

Γενικά περί ιοντιζουσών ακτινοβολιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διέλευση μιας δέσμης ιοντιζουσας ακτινοβολίας μέσα από ένα βιολογικό σύστημα, λαμβάνει χώρα μια σειρά από αλληλεπιδράσεις, με αρχή την πρόκληση ιοντισμών και διεγέρσεων και τέλος την εμφάνιση του τελικού βιολογικού αποτελέσματος που μπορεί να ποικίλλει από την αδρανοποίηση ενός ενζύμου μέχρι τον θάνατο του ακτινοβοληθέντος κυττάρου ή οργανισμού.

Την όλη σειρά των διαδικασιών αυτών μπορούμε να τη διακρίνουμε σε 4 στάδια: το φυσικό, το χημικό, το κυτταρικό και το ιστικό. Το φυσικό στάδιο είναι απειροελάχιστης διάρκειας, ενώ το ιστικό πολύ μεγάλης, ακόμη και πολλών ετών.

Κατά το *φυσικό στάδιο*, η προσπίπτουσα ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τα άτομα του υλικού μέσα από το οποίο διέρχεται με αποτέλεσμα την εκδίωξη ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων. Η διαδικασία αυτή λέγεται *ιοντισμός*, διαρκεί 10^{-6} του δευτερολέπτου περίπου και έχει ως αποτέλεσμα, εκτός από την εκδίωξη του ηλεκτρονίου, την απώλεια ενέργειας από το προσπίπτον φωτόνιο. Το ποσό της ενέργειας το οποίο καταναλώνεται σε κάθε ιοντισμό είναι περίπου 34 eV (Ένα eV είναι η ενέργεια την οποία αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν βρεθεί σε ηλεκτρικό πεδίο με διαφορά δυναμικού ενός βόλτ). Το εκδιωχθέν ηλεκτρόνιο αποκτά έτσι σχετικά μεγάλη κινητική ενέργεια και μαζί με το αρχικό φωτόνιο συνεχίζουν την πρόκληση ιοντισμών και την παραγωγή *δευτερογενών*, *τριτογενών* κ.λπ. ηλεκτρο-

νίων, με ταυτόχρονη απώλεια ενέργειας 34 eV για κάθε ιοντισμό. Όταν η ενέργειά τους γίνει μικρότερη από 34 eV, τότε δεν είναι ικανά να προκαλέσουν περαιτέρω ιοντισμούς αλλά μόνο διεγέρσεις. Το εξασθενημένο πλέον ηλεκτρόνιο είναι δυνατό να συλληφθεί από ένα ουδέτερο μόριο νερού και να καταστεί *ένυδρο ηλεκτρόνιο* (e^-_{aq}). Το ένυδρο ηλεκτρόνιο ζει μόνο 10^{-12} του δευτερολέπτου και έχει τις ιδιότητες της ελεύθερης ρίζας. Ο σχηματισμός του ένυδρου ηλεκτρονίου είναι το όριο μετάβασης από το φυσικό στο χημικό στάδιο.

Στο *χημικό στάδιο* έχουμε κυρίως την παραγωγή ελεύθερων ριζών. Κατά τη διέλευση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας μέσα από ένα βιολογικό σύστημα, λ.χ. ένα κύτταρο, η μεταφερόμενη ενέργεια μοιράζεται σε όλα τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα αυτό, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής τους στη σύνθεση του συστήματος. Επειδή στα περισσότερα των κυττάρων το 80% είναι νερό, έπεται ότι οι περισσότερες αλληλεπιδράσεις θα γίνουν μεταξύ της ακτινοβολίας και του ενδοκυττάρου υγρού. Το νερό με την αλληλεπίδραση αυτή υφίσταται *ραδιόλυση*, με αποτέλεσμα την παραγωγή ελεύθερων ριζών, δηλαδή πολύ δραστικών στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά διαχέονται στο γύρω χώρο εντός 10^{-7} του δευτερολέπτου και σε απόσταση 20 Å όπου αντιδρούν με τα γειτονικά μόρια, όπως είναι ένζυμα, πυρινηκά οξέα κ.λπ. Οι βιοχημικές αυτές μεταβολές είναι δυνατό να παρατηρηθούν σε χρονικό διάστημα το οποίο ποικίλλει από δευτερόλεπτα μέχρι ώρες.

Στο *κυτταρικό στάδιο* συμβαίνουν διάφορες μεταβολές στη δομή και τη λειτουργία των διάφορων μακρομορίων τα οποία υπάρχουν μέσα στο κύτταρο. Αρχικά οι μεταβολές αυτές ανιχνεύονται δύσκολα, αργότερα όμως γίνονται εύκολα αντιληπτές. Έτσι, μέσα σε ένα λεπτό μετά την ακτινοβόληση παρατηρούνται μεταβολές στο σχήμα της κυτταρικής μεμβράνης και μετά από ώρες μεταβολές στη μεμβράνη του πυρήνα, τόσο μορφολογικές όσο και λειτουργικές. Στον πυρήνα παρατηρούνται μεταβολές στο χρωμοσωματικό υλικό, με αποτέλεσμα την αδυναμία του κυττάρου για επ' άοριστο πολλαπλασιασμό.

Στο *ιστικό στάδιο* παρατηρούνται ποικίλες αλλοιώσεις που κατά έναν βαθμό εξαρτώνται από την ποσότητα και την ποιότητα της χρησιμοποιηθείσης ακτινοβολίας και το είδος του ακτινοβοληθέντος ιστού. Οι αλλοιώσεις αυτές μπορεί να είναι πρώιμες, όπως το *ερύθημα του δέρματος*, ή όψιμες, όπως είναι η *ίνωση*, η *νέκρωση*, η *καρκινογέννηση* ή ακόμη και ο θάνατος του κυττάρου. Αν το ακτινοβοληθέν κύτταρο ανήκει στις γονάδες, τότε είναι δυνατό να δούμε τις αλλοιώσεις αυτές και στις επόμενες γενεές.

Αν σκεφθεί κανείς το καταστροφικό αποτέλεσμα που προκαλείται από τη μεταφορά της ακτινικής ενέργειας σ' έναν ζώντα οργα-

νισμό, θα περίμενε ότι η ενέργεια αυτή θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλη. Στην πραγματικότητα είναι πολύ μικρή. Αν έναν ζώντα οργανισμό, π.χ. έναν άνθρωπο, τον ακτινοβολήσουμε και χορηγήσουμε εφ' άπαξ, σε ολόκληρο το σώμα, δόση ακτινοβολίας 10 Gy, το τελικό αποτέλεσμα θα είναι ο θάνατος. Αν μετατρέψουμε σε θερμότητα τη μεταφερθείσα ακτινική ενέργεια θα δούμε ότι αυτή είναι τόσο μικρή, ώστε να είναι ικανή να αυξήσει τη θερμοκρασία του σώματος του ακτινοβοληθέντος ανθρώπου μόνο κατά 0,001° C. Αυτό λέγεται *ακτινικό παράδοξο*. Κατά τον D. Lea η δόση των 10 Gy προκαλεί περίπου 200 ιοντισμούς μέσα σε έναν όγκο 1 κυβικού μικρού. Επειδή 1μ³ περιέχει 10¹¹ άτομα, η θανατηφόρος δόση των 10 Gy προκαλεί αλλοιώσεις σε ένα απειροελάχιστο κλάσμα των ατόμων και των μορίων που περιέχονται στον όγκο αυτό του 1μ³. Όλα αυτά σημαίνουν ότι η ακτινοβολία καταστρέφει μεταξύ των άλλων κυτταρικών δομών και ορισμένους *στρατηγικούς στόχους* απαραίτητους για τη ζωή του κυττάρου, οι οποίοι είναι σχετικά ακτινευαίσθητοι. Πράγματι αυτό συμβαίνει και οι στρατηγικοί στόχοι βρίσκονται στο μόριο του DNA.

1.2 ΑΤΟΜΟ - ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Η ύλη αποτελείται από μικρότατα σωματίδια τα οποία καλούνται *άτομα*, λ.χ. άτομα υδρογόνου, οξυγόνου, άνθρακα κ.λπ. Δύο ή περισσότερα άτομα, ίδια ή διαφορετικά μεταξύ τους ενούμενα, σχηματίζουν ένα *μόριο*. Έτσι λ.χ. έχουμε ένα μόριο οξυγόνου το οποίο αποτελείται από δύο άτομα οξυγόνου (O₂). Ένα μόριο νερού που αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου (HOH ή H₂O) κ.λπ. Κάθε άτομο, σύμφωνα με το πρότυπο των Rutherford και Bohr, είναι η μικρογραφία ενός ηλιακού συστήματος. Αποτελείται δηλαδή από έναν ήλιο-πυρήνα και από έναν πλανήτη-ηλεκτρόνιο ή πολλούς πλανήτες-ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα, όπως οι πλανήτες γύρω από τον ήλιο, σε καθορισμένες τροχιές.

Το ηλεκτρόνιο είναι ένα σωματίδιο, το οποίο έχει μάζα (m) και ένα αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο (e). Το φορτίο του ηλεκτρονίου ονομάζεται *στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο*. Τα μεγέθη m και e είναι τα ίδια για όλα τα ηλεκτρόνια, άσχετα με τα άτομα στα οποία ανήκουν. Ο πυρήνας είναι και αυτός σωματίδιο, η μάζα όμως και το φορτίο του δεν είναι όμοια σε όλους τους πυρήνες, αλλά εξαρτώνται από το στοιχείο στο οποίο ανήκει ο πυρήνας. Σε αντίθεση με το ηλεκτρόνιο, ο πυρήνας αποτελείται από άλλα μικρότερα σωματίδια, τα *πρωτόνια*, τα *νετρόνια* και τα *μεσόνια* ή *πιόνια*. Τα σωμα-

τίδια αυτά ονομάζονται *νουκλεόνια* (nucleons). Τα δύο πρώτα έχουν την ίδια μάζα, η οποία λαμβάνεται ως μονάδα στην ατομική κλίμακα, διαφέρουν όμως ως προς το φορτίο. Το πρωτόνιο είναι φορτισμένο και φέρει ένα θετικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, ενώ το νετρόνιο ή ουδετερόνιο δεν φέρει ηλεκτρικό φορτίο. Επειδή το φορτίο του πυρήνα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου, έπεται ότι ισούται προς Z . Ο ακέραιος αριθμός Z , ο οποίος εκφράζει τον αριθμό των στοιχειωδών ηλεκτρικών φορτίων, λέγεται και *ατομικός αριθμός*. Το άθροισμα των πρωτονίων και των νετρονίων κάθε ατόμου ονομάζεται *μαζικός αριθμός* (A). Τα μεσόνια έχουν ελάχιστη μάζα, ίση προς 276 της μάζας του ηλεκτρονίου, η οποία είναι το 1/1850 της μάζας του πρωτονίου. Μπορεί να είναι θετικά ή αρνητικά φορτισμένα, ακόμη και ουδέτερα. Πιστεύεται ότι ο ρόλος των μεσονίων είναι η συγκράτηση των ομώνυμω φορτισμένων πρωτονίων μέσα στον πυρήνα.

1.3

ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Διάφορες μελέτες έδειξαν ότι τα ατομικά βάρη, δηλαδή ο αριθμός ο οποίος μας λέει πόσες φορές το άτομο ενός στοιχείου είναι βαρύτερο από το άτομο του υδρογόνου, δεν είναι πάντοτε ακέραιος αριθμός. Το 1910, ο Άγγλος F. Soddy απέδειξε ότι ορισμένα στοιχεία αποτελούνται από άτομα χημικά παρόμοια αλλά διαφέροντα ως προς το βάρος και τα ονόμασε *ισότοπα*. Επειδή οι χημικές ιδιότητες των ισωτόπων του ίδιου στοιχείου παραμένουν οι ίδιες, έπεται ότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων, άρα και των πρωτονίων, είναι ο ίδιος. Επομένως οι διαφορετικές μάζες θα πρέπει να οφείλονται σε διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Οι περισσότεροι πυρήνες είναι σταθεροί αλλά μερικοί είναι ασταθείς (*ραδιενεργείς πυρήνες*) και υφίστανται ραδιενεργείς διασπάσεις (decay) για την παραγωγή σταθερών μορφών. Κάθε ραδιενεργός πυρήνας διασπάται κατά ένα χαρακτηριστικό τρόπο με σύγχρονη εκπομπή ενέργειας διαφόρων μορφών. Έτσι έχουμε εκπομπή ακτίνων άλφα, βήτα και γάμα, καθώς και *εσωτερικές μετατροπές* (internal conversions), κατά τις οποίες είναι δυνατόν να έχουμε εκπομπή *ηλεκτρονίων Auger*, καθώς και τη *σύλληψη ηλεκτρονίου* (electron capture), οπότε είναι δυνατόν να έχουμε την εκπομπή ενός *νετρίνο* (neutrino), δηλαδή ενός σωματιδίου χωρίς φορτίο, με μάζα ηρεμίας 0 και ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός.

Η διάσπαση ενός ραδιενεργού στοιχείου ακολουθεί πάντοτε ένα σταθερό πρότυπο. Ο αριθμός των διασπάσεων ανά δευτερόλεπτο είναι ανάλογος προς τον αριθμό των πυρήνων που υπάρχουν κατά τη δεδομένη στιγμή:

$$\frac{dA}{dt} = -\lambda A \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) ολοκληρούμενη ως προς τον χρόνο μας δίνει:

$$A = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

Όπου A_0 είναι η ενεργότητα σε χρόνο 0, A η ενεργότητα σε χρόνο t , και λ είναι η σταθερά διάσπασης.

Αυτή η εκθετική μείωση της ενεργότητας έχει ημίσεια ζωή ($T_{1/2}$), η οποία ορίζεται ως ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να μειωθεί η ενεργότητα στο $1/2$ της τιμής της ενεργότητας της δεδομένης στιγμής.

Ο χρόνος της $T_{1/2}$ μπορεί να υπολογιστεί με αντικατάσταση του A με το A_0 στην εξίσωση (2):

$$1/2 A_0 = A_0 \exp(-\lambda t_{1/2})$$

η οποία με λογαριθμική έκφραση μας δίνει:

$$t_{1/2} = (\log_e 2) / \lambda$$

Η ημίσεια ζωή ενός ραδιοϊσοτόπου μπορεί να ποικίλλει από λιγότερο από 10^{-6} του δευτερολέπτου, μέχρι 10^{11} χρόνια, που είναι περισσότερα από την ηλικία της Γης.

Η ενεργότητα ενός ραδιενεργού στοιχείου μετράται με τη μονάδα Curie (Ci). Σε ένα Ci αντιστοιχούν $3,70 \times 10^{10}$ διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο. Ο αριθμός αυτός έχει επιλεγεί διότι αντιπροσωπεύει τις διασπάσεις τις οποίες υφίσταται ένα γραμμάριο ραδίου ανά δευτερόλεπτο. Η μονάδα Curie έχει αντικατασταθεί στο σύστημα SI με τη μονάδα Becquerel (Bq), η οποία ορίζεται ως μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Επειδή η Bq είναι πολύ μικρή, χρησιμοποιούνται τα πολλαπλάσιά της Megabecquerel (MBq) και Gigabecquerel (GBq).

$$1 \text{ MBq} = 10^6 \text{ Bq} \text{ και } 1 \text{ GBq} = 10^9 \text{ Bq}$$

1.4 ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

Ιοντίζουσες ακτινοβολίες ονομάζονται οι ακτινοβολίες οι οποίες, όταν διέλθουν μέσα από ένα υλικό σώμα, έχουν την ικανότητα να εκδιώκουν ηλεκτρόνια από τα άτομα του υλικού που βρίσκονται κοντά στην τροχιά τους, δηλαδή να προκαλούν ιοντισμούς και διε-