

ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

Μονάδες

Ε.Ν. ΓΑΖΗΣ

ΣΕΜΦΕ-Τομέας Φυσικής

2003-04

Η *ενέργεια* των ιοντιζουσών ακτινοβολιών μετρείται σε μονάδες του *ηλεκτρονιοβόλτ (eV)*,

ορίζεται: η ενέργεια που προσλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο όταν επιταχυνθεί μέσω μίας διαφοράς δυναμικού ενός *Volt*.

Η ισοδυναμία μεταξύ *eV* και *joule* στο σύστημα *SI* είναι:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.3)$$

Η *μάζα ηρεμίας m* ενός σωματιδίου μετρείται σε σχετικές με το ηλεκτρονιοβόλτ μονάδες *eV/c²*, με βάση την εξίσωση $E = mc^2$. Στο σύστημα *SI* η ισοδυναμία μεταξύ *eV/c²* και *kg* είναι:

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36} \text{ Kg} \quad (1.4)$$

Η *ορμή* p ενός σωματιδίου μετρείται σε σχετικές με το ηλεκτρονιοβόλτ μονάδες eV/c , με βάση τη σχέση $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$. Στο σύστημα SI η ισοδυναμία μεταξύ eV/c και $kg\ m/s$ είναι:

$$1\ eV/c = 0.535 \times 10^{-27}\ kg\ m/s \quad (1.5)$$

Η *ροή* I των εκπεμπόμενων σωματιδίων ή ακτίνων ορίζεται ως το πηλίκο:

$$I = \frac{n}{tf} \quad (1.6)$$

όπου n σωματίδια ή ακτίνες διαπερνούν μια επιφάνεια f σε χρονικό διάστημα t . Οι μονάδες είναι σωματίδια ή ακτίνες ανά m^2s .

Το ίδιο μέγεθος χρησιμοποιείται και για τον ορισμό της *έντασης* μιάς δέσμης επιταχυνόμενων σωματιδίων.

Η *ενεργότητα* μιάς ραδιενεργού πηγής ορίζεται από τον αριθμό των αποδιεγέρσεων (διασπάσεων) ανά δευτερόλεπτο. Μονάδα είναι το *Curie (Ci)* ή το *Becquerel (Bq)*, όπου:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ διασπάσεις/s} \quad (1.7)$$

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ διάσπαση/s} = 2.70 \times 10^{-11} \text{ Ci} \quad (1.8)$$

Η ενεργότητα σχετίζεται με την **σταθερά διάσπασης** λ από τον νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων, όπου το λ έχει διαστάσεις s^{-1} :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.9)$$

Ο μέσος χρόνος ζωής τ ενός ραδιενεργού ισοτόπου ή ασταθούς σωματιδίου ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μετά την παρέλευση του οποίου ο αρχικός αριθμός των πυρήνων N_0 του ραδιενεργού ισοτόπου που διασπάται έχει μειωθεί στον αριθμό N_0/e . Ο μέσος χρόνος ζωής σχετίζεται με την σταθερά διάσπασης λ με τη σχέση:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.10)$$

Συνήθως χρησιμοποιείται πιο συχνά ο *χρόνος ημι-ζωής* $t_{1/2}$, μετά την παρέλευση του χρονικού αυτού διαστήματος ο αρχικός αριθμός N_0 των πυρήνων μειώνεται στο **μισό**. Η σχέση μεταξύ του μέσου χρόνου ζωής και του χρόνου ημι-ζωής είναι:

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.693 \tau \quad (1.11)$$

Ποσοτικές Μονάδες των ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

(i) Η *ενεργειακή δόση ακτινοβολίας* D , ορίζεται ως η ενέργεια ακτινοβολίας W_D που απορροφάται από όγκο ύλης V και πυκνότητας ρ :

$$D = \frac{dW_D}{\rho dV} \quad (1.12)$$

Μονάδα μέτρησης της δόσης είναι:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/gr} = 10^{-2} \text{ J/kg} \quad (1.13)$$

και

$$1 \text{ gray} = 1 \text{ J/Kg} \quad (1.14)$$

(u) Η δόση ιοντισμού D_I δίδεται από τη σχέση του φορτίου Q που απελευθερώνεται λόγω ακτινοβολίας στον αέρα με πυκνότητα ρ_A :

$$D_I = \frac{dQ}{\rho_A dV} \quad (1.15)$$

Μονάδα μέτρησης της δόσης ιοντισμού είναι το *Roentgen (R)*:

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/(kg \text{ αέρα}) \quad (1.16)$$

Η δόση ιοντισμού $1 R$ στον αέρα αντιστοιχεί με τον αριθμό $1 R/e = 1.61 \times 10^{15}$ *ιόντα/Kg* και με μια ενεργειακή δόση $1 R \cdot W_I/e$, όπου W_I είναι η μέση ενέργεια επίδρασης που απαιτείται για την απελευθέρωση ενός ζεύγους ιόντος-ηλεκτρονίου στον αέρα.

Για τον αέρα ισχύει $W_I = 33.7 eV$,

οπότε η ενεργειακή δόση είναι $D = 0.87 rad$.

Υπολογίζεται ότι ο αριθμός των ζευγών ιόντων που απελευθερώνονται σε $1 cm^3$ αέρα υπό κανονικές συνθήκες είναι 2.08×10^9 .

(iii) Η **ισοδύναμη δόση** D_q είναι το μέτρο της επίδρασης των ιοντιζουσών ακτινοβολιών επάνω στο ανθρώπινο σώμα. Ορίζεται από τη σχέση:

$$D_q = q \cdot D \quad (1.17)$$

q = ποιοτικός παράγοντας της βιολογικής επίδρασης των διαφόρων τύπων των ιοντιζουσών ακτινοβολιών επάνω στο βιολογικό σύστημα.

Η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης είναι το *rem* (= *roentgen equivalent mass*):

$$1 \text{ rem} = q \cdot 1 \text{ rad} \quad (1.18)$$

Μονάδα ισοδύναμης δόσης στο σύστημα *SI* είναι το *Sievert (Sv)*, με τη σχέση ισοδυναμίας:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad (1.19)$$

$q=1$ για ακτίνες- γ και ηλεκτρόνια,

$q=10$ για σωματίδια- α , πρωτόνια και δευτέρια,

$q = 20$ για βαρείς πυρήνες

$2 < q < 10$ για νετρόνια, ανάλογα με την κινητική τους ενέργεια.

Τεχνητές Πηγές των Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών

Τις τελευταίες δεκαετίες είναι μεγάλη η συνεισφορά των τεχνητών πηγών ακτινοβολιών στην συνολική έκθεση του ανθρώπου και κατ'έπείταση στην επιβάρυνση της υγείας του, προέρχονται:

- διαγνωστική και θεραπευτική ακτινολογία
- χρήση των ραδιοϊσοτόπων στην ιατρική
- τα ραδιενεργά απόβλητα
- τη ραδιενεργή σκόνη στην ατμόσφαιρα από τις δοκιμές των πυρηνικών όπλων
- επαγγελματική έκθεση από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες και τους επιταχυντές.

Διαγνωστική Ακτινολογία

Έχει υπολογιστεί ότι το 75-90% της ολικής έκθεσης του πληθυσμού σε ιατρικές ακτινοβολίες προέρχεται από τη διαγνωστική χρήση των ακτίνων X.

Οι πιο ευαίσθητες περιοχές του σώματος είναι:

- ο μυελός των οστών
- οι γονάδες
- το έμβρυο

Ο **μυελός των οστών** είναι το μέρος όπου δημιουργούνται τα αιμοσφαίρια και η ακτινοβόληση αυτής της περιοχής μπορεί να ευνοήσει την ανάπτυξη της **λευχαιμίας**. Η ακτινοβόληση των **γονάδων** εγκυμονεί κινδύνους **γενετικής βλάβης** ενώ η ακτινοβόληση των **εγκύων** γυναικών πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά γιατί μπορεί να οδηγήσει σε **σωματικές και πνευματικές ανωμαλίες** του παιδιού.

Θεραπευτική Ακτινολογία

Στις περισσότερες χώρες η μέση δόση στον πληθυσμό από τη θεραπευτική ακτινολογία είναι πολύ μικρότερη από αυτή της διαγνωστικής ακτινολογίας.

Αν και σε μερικές θεραπείες η έκθεση μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, ωστόσο μόνο ένας μικρός αριθμός ανθρώπων τη λαμβάνει.

Χρήση των ραδιοϊσοτόπων

Τα **ραδιοϊσότοπα** χρησιμοποιούνται στην ιατρική για την ανίχνευση της διαδρομής και της θέσης συγκεκριμένων χημικών ουσιών ή φαρμάκων στο σώμα.

Τα ραδιενεργά ισότοπα είναι **χημικά όμοια** με τα σταθερά ισότοπα του ίδιου στοιχείου, ακολουθούν την ίδια διαδρομή και συγκεντρώνονται στο ίδιο σημείο και στον ίδιο βαθμό με τα μη ενεργά ισότοπα. Η θέση των ραδιενεργών προσδιορίζεται με μετρικές μεθόδους.

Ραδιενεργά απόβλητα

Η αυξημένη χρήση των ραδιοϊσοτόπων και η συνεχής ανάπτυξη της βιομηχανίας της πυρηνικής ενέργειας έχει οδηγήσει σε μία συνεχώς αυξανόμενη ποσότητα των **ραδιενεργών καταλοίπων**.

Ο συνεχής διασκορπισμός των καταλοίπων **χαμηλής και μέσης** ραδιενέργειας στο περιβάλλον σημαίνει ότι **ο γενικός πληθυσμός** λαμβάνει διαρκώς **αυξανόμενες ποσότητες ραδιενέργειας** από αυτήν την πηγή.

Για το λόγο αυτό γίνεται **αυστηρός έλεγχος** όσον αφορά τον **διασκορπισμό των ραδιενεργών καταλοίπων** και λαμβάνονται ειδικά μέτρα, σε διεθνές επίπεδο, **συσκευασίας και απόθεσης** αυτών των υλικών.

Ραδιενεργή σκόνη από πυρηνικές δοκιμές

Τα ισότοπα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια μιας πυρηνικής δοκιμής διαχέονται στην **τροπόσφαιρα** (**12–20 km**) και μεταφέρονται γύρω από τη γη αρκετές φορές.

Σταδιακά **επιστρέφουν** στη γη μέσα σε μια **περίοδο λίγων ετών** και έτσι **συμβάλλουν** πολύ στην **συνολική λαμβανόμενη δόση ακτινοβολίας** από τον πληθυσμό. Η συγκέντρωση των ισοτόπων που διαχέονται στην τροπόσφαιρα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της λίγο μετά την πυρηνική δοκιμή.

Τα δύο **σημαντικότερα** ισότοπα που παράγονται σε μια πυρηνική δοκιμή είναι το στρόντιο **^{90}Sr ($t_{1/2} = 28.8$ χρόνια)** και καίσιιο **^{137}Cs ($t_{1/2} = 30$ χρόνια)**.

Το ^{90}Sr συγκεντρώνεται στα **οστά** ενώ το ^{137}Cs διαμοιράζεται ομοιόμορφα στο **σώμα** και τα **οστά**.

Επαγγελματική έκθεση

Η δόση από την επαγγελματική έκθεση τόσο στη διαδικασία της έρευνας όσο και της παραγωγής, είναι **πολύ μικρή** αν πάρουμε το **μέσο όρο σε όλο τον πληθυσμό**.

Ωστόσο, για αυτούς που **ασχολούνται** με τη ραδιενέργεια η δόση είναι αρκετά μεγάλη.

Παραγωγή σε αντιδραστήρες

Ασταθείς ραδιενεργοί πυρήνες παράγονται με **πυρηνικές αντιδράσεις** όταν ενεργειακά σωματίδια που προέρχονται από **επιταχυντές ή πυρηνικούς αντιδραστήρες** προσπίπτουν επάνω σε σταθερούς πυρήνες.

Τα **νετρόνια** προερχόμενα από πυρηνικούς αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την **παραγωγή ραδιενεργών ισοτόπων με εκπομπή σωματιδίων-β** με χρόνους ημι-ζωής που κυμαίνονται από **κλάσματα του δευτερολέπτου μέχρι 10^5 χρόνια**.

Τα περισσότερα ισότοπα εκπομπής **σωματιδίων-β** είναι συγχρόνως και πηγές **ακτίνων-γ**, εφόσον η εκπομπή σωματιδίου-β οδηγεί στο θυγατρικό πυρήνα σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, η οποία αποδιεγείρεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση με εκπομπή ακτίνας-γ.

Ελάχιστα ισότοπα εκπέμπουν σωματίδια-β με παραγωγή του θυγατρικού πυρήνα κατευθείαν στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση. Μόνο όταν αυτό επιβάλλεται λόγω των κανόνων επιλογής.

Πιο χρήσιμα, για πειραματικούς σκοπούς βαθμονόμησης ανιχνευτικών και άλλων διατάξεων, είναι τα **μονο-ενεργειακά ηλεκτρόνια** που προέρχονται από το φαινόμενο της **εσωτερικής μετατροπής**.

Όταν κατά την διαδικασία της αποδιέγερσης ενός πυρήνα είναι **αδύνατη** η εκπομπή ακτίνων- γ εξ αιτίας των κανόνων επιλογής, **→→** εκπέμπονται τα **ηλεκτρόνια** αυτά από κάποια στιβάδα του αντίστοιχου ατόμου.

Παραδείγματα ισοτόπων εκπομπής ηλεκτρονίων από εσωτερική μετατροπή είναι οι ακόλουθοι πυρήνες με τις αντίστοιχες ενέργειες των ηλεκτρονίων:

^{137}Cs (625 keV), $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (656 keV, 885 keV) και $^{113\text{m}}\text{In}$ (393 keV)

Πίνακας Ι.1 : Πηγές εκπομπής σωματιδίων-β

ΙΣΟΤΟΠΟ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙ- ΖΩΗΣ $t_{1/2}$
^3He	18.6	12.26 y
^{14}C	156	5730 y
^{33}P	248	24.4 d
^{90}Sr	546	27.7 y
^{90}Y	2270	64 h
^{99}Tc	292	2.1×10^5 y

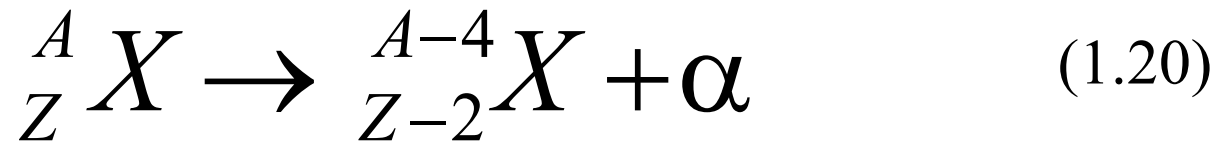
Ο πιο κοινός τρόπος αποδιέγερσης μιάς πυρηνικής διεγερμένης ενεργειακής κατάστασης είναι η **εκπομπή ακτινοβολίας-γ**.

Οι πυρηνικές διεγερμένες ενεργειακές καταστάσεις προκαλούνται συνήθως από την εκπομπή σωματιδίων-β, οπότε ο χρόνος ημι-ζωής των πηγών ακτίνων-γ καθορίζεται από τον χρόνο ημι-ζωής του ισοτόπου εκπομπής σωματιδίων-β.

Πίνακας I.2 : Πηγές εκπομπής ακτίνων-γ

ΠΑΤΡΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ-β	ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙ- ΖΩΗΣ $t_{1/2}$	ΘΥΓΑΤΡΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ	E_{γ} (keV)
^{22}Na	^{22}Na	^{22}Ne	1274
^{57}Co	^{57}Co	^{57}Fe	14.4, 122.1
^{60}Co	^{60}Co	^{60}Ni	1173.2, 1332.5
^{137}Cs	^{137}Cs	^{137}Ba	661.6

Μια άλλη μορφή αποδιέγερσης που χρησιμοποιείται για πειραματική διαδικασία βαθμονόμησης είναι η **εκπομπή σωματιδίων-α** που γίνεται μέσω της πυρηνικής αντίδρασης:



ο ρυθμός αποδιέγερσης του πυρήνα και παραγωγής σωματιδίων-α εξαρτάται από την **πιθανότητα διέλευσης**, μέσω του **φαινομένου σήραγγος**, του σωματιδίου-α διαμέσου του φράγματος του δυναμικού **Coulomb** του εναπομείναντα πυρήνα.

Ο μηχανισμός αποδιέγερσης καθορίζει μια **εκθετική εξάρτηση** του ρυθμού εκπομπής από την ενέργεια E_α του εκπεμπόμενου σωματιδίου-α.

Οι χρόνοι ημι-ζωής των αντίστοιχων ισοτόπων ποικίλλουν:

- Από 10^{10} χρόνια με ενέργεια εκπομπής $E_\alpha = 4 \text{ MeV}$,
- Μέχρι **μερικές ημέρες** με ενέργεια εκπομπής $E_\alpha = 6.5 \text{ MeV}$.

Μια χρήσιμη πηγή σωματιδίων-α για εργαστηριακούς σκοπούς είναι ο πυρήνας του ^{241}Am με χρόνο ημι-ζωής **433 χρόνια** και δύο ενεργειακές “γραμμές” στα 5.485 MeV και 5.443 MeV .

Επιταχυντές φορτισμένων σωματιδίων

Η μελέτη και διερεύνηση του πυρήνα και των συστατικών του για ακόμη μικρούς και θεμελιώδεις «σημειακούς» δομικούς λίθους της ύλης, απαίτησαν την βαθύτερη μελέτη της διαδικασίας της σκέδασης και της εξαΰλωσης σε ενέργειες του κέντρου μάζας του πυρήνα και των συστατικών του ολοένα και μεγαλύτερες.

Αυτό επιτεύχθηκε με την σχεδίαση και κατασκευή **επιταχυντών** φορτισμένων σωματιδίων. Για την επιτάχυνση των πρωτονίων ο ηλεκτροστατικός επιταχυντής *Van-de-Graaf*, το **κύκλοτρο ασθενούς εστίασης** και το **συγχρο-κύκλοτρο** επιτάχυναν τα σωματίδια σε ενέργειες **15 MeV**, **20 MeV** και **500 MeV** αντίστοιχα, στο συστημα εργαστηρίου.

Το **1956** οι *E.D. Courant* και *H.A. Snyder* εισήγαγαν την αρχή της **ισχυρής εστίασης** της δέσμης με **εναλλασσόμενη βαθμίδα μαγνητικού πεδίου** κατά μήκος της κυκλικής τροχιάς του επιταχυντού.

Η ανακάλυψη αυτή επέφερε τη σχεδίαση και κατασκευή του **συγχροτρονίου πρωτονίων (PS)** στο Ευρωπαϊκό Εργαστήριο για την Έρευνα των Στοιχειωδών Σωματιδίων (*CERN*) στη Γενεύη και του συγχροτρονίου εναλλασσόμενης βαθμίδας (*AGS*) στο Εθνικό Εργαστήριο του *Brookhaven* (*ΗΠΑ*).

Και οι δύο επιταχυντές έφτασαν να επιτύχουν μέγιστη ενέργεια των πρωτονίων περίπου στα **30 GeV**,

Ενώ στο Εθνικό Εργαστήριο *Sherpukhov* (*ΕΣΣΔ*) η ενέργεια των πρωτονίων έφτασε περίπου στα **70 GeV**.

Στη δεκαετία του **1970** επιτεύχθηκαν ενέργειες των πρωτονίων στα 400 GeV με την κατασκευή των **μεγάλων συγχροτρονίων** στο Εθνικό Εργαστήριο *Fermi* (ΗΠΑ) και στο *CERN* με το υπερ-συγχροτρόνιο πρωτονίων (*SPS*).

Στη δεκαετία του **1980** στον επιταχυντικό δακτύλιο *SPS* του *CERN* επιτεύχθηκε η ταυτόχρονη ανάπτυξη και επιτάχυνση δύο αντιθέτως κινούμενων δεσμών **πρωτονίων** και **αντι-πρωτονίων** και τεμνομένων μεταξύ τους σε δύο πειραματικά σημεία, προκειμένου να μελετηθεί η παραγωγή και η διάσπαση των ενδιάμεσων μποζονίων βαθμίδας και φθάνοντας συνολικά σε μέγιστη ενέργεια κέντρου μάζας **900 GeV** .

Στη δεκαετία του **1990** στον επιταχυντικό δακτύλιο *SPS* του *CERN* επιτεύχθηκε η κατασκευή του LEP και η επιτάχυνση δύο αντιθέτως κινούμενων δεσμών **ηλεκτρονίων** και **ποζιτρονίων** και τεμνομένων μεταξύ τους σε τέσσερα πειραματικά σημεία σε μέγιστη ενέργεια κέντρου μάζας **92 GeV** αρχικά και σε μέγιστη ενέργεια κέντρου μάζας **200 GeV** τελικά.