευτερεύων κατευθυντήρας**, ο οποίος δημιουργεί ορθοκανονικά πεδία που προσπίπτουν στον ασθενή,
- ο **κατευθυντήρας πολλαπλών φύλλων**, ο οποίος διαμορφώνει το σχήμα του πεδίου ώστε αυτό να προσαρμόζεται στο περίγραμμα του όγκου – στόχου.

ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

Η αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη έχει ως αποτέλεσμα την **απορρόφηση ενέργειας**, μέσω διεγέρσεων και ιονισμών των ατόμων και των μορίων, η οποία μπορεί να προκαλέσει χημικές μεταβολές.

Τέτοιου είδους μεταβολές είναι:

- η διάσπαση χημικών δεσμών,
- ο ιονισμός ενός μορίου,
- ο σχηματισμός ελευθέρων ριζών που δρουν οξειδωτικά και προκαλούν περαιτέρω χημικές μεταβολές στα βιομόρια.

Το κύτταρο διαθέτει αποτελεσματικούς **μηχανισμούς επιδιόρθωσης**, των διαφόρων βλαβών που προκαλούνται από την απορρόφηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Παρά ταύτα, ένα ποσοστό των βλαβών παραμένουν και μπορούν να προκαλέσουν ποικίλα βιολογικά αποτελέσματα σε κυτταρικό επίπεδο όπως:

- γονιδιακές μεταλλάξεις & χρωμοσωμικές ανωμαλίες που αποτελούν μεταβολή του γενετικού υλικού και επιφέρουν **απώτερα βιολογικά αποτελέσματα**, τα οποία εκδηλώνονται σε χρονικό διάστημα ετών,
- κυτταρικό θάνατο που επιφέρει **άμεσα βιολογικά αποτελέσματα**, τα οποία εμφανίζονται σε χρονικό διάστημα εβδομάδων ή μηνών.

Η βιολογική δράση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας εκδηλώνεται με χρονική ακολουθία διαδοχικών σταδίων:

- **Φυσικό Στάδιο**, κατά το οποίο απορροφάται η ενέργεια και προκαλούνται διεγέρσεις & ιονισμοί.
- **Φυσικοχημικό Στάδιο**, κατά το οποίο αναδιατάσσονται τα διεγερμένα και ιονισμένα μόρια και σχηματίζονται δραστικές ελεύθερες ρίζες, κυρίως με τη ραδιόλυση του νερού.
- **Χημικό Στάδιο**, κατά το οποίο παράγονται άτυπα μόρια και προκαλούνται βλάβες στα βιομόρια.
- **Βιοχημικό Στάδιο**, κατά το οποίο αναγνωρίζονται και επιδιορθώνονται μέσω ενζυμικών αντιδράσεων οι βλάβες στα βιομόρια.
- **Κυτταρικό Στάδιο**, κατά το οποίο εκδηλώνονται, αλλά και επιδιορθώνονται οι βλάβες σε κυτταρικό επίπεδο και σε επίπεδο ιστών.
- **Συστηματικό Στάδιο**, κατά το οποίο εκδηλώνονται ορμονικές μεταβολές, ανοσολογικές αντιδράσεις, διάφορες λειτουργικές βλάβες και καρκινογένεση.

Ως **άμεση δράση**, ιοντίζουσας ακτινοβολίας ορίζονται αλληλεπιδράσεις με βιομόρια όπως το DNA και το RNA που προκαλούν θραύση χημικών δεσμών, με αποτέλεσμα την παραγωγή ελευθέρων ριζών ή τη διάσπαση του μορίου σε μικρότερα. Τα μόρια που δημιουργούνται εκδηλώνουν διαφορετική φυσική και χημική συμπεριφορά, ενώ το ίδιο συμβαίνει και σε μόρια που δεν διασπώνται αλλά μεταβάλλουν τη δομή τους εξαιτίας της θραύσης μη ομοιοπολικών δεσμών. Η άμεση δράση εκδηλώνεται από ακτινοβολίες με **υψηλό LET**, δηλαδή ακτινοβολίες που εναποθέτουν σχετικά υψηλό ποσό ενέργειας σε κάθε μονάδα μήκους διαδρομής τους μέσα στην ύλη.

Ως **έμμεση δράση**, ιοντίζουσας ακτινοβολίας ορίζονται οι μεταβολές που οφείλονται σε χημικές αντιδράσεις διαφόρων βιομορίων και ελευθέρων ριζών που σχηματίζονται κατά την ραδιόλυση H_2O . Ως **ελεύθερη ρίζα**, ορίζεται άτομο ή συγκρότημα ατόμων που διαθέτει ασύζευκτα ηλεκτρόνια και χαρακτηρίζεται από υψηλή δραστηριότητα.

Κατά την **ραδιόλυση H_2O** , η ιοντίζουσα ακτινοβολία απορροφάται από μόρια νερού με αποτέλεσμα την παραγωγή ιονισμένων και διεγερμένων μορίων H_2O , αλλά και ελευθέρων ηλεκτρονίων.

- Τα **ελεύθερα ηλεκτρόνια**, έλκονται από τα ισχυρά πολικά μόρια του νερού και μετατρέπονται σε ενυδατωμένα ηλεκτρόνια.
- Τα **ιονισμένα μόρια H_2O** , διασπώνται σε κατιόντα υδρογόνου και ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου.
- Τα **διεγερμένα μόρια H_2O** , κατά την αποδιέγερσή, μπορεί να διασπασθούν σε ελεύθερες ρίζες υδρογόνου και υδροξυλίου.

Τα προϊόντα των διεργασιών αυτών διαχέονται μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν με αποτέλεσμα:

- την αδρανοποίηση ελευθέρων ριζών,
- την παραγωγή ισχυρά οξειδωτικού H_2O_2 , από το οποίο μπορεί να παραχθεί η δραστική ρίζα του υπεροξυλίου,
- την άμεση παραγωγή ριζών υπεροξυλίου.

Οι ελεύθερες ρίζες του υδρογόνου είναι αναγωγικά σώματα, ενώ οι ρίζες υδροξυλίου έχουν οξειδωτικό χαρακτήρα. Εξαιτίας της παραγωγής υπεροξειδίου του υδρογόνου και υπεροξυλίου, τελικά, επικρατεί ο οξειδωτικός χαρακτήρας και η ραδιόλυση H_2O προκαλεί την οξείδωση διαφόρων βιομορίων στο κυτταρόπλασμα, όταν αυτό εκτεθεί σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, με αποτέλεσμα πολυμερισμούς και αποπολυμερισμούς, οι οποίοι επιφέρουν μεταβολή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων.

Όταν το DNA εκτεθεί σε ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να προκληθεί αποσύνθεση, βλάβη βάσεων, ενδοκλωνική – διακλωνική – διαμοριακή σύνδεση με άλλα μόρια DNA ή πρωτεΐνες. Ειδικά η θραύση στο φωσφοδιεστερικό δεσμό έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση του ενός ή και των δύο κλώνων του DNA, αντίστοιχα SSB – DSB, που μπορεί να προκαλέσουν κυτταρικό θάνατο. Παρά το γεγονός ότι το κύτταρο διαθέτει εξαιρετικά αποτελεσματικούς μηχανισμούς επιδιόρθωσης, ένας αριθμός βλαβών του DNA παραμένει και, με σημαντικότερες από αυτές τις DSB, αποτελεί πρόδρομο των διαφόρων βιολογικών αποτελεσμάτων.

Βλάβες σε Κυτταρικό Επίπεδο

Οι βλάβες βάσεων και οι SSB – DSB μπορεί να επιφέρουν αλλαγές στην αλληλουχία των βάσεων στο DNA, με τελικό αποτέλεσμα τις **γονιδιακές μεταλλάξεις**. Συνέπεια των μεταλλάξεων είναι είτε η έκφραση τροποποιημένων πρωτεϊνών, είτε η μεταβολή των επιπέδων μιας φυσιολογικής πρωτεΐνης. Η συχνότητα των μεταλλάξεων αυξάνει με την αύξηση της δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας, αλλά σε πολύ υψηλά επίπεδα δόσεων επικρατεί ο κυτταρικός θάνατος και η συχνότητα εμφάνισης μεταλλαγμένων κυττάρων μειώνεται.

Οι μη επιδιορθωμένες DSB μπορεί να προκαλέσουν **χρωμοσωματικές ανωμαλίες**, οι οποίες γίνονται αντιληπτές στα θυγατρικά κύτταρα, μετά την κυτταρική διαίρεση. Πρόκειται για ανταλλαγές τμημάτων DNA μεταξύ διαφορετικών χρωμοσωμάτων, ή μεταξύ χρωματίδων, ή και μεταξύ τμημάτων της ίδιας χρωματίδας. Ανάλογα με τη φάση κυτταρικής διαίρεσης στην οποία συμβαίνουν, G1 – G2, οι χρωμοσωματικές ανωμαλίες διακρίνονται σε χρωμοσωματικές ή χρωματιδικές, αντίστοιχα.

Ο **κυτταρικός θάνατος**, συνδέεται με την έκταση της βλάβης στα χρωμοσώματα κατά τη φάση της πρώτης μίτωσης. Ειδικότερα:

- Σε εξαιρετικά υψηλή δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας, προκαλείται σημαντική βλάβη στο DNA, με αποτέλεσμα τη **νέκρωση**, του κυττάρου, δηλαδή αύξηση του κυτταρικού όγκου και ρήξη της κυτταρικής μεμβράνης.
- Χαμηλότερες δόσεις ιοντίζουσας ακτινοβολίας προκαλούν **άμεση απόπτωση**, δηλαδή συμπύκνωση της χρωματίνης και συρρίκνωση του πυρήνα, πτύχωση της κυτταρικής μεμβράνης και, τελικά, συρρίκνωση του κυττάρου.
- Μικρή δόση ακτινοβολίας προκαλεί επιδιορθώσιμες βλάβες. Σε περίπτωση μη επιτυχούς επιδιόρθωσης των βλαβών, το κύτταρο πολλαπλασιάζεται μέχρι να συμβεί **καθυστερημένη απόπτωση**, ή **νέκρωση**.

Εκτός από τις μη επιδιορθώσιμες ή ατελώς επιδιορθωμένες βλάβες του DNA και κυρίως τις DSB, βιολογικά αποτελέσματα μπορεί να προκαλέσουν:

- η **προσαρμογή της απόκρισης**, η οποία συντελεί στην αυξημένη αντοχή του κυττάρου σε κάθε επόμενη ακτινοβολήση,
- **επιγενετικές αποκρίσεις**, όπως γονιδιακή αστάθεια και μεταβίβαση σημάτων μεταξύ κυττάρων, δηλαδή αποκρίσεις που συμβαίνουν χωρίς να σημειωθεί μεταβολή στο DNA.

Κύτταρα που εμφανίζουν ένα διαρκώς υψηλό επίπεδο χρωμοσωματικών ανωμαλιών μπορεί να επιβιώνουν, αποδεικνύοντας ότι η ιοντίζουσα ακτινοβολία ενδέχεται να προκαλεί αποτελέσματα διάρκειας που εμφανίζονται ως **γονιδιακή αστάθεια**.

Κύτταρα δεν έχουν ακτινοβοληθεί μπορεί να υποστούν μεταλλάξεις ή και θάνατο, εφόσον αποκριθούν σε **μεταβίβαση σημάτων**, τα οποία λαμβάνουν από γειτονικά κύτταρα που έχουν ακτινοβοληθεί.

Τροποποιητικοί Μηχανισμοί της Δράσης Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας

Η έκταση των αποτελεσμάτων της δράσης μιας ιοντίζουσας ακτινοβολίας εξαρτώνται από φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς παράγοντες.

Στους **φυσικούς παράγοντες**, περιλαμβάνονται:

- το είδος της ακτινοβολίας,
- το μέγεθος και ο χρονικός ρυθμός της δόσης.

Το είδος της ακτινοβολίας καθορίζει το **LET**, δηλαδή την εναποτιθέμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους διαδρομής, ενώ κατά σειρά μεγαλύτερο LET εμφανίζουν τα βαριά σωματίδια, τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια. Είναι προφανές ότι μια ακτινοβολία με υψηλό LET έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να πλήξει το DNA του κυττάρου και να προκαλέσει DSB. Για τη σύγκριση διαφορετικών ειδών ιοντίζουσας ακτινοβολίας ορίζεται η **σχετική βιολογική δραστηριότητα – RBE**, δηλαδή ο λόγος της δόσης μιας ακτινοβολίας αναφοράς προς τη δόση μιας υπό δοκιμή ακτινοβολίας που επιφέρει ίδιο αποτέλεσμα.

Ο τρόπος χορήγησης της δόσης σχετίζεται με το αποτέλεσμα, διότι ο χωρισμός της συνολικής χορηγούμενης δόσης σε μικρότερα κλάσματα επιφέρει ηπιότερα βιολογικά αποτελέσματα, σε σύγκριση με την εφ' άπαξ χορήγηση της, καθώς επιτρέπει στους επιδιορθωτικούς μηχανισμούς του κυττάρου να αναλάβουν δράση. Επίσης, η αύξηση του χρονικού ρυθμού της δόσης επιφέρει τον περιορισμό της αποτελεσματικότητας των μηχανισμών επιδιόρθωσης και αυξάνει την πιθανότητα να προκληθούν DSB.

Στους **χημικούς παράγοντες**, περιλαμβάνονται:

- η συγκέντρωση O_2 που ενισχύει το βιολογικό αποτέλεσμα,
- αναγωγικές ουσίες όπως οι θειόλες που δεσμεύουν το O_2 και αδρανοποιούν ελεύθερες ρίζες,
- ανάλογα θυμιδίνης που εξασθενούν τον κλώνο του DNA με τον οποίο συνδέονται και μπορεί να προκαλέσουν τον περισπασμό των επιδιορθωτικών μηχανισμών του κυττάρου.

Η ενίσχυση του βιολογικού αποτελέσματος ιοντίζουσας ακτινοβολίας εξαιτίας της συγκέντρωσης O_2 εκφράζεται με το Λόγο Ενίσχυσης εξαιτίας του Οξυγόνου – OER, δηλαδή το λόγο των δόσεων που σε ανοξικές και οξικές συνθήκες προκαλούν το ίδιο αποτέλεσμα.

Στους **βιολογικούς παράγοντες**, περιλαμβάνονται:

- η φάση του κυτταρικού κύκλου, κατά την οποία ακτινοβολείται το κύτταρο,
- το είδος του κυττάρου.

Το κύτταρο είναι περισσότερο ακτινοευαίσθητο κατά τις φάσεις G2 και M, ενώ οι επιδιορθωτικοί μηχανισμοί είναι περισσότερο αποδοτικοί κατά τη φάση S. Επίσης, η ευαισθησία του κυττάρου είναι ανάλογη της μιτωτικής του δραστηριότητας και αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού διαφοροποίησης.

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Έστω δέσμη ιοντίζουσας ακτινοβολίας που εισέρχεται σε υλικό ορισμένου όγκου dV στον οποίο περιέχεται μάζα dm του υλικού αυτού. Μέσω των διαφόρων μηχανισμών αλληλεπίδρασης ιοντίζουσας ακτινοβολίας και ύλης, ένα μέρος από την ενέργεια της δέσμης θα μεταδοθεί στο υλικό.

Η **μεταδιδόμενη ενέργεια ϵ** , δεδομένου ότι υπόκειται σε στατιστικές διακυμάνσεις, αποτελεί στοχαστική ποσότητα και η τιμή της δεν μπορεί να υπολογισθεί επακριβώς. Για το λόγο αυτό γίνεται εκτίμηση της μέσης τιμής της ενέργειας που εναποτίθεται σε ορισμένη μάζα του υλικού.

Ως **απορροφούμενη δόση D** , ιοντίζουσας ακτινοβολίας, ορίζεται η μέση ενέργεια που εναποτίθεται από την ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας ακτινοβολούμενου υλικού:

$$D = d\epsilon / dm.$$

Τα βιολογικά αποτελέσματα μιας ιοντίζουσας ακτινοβολίας εξαρτώνται από το ποσό και τη χωρική κατανομή της ενέργειας που εναποτίθεται, αλλά και το είδος του ιστού που ακτινοβολείται.

Η χωρική κατανομή της εναποτιθέμενης ενέργειας καθορίζεται από το LET, δηλαδή την εναποτιθέμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους διαδρομής της ακτινοβολίας στο υλικό που εξαρτάται άμεσα από το είδος της ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι, για να εκτιμηθεί το αποτέλεσμα της ακτινοβολίας θα πρέπει η απορροφούμενη δόση D να σταθμιστεί με έναν συντελεστή W_R , η τιμή του οποίου προσδιορίζεται ανάλογα με το LET, δηλαδή το είδος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η **ισοδύναμη δόση H_t** :

$$H_t = W_R D.$$

Για δεδομένη ισοδύναμη δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας οι διαφορετικοί ιστοί έχουν διαφορετική ευαισθησία, άρα και διαφορετική πιθανότητα να εμφανίσουν βλάβες από την έκθεσή τους στην ακτινοβολία. Επομένως, η ισοδύναμη δόση H_t θα πρέπει να σταθμιστεί με έναν συντελεστή W_T , η τιμή του οποίου καθορίζεται από το είδος του ιστού που ακτινοβολείται. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η **ενεργός δόση E_{eff}** :

$$E_{eff} = W_T H_t = W_T W_R D.$$

Η ενεργός δόση προσδιορίζει το συνολικό ενδεχόμενο αποτέλεσμα, ανεξαρτήτως του είδους της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, τις συνθήκες ακτινοβολίας και το είδος του ιστού που ακτινοβολείται και είναι το δοσιμετρικό μέγεθος που χρησιμοποιείται στην ακτινοπροστασία για ρυθμιστικούς σκοπούς, αλλά και για τον έλεγχο συμβατότητας μιας έκθεσης με τα όρια δόσεων.

Υπολογιστική Δοσιμετρία

Η μέση μεταδιδόμενη ενέργεια μιας ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε ορισμένη ποσότητα υλικού μπορεί να εκτιμηθεί με στατιστικές μεθόδους, αρκεί να υπολογισθούν οι τιμές των μεγεθών που χαρακτηρίζουν το πεδίο ακτινοβολίας.

Έστω μια στοιχειώδης επιφάνεια dA από την οποία, σε ορισμένο χρονικό διάστημα, διέρχονται dN «σωματίδια» μιας ιοντίζουσας ακτινοβολίας, το καθένα από τα οποία μεταφέρει ενέργεια E και συνολικά μεταφέρουν **ενέργεια $dR = E dN$** :

- Ως **ροή σωματιδίων Φ** , ορίζεται ο αριθμός των σωματιδίων που διέρχονται ανά μονάδα επιφάνειας και ως **ρυθμός ροής ϕ** , ορίζεται η ροή σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου.
- Ως **ενεργειακή ροή Ψ** , ορίζεται η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται από τα σωματίδια ανά μονάδα της επιφάνειας και ως **ρυθμός ενεργειακής ροής ψ** , ορίζεται η ενεργειακή ροή ανά μονάδα χρόνου.

Για μονοενεργειακή ακτινοβολία ισχύουν: $R = EN$, $\Psi = E\Phi$, $\psi = E\phi$.

Έστω σημειακή πηγή ιοντίζουσας H/M ακτινοβολίας. Τα φωτόνια εκπέμπονται, από την πηγή, ακτινικά και με ομοιόμορφα. Αποδεικνύεται ότι σε ένα σημείο του πεδίου ακτινοβολίας της πηγής η ένταση της ακτινοβολίας, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου που διέρχεται από το σημείο, είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης του σημείου από την πηγή – **νόμος αντιστρόφου τετραγώνου**.

Η υπολογιστική δοσιμετρία αποσκοπεί στην άμεση μέτρηση της απορροφούμενης δόσης, βάσει υπολογισμών με τους οποίους γίνεται προσπάθεια να προσδιορισθεί η μέση μεταδιδόμενη ενέργεια σε υλικό που δέχεται ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Σε **εφαρμογές πυρηνικής ιατρικής**, εισάγεται σε έναν οργανισμό **ραδιοφάρμακο**, δηλαδή διάλυμα που περιέχει μια χημική ένωση φορέα ραδιονουκλιδίου, το οποίο συγκεντρώνεται σε ένα όργανο και εκπέμπει ακτινοβολία προς τα γειτονικά όργανα. Η δόση που λαμβάνουν τα **όργανα – στόχοι**, από το **όργανο – πηγή**, εξαρτάται από:

- την αθροιστική ενεργότητα A , δηλαδή το συνολικό αριθμό διασπάσεων, αλλά και τη μέση ενέργεια Δ που εκπέμπεται σε κάθε διάσπαση,
- το κλάσμα απορρόφησης ϕ , δηλαδή το ποσοστό της εκπεμπόμενης ενέργειας που μεταδίδεται στο όργανο – στόχο,
- τη μάζα m του οργάνου – στόχου.

Ισχύει:

$$D = A \Delta \phi / m.$$

- Ο υπολογισμός της αθροιστικής ενεργότητας A απαιτεί βιοκινητικά μοντέλα σχετικά με τη συγκέντρωση ενεργότητας, ως προς το χρόνο, σε κάθε όργανο και για κάθε χημική μορφή του ραδιονουκλιδίου. Επίσης, πρέπει να συνυπολογισθεί ότι η ενεργότητα, στο όργανο – πηγή, δεν εξαρτάται μόνον από τον φυσικό, αλλά και από τον βιολογικό χρόνο ημιζωής.
- Ο υπολογισμός της μέσης ενέργειας Δ , η οποία εκπέμπεται σε κάθε διάσπαση, γίνεται με βάση φυσικά δεδομένα που είναι προσδιορισμένα με ακρίβεια.
- Ο υπολογισμός του κλάσματος απορρόφησης ϕ απαιτεί το συνδυασμό ανατομικών και φυσικών δεδομένων που δεν είναι δυνατό να εξατομικευθούν.

Στην υπολογιστική δοσιμετρία γίνεται προσπάθεια άμεσου υπολογισμού της δόσης. Αυτό απαιτεί τη χρήση σύνθετων υπολογιστικών μεθόδων, διότι οι απλοί αλγόριθμοι υπολογισμού δίνουν αποδεκτά αποτελέσματα μόνον υπό αυστηρές προϋποθέσεις. Στην πράξη, χρησιμοποιούνται ημιεμπειρικοί αλγόριθμοι ή και πιο εξεζητημένοι μαθηματικοί αλγόριθμοι. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται **πειραματική επιβεβαίωση**.

Πειραματική Δοσιμετρία

Η δυσκολία υπολογισμού της δόσης μιας ιοντίζουσας ακτινοβολίας έγκειται στο ότι τα δυσμενή βιολογικά αποτελέσματα δεν οφείλονται στο ποσό της ενέργειας, αλλά στο μηχανισμό μετάδοσής της. Εφόσον η άμεση μέτρηση της απορροφούμενης δόσης είναι δύσκολη, γίνεται προσπάθεια ποσοτικού προσδιορισμού της μέσω του αριθμού των ιοντισμών που προκαλεί μέσα στην ύλη.

Σε κάθε **ιονισμό**, παράγεται ζεύγος ιόντων και απαιτείται σταθερό ποσό ενέργειας που ονομάζεται **μέση ενέργεια σχηματισμού ζεύγους ιόντων – W** . Αυτή η ενέργεια είναι σταθερή για τα αέρια και σχεδόν ανεξάρτητη από την ενέργεια ηλεκτρονίων.

Έστω μια στοιχειώδης μάζα αέρα dm η οποία ακτινοβολείται από φωτόνια και μέσα της δημιουργείται στοιχειώδες φορτίο ενός προσήμου dQ , θετικό ή αρνητικό, όταν τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια που παράγονται από την αλληλεπίδραση των φωτονίων με το υλικό επιβραδυνθούν εντελώς στο αέρα. Ως **Έκθεση – X** , ορίζεται το πηλίκο:

$$X = dQ / dm.$$

Η Έκθεση ορίζεται για δεδομένο είδος ιοντίζουσας ακτινοβολίας, **φωτόνια**, αλλά και για δεδομένο υλικό, **αέρας**. Τα όργανα μέτρησης ιοντισμού για δοσιμετρία καλούνται θάλαμοι ιοντισμού. Όταν ένας θάλαμος ιοντισμού είναι βαθμονομημένος μπορεί να αποτελέσει όργανο μέτρησης για την Έκθεση – X και ισχύει: $D = XW / e$, όπου ως e θέτουμε το φορτίο ενός ηλεκτρονίου.

Όταν μια έμμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία μη φορτισμένων σωματιδίων, φωτόνια ή νετρόνια, ακτινοβολεί μια στοιχειώδη μάζα dm , παράγονται φορτισμένα σωματίδια με συνολική κινητική ενέργεια dE , την οποία μεταδίδουν στο υλικό. Ως **KERMA**, ορίζεται το πηλίκο:

$$K = dE / dm.$$

Ενώ η Έκθεση – X που ορίζεται μόνον για αέρα, το KERMA μπορεί να αναφέρεται σε οποιοδήποτε υλικό. Όταν η απώλεια ενέργειας των παραγόμενων φορτισμένων σωματιδίων εξαιτίας πέδησης δεν είναι σημαντική και υπό συνθήκες ηλεκτρονικής ισορροπίας, το KERMA ισούται με την Δόση.

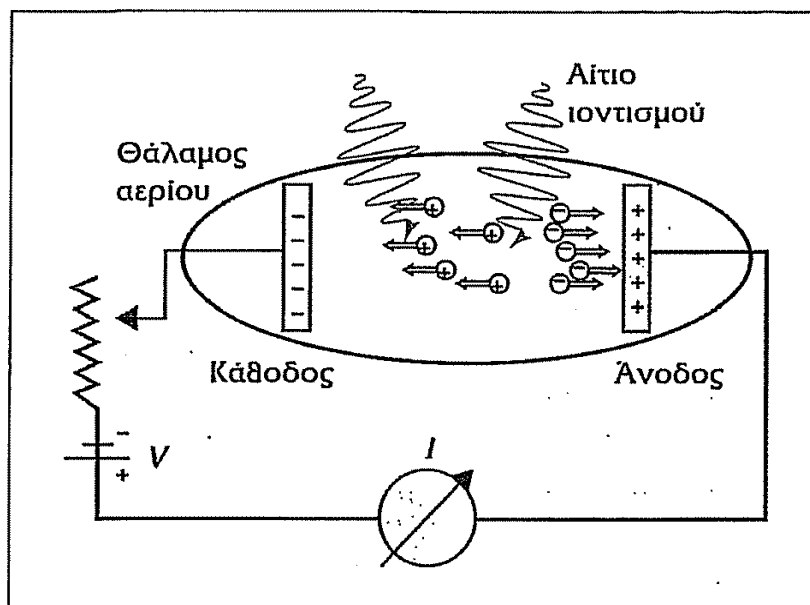
Παρά το γεγονός ότι τα μεγέθη Έκθεση – X και KERMA ορίζονται για συγκεκριμένο είδος ιοντίζουσας ακτινοβολίας, οι θάλαμοι ιοντισμού που είναι βαθμονομημένοι σε μονάδες αυτών των μεγεθών μπορεί να χρησιμοποιηθούν στη δοσιμετρία κάθε είδους ακτινοβολίας.

Οι γενικές αρχές των μεθόδων πειραματικής δοσιμετρίας είναι ίδιες για όλα τα είδη ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Αυτό που αλλάζει είναι ο σχεδιασμός των δοσιμέτρων με βάση τα ειδικά χαρακτηριστικά της κάθε ιοντίζουσας ακτινοβολίας και το μηχανισμό με τον οποίο αλληλεπιδρά με την ύλη. Ειδικότερα:

- Για τα ηλεκτρόνια πρέπει να υπάρχουν **συνθήκες ηλεκτρονικής ισορροπίας**, δηλαδή ο αριθμός και η ενέργεια των ηλεκτρονίων που εισέρχονται πρέπει να είναι ίσα με τον αριθμό και την ενέργεια των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από την περιοχή ενδιαφέροντος.
- Για τα βαρέα φορτισμένα σωματίδια η μέση ενέργεια σχηματισμού ζεύγους ιόντων εξαρτάται από την ενέργεια της ακτινοβολίας.
- Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες των ατόμων και ελευθερώνουν ανακρουόμενους πυρήνες, υποατομικά σωματίδια, αλλά και φωτόνια. Για να μετρηθεί το μικτό πεδίο έμμεσα ιοντίζουσας ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται διαφορετικά δοσιμέτρα για τα φωτόνια και τα νετρόνια. Τέλος, δεδομένου ότι η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των νετρονίων εξαρτάται κατά πολύ από την σύσταση του υλικού και δεν μεταβάλλεται ομαλά με την ενέργεια και το Z , η σύσταση του υλικού του δοσιμέτρου πρέπει να προσομοιάζει με την σύσταση του υλικού στο οποίο θέλουμε να μετρήσουμε τη δόση.

ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΙΟΝΤΙΣΜΩΝ – ΘΑΛΑΜΟΣ ΑΕΡΙΟΥ

Σε θάλαμο που περιέχει μια ποσότητα αερίου είναι τοποθετημένα δύο ηλεκτρόδια, στα οποία εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού V που μπορεί να λάβει διάφορες τιμές και δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο.



Στο θάλαμο προσπίπτει ιοντίζουσα ακτινοβολία, η οποία αλληλεπιδρά με τα μόρια του αερίου και παράγει ζεύγη ιόντων. Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, τα θετικά ιόντα κατευθύνονται στην κάθοδο και τα αρνητικά στην άνοδο με ενέργεια που είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης.

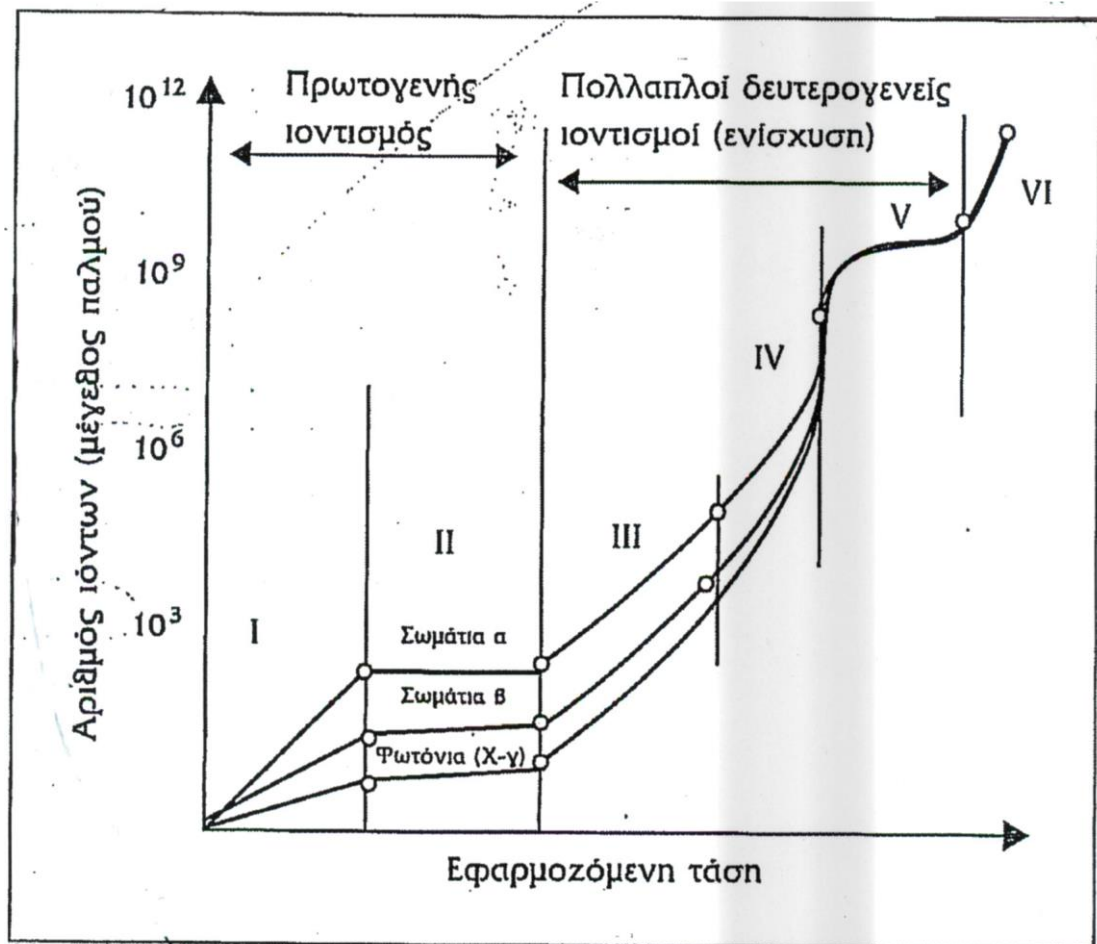
Τα ιόντα φθάνουν στα ηλεκτρόδια και εναποθέτουν το φορτίο τους, με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος I που μετράται από αμπερόμετρο. Με αυτό τον τρόπο, κάθε μεμονωμένος ιοντισμός μέσα στο θάλαμο καταγράφεται ως ηλεκτρικός παλμός. Το **σήμα εξόδου**, του ανιχνευτή, με **κατάλληλη βαθμονόμηση**, μπορεί να μετατραπεί σε έκθεση – ρυθμό έκθεσης, δόση – ρυθμό δόσης, κ.ο.κ.

Το **μέγεθος**, του **ηλεκτρικού παλμού**, εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση V και το είδος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, δηλαδή το LET.

Τόσο στο ύψος όσο και η μορφή του παλμού εξαρτώνται από:

- **επανασυνδέσεις**, ετερόνυμων ιόντων κατά τη διαδρομή προς τα ηλεκτρόδια του θαλάμου και συμβαίνουν σε χαμηλές τιμές της τάσης V , δηλαδή όταν τα ιόντα κινούνται με χαμηλές ταχύτητες,
- **δευτερογενείς ιοντισμούς**, οι οποίοι συμβαίνουν σε σχετικά υψηλές τιμές της τάσης, δηλαδή όταν τα ιόντα κινούνται με ταχύτητες τέτοιες ώστε να μπορούν να προκαλέσουν περαιτέρω ιοντισμούς.

Η καμπύλη που εκφράζει το μέγεθος του παλμού σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση V , δείχνει ότι υπάρχουν περιοχές τιμών της τάσης σε κάθε μια από τις οποίες συμβαίνουν χαρακτηριστικές φυσικές διεργασίες.



Στην Περιοχή – I, **περιοχή επανασυνδέσεων**, η εφαρμοζόμενη τάση είναι χαμηλή και ο αριθμός ιόντων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια είναι μικρότερος από τον αριθμό των πρωτογενών ιόντων που παράγονται στο θάλαμο. Με την αύξηση της τάσης στα ηλεκτρόδια μειώνεται ο αριθμός επανασυνδέσεων και ο παλμός αυξάνεται γραμμικά. Η Περιοχή – I δεν προσφέρεται για μετρήσεις.

Στην Περιοχή – II, **περιοχή πρωτογενών ιοντισμών**, δεν υπάρχουν επανασυνδέσεις και συλλέγεται το σύνολο των ιόντων που παράγονται πρωτογενώς στο θάλαμο, ενώ ο παλμός σταθεροποιείται και το ύψος του εξαρτάται αποκλειστικά από το LET της ακτινοβολίας που καθορίζει τον αριθμό των πρωτογενών ιόντων που θα παραχθούν. Στην Περιοχή – II λειτουργούν οι **θάλαμοι ιοντισμού**, με τους οποίους ανιχνεύεται το είδος της ακτινοβολίας, δεδομένου ότι τα σωματία – α δίνουν υψηλότερο παλμό σε σχέση με σωματία – β και φωτόνια – γ. Οι θάλαμοι ιοντισμού, με χρήση κατάλληλων απορροφητικών φίλτρων μπορούν να ανιχνεύσουν και την ενέργεια της ακτινοβολίας.

Στην Περιοχή – III, **αναλογική περιοχή**, η εφαρμοζόμενη τάση είναι τέτοια ώστε τα πρωτογενή ιόντα να έχουν ενέργεια ικανή για την **παραγωγή δευτερογενών ιόντων**. Ο αριθμός των δευτερογενών ιόντων είναι ανάλογος της ενέργειας των πρωτογενών ιόντων και το ύψος του παλμού αυξάνεται γραμμικά με την τάση. Στην Περιοχή – III λειτουργούν οι λεγόμενοι **αναλογικοί απαριθμητές**, ενώ το γεγονός ότι ο παλμός είναι γραμμικός διευκολύνει τη βαθμονόμηση του οργάνου και την ανίχνευση τόσο του είδους όσο και της ενέργειας της ακτινοβολίας. Ο ενισχυμένος παλμός προσφέρει τη δυνατότητα ανίχνευσης μεμονωμένων συμβάντων.

Στην Περιοχή – IV, **μη αναλογική περιοχή**, η συνεχώς αυξανόμενη τάση προσδίδει στα δευτερογενή ιόντα ικανότητα να προκαλέσουν περαιτέρω ιονισμούς και ο παλμός παύει να είναι γραμμικός, γεγονός που δημιουργεί ασταθείς συνθήκες βαθμονόμησης και περιορίζει την επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Η Περιοχή IV δεν προσφέρεται για τη λειτουργία μετρητών και απαριθμητών.

Στην Περιοχή – V, **περιοχή Geiger – Mueller**, η τάση αυξάνεται σε επίπεδα τέτοια ώστε εμφανίζονται φαινόμενα διέγερσης των ατόμων και των μορίων του αερίου και **εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας**, η οποία μπορεί να προκαλέσει ιονισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν σταθερό παλμό που είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό των πρωτογενών ιόντων, δηλαδή από το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας. Στην Περιοχή – V λειτουργούν οι **απαριθμητές Geiger – Mueller**. Κάθε αρχικός ιονισμός που συμβαίνει στο θάλαμο δίνει στην έξοδο ηλεκτρικό παλμό, ενώ το σήμα εξόδου είναι ισχυρό τόσο ώστε να ανιχνεύεται ο **ρυθμός μεμονωμένων συμβάντων**. Με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων στην είσοδο, ο παλμός εξόδου μπορεί να ανιχνεύσει το είδος της ακτινοβολίας και με κατάλληλη βαθμονόμηση ο παλμός μετατρέπεται σε **ρυθμό δόσης**, για γνωστής ενέργειας ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Στην Περιοχή – VI, **περιοχή συνεχούς αποφόρτισης**, δημιουργείται συνεχές ρεύμα στα ηλεκτρόδια του απαριθμητή που μπορεί να προκαλέσει βλάβη ή και καταστροφή του οργάνου.

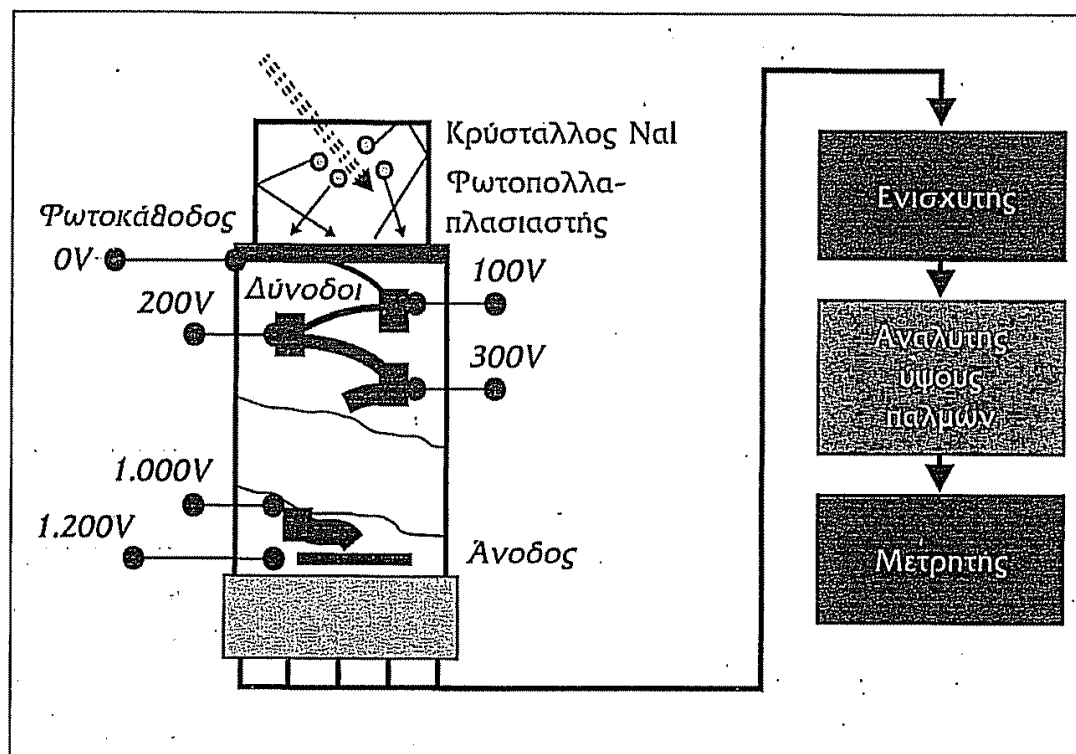
ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΙΟΝΤΙΣΜΩΝ – ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΕΣ

Οι σπινθηριστές είναι υλικά τα οποία, κατά την αλληλεπίδραση τους με ιοντίζουσα ακτινοβολία, μετατρέπουν σε φωτεινή ενέργεια, **σπινθηρισμούς**, μέρος της ενέργειας που αποδίδεται από την ακτινοβολία.

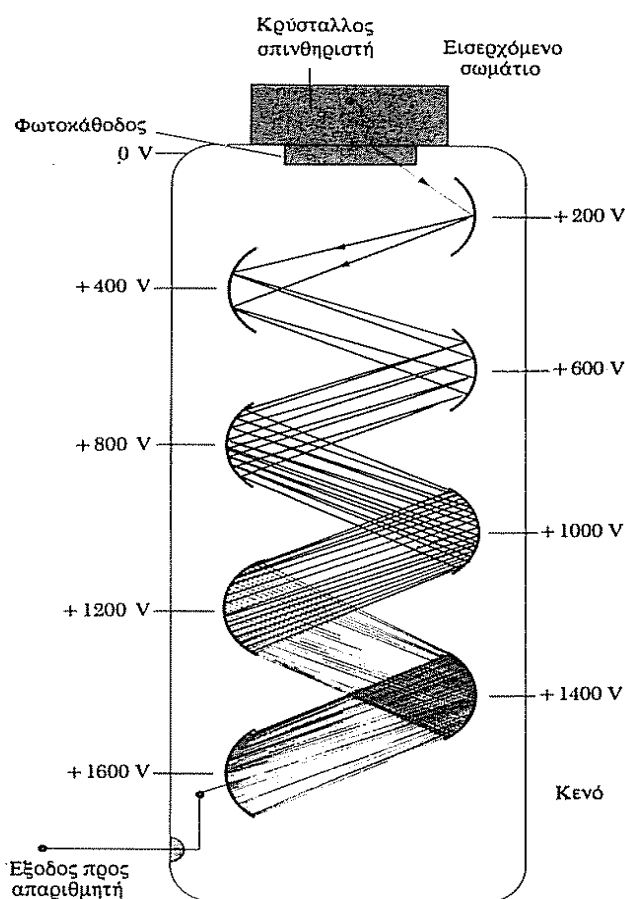
Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τις αποδιεγέρσεις των θετικών ιόντων που παράγονται από ιοντισμούς εκπέμπεται χαρακτηριστική ακτινοβολία στην περιοχή του ορατού φωτός. Ειδικά από τον κρύσταλλο **NaI (TI)**, **Ιωδιούχο Νάτριο με πρόσμιξη Θαλίου**, εκπέμπεται η χαρακτηριστική ιώδης ακτινοβολία του Ιωδίου, ενώ η πρόσμιξη Θαλίου ενεργοποιεί τον κρύσταλλο σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Το ανιχνευτικό σύστημα, εκτός από τον κρύσταλλο – σπινθηριστή, αποτελείται από:

- τον **φωτοπολλαπλασιαστή**, ο οποίος μετατρέπει τον σπινθήρα σε ηλεκτρικό παλμό τον οποίο και ενισχύει,
- ένα ηλεκτρονικό **κύκλωμα ενίσχυσης**, το οποίο ενισχύει το σήμα εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή, χωρίς να μεταβάλλει την αναλογία ύψους των παλμών που το συνθέτουν,
- τον **αναλυτή ύψους παλμών – ΑΥΠ**, ο οποίος επεξεργάζεται το ηλεκτρικό σήμα, επιτρέποντας τη διέλευση παλμών σε μια ορισμένη περιοχή τιμών,
- **μετρητικό σύστημα**, το οποίο αποτελείται από ηλεκτρονικά συστήματα για την καταμέτρηση και καταγραφή των παλμών.

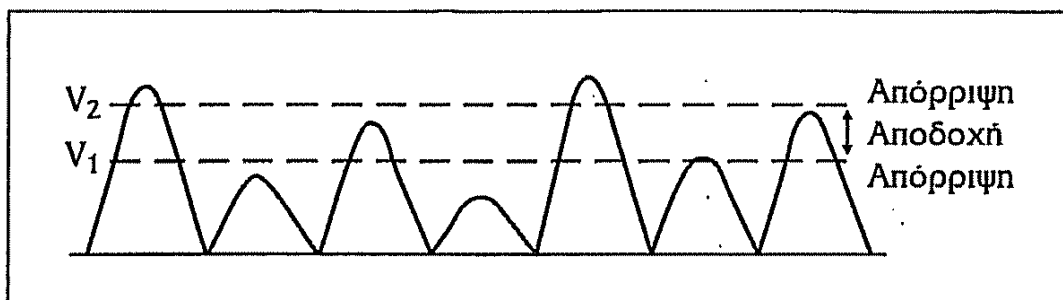


Ο **φωτοπολλαπλασιαστής**, είναι μια ηλεκτρονική λυχνία που βρίσκεται σε άριστη μηχανική και οπτική επαφή με τον κρύσταλλο. Οι σπινθήρες εισέρχονται στη λυχνία μέσα από οπτικό παράθυρο όπου συναντούν ένα στρώμα φωτοευαίσθητης ουσίας, **φωτοκάθοδος**, το οποίο παράγει **φωτοηλεκτρόνια**, όταν διεγερθεί από ορατό φως. Το ρεύμα των φωτοηλεκτρονίων ενισχύεται από ένα σύστημα ηλεκτροδίων, **δύνοδοι**, στο οποίο κατανέμεται συνολική **υψηλή τάση 1000 – 1200 Volt**, με τρόπο ώστε να βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού μεταξύ τους και με την φωτοκάθοδο. Ειδικότερα, τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την φωτοκάθοδο κατευθύνονται, λόγω διαφοράς δυναμικού, στην πρώτη δύνοδο από την οποία ελευθερώνονται επιπλέον ηλεκτρόνια και προκαλείται μια πρώτη ενίσχυση του ρεύματος ηλεκτρονίων της φωτοκαθόδου. Αυτό επαναλαμβάνεται σε κάθε δύνοδο, με συνέπεια ο αρχικός ηλεκτρικός παλμός να ενισχύεται σημαντικά στην έξοδο του συστήματος των δυνόδων.



Το ύψος του παλμού εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή είναι ανάλογο της ενέργειας των φωτονίων που απορροφώνται από τον κρύσταλλο – σπινθηριστή, με αποτέλεσμα να παρέχει πληροφορία για την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας και να δίνει τη δυνατότητα διάκρισης των φωτονίων σε πρωτογενή ή δευτερογενή – Compton.

Ο **Αναλυτής Ύψους Παλμών – ΑΥΠ**, είναι ηλεκτρονικό κύκλωμα που αποκόπτει τα σκεδασμένα φωτόνια – Compton. Για το λόγο αυτό το κύκλωμα ρυθμίζεται ώστε να επιτρέπει τη διέλευση παλμών με ύψος που βρίσκεται σε ένα **ενεργειακό παράθυρο**, δηλαδή σε ενεργειακή περιοχή $LL < U < UL$ που καθορίζεται από ένα άνω και ένα κάτω όριο. Όταν συνδεθούν σε σειρά απλοί – **μονοδιάυλοι αναλυτές**, προκύπτει ένας **πολυδιάυλος αναλυτής**, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων σε ευρείες περιοχές του φάσματος.



Τα ηλεκτρονικά **συστήματα καταμέτρησης – καταγραφής παλμών**:

- καταμετρούν τις μεταβολές της συγκέντρωσης της ραδιενεργού ουσίας ως προς το χρόνο, δηλαδή το ρυθμό παραγωγής σπινθηρισμών, **ρυθμόμετρα**,
- καταγράφουν τον κάθε μεμονωμένο παλμό και τον αθροίζουν στο συνολικό αριθμό των κρούσεων, **κλίμακες υποβιβασμού**, ενώ η μέτρηση διακόπτεται όταν συμπληρωθεί προκαθορισμένος χρόνος ή αριθμός κρούσεων.

Ως **ανόργανοι σπινθηριστές**, χαρακτηρίζονται υψηλής καθαρότητας κρύσταλλοι που είναι ενεργοποιημένοι με διάφορες προσμίξεις και όταν αλληλεπιδράσουν με φωτόνια παράγουν σπινθηρισμούς, δηλαδή ακτινοβολούν στο ορατό φως. Πλέον διαδεδομένος είναι ο **κρύσταλλος NaI (TI)**, Ιωδιούχο Νάτριο με πρόσμιξη Θαλίου, ο οποίος μπορεί να διεγείρεται και να σπινθηρίζει σε **θερμοκρασία περιβάλλοντος**. Αυτή η ιδιότητα του κρυστάλλου οφείλεται στις προσμίξεις Θαλίου, ενώ όταν διεγερθεί εκπέμπει την χαρακτηριστική ιώδη ακτινοβολία του Ιωδίου. Ο κρύσταλλος:

- περιβάλλεται από λεπτό **φύλλο Αλουμινίου**, με σκοπό την οπτική θωράκιση, τη μηχανική προστασία και την μόνωση από την υγρασία,
- περικλείεται από **θωράκιση Μολύβδου**, ώστε να αποκόπτεται η ακτινοβολία περιβάλλοντος,

ενώ το οπτικό πεδίο του κρυστάλλου καθορίζεται από τον **κατευθυντήρα δέσμης**, ο οποίος συμβάλλει και στον αποκλεισμό των φωτονίων που δεν προέρχονται από το οπτικό πεδίο του κρυστάλλου.

Ένας κρύσταλλος, για να θεωρηθεί κατάλληλος, πρέπει:

- να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης από την πηγή ενέργειας, δηλαδή ακόμη και τα χαμηλής και μέσης ενέργειας φωτόνια,
- να μετατρέπει την απορροφώμενη ακτινοβολία σε σπινθήρα στο ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα,
- να είναι καθαρός και διαφανής, ώστε να μην απορροφά τους παραγόμενους, από τον ίδιο, σπινθηρισμούς,
- να εκπέμπει σπινθήρες με μήκος κύματος στο οποίο ο φωτοπολλαπλασιαστής εμφανίζει τη μέγιστη δυνατή ευαισθησία,
- να εμφανίζει ικανοποιητική μηχανική αντοχή, ώστε να μπορεί να κοπεί στο επιθυμητό σχήμα και μέγεθος.

Οι **κρύσταλλοι NaI (TI)**, Ιωδιούχο Νάτριο με πρόσμιξη Θαλίου, χρησιμοποιούνται στη δοσιμετρία, την ακτινοπροστασία και τις αναλυτικές μετρήσεις ραδιενέργειας. Επίσης, επιλέγονται σε όλο το φάσμα εφαρμογών της Πυρηνικής Ιατρικής. Εξαιτίας της ικανότητας να ανιχνεύουν τα χαμηλής και μέσης ενέργειας φωτόνια – γ , τα οποία εκπέμπονται σε διαγνωστικές εφαρμογές Πυρηνικής Ιατρικής, οι κρύσταλλοι NaI (TI) χρησιμοποιούνται σε:

- ποσοτικές In Vitro μετρήσεις, δηλαδή μετρήσεις δειγμάτων,
- επιφανειακές και διεγχειρητικές In Vivo μετρήσεις στο σώμα του ασθενούς,
- στατικές και δυναμικές In Vivo απεικονίσεις,
- μετρήσεις πεδίων ακτινοβολίας με σκοπό την ακτινοπροστασία.

Σημαντικά είναι τα συστήματα γ – **camera**, με επίπεδους παράλληλους κρυστάλλους, τα οποία χρησιμοποιούνται για επίπεδη ή και τομογραφική απεικόνιση της χωρικής ή και χρονικής κατανομής ραδιενέργειας σε ένα όργανο στις διαγνωστικές εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής.

Η **μετρητική απόδοση**, του κρυστάλλου NaI (TI), προσδιορίζεται από την:

- ενεργειακή διακριτική ικανότητα R του κρυστάλλου που ορίζεται ως ο λόγος του εύρους ΔE στο ήμισυ του ύψους μιας φωτοκορυφής του φάσματος του κρυστάλλου προς την ενέργεια E της φωτοκορυφής και εκφράζει τη διακύμανση με την οποία καταγράφονται δύο φωτόνια ίδιας ενέργειας,
- ανιχνευτική απόδοση ϵ του συστήματος που είναι ανάλογη προς το κλάσμα της στερεάς γωνίας με την οποία «βλέπει» η πηγή τον κρύσταλλο και την πιθανότητα απορρόφησης των φωτονίων της πηγής από τον κρύσταλλο.

Φασματογραφία με Κρύσταλλο NaI (Tl)

Έστω μια μονοενεργειακή πηγή γ – ακτινοβολίας που είναι τοποθετημένη στο οπτικό πεδίο ενός συστήματος ανιχνευτή με Κρύσταλλο NaI (Tl).

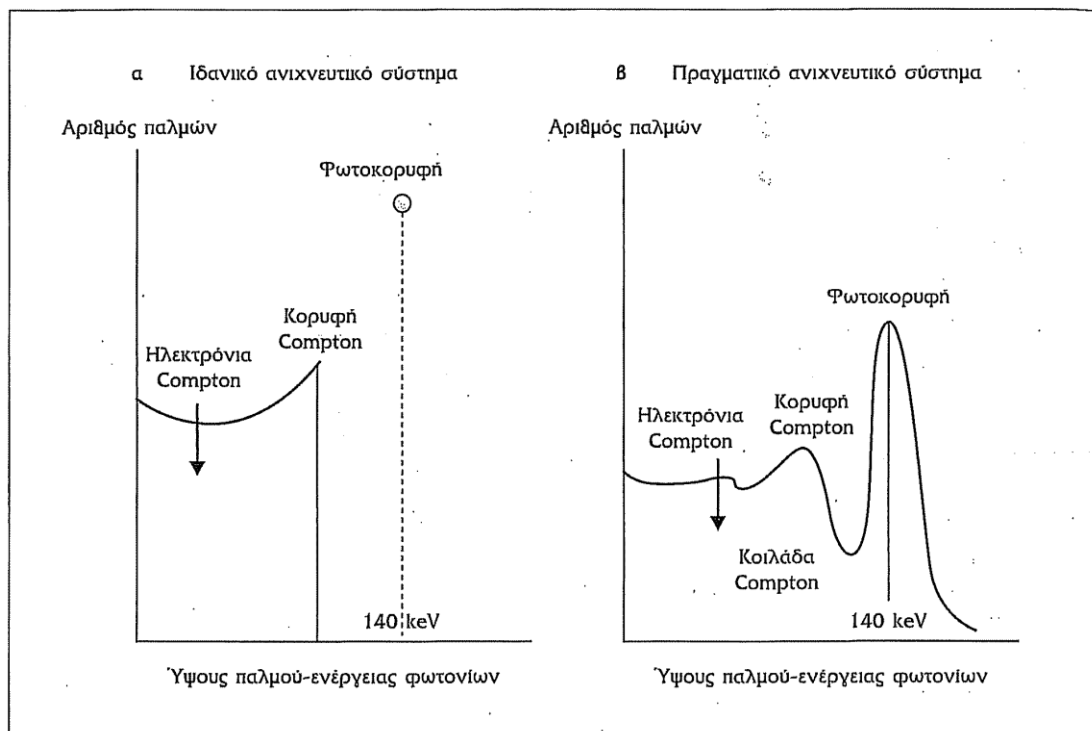
Τα φωτόνια που φθάνουν στον κρύσταλλο μπορεί να είναι:

- **πρωτογενή φωτόνια**, τα οποία εκπέμπονται από την πηγή και προέρχονται από το οπτικό πεδίο του κρυστάλλου,
- **δευτερογενή φωτόνια**, τα οποία προέρχονται από σκεδάσεις των πρωτογενών φωτονίων της πηγής σε περιοχές εκτός του οπτικού πεδίου του κρυστάλλου,
- φωτόνια από **ραδιενέργεια υποστρώματος**, τα οποία προέρχονται από πηγές του περιβάλλοντος και διαπέρασαν τη θωράκιση του κρυστάλλου.

Τα φωτόνια που εισέρχονται στον κρύσταλλο αλληλεπιδρούν:

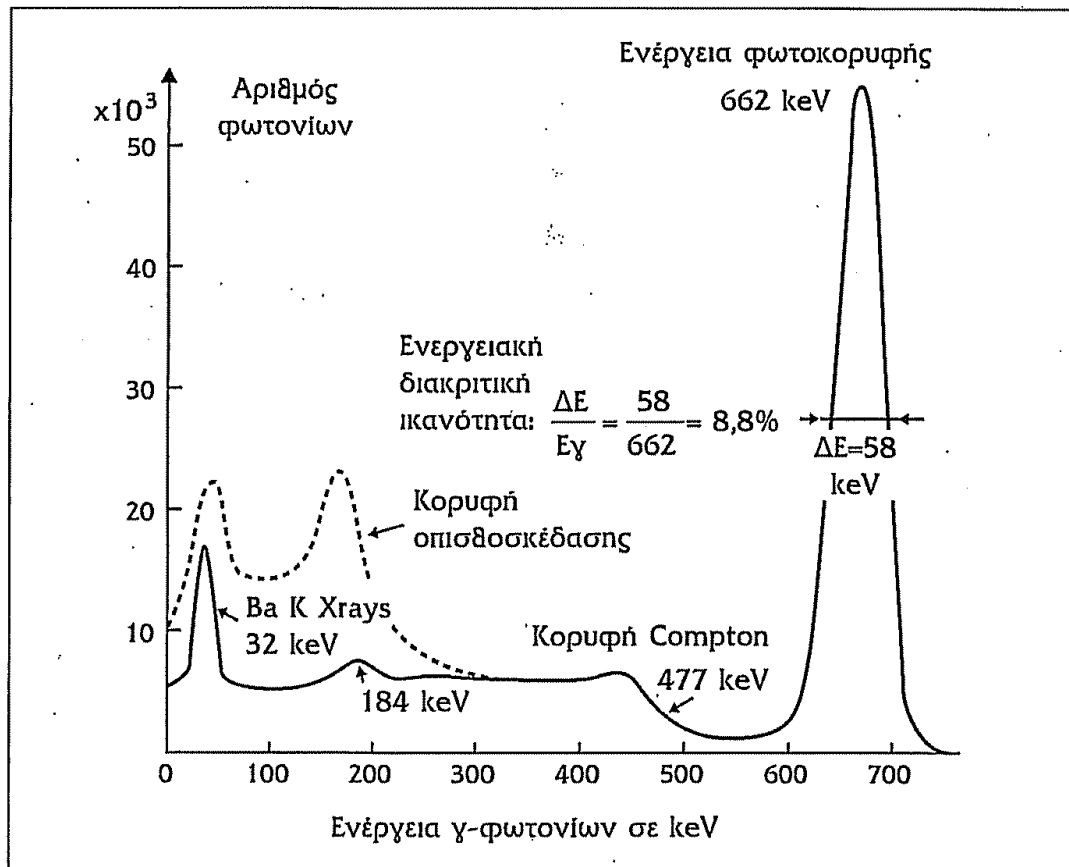
- τόσο με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο,
- όσο και με σκέδαση Compton.

Σε ένα **ιδανικό ανιχνευτικό σύστημα**, όλα τα **πρωτογενή φωτόνια**, καταμετρώνται με ίσες ενέργειες και δίνουν ισοϋψείς παλμούς εξόδου. Σε ένα τέτοιο σύστημα τα φωτόνια που αλληλεπιδρούν με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο απεικονίζονται ως ένα και μοναδικό σημείο την **φωτοκορυφή**, ενώ τα φωτόνια που αλληλεπιδρούν με σκέδαση Compton δίνουν στην έξοδο κατανομή ύψους παλμών που ακολουθεί την στατιστική κατανομή Klein – Nishina και βρίσκεται αριστερά της φωτοκορυφής, με μέγιστο την **κορυφή – Compton**.



Σε ένα **πραγματικό ανιχνευτικό σύστημα**, τα φαινόμενα ανίχνευσης υπόκεινται σε στατιστικές διακυμάνσεις και, επομένως, τα πρωτογενή φωτόνια που αλληλεπιδρούν με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο καταμετρώνται με διακύμανση γύρω από μια μέση τιμή που καλείται **φωτοκορυφή**. Η κατανομή ύψους των παλμών εξόδου ακολουθεί την κατανομή Gauss που δίνει κωδωνοειδή καμπύλη με μέγιστο την **φωτοκορυφή – E₀**. Η καμπύλη αριστερά της φωτοκορυφής αποδίδει την κατανομή Klein – Nishina των ηλεκτρονίων Compton.

Τα **δευτερογενή φωτόνια**, τα οποία φθάνουν στον κρύσταλλο εξαιτίας πολλαπλών σκεδάσεων και με χαμηλή ενέργεια, εμφανίζουν συνεχές φάσμα ενεργειών σύμφωνα με την κατανομή **Klein – Nishina**, για φωτόνια **Compton**. Τα φωτόνια αυτά χάνουν τη μέγιστη ενέργεια όταν σκεδάζονται κατά 180° και, τότε, δίνουν παλμό με ελάχιστο ύψος – **κορυφή οπισθοσκέδασης**.



ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

Στη σύγχρονη εποχή η νόσος αντιμετωπίζεται ως μεταβολική – μοριακή διαδικασία, δηλαδή ως αποτέλεσμα διαταραχής χημικών αντιδράσεων σε μοριακό – κυτταρικό επίπεδο, ενός οργάνου.

Η **πυρηνική ιατρική**, χρησιμοποιεί ραδιονουκλίδια για να αξιολογήσει διαγνωστικά αλλαγές στο μεταβολισμό και, κατ' επέκταση, στη φυσιολογία του σώματος, αλλά και για θεραπευτικούς σκοπούς. Οι διαγνωστικές μέθοδοι της πυρηνικής ιατρικής περιλαμβάνουν:

- In Vivo εξετάσεις που απεικονίζουν τη λειτουργικότητα ιστών & οργάνων,
- In Vitro εξετάσεις, στις οποίες προσδιορίζονται ποσοτικά διάφορες βιολογικές χημικές ενώσεις με μετρήσεις δειγμάτων βιολογικών υγρών όπως το αίμα.

Οι In Vivo μέθοδοι της πυρηνικής ιατρικής παρέχουν **λειτουργική πληροφορία**, ενώ οι **ανατομικές απεικονίσεις**, παρουσιάζουν τη νόσο ως μια μορφολογική διαταραχή σε μακροσκοπικό επίπεδο. Οι μελέτες της πυρηνικής ιατρικής, παρέχοντας μοριακή πληροφορία, μπορούν να εντοπίζουν πρώιμες βλάβες που δεν μπορούν να φανούν σε μια ανατομική απεικόνιση.

Σε μια In Vivo εξέταση πυρηνικής ιατρικής, μετά τη χορήγηση του ραδιοφαρμάκου στον εξεταζόμενο, παρακολουθείται η πρόσληψή – απομάκρυνσή του από το όργανο που εξετάζεται. Το **ραδιοφάρμακο**, ουσία επισημασμένη με ραδιενεργό ιχνηθέτη που έχει την ιδιότητα να συγκεντρώνεται στο υπό εξέταση όργανο, εκπέμπει ακτινοβολία γ – φωτονίων που ανιχνεύεται από μια γ – camera, η οποία σχηματίζει εικόνα για την κατανομή του στο όργανο. Οι λαμβανόμενες εικόνες είναι στατικές ή δυναμικές, ενώ λαμβάνονται και τομογραφίες που παρουσιάζουν την κατανομή του ραδιοφαρμάκου σε αξονικές τομές.

Τα **ραδιοφάρμακα**, της **πυρηνικής ιατρικής**, είναι σκευάσματα που είτε περιέχουν μια χημική ένωση – φορέα ενός ραδιονουκλιδίου είτε περιέχουν το ραδιονουκλίδιο σε ελεύθερη μορφή και συσσωρεύονται στο υπό εξέταση όργανο. Τα ραδιοφάρμακα δεν επηρεάζουν τη φυσιολογική λειτουργία των ιστών – οργάνων, διότι χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες. Βασικά μεγέθη των ραδιονουκλιδίων – ραδιοφαρμάκων είναι:

- η **Ενεργότητα**, του **ραδιονουκλιδίου**, αριθμός ραδιενεργών διασπάσεων του ραδιονουκλιδίου ανά μονάδα χρόνου,
- ο **Φυσικός Χρόνος Υποδιπλασιασμού – T_p**, του **ραδιονουκλιδίου**, ο χρόνος στον οποίο διασπάται το ήμισυ των ραδιενεργών πυρήνων του δείγματος,

- ο **Βιολογικός Χρόνος Υποδιπλασιασμού – T_b**, του **ραδιοφαρμάκου**, δηλαδή ο χρόνος στον οποίο αποβάλλεται το ήμισυ της αρχικής ποσότητας του από το ανθρώπινο σώμα, με βιολογικούς μηχανισμούς,
- ο **Ενεργός Χρόνος Υποδιπλασιασμού – T_e**, του **ραδιοφαρμάκου**, δηλαδή ο χρόνος στον οποίο μειώνεται στο ήμισυ η χορηγηθείσα ενεργότητα, ο οποίος εξαρτάται από τους χρόνους T_p και T_b ως εξής:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

Τα **ραδιονουκλίδια**, για **διαγνωστικές εξετάσεις**, πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις όπως:

- να εκπέμπουν ακτινοβολία ανιχνεύσιμη από το ανιχνευτικό σύστημα, δηλαδή αφενός να μην εκπέμπουν χαμηλής ενέργειας β και γ – ακτινοβολία που απορροφάται στο όργανο και αφετέρου να εκπέμπουν γ – ακτινοβολία με ενέργεια τέτοια ώστε να απορροφάται ικανοποιητικά από το σύστημα,
- σχετικά μικρό φυσικό χρόνο υποδιπλασιασμού, για λόγους ακτινοπροστασίας του εξεταζόμενου, αλλά όχι μικρότερο από το χρόνο διάρκειας της εξέτασης,
- χημικές ιδιότητες τέτοιες ώστε να μπορεί να παρασκευασθεί ένας μεγάλος αριθμός επισημασμένων ενώσεων με κατάλληλη χημική συμπεριφορά.

Τα **ραδιοφάρμακα**, για **διαγνωστικές εξετάσεις**, πρέπει:

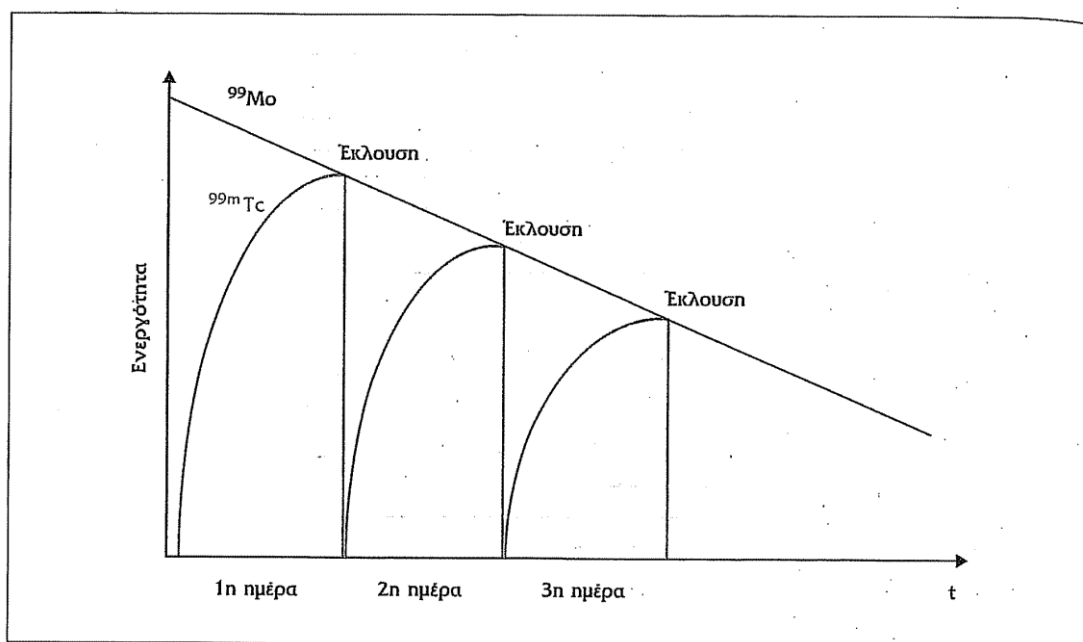
- να έχουν εξειδικευμένη βιολογική συμπεριφορά, ανάλογα με το διαγνωστικό πρόβλημα και την φυσιολογική παράμετρο που πρέπει να μετρηθεί,
- να έχει μικρό βιολογικό χρόνο υποδιπλασιασμού, ώστε να αποβάλλεται κατά το δυνατό ταχύτερα με το πέρας της εξέτασης, για λόγους ακτινοπροστασίας του εξεταζόμενου και του περιβάλλοντός του, ειδικά όταν το ραδιονουκλίδιο έχει σχετικά μεγάλο φυσικό χρόνο υποδιπλασιασμού.

Η **καταλληλότητα**, του **ραδιοφαρμάκου**, για χορήγηση στον εξεταζόμενο – ασθενή, υπόκειται σε ποιοτικό έλεγχο με κριτήρια:

- τη **Χημική Καθαρότητα**, δηλαδή το ποσοστό ραδιοφαρμάκου που βρίσκεται στην επιθυμητή χημική μορφή,
- τη **Ραδιοχημική Καθαρότητα**, το ποσοστό ραδιενέργειας που βρίσκεται στην επιθυμητή χημική μορφή,
- τη **Ραδιοϊσοτοπική Καθαρότητα**, δηλαδή το ποσοστό της ραδιενέργειας που βρίσκεται στην επιθυμητή ραδιοϊσοτοπική μορφή.

Τα ραδιοφάρμακα υπόκεινται σε **βιολογικό έλεγχο**, για να διαπιστωθεί η παρουσία τοξικών ουσιών, μικροοργανισμών, πυρετογόνων, αλλά και ως προς το pH.

Η **παραγωγή ραδιονουκλιδίων**, της πυρηνικής ιατρικής, συντελείται σε επιταχυντές σωματιδίων και αντιδραστήρες. Το πλέον διαδεδομένο ραδιονουκλίδιο στην In Vivo πυρηνική ιατρική είναι το **Τεχνητίο - ^{99}Tc** , το οποίο παράγεται από τη διάσπαση του Μολυβδενίου - ^{99}Mo , τεχνητό στοιχείο που παράγεται με **νετρονική ενεργοποίηση**, δηλαδή προσθήκη ενός νετρονίου στο ^{98}Mo . Η διάταξη παραγωγής: ^{99}Tc ονομάζεται **γεννήτρια $^{99}\text{Mo} / ^{99}\text{Tc}$** . Η γεννήτρια περιέχει μια στήλη Αλουμινίου στην οποία είναι συνδεδεμένα δισθενή ιόντα MoO_4 . Κατά την ραδιενεργό διάσπαση του ^{99}Mo τα ιόντα MoO_4 μετατρέπονται σε μονοσθενή ιόντα TcO_4 που αποσπώνται σχετικά εύκολα από την στήλη με έκλυση, δηλαδή έκπλυση της στήλης Αλουμινίου σε φυσιολογικό ορό, από την οποία παράγεται διάλυμα ιόντων TcO_4 που τοποθετείται σε στείρο φιαλίδιο. Οι ενεργότητες Μολυβδενίου και Τεχνητίου μειώνονται με την πάροδο του χρόνου, ανάμεσα σε διαδοχικές εκλούσεις.



Η γεννήτρια θωρακίζεται με Μόλυβδο για λόγους προστασίας από την ακτινοβολία τόσο του Μολυβδενίου όσο και του θυγατρικού του Τεχνητίου.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΠΟΖΙΤΡΟΝΙΩΝ – PET

Η Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων – PET είναι μια απεικονιστική μέθοδος της πυρηνικής ιατρικής που καθιστά δυνατή την λήψη λειτουργικών εικόνων δηλωτικών του μεταβολισμού και, άρα, της φυσιολογικής ή παθολογικής λειτουργίας οργάνων.

Με την χρήση των κατάλληλων ραδιοφαρμάκων, η PET παρακολουθεί τις βιοχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία διαφόρων οργάνων. Με αυτό τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η ανίχνευση χημικών μεταβολών, σε όργανα, οι οποίες αποτελούν το αίτιο της νόσου.

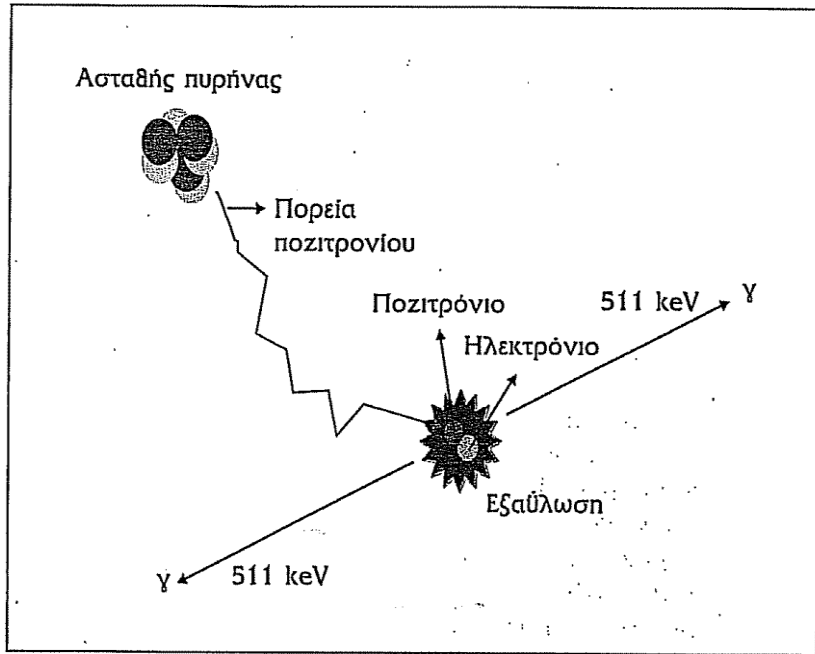
Η PET χρησιμοποιεί ραδιοφάρμακα που περιέχουν **ραδιονουκλίδια εκπομπούς – β^+** , τα οποία έχουν μικρούς χρόνους υποδιπλασιασμού και παράγονται σε κύκλοτρα ή σε γεννήτριες. Οι **χημικές ενώσεις**, της PET, προσομοιάζουν με βιοχημικές ενώσεις που συμμετέχουν στη φυσιολογική λειτουργία του υπό μελέτη οργάνου και στο μόριο τους είναι ενσωματωμένα βραχύβια ραδιενεργά ισότοπα στοιχείων που είναι δομικοί λίθοι σημαντικών βιομορίων.

- Ένα αρκετά διαδεδομένο ραδιοφάρμακο είναι η **F – 18 FDG**, η οποία, κατά το μεταβολισμό, συμπεριφέρεται όπως η κανονική γλυκόζη, αλλά τα ένζυμα της γλυκόλυσης αναγνωρίζουν τη διαφορά της από την κανονική γλυκόζη και παρεμποδίζουν την περαιτέρω αντίδραση, με συνέπεια να συσσωρεύεται και να καθιστά δυνατή την απεικόνιση του οργάνου. Σε **φυσιολογικές συνθήκες**, η F – 18 FDG συγκεντρώνεται στον εγκέφαλο και την καρδιά, αλλά όχι στο μεσοθωράκιο και επομένως δεν συνίσταται για μελέτη όγκων του εγκεφάλου, όπου χρησιμοποιούνται **αμινοξέα**, ενώ είναι κατάλληλη για τη μελέτη όγκων στους πνεύμονες και το μεσοθωράκιο.
- Ένα άλλο ραδιοφάρμακο είναι η **N – 13 Αμμωνία**, η οποία χρησιμοποιείται σε καρδιολογικές εφαρμογές.

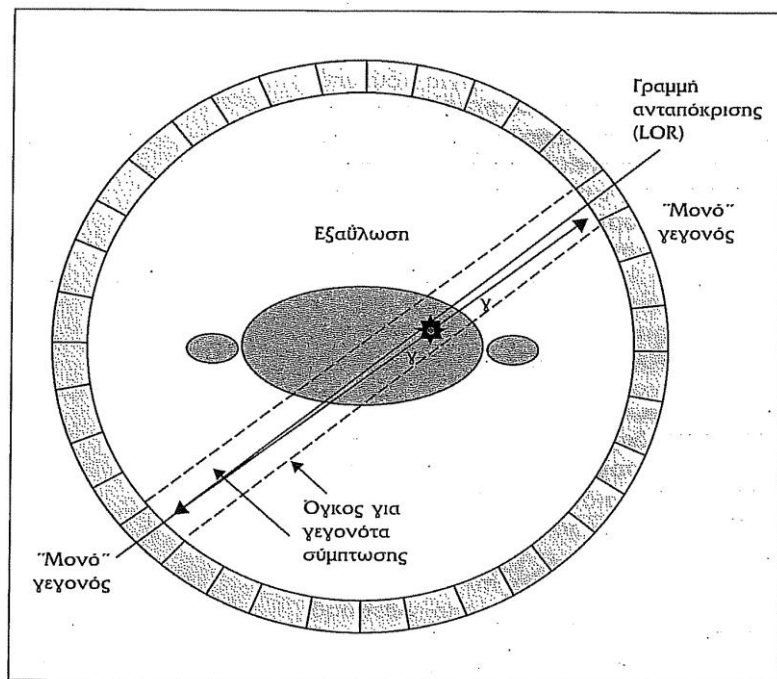
Για την αξιολόγηση των εικόνων PET γίνεται σύγκριση τόσο με σπινθηρογραφήματα, όσο και με εικόνες Αξονικής ή Μαγνητικής Τομογραφίας.

Φυσικές Αρχές της Τομογραφίας Εκπομπής Ποζιτρονίων – PET

Ένας εκπομπός – β^+ είναι ασταθής πυρήνας με πλεόνασμα πρωτονίων που εκπέμπει **ποζιτρόνια**, δηλαδή **αντισωματίδια ηλεκτρονίων**, τα οποία έχουν ίδιες ιδιότητες με τα ηλεκτρόνια αλλά θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Όταν ένα ποζιτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο συμβαίνει **εξαΰλωση**, από την οποία παράγονται δύο όμοια φωτόνια που κινούνται αντιδιαμετρικά και ονομάζονται **ακτινοβολία γ – εξαΰλωσης**.



Η ανίχνευση της ακτινοβολίας γ – εξαύλωσης γίνεται από δύο αντιδιαμετρικούς **ανιχνευτές σπινθηρισμών**. Οι ανιχνευτές ρυθμίζονται ώστε να καταγράφουν ζεύγη φωτονίων που φθάνουν σχεδόν ταυτόχρονα ή με πολύ μικρή χρονική διαφορά στον κρύσταλλο, **συμπτωτική ανίχνευση ακτινοβολίας εξαύλωσης – ACD**. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται η περιοχή μέσα στην οποία συμβαίνουν γεγονότα σύμπτωσης. Τα σημεία εξαύλωσης ποζιτρονίων, ιδιαίτερα σε **σύγχρονα συστήματα PET**, μπορεί να προσδιορισθούν με υπολογισμό της διαφοράς των χρόνων κίνησης των φωτονίων γ – εξαύλωσης μέχρι την άφιξή τους στους κρυστάλλους.



Συστήματα Απεικόνισης PET

Τα συστήματα PET, περιλαμβάνουν ανιχνευτική διάταξη κρυστάλλων σπινθηριστών που είναι τοποθετημένοι ώστε να σχηματίζουν δακτύλιο. Όταν δύο συμβατά φωτόνια ανιχνεύονται από δύο αντιδιαμετρικούς κρυστάλλους, σε χρονικό διάστημα της τάξης του nsec, καταγράφεται γεγονός σύμπτωσης κατά μήκος της ευθείας που ορίζεται από τα σημεία ανίχνευσης, **γραμμή ανταπόκρισης – LOR**. Τα δεδομένα συλλέγονται και υφίστανται επεξεργασία με σκοπό τον σχηματισμό ολόσωμης τομογραφικής εικόνας. Οι **σύγχρονοι τομογράφοι – PET**, είναι **υβριδικά συστήματα**, αποτελούμενα από:

- Τομογράφο PET,
- Αξονικό Τομογράφο CT,

Τα οποία ονομάζονται **Τομογράφοι PET / CT**. Τα συστήματα PET / CT συνδυάζουν τη μεταβολική πληροφορία της PET με την ανατομική – μορφολογική εικόνα του CT. Με **σύντηξη εικόνας**, επιτυγχάνεται ταυτόχρονη παρουσίαση των δύο πληροφοριών. Στα πλεονεκτήματα των σύγχρονων τομογράφων PET περιλαμβάνονται:

- Η διόρθωση της εξασθένησης της ακτινοβολίας γ – εξαύλωσης χωρίς μελέτη διέλευσης, διότι το σύστημα CT υπολογίζει τους συντελεστές εξασθένησης μ στα voxel του οργάνου και χαρτογραφεί την εξασθένηση της γ – ακτινοβολίας.
- Με τη χρήση κρυστάλλων LSO, GSO, LYSO, αντί των κρυστάλλων BGO των αρχικών συστημάτων PET, επιτυγχάνεται **αυξημένη παραγωγή φωτός**, ανά σπινθηρισμό και **μικρό χρόνο απόσβεση**, με συνέπεια μικρότερο νεκρό χρόνο, μεγαλύτερη απόρριψη τυχαίων γεγονότων, μεγαλύτερη απόδοση ως προς το ρυθμό κρούσεων, άρα και καλύτερη **χωρική διακριτική ικανότητα**. Ταυτόχρονα και για τον ίδιο λόγο, δηλαδή την αυξημένη παραγωγή φωτός σε κάθε σπινθηρισμό, μειώνεται η στατιστική αβεβαιότητα και επιτυγχάνεται καλύτερη **ενεργειακή διακριτική ικανότητα**.

Στα σύγχρονα συστήματα PET υπάρχει το σύστημα **Time of Flight – TOF**, με το οποίο γίνεται υπολογισμός της διαφοράς των χρόνων κίνησης των αντιδιαμετρικών φωτονίων γ – εξαύλωσης μέχρι την άφιξή τους στους κρυστάλλους, με αποτέλεσμα να εντοπίζεται με καλύτερη ακρίβεια το σημείο εξαύλωσης κατά μήκος της γραμμής ανταπόκρισης και να βελτιώνεται η **διακριτική ικανότητα**, αλλά και η **αντίθεση**.

Στα σύγχρονα συστήματα PET εμφανίζονται προβλήματα όπως δυσαρμονία εξαιτίας της σύντηξης των εικόνων PET και CT κινουμένων οργάνων και σφάλματα απεικόνισης μεταλλικών εμφυτευμάτων και ασβεστοποιημένων δομών.

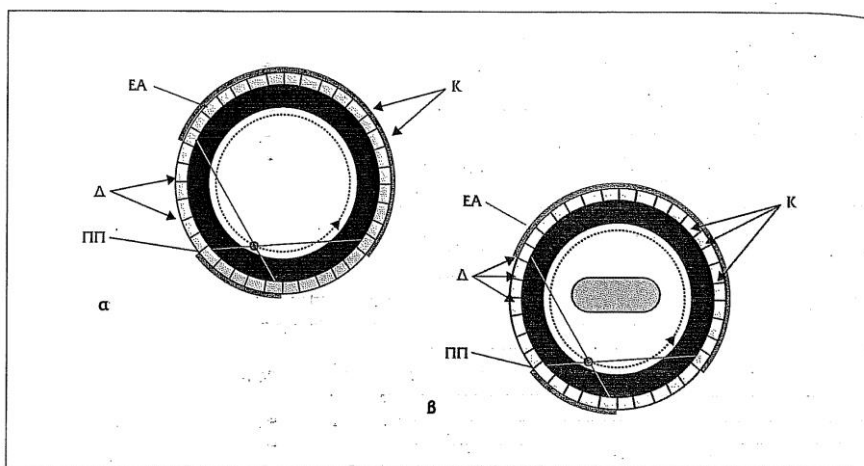
Εναλλακτικά του Τομογράφου Ποζιτρονίων που χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος χρησιμοποιείται υβριδική γ – camera, με δύο αντιδιαμετρικές κεφαλές NaI(Tl), η οποία μπορεί να καταγράφει τόσο τα φωτόνια της συμβατικής πυρηνικής ιατρικής όσο και τα φωτόνια γ – εξαύλωσης.

Ποιότητα Εικόνας στην Απεικόνιση PET

Η Απεικόνιση PET μπορεί να υποβαθμιστεί από παράγοντες όπως:

- σκέδαση του ποζιτρονίου ή ενός από τα φωτόνια γ – εξαύλωσης, αλλά και η απορρόφηση ενός από τα φωτόνια εξαύλωσης,
- τυχαία ταυτόχρονη προσβολή αντιδιαμετρικών κρυστάλλων από σκεδασμένα φωτόνια που φαίνεται να προέρχονται από την ίδια εξαύλωση και αποτελούν γεγονός ψευδούς σύμπτωσης,
- ο νεκρός χρόνος, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την ανταπόκριση του σπινθηριστή και την επεξεργασία του σήματος,
- ο θόρυβος εικόνας εξαιτίας ραδιενέργειας υποστρώματος και ο ηλεκτρονικός θόρυβος που αντιμετωπίζονται, αντίστοιχα, με τη χρήση ραδιοφαρμάκων με μεγαλύτερη ενεργότητα και την αύξηση του χρόνου απόκτησης δεδομένων.

Η εξασθένηση της ακτινοβολίας που προέρχεται από τα βαθύτερα στρώματα ιστών, στα κλασικά συστήματα PET, διορθώνεται με τη μελέτη διέλευσης. Ειδικότερα, μια πηγή Cs – 137 ή Ge – 68 / Ga – 68 περιστρέφεται γύρω από τον εξεταζόμενο και με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται, από έναν αντιδιαμετρικό ως προς την πηγή ανιχνευτή, οι συντελεστές εξασθένησης των ιστών του εξεταζόμενου. Πρέπει να σημειωθεί ότι πριν από την μελέτη διέλευσης προηγείται η λεγόμενη **κενή μελέτη**, κατά την οποία με απόντα τον εξεταζόμενο υπολογίζεται η ραδιενέργεια υποστρώματος. Από τις δύο αυτές μελέτες προσδιορίζεται ένας παράγων διόρθωσης της εξασθένησης.



Στα σύγχρονα συστήματα PET η διόρθωση της εξασθένησης γίνεται χωρίς μελέτη διέλευσης, δεδομένου ότι το σύστημα CT υπολογίζει τους συντελεστές εξασθένησης και χαρτογραφεί την εξασθένηση της γ – ακτινοβολίας.

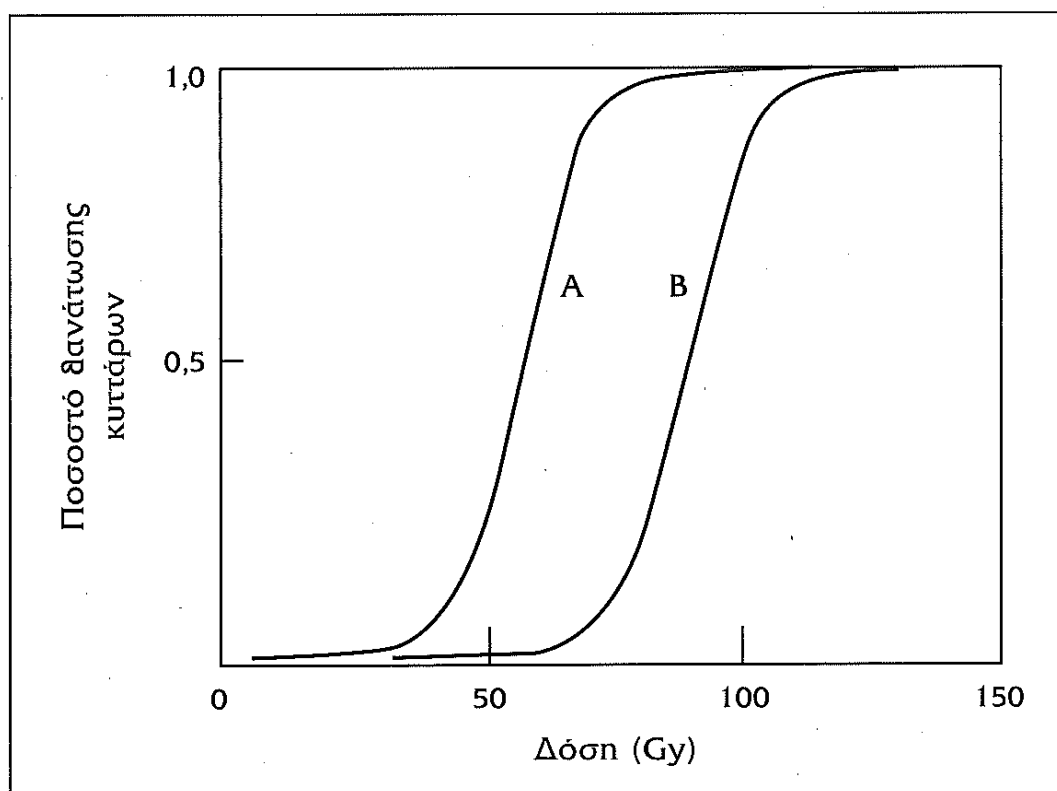
ΑΚΤΙΝΟΘΕΡΑΠΕΙΑ

Η ακτινοθεραπεία χρησιμοποιεί ιοντίζουσες ακτινοβολίες υψηλής ενέργειας για τη θεραπεία διαφόρων νόσων. Κατά την ακτινοθεραπεία, εναποτίθεται η μέγιστη δυνατή δόση στον όγκο – στόχο με σκοπό την αναστολή ανάπτυξης του όγκου και την πλήρη καταστροφή του. Οι ακτινοβολούμενοι όγκοι γειτνιάζουν με υγιείς ιστούς που πρέπει να προστατευθούν και αυτό δημιουργεί την ανάγκη:

- αφενός να μεγιστοποιηθεί η δόση σε μια περιοχή του σώματος του ασθενούς με σκοπό ντον έλεγχο της νόσου,
- αφετέρου δε να ελαχιστοποιηθεί η δόση σε γειτονικές υγιείς περιοχές, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η βλάβη εξαιτίας της θανάτωσης υγιών κυττάρων.

Ραδιοβιολογική Βάση της Ακτινοθεραπείας

Ο κυτταρικός θάνατος μέσω της δράσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας είναι, καταρχήν, στοχαστικό φαινόμενο. Αλλά σε μεγάλους πληθυσμούς κυττάρων το φαινόμενο αυτό γίνεται μη στοχαστικό. Το ποσοστό θανάτων σε ένα πληθυσμό κυττάρων σε σχέση με την εναποτιθέμενη δόση, δηλαδή η ακτινοευαισθησία του ιστού, απεικονίζεται στις καμπύλες δόσης – επιβίωσης.



Είναι προφανές ότι υπάρχει ένα κατώφλι δόσης κάτω από το οποίο δεν παρατηρείται κλινικό αποτέλεσμα αλλά και ένα μέγιστο όριο δόσης πάνω από το οποίο εμφανίζεται αποτέλεσμα στο σύνολο του κυτταρικού πληθυσμού.

Από τις καμπύλες A & B, για καρκινικά και υγιή κύτταρα αντίστοιχα, φαίνεται ότι αν το κατώφλι δόσης των υγιών είναι υψηλότερο από αυτό των καρκινικών κυττάρων, τότε η τιμή της θεραπευτικής δόσης μπορεί να είναι τέτοια ώστε να θανατωθεί ακόμη και το 95% των καρκινικών ενώ το αντίστοιχο ποσοστό θανάτου των υγιών κυττάρων δεν θα ξεπερνά το 5%.

Στις πραγματικές συνθήκες, οι καμπύλες δόσης – επιβίωσης, υγιών και καρκινικών κυττάρων, βρίσκονται σχετικά κοντά και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θανάτωση ενός σημαντικού αριθμού καρκινικών κυττάρων να συνοδεύεται από σοβαρή βλάβη στον υγιή κυτταρικό πληθυσμό.

Η μορφή της καμπύλης δόσης – επιβίωσης εξαρτάται από το είδος του ιστού, το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας, αλλά και από το ρυθμό χορήγησης της δόσης.

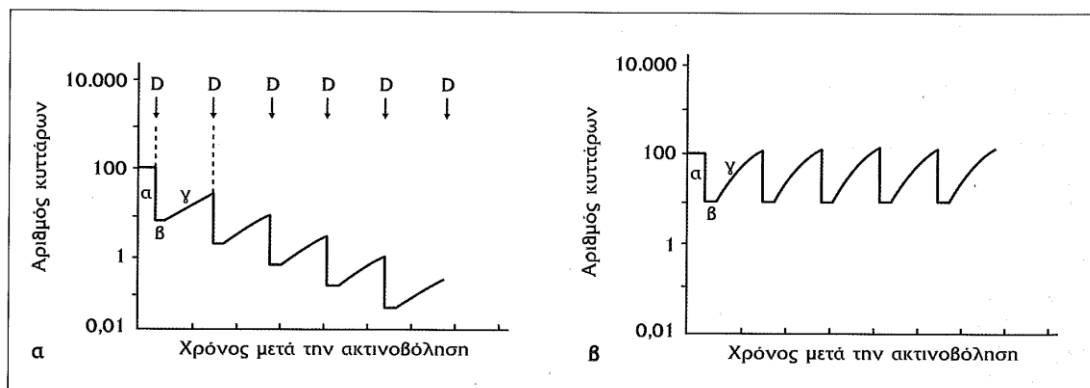
Κλασματοποίηση της Δόσης

Εάν επιτευχθεί η κατά το δυνατόν ελάττωση της εναποτιθέμενης δόσης στους υγιείς ιστούς μπορεί να ενισχυθεί η δόση στον όγκο – στόχο και να αυξηθεί η πιθανότητα ελέγχου της νόσου, με ταυτόχρονη μείωση των επιπλοκών.

Η πλέον διαδεδομένη τεχνική προστασίας των υγιών ιστών είναι η **κλασματοποίηση**, της **δόσης**, κατά την οποία αυξάνεται η συνολική εναποτιθέμενη δόση και μοιράζεται σε κλάσματα που χορηγούνται σε συνεδρίες με χρονική απόσταση τέτοια ώστε τα μεν υγιή κύτταρα να έχουν τη δυνατότητα να επιδιορθώσουν τις όποιες βλάβες, μεταξύ των δύο συνεδριών.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εξάρτηση της καμπύλης δόσης – επιβίωσης από το ρυθμό της χορηγούμενης δόσης και οι συχνές δόσεις προκαλούν σημαντικότερη και με μεγαλύτερο κατώφλι βλάβη.

Επίσης, τα υγιή κύτταρα διαθέτουν αποδοτικότερους μηχανισμούς επιδιόρθωσης του DNA, σε σύγκριση με αυτά των όγκων, γεγονός που αξιοποιείται με τον κατάλληλο διαμοιρασμό της συνολικής χορηγούμενης δόσης.



Στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο κλασμάτων τα υγιή κύτταρα έχουν τη δυνατότητα να ανανήψουν σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι τα καρκινικά και με τη χορήγηση ενός ικανού αριθμού κλασμάτων επιτυγχάνεται καταστροφή του απαιτούμενου αριθμού καρκινικών κυττάρων, ώστε να ελεγχθεί η νόσος και να μην καταστραφούν οι υγιείς γειτονικοί με τον όγκο ιστοί.

Σε **εξελιγμένες τεχνικές ακτινοθεραπείας**, γίνεται χρήση εξαιρετικά μικρών πεδίων ακτινοβολίας και η δόση «συμμορφώνεται» με το περίγραμμα του όγκου – στόχου, ώστε να γίνεται επιλεκτική ακτινοβολήση, ενώ η δόση χορηγείται άπαξ ή σε μικρό αριθμό συνεδριών, **στερεοτακτικές τεχνικές**.

Σε κάθε περίπτωση, βασικός κανόνας της ακτινοθεραπείας είναι ο έλεγχος της νόσου, με ελαχιστοποίηση της βλάβης των υγιών ιστών και οργάνων.

Εξωτερική Ακτινοθεραπεία

Στις τεχνικές εξωτερικής ακτινοθεραπείας η ακτινοβολήση του ασθενούς γίνεται με εξωτερικές πηγές, εν αντιθέσει με τη βραχυθεραπεία που χρησιμοποιεί κλειστές πηγές τοποθετημένες σε επαφή ή και μέσα στον όγκο.

Στην εξωτερική ακτινοθεραπεία χρησιμοποιούνται:

- Δέσμες Ακτίνων – X ή Ηλεκτρονίων Υψηλής Ενέργειας που παράγονται σε γραμμικούς επιταχυντές.
- Ραδιενεργές πηγές γ – ακτινοβολίας, όπως Co, οι οποίες μειονεκτούν καθώς εκπέμπουν χαμηλής ποιότητας δέσμη, η ενεργότητα τους ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, εκπέμπουν φωτόνια χαμηλής ενέργειας και παρέχουν χαμηλά επίπεδα ακτινοπροστασίας.
- Βαριά Φορτισμένα Σωματίδια υψηλού LET, πυρήνες άνθρακα και πρωτόνια.

Τα ηλεκτρόνια που χρησιμοποιούνται στην ακτινοθεραπεία έχουν μικρό βεληνεκές και, κατά συνέπεια, είναι κατάλληλα για τη θεραπεία επιφανειακών όγκων, ενώ για τη θεραπεία μη επιφανειακών όγκων χρησιμοποιούνται διεισδυτικές ακτίνες – X.

Στόχος της ακτινοθεραπείας είναι η απορρόφηση μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας ενέργειας από τα καρκινικά κύτταρα. Κατά συνέπεια, τα σωματίδια με υψηλό LET αποτελούν την καταλληλότερη επιλογή.

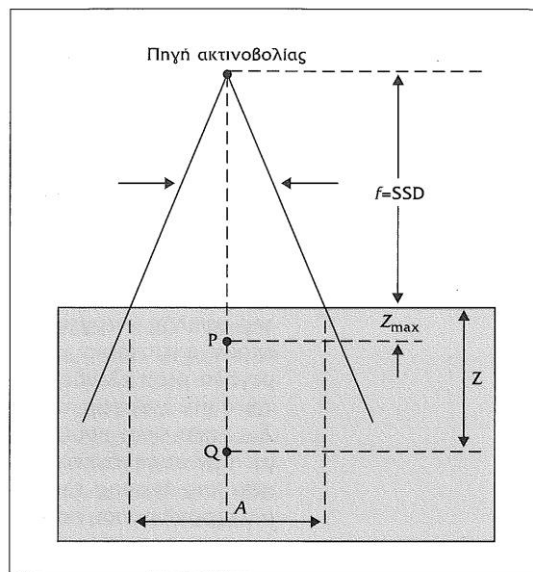
Κατανομές Δόσης

Η **κατανομή δόσης**, δηλαδή η τιμή της δόσης που χορηγείται σε κάθε σημείο του ασθενή, προσδιορίζεται επακριβώς με τη χρήση κατάλληλων δοσιμέτρων, τα οποία τοποθετούνται σε ομοιώματα νερού ή υλικού παρόμοιου με το νερό.

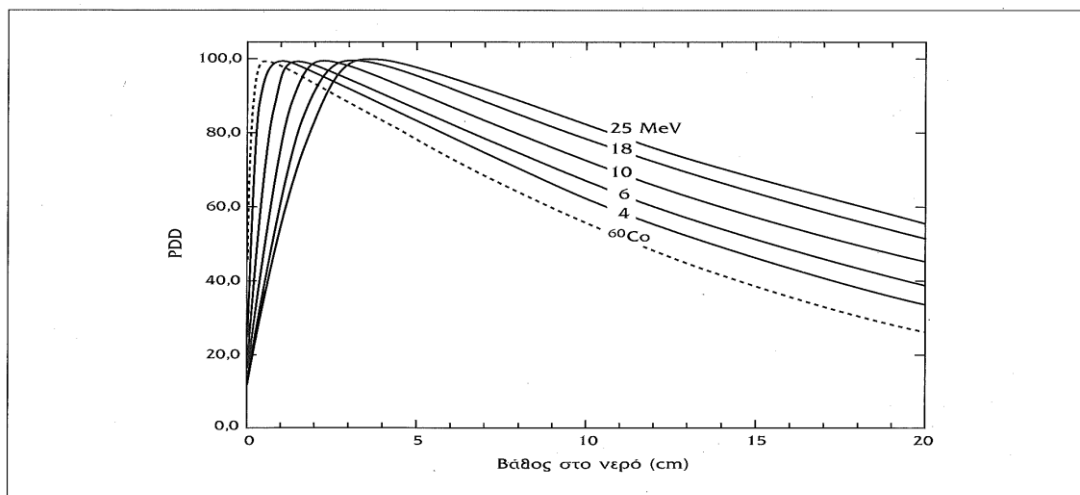
Στις **σύγχρονες τεχνικές**, ο σχεδιασμός της ακτινοθεραπείας είναι τρισδιάστατος και βασίζεται στην αξονική τομογραφία, ενώ ο καθορισμός της κατανομής δόσης γίνεται σε κάθε διάσταση και η διόρθωση τυχόν ανομοιογενειών γίνεται με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων.

Όταν μια ιοντίζουσα ακτινοβολία εισέρχεται μέσα στον ασθενή η απορροφούμενη δόση μεταβάλλεται ως προς το βάθος και η μεταβολή της δόσης βάθους καθορίζεται από την **% δόση βάθους – PDD**, δηλαδή το πηλίκο της απορροφούμενης δόσης D σε βάθος Z προς τη μέγιστη απορροφούμενη δόση Dmax σε βάθος Zmax:

$$PDD = (D / D_{max}) 100\%$$



Για **ακτινοβολία φωτονίων**, η μέγιστη δόση δεν σημειώνεται κοντά στην επιφάνεια, αλλά σε κάποιο βάθος που αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας της ακτινοβολίας. Μέχρι το βάθος μέγιστης δόσης υπάρχει μια **περιοχή – build up**, στην οποία η δόση αυξάνει με το βάθος, ενώ μετά το βάθος μέγιστης δόσης η δόση βάθους μειώνεται.

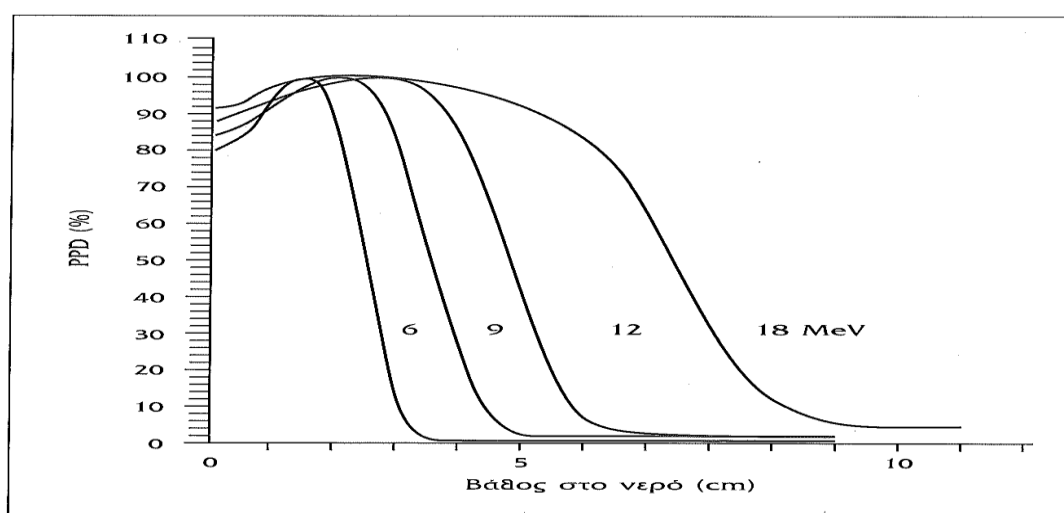


Με την αύξηση της ενέργειας της δέσμης φωτονίων μειώνεται η δόση στην επιφάνεια και αυξάνεται το βάθος μέγιστης δόσης. Το γεγονός αυτό, skin sparing effect, έχει ως αποτέλεσμα να προστατεύεται το δέρμα κατά την ακτινοβολία ενδοβαθών όγκων.

Η % δόση βάθους φωτονίων εξαρτάται από:

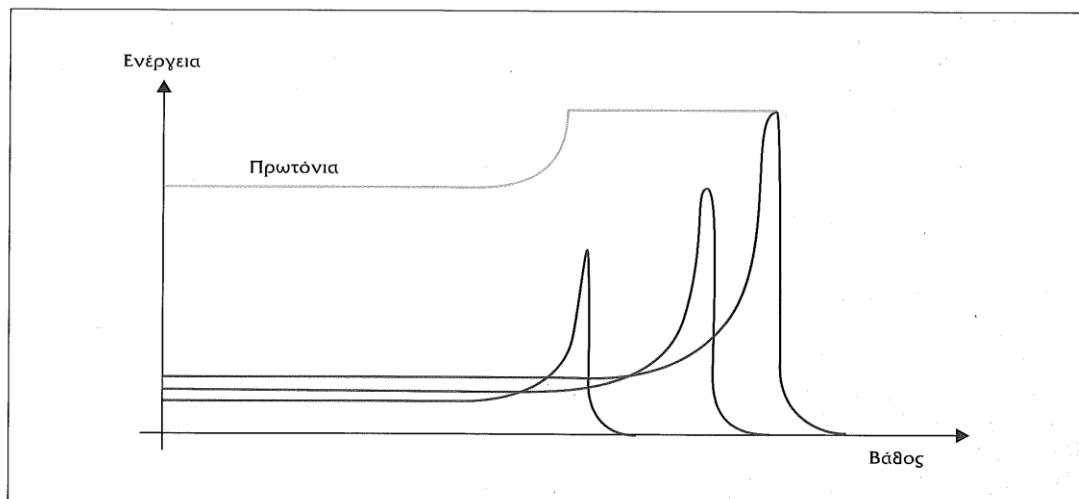
- την **ενέργεια**, της δέσμης, διότι οι δέσμες φωτονίων υψηλότερης ενέργειας είναι περισσότερο διεισδυτικές και εξασθενούν με σχετικά μικρότερο ρυθμό,
- το **βάθος**, διότι με την αύξηση της ενέργειας μειώνεται ο συντελεστής μ της δέσμης και η μείωση της δόσης βάθους που παρατηρείται μετά το Z_{max} είναι μικρότερη,
- το **μέγεθος**, του πεδίου ακτινοβολίας, διότι με την αύξηση του μεγέθους του πεδίου ακτινοβολίας αυξάνεται ο αριθμός των σκεδαζόμενων φωτονίων που παραμένουν μέσα σε αυτό,
- την **απόσταση πηγής – επιφάνειας SSD**, διότι η ροή εισερχόμενων φωτονίων είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή και η % δόση βάθους αυξάνεται με την απόσταση της επιφάνειας από την πηγή.

Η καμπύλη της % δόσης βάθους, για **δέσμη ηλεκτρονίων**, διαφέρει από αυτήν της δέσμης φωτονίων καθώς εμφανίζει σχετικά υψηλή δόση βάθους στην επιφάνεια που αυξάνει μέχρι το βάθος μέγιστης δόσης και μετά από αυτό μειώνεται απότομα σε μια σχεδόν σταθερή τιμή – «ουρά» **ακτινοβολίας πέδησης**. Αυτό το γεγονός καθιστά την ακτινοβολία με δέσμη ηλεκτρονίων την καταλληλότερη τεχνική ακτινοθεραπείας των επιφανειακών όγκων – σε βάθος μικρότερο των 5cm.



Για τα ηλεκτρόνια η % δόση βάθους μετράται για ορισμένη SSD, συνήθως **100cm**, η οποία καλείται ονομαστική απόσταση θεραπείας, ενώ εξαρτάται από το μέγεθος του πεδίου και την ενέργεια της δέσμης.

Η ακτινοθεραπεία με βαριά σωματία, κυρίως **πρωτόνια**, εμφανίζει πλεονέκτημα ως προς το ότι οι υγιείς ιστοί που βρίσκονται πριν και μετά από έναν **ενδοβαθή όγκο**, δέχονται μικρότερη δόση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πρωτόνια εναποθέτουν το μέγιστο της δόσης στο τέλος της διαδρομής τους – **καμπύλη Bragg**.



Η **κορυφή Bragg**, βρίσκεται σε θέση που εξαρτάται από την ενέργεια των πρωτονίων και μπορεί να κατευθυνθεί προς τον όγκο – στόχο με κατάλληλη επιλογή ενέργειας. Με δεδομένο το μικρό εύρος της κορυφής Bragg, στην πράξη, χρησιμοποιείται ένα φάσμα ενεργειών, ώστε να καλυφθεί ο όγκος – στόχος σε όλη του την έκταση.

Άλλα πλεονεκτήματα της ακτινοθεραπείας με πρωτόνια είναι ότι:

- η διαδρομή των πρωτονίων στην ύλη είναι ευθύγραμμη, σε αντίθεση με αυτή των ηλεκτρονίων και των φωτονίων που υφίστανται σκεδάσεις, με συνέπεια το «άνοιγμα» της δέσμης,
- τα πρωτόνια εμφανίζουν σχετικά μεγαλύτερο RBE.

Η ακτινοθεραπεία με πρωτόνια θεωρείται ως μια αποτελεσματική τεχνική εξωτερικής ακτινοθεραπείας, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται, ακόμη, οι τεχνικές με φωτόνια – X ή σωματία – β υψηλής ενέργειας που εκπέμπονται από γραμμικούς επιταχυντές.

Βραχυθεραπεία

Στη βραχυθεραπεία οι ραδιενεργές πηγές τοποθετούνται ενδοκοιλιακά, ενδοϊστικά, ή σε επαφή με τον όγκο – στόχο. Σκοπός είναι η ακτινοβόληση του όγκου με υψηλές δόσεις και, παράλληλα, η προστασία των παρακείμενων ιστών – οργάνων.

Η περιοχή του όγκου απορροφά πολύ μεγαλύτερη δόση ακτινοβολίας σε σχέση με τους παρακείμενους υγιείς ιστούς – όργανα, καθώς η δόση από την πηγή μειώνεται με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης.

Η βραχυθεραπεία αναπτύχθηκε με αφορμή την απομόνωση του Ra, το οποίο έχει μεν μεγάλο χρόνο ημιζωής, αλλά παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα ακτινοπροστασίας. Με την εξέλιξη των πυρηνικών αντιδραστήρων έγινε δυνατή η κλινική χρήση νέων τεχνητών ραδιονουκλιδίων όπως I – 125, I – 131, Cs – 137, Ir – 192.

Με στόχο καλύτερη ακτινοπροστασία του προσωπικού έχει αναπτυχθεί η μέθοδος αυτόματης μεταφόρτισης, κατά την οποία αρχικά εισάγονται στον ασθενή και στις κατάλληλες θέσεις καθετήρες – «οδηγοί» και στη συνέχεια, όταν έχει εξασφαλισθεί η επιθυμητή γεωμετρία ακτινοβόλησης, εισάγεται η ραδιενεργός πηγή.

Η βραχυθεραπεία, ανάλογα με το ρυθμό της χορηγούμενης δόσης διακρίνεται σε:

- χαμηλού ρυθμού δόσης – LDR,
- μέσου ρυθμού δόσης – MDR,
- υψηλού ρυθμού δόσης – HDR.

Ειδικά η HDR, στην οποία χρησιμοποιούνται πηγές εξαιρετικά υψηλής ενεργότητας, έχει το πλεονέκτημα ότι η δόση χορηγείται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα με συνέπεια να αποφεύγονται επιπλοκές που μπορεί να εμφανίζονται σε βραχυθεραπείες με μεγάλο χρόνο διάρκειας όπως η LDR.

Βασικά κριτήρια επιλογής ραδιονουκλιδίων, για τη βραχυθεραπεία, είναι:

- η ενέργεια, η οποία δεν πρέπει να είναι εξαιρετικά υψηλή κυρίως για λόγους ακτινοπροστασίας,
- η ειδική ενεργότητα, δηλαδή η ενεργότητα ανά μονάδα μάζας της πηγής,
- ο χρόνος ημιζωής, δεδομένου ότι πηγές με υψηλό χρόνο ημιζωής κρίνονται κατάλληλες για παροδικές εφαρμογές, ενώ η ενεργότητα πηγών με υψηλό χρόνο ημιζωής δεν μεταβάλλεται σημαντικά και αυτό καθιστά ευκολότερη τη δοσιμετρία των πηγών αυτών,
- κόστος,
- ακτινοπροστασία.

Με βάση τα παραπάνω οι πλέον συχνά χρησιμοποιούμενες πηγές βραχυθεραπείας είναι το Ir – 192 για παροδικές εφαρμογές βραχυθεραπείας HDR και το I – 125 για εφαρμογές LDR με μόνιμα εμφυτεύματα.

ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑ – ΜΑΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

Η ακτινογραφία αποτελεί στιγμιαία απεικόνιση, δηλαδή μια στατική εικόνα, η οποία σχηματίζεται με βάση τη διαφορά εξασθένησης των ακτίνων – X που διέρχονται από διαφορετικά βιολογικά υλικά.

Η ακτινογραφία λαμβάνεται με τη χρήση:

- λυχνίας ακτίνων – X που τοποθετείται εμπρός από τον εξεταζόμενο,
- ανιχνευτικού συστήματος τοποθετημένου πίσω από τον.

Η λυχνία εκπέμπει δέσμη ακτίνων – X που εισέρχεται και απορροφάται εν μέρει από τον εξεταζόμενο. Η εξερχόμενη δέσμη συλλαμβάνεται από το ανιχνευτικό σύστημα και χρησιμοποιείται για το σχηματισμό εικόνας.

Δεδομένου ότι η απορρόφηση των ακτίνων – X διαφέρει ανάλογα με το είδος και την πυκνότητα του ιστού που συναντούν στο σώμα του εξεταζόμενου, η κατανομή της έντασης της εξερχόμενης δέσμης δίνει την πληροφορία για το σχηματισμό εικόνας.

Η απλή ακτινογραφία αποτελεί **μελέτη διέλευσης**, από την οποία σχηματίζεται μια **προβολική εικόνα**, δηλαδή διάφορες τρισδιάστατες ανατομικές δομές του σώματος του εξεταζόμενου απεικονίζονται σε μια επίπεδη – δισδιάστατη εικόνα.

Τα **βασικά μέρη**, του ακτινογραφικού μηχανήματος είναι:

- Η κεφαλή του συστήματος που αποτελείται από τη **λυχνία ακτίνων – X**, αλλά και το σύστημα ψύξης της λυχνίας.
- Το **κιβώτιο διαφραγμάτων**, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στην κεφαλή και τον εξεταζόμενο και αποτελείται από οριζόντια & κάθετα πλακίδια μολύβδου που ρυθμίζονται έτσι ώστε να οριοθετείται το πεδίο ακτινοβολίας.
- Η **εξεταστική τράπεζα**, στην οποία τοποθετείται ο εξεταζόμενος και μπορεί να μετακινηθεί προς κάθε κατεύθυνση.
- Το **αντιδιαχτυτικό διάφραγμα**, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στον εξεταζόμενο και το σύστημα ανίχνευσης, ώστε να αποκόπτει τα σκεδασμένα φωτόνια από την εξερχόμενη δέσμη ακτίνων – X.
- Το **σύστημα ανίχνευσης**, το οποίο μπορεί να είναι ένα ακτινογραφικό film, στην απλή ακτινογραφία, ή μια ηλεκτρονική συσκευή ή σύστημα ψηφιακής ακτινογραφίας.
- Το **χειριστήριο – κονσόλα χειρισμού**, με το οποίο γίνεται ο ποιοτικός και ποσοτικός έλεγχος των ακτίνων – X που παράγονται από τη λυχνία, δηλαδή ρυθμίζονται ο χρόνος έκθεσης, η υψηλή τάση και το ρεύμα της λυχνίας.

Ποιοτικός & Ποσοτικός Έλεγχος της Δέσμης των Ακτίνων – X

Ο ποιοτικός και ποσοτικός έλεγχος της δέσμης των ακτίνων – X γίνεται με ρύθμιση της υψηλής τάσης – KV και του ρεύματος – mA της λυχνίας, αλλά και του χρόνου έκθεσης – msec, από το χειριστήριο. Αυτό μπορεί να γίνει με:

- Τεχνική «τριών κομβίων», δηλαδή την ανεξάρτητη επιλογή των παραμέτρων.
- Τεχνική «δύο κομβίων», δηλαδή την επιλογή της υψηλής τάσης – KV και του γινομένου mAs που καθορίζεται με κριτήρια το μικρό χρόνο έκθεσης και τη θερμική αντοχή της λυχνίας.
- Τεχνική «ενός κομβίου», δηλαδή την επιλογή της υψηλής τάσης – KV και την αυτόματη ρύθμιση των άλλων δύο παραμέτρων που καθορίζονται με κριτήρια το πάχος του εξεταζόμενου, το μικρό χρόνο έκθεσης και τη θερμική αντοχή της λυχνίας.
- Τυποποιημένη Ανατομική Τεχνική που γίνεται με τη χρήση ήδη υπαρχόντων ανατομικών προτύπων.

Η **υψηλή τάση – KV**, καθορίζει την ενέργεια, δηλαδή τη διεισδυτική ικανότητα, της δέσμης των ακτίνων – X. Με την επιλογή των KV προσδιορίζεται η μέγιστη ενέργεια του φάσματος των ακτίνων – X που παράγονται από τη λυχνία, ενώ τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας που δεν συμβάλλουν στην απεικόνιση αποκόπτονται με τη χρήση φίλτρων Αλουμινίου.

Το **ρεύμα – mA**, της λυχνίας, δηλαδή ο αριθμός θερμοηλεκτρονίων της καθόδου που κατευθύνονται προς την άνοδο ανά μονάδα χρόνου, προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό παραγωγής φωτονίων στην άνοδο της λυχνίας, άρα και την ένταση της δέσμης.

Ο **χρόνος έκθεσης – msec**, αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια της ακτινοβόλησης του εξεταζόμενου που πρέπει να είναι κατά το δυνατό μικρή ώστε να αποφευχθεί ασάφεια στην εικόνα εξαιτίας κίνησης είτε του εξεταζόμενου είτε των ανατομικών δομών που απεικονίζονται – καρδιά και πνεύμονες. Το **γινόμενο mAs**, «έκθεση», προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό το συνολικό αριθμό των φωτονίων που παράγονται στη λυχνία.

Αντιδιαχτυτικό Διάφραγμα

Όταν η δέσμη των ακτίνων – X που εξέρχονται από την λυχνία διέλθει από το σώμα του εξεταζόμενου, ένα μέρος των φωτονίων της δέσμης απορροφάται και ένα άλλο μέρος σκεδάζεται και η εξερχόμενη δέσμη αποτελείται από πρωτογενή φωτόνια που δεν απορροφήθηκαν, αλλά και σκεδασμένα φωτόνια που υποβαθμίζουν την αντίθεση της εικόνας.

Η αποκοπή των σκεδασμένων φωτονίων γίνεται με την παρεμβολή λεπτών λωρίδων μολύβδου & αλουμινίου, αντιδιαχυτικό διάφραγμα – Bucky, οι οποίες μπορεί να είναι παράλληλες, εστιασμένες ή διασταυρούμενες.

Τα χαρακτηριστικά ενός αντιδιαχυτικού διαφράγματος καθορίζονται από:

- τον λόγο του διαφράγματος, δηλαδή το μήκος των λωρίδων προς τη μεταξύ τους απόσταση,
- την πυκνότητα λωρίδων, δηλαδή τον αριθμό λωρίδων ανά μονάδα μήκους,
- την διαπερατότητα πρωτογενούς ακτινοβολίας, δηλαδή το ποσοστό έντασης πρωτογενούς ακτινοβολίας που διαπερνά το διάφραγμα,
- τον παράγοντα αντιδιαχυτικού διαφράγματος, δηλαδή το λόγο της έντασης που προσπίπτει προς αυτή που το διαπερνά,
- τον παράγοντα βελτίωσης της αντίθεσης, δηλαδή το λόγο της αντίθεσης με το διάφραγμα προς την αντίθεση χωρίς αυτό.

Ακτινολογικό FILM

Το ακτινολογικό film αποτελείται από μια συνθετική βάση εκατέρωθεν της οποίας βρίσκεται **φωτογραφικό γαλακτώμα**, με ενεργό συστατικό **κόκκους AgBr – AgI**. Το σύστημα βάσης – γαλακτώματος περιβάλλεται από προστατευτικό επίστρωμα ζελατίνης.

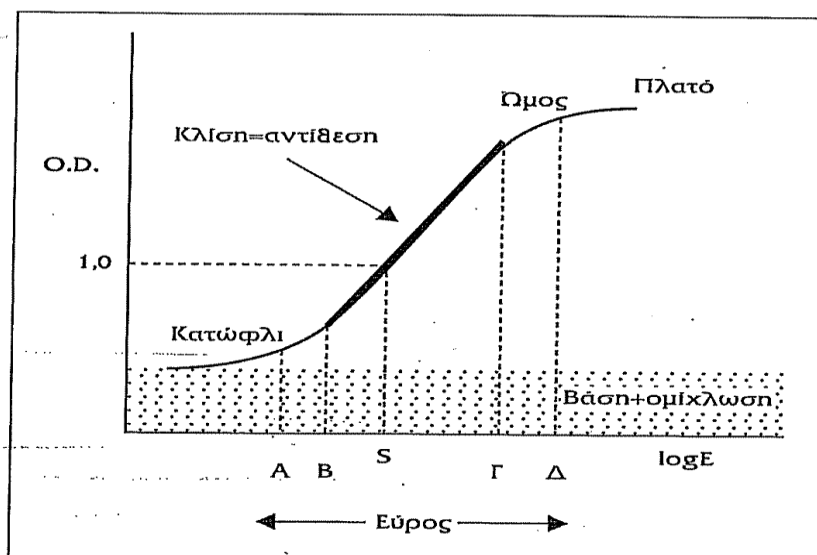
Δεδομένου ότι το φωτογραφικό film είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητο στο ορατό φως από ότι στην ακτινοβολία – X, χρησιμοποιείται η **ενισχυτική πινακίδα**, η οποία μετατρέπει την ακτινοβολία – X σε ακτινοβολία ορατού φωτός. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η υπερβολική ακτινοβολήση του εξεταζόμενου.

Όταν το ακτινολογικό film ακτινοβοληθεί, αμαυρώνεται και ο βαθμός αμαύρωσης είναι ανάλογος του αριθμού φωτονίων που το προσβάλλουν. Ο **βαθμός αμαύρωσης**, του film, ποσοτικοποιείται με την **οπτική πυκνότητα – OD**, η οποία ορίζεται ως:

$$OD = \log \frac{I_0}{I}$$

δηλαδή ως δεκαδικός λογάριθμος του πηλίκου της έντασης – I_0 μιας λεπτής δέσμης ορατού φωτός που προσπίπτει στο εμφανισμένο film προς την εξερχόμενη ένταση – I . Η **χαρακτηριστική καμπύλη**, του **film**, παριστά την οπτική πυκνότητα συναρτήσει του δεκαδικού λογαρίθμου της συνολικής έκθεσης που δέχεται το film, το οποίο έχει μια αρχική ομοιόμορφη αμαύρωση που οφείλεται:

- στην αδιαφάνεια της βάσης,
- αλλά και στην ομίχλωση που προκαλείται κατά την εμφάνιση του film.



Στη χαρακτηριστική καμπύλη του ακτινολογικού film φαίνεται ότι:

- σε χαμηλές τιμές της έκθεσης εμφανίζεται μόνον αμαύρωση που οφείλεται στην ομίχλωση της βάσης – **κατώφλι**,
- σε υψηλές τιμές έκθεσης, πάνω από ένα όριο, η αμαύρωση δεν μεταβάλλεται και έχει επέλθει κορεσμός του film – **πλατό**,
- στην περιοχή ανάμεσα σε «κατώφλι» και «πλατό», η οπτική πυκνότητα – OD εμφανίζει **γραμμική μεταβολή**, με κλίση που καθορίζει την **αντίθεση**, του film, ενώ το εύρος τιμών της γραμμικής περιοχής καλείται **εύρος**, του film και είναι αντιστρόφως ανάλογο της αντίθεσης.

Η επιλογή του film εξαρτάται από το βαθμό ανομοιομορφίας της ανατομικής δομής που πρόκειται να απεικονισθεί. Αν η δομή είναι σχετικά ομοιογενής, όπως μια κύστη, τότε επιλέγεται film με πολύ μικρό εύρος τιμών ώστε να εμφανίζει εξαιρετικά υψηλή αντίθεση που θα ενισχύσει τις πολύ μικρές διαφορές στη σύσταση της δομής.

Η έκθεση που απαιτείται για να γίνει $OD = 1$, ονομάζεται **ταχύτητα** – **S**, του film και είναι ένα από τα κριτήρια ευαισθησίας του film.

Ποιότητα Εικόνας

Σε διαγνωστικές εφαρμογές με ακτίνες – X χρησιμοποιούνται ενέργειες που ευνοούν το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**, αλλά και **σκέδαση Compton**. Η εικόνα σχηματίζεται από πρωτογενή φωτόνια που δεν έχουν απορροφηθεί από τη δομή που πρόκειται να απεικονισθεί, ενώ τα σκεδασμένα φωτόνια όταν προσβάλλουν το ακτινολογικό film δίνουν λανθασμένη πληροφορία και, για το λόγο αυτό, είναι «ανεπιθύμητα».

Η αποκοπή των σκεδασμένων φωτονίων, ώστε να μην φθάσουν και προσβάλλουν το film, γίνεται με τη χρήση αντιδιαχυτικού διαφράγματος – Bucky.

Ως **ποιότητα εικόνας**, ορίζεται σύνολο χαρακτηριστικών με τα οποία αξιολογείται η πληροφορία που παρέχεται από μια απεικόνιση. Η αντικειμενική αξιολόγηση, για την ακτινογράφιση, γίνεται από τις τιμές παραμέτρων όπως:

- Η **Αντίθεση Εικόνας**, η οποία ορίζεται από τη διαφορά οπτικής πυκνότητας μεταξύ γειτονικών περιοχών του ακτινολογικού film και εξαρτάται από την **Αντίθεση Θέματος**, αλλά και την ευαισθησία του συστήματος ενισχυτικής πινακίδας και film.
- Η **Ασάφεια**, δηλαδή η αδυναμία ακριβούς απεικόνισης του περιγράμματος που οφείλεται σε παράγοντες όπως κίνηση του αντικειμένου, μέγεθος εστίας, γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου και του συστήματος, ενισχυτική πινακίδα. Η ασάφεια εξαιτίας του μεγέθους της εστίας λέγεται **παρασκιά**.
- Ο **Θόρυβος**, δηλαδή λανθασμένη πληροφορία, μπορεί να είναι θόρυβος δομής ή κβαντικός θόρυβος, ενώ μπορεί να οφείλεται και σε σκεδασμένα φωτόνια.

Όταν από δύο γειτονικές περιοχές ενός αντικειμένου εισέρχεται δέσμη ακτίνων – X εντάσεως I_0 , οι επιμέρους εντάσεις της εξερχόμενης δέσμης είναι διαφορετικές και η ποσοστιαία διαφορά τους ορίζει την **αντίθεση θέματος – Cs**, η οποία εξαρτάται από:

- τη διαφορά πάχους,
- τη διαφορά πυκνότητας,
- τη διαφορά ατομικού αριθμού,
- τη διαφορά στις ενέργειες των φωτονίων, για πολυενεργειακή δέσμη.

Η **έγγυση σκιαγραφικών υλικών**, όπως Ιώδιο και Βάριο που εξαιτίας των υψηλών ατομικών αριθμών τους είναι ισχυρά απορροφητικά, ενισχύει την αντίθεση θέματος.

Ως **θόρυβος δομής**, θεωρείται η όποια λανθασμένη πληροφορία οφείλεται σε δομές που είναι γειτονικές της εξεταζόμενης δομής και δυσκολεύουν τη διάγνωση. Επίσης, ως **κβαντικός θόρυβος**, ορίζεται ο θόρυβος που οφείλεται στο στατιστικό χαρακτήρα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ακτίνων – X και του υλικού του αντικειμένου. Για την αποφυγή του κβαντικού θορύβου απαιτείται η χρήση ικανού αριθμού φωτονίων, ώστε η συμπεριφορά τους να προσεγγίζει την αναμενόμενη με βάση την ενέργεια της δέσμης, αλλά και το πάχος και τη σύσταση του προς απεικόνιση αντικειμένου.

Κατά την ακτινογράφιση, η ποιότητα εικόνας επηρεάζεται από τη γεωμετρία τόσο της διάταξης όσο και του αντικειμένου. Σημαντική είναι η επίδραση της μεγέθυνσης, δηλαδή της μεταβολής των διαστάσεων του αντικειμένου κατά την απεικόνιση του η οποία, όταν είναι ανομοιόμορφη, προκαλεί **παραμόρφωση σχήματος & θέσης**.

Μαστογραφία

Η μαστογραφία είναι απεικονιστική μέθοδος που χρησιμοποιεί ακτίνες – X για να κατασκευάσει προβολικές εικόνες του μαστού – ακτινογραφία του Μαστού.

Στις ακτινολογικές εξετάσεις βασική επιδίωξη είναι η καλύτερη δυνατή απεικόνιση και, ταυτόχρονα, η ελάχιστη δυνατή δόση προς τον εξεταζόμενο. Στην περίπτωση του μαστού, ιδιαίτερη σημασία έχουν:

- η μεγάλη ακτινοευαισθησία, αλλά και
- οι μικρές διαφορές ως προς την πυκνότητα με αποτέλεσμα αντίστοιχα μικρές διαφορές ως προς την αντίθεση θέματος, μεταξύ των διαφόρων περιοχών του Μαστού.

Για τους λόγους αυτούς, κατά τη Μαστογραφία, χρησιμοποιούνται ακτίνες – X με ενέργεια χαμηλότερη από ότι στην κοινή Ακτινογραφία. Η υψηλή τάση στη λυχνία είναι 25 – 35 KV, αν και προτιμάται η ρύθμιση να είναι πιο κοντά στο κάτω όριο του διαστήματος. Η αρχή λειτουργίας της λυχνίας είναι όμοια με αυτή της Ακτινογραφίας και διαφέρει μόνον στο ότι χρησιμοποιείται εστία Μολυβδαινίου ώστε να παράγονται φωτόνια σχετικά χαμηλότερης ενέργειας.

Η **αντίθεση θέματος**, μεταξύ των γειτονικών περιοχών του Μαστού, εξαρτάται από τη διαφορά στο πάχος και τους γραμμικούς συντελεστές εξασθένησης – μ. Με σκοπό την εξάλειψη της επίδρασης της διαφοράς πάχους που ενδέχεται να αντισταθμίσει τις διαφορές των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης – μ και, τελικά, να υποβαθμίσει την αντίθεση θέματος, χρησιμοποιείται **σύστημα συμπίεσης – Πίεστρο**, το οποίο:

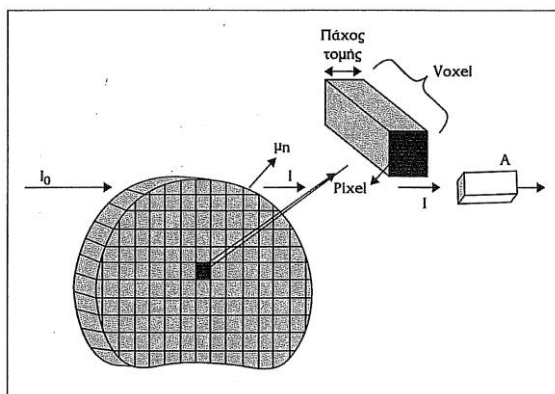
- προσδίδει το ίδιο πάχος στους επιμέρους ιστούς
- και, ταυτόχρονα, ακινητοποιεί το Μαστό περιορίζοντας την ασάφεια,

ενώ με τη μείωση του συνολικού πάχους του Μαστού επιτυγχάνεται μείωση και της χορηγούμενης δόσης.

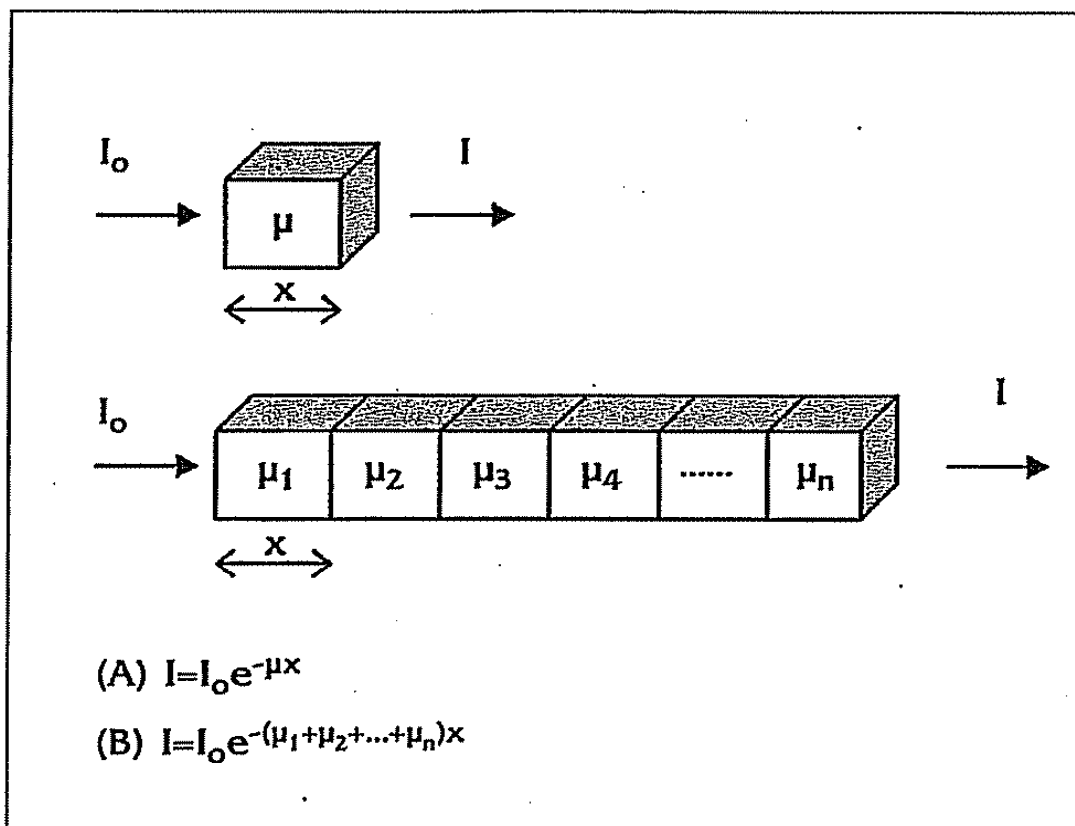
Μαστογραφία γίνεται σε ασυμπτωματικές γυναίκες, με στόχο την έγκαιρη ανίχνευση κακοηθών εστιών στο Μαστό, αλλά και σε γυναίκες που εμφανίζουν συμπτώματα που πρέπει να διερευνηθούν.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ή ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Κατά την αξονική τομογραφία καταγράφονται οι γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης στοιχείων όγκου – voxels, τα οποία βρίσκονται στο επίπεδο μιας τομής του σώματος του εξεταζόμενου. Από τις τιμές των συντελεστών – μ λαμβάνεται πληροφορία για τη σύσταση κάθε επιμέρους ογκοστοιχείου – voxel και κατασκευάζεται η εικόνα.

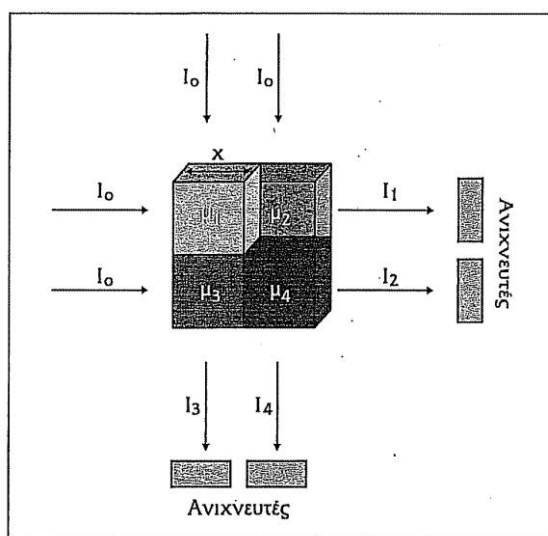


Όταν μια λεπτή δέσμη ακτίνων – X διαπερνά μια σειρά ογκοστοιχείων – voxels που έχουν ίδιο πάχος, η ένταση της εξερχόμενης δέσμης διαμορφώνεται από τη διαδοχική εξασθένηση που υφίσταται καθώς διέρχεται από το κάθε ογκοστοιχείο στο επόμενο.



Από την κάθε σειρά ογκοστοιχείων προκύπτει μια εξίσωση που έχει ως αγνώστους τις τιμές των συντελεστών εξασθένησης των ογκοστοιχείων – voxels που τη συνιστούν.

Για τον υπολογισμό όλων των συντελεστών εξασθένησης των ογκοστοιχείων – voxels της τομής απαιτείται ένα συγκεκριμένο πλήθος εξισώσεων. Για το λόγο αυτό, η τομή ακτινοβολείται οριζόντια, κάθετα, αλλά και υπό διάφορες γωνίες.



Οι εξισώσεις που προκύπτουν ονομάζονται **προβολές**. Τα δεδομένα των προβολών εισάγονται σε H/Y και ο υπολογισμός των τιμών των συντελεστών εξασθένησης γίνεται με μαθηματικές μεθόδους – **μέθοδοι ανακατασκευής εικόνας**, οι οποίες διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μέθοδοι Οπισθοπροβολής.
- Επαναληπτικές Μέθοδοι.
- Αναλυτικές Μέθοδοι.

Κατά τη **μέθοδο οπισθοπροβολής**, με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία των προβολών προκύπτει πίνακας στοιχεία του οποίου είναι οι συντελεστές εξασθένησης των ογκοστοιχείων της τομής – **πίνακας ανακατασκευής εικόνας**.

Στη συνέχεια και για κάθε επιμέρους συντελεστή εξασθένησης – μ_i υπολογίζεται ο αντίστοιχος **αριθμός CT**:

$$CT = 1000 (\mu_i - \mu_w) / \mu_w,$$

Όπου μ_w είναι ο συντελεστής εξασθένησης για το νερό. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει πίνακας με στοιχεία τους αριθμούς CT. Σε κάθε αριθμό CT αποδίδεται μια απόχρωση του γκρι και ο πίνακας ανακατασκευής εικόνας μετατρέπεται σε πίνακα κατανομής αποχρώσεων του γκρι – ασπρόμαυρη εικόνα.

Με την χρήση των αριθμών CT επιτυγχάνεται ενίσχυση των διαφορών εξασθένησης μεταξύ των ιστών που είναι μικρές στην περιοχή των ενεργειών των ακτίνων – X της υπολογιστικής τομογραφίας.

Στους αξονικούς τομογράφους χρησιμοποιούνται **λυχνίες ακτίνων – X**, οι οποίες παράγουν πολυενεργειακή δέσμη με συνέπεια να γίνεται δυσκολότερη η διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας. Η λυχνία υφίσταται υψηλό θερμικό φορτίο και, για το λόγο αυτό, η άνοδος κατασκευάζεται από ένα κράμα Βολφραμίου – Ρηνίου και είναι περιστρεφόμενη. Για την τάση λειτουργίας της λυχνίας επιλέγονται σχετικά υψηλές τιμές, ενώ στην έξοδο τοποθετούνται φίλτρα Αλουμινίου – Χαλκού που αποκόπτουν τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας.

Δύο **κατευθυντήρες**, τοποθετούνται:

- στην έξοδο της λυχνίας ώστε να ρυθμίζει το μέγεθος της εξερχόμενης δέσμης,
- εμπρός από τους ανιχνευτές ώστε να αποκόπτει τη σκεδασμένη ακτινοβολία.

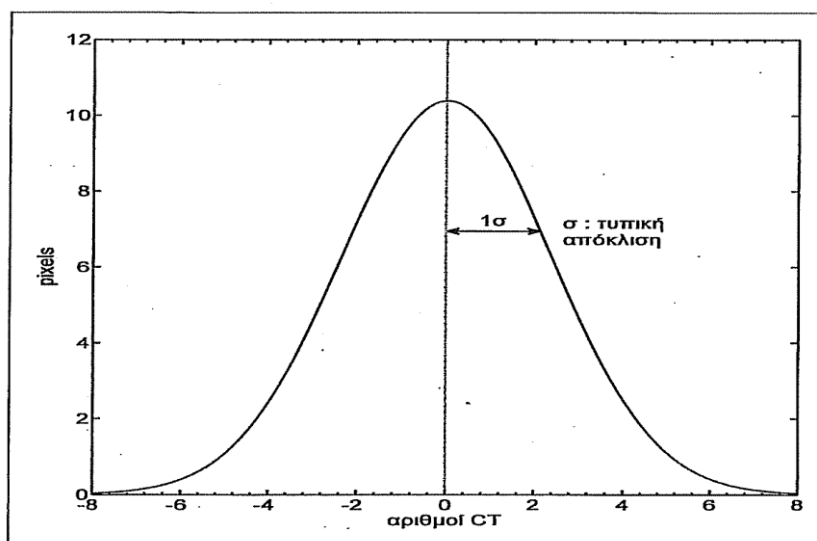
Στους σύγχρονους αξονικούς τομογράφους χρησιμοποιούνται **θάλαμοι ιοντισμού**, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μετρητική σταθερότητα, αλλά και χαμηλή απόδοση, ενώ επικρατέστεροι είναι οι **ανιχνευτές σπινθηρισμών**, με φωτοδίοδο Πυριτίου, οι οποίοι μπορούν να κατασκευασθούν σε οποιοδήποτε σχήμα και μέγεθος, εμφανίζουν υψηλή απόδοση, αλλά απαιτούν συνεχή ρύθμιση.

Το **σύστημα απόκτησης δεδομένων**, ενισχύει τα ηλεκτρικά σήματα των ανιχνευτών και μετατρέπει τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά.

Το **σύστημα αποθήκευσης & απεικόνισης**, αποθηκεύει την ανακατασκευασμένη εικόνα υπό τη μορφή ενός πίνακα αριθμών – CT.

Βασικοί **παράμετροι ποιότητας εικόνας**, είναι:

- Ο Θόρυβος, ο οποίος είναι καθαρά κβαντικός – στατιστικός, διότι οι αριθμοί CT δεν υπολογίζονται επακριβώς αλλά εμφανίζουν διακύμανση γύρω από μια μέση τιμή:



- Η **διακριτική ικανότητα υψηλής αντίθεσης**, χωρική διακριτική ικανότητα, η οποία εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να διακρίνει δύο αντικείμενα που έχουν υψηλή πυκνότητα και βρίσκονται πολύ κοντά και εξαρτάται από το μέγεθος του voxel, ενώ, στην πράξη ως χωρική διακριτική ικανότητα ορίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων που μπορούν να διακριθούν ως διαφορετικά.
- Η **διακριτική ικανότητα χαμηλής αντίθεσης**, αντίθεση, η οποία εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να διακρίνει αντικείμενα με μικρή διαφορά στην πυκνότητα και εξαρτάται από τον θόρυβο.
- Η **ασάφεια**, δηλαδή η αδυναμία ευκρινούς απεικόνισης των ορίων δύο δομών που μπορεί να οφείλεται σε κίνηση του εξεταζόμενου, το μέγεθος της εστίας, τη δειγματοληψία και τη χρησιμοποιούμενη μαθηματική μέθοδο, ενώ συχνά παραμορφώσεις που δεν αντιστοιχούν σε υφιστάμενες δομές – **ψευδοδομές**, οι οποίες οφείλονται σε παράγοντες όπως η σκλήρυνση της δέσμης που έχει ως αποτέλεσμα ογκοστοιχεία – voxels με την ίδια σύσταση, αλλά σε διαφορετική θέση να εμφανίζουν διαφορετική εξασθένιση λόγω της μεταβολής της μέσης ενέργειας της δέσμης.