

# **ΓΕΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ II**

## **ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ**

**Υπό**

**Μ. Χανιά**

**Αν. Καθηγητή**

**Τμήμα Φυσικής ΔΙ.ΠΑ.Ε.**

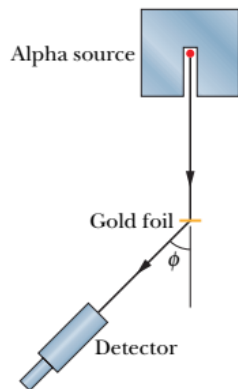
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

### ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

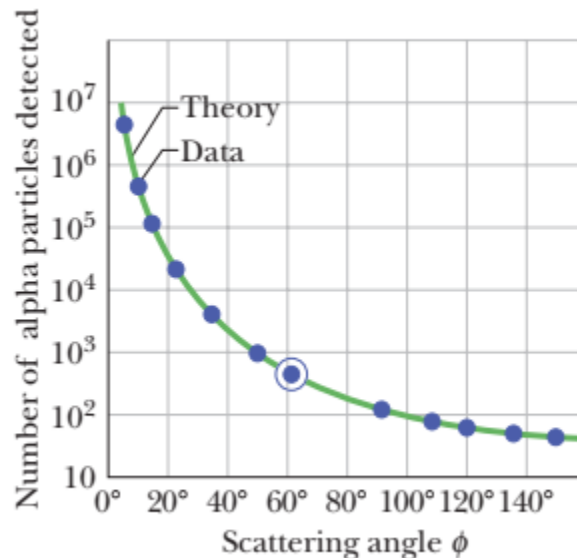
#### 12.1 Δομή ατομικού πυρήνα – Ατομικός και Μαζικός αριθμός

Οι πυρήνες των ατόμων αποτελούνται από πρωτόνια  $p$  και νετρόνια  $n$ . Εξαιρείται ο πυρήνας του απλού υδρογόνου που αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια ονομάζονται **νουκλεόνια (nucleons)**. Κάθε ξεχωριστό είδος πυρήνα χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο μαζικό και ατομικό το αριθμό λέγεται **νουκλίδιο (nuclide)**

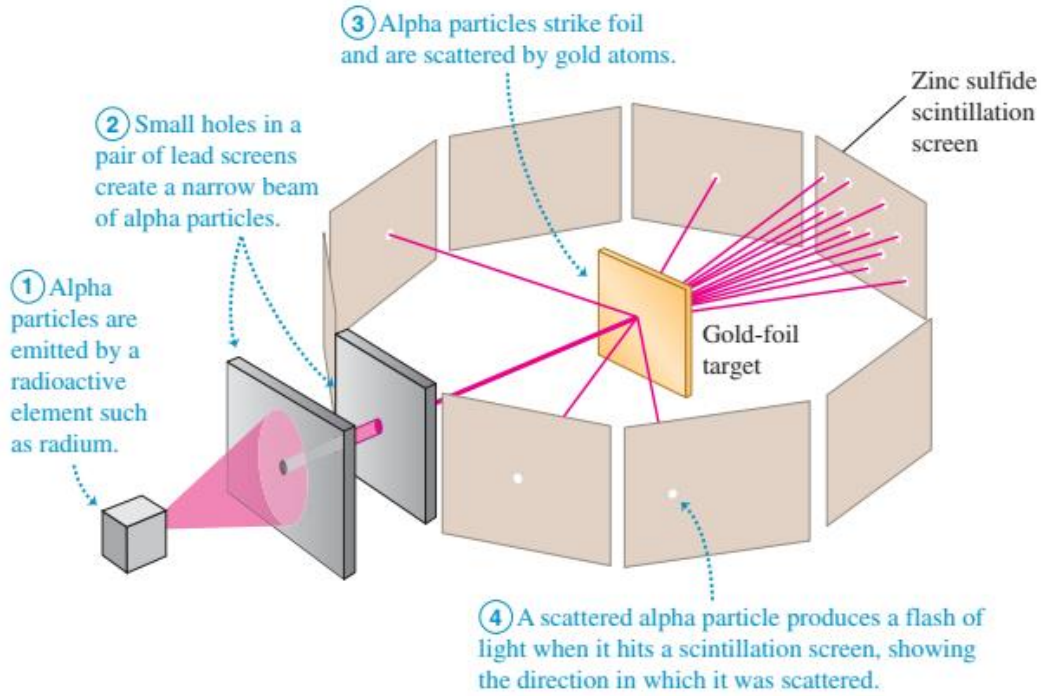
#### Το πείραμα των Geiger Marsden



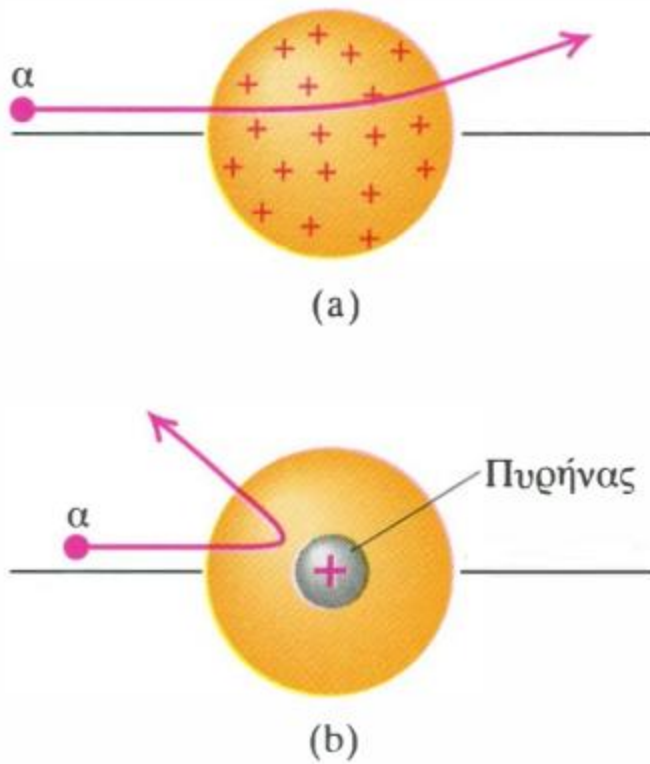
**Fig. 42-1** An arrangement (top view) used in Rutherford's laboratory in 1911–1913 to study the scattering of  $\alpha$  particles by thin metal foils. The detector can be rotated to various values of the scattering angle  $\phi$ . The alpha source was radon gas, a decay product of radium. With this simple “tabletop” apparatus, the atomic nucleus was discovered.



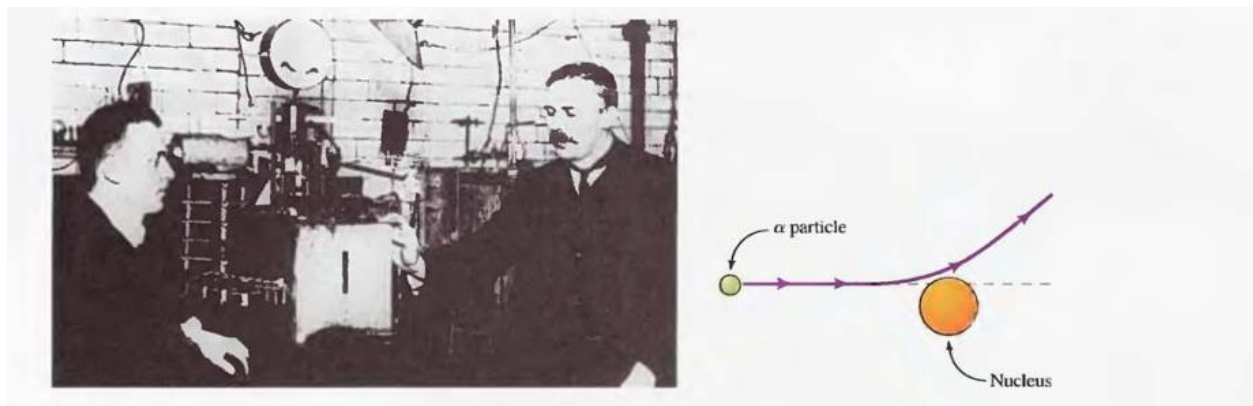
Ασκούνται ηλεκτρικές δυνάμεις στο σωματίο  $\alpha$  όσο αυτό είναι έξω από το άτομο;



Τα σωματΙΑ α έχουν μάζα 7300 φορές μεγαλύτερη από την μάζα των ηλεκτρονίων



[https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering\\_el.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_el.html)



«Ήταν το πιο απίστευτο γεγονός που μου συνέβη σε όλη μου τη ζωή. Ήταν σχεδόν τόσο απίστευτο όσο αν πυροβολούσες ένα βλήμα 15 ιντσών πάνω σε ένα χαρτομάντιλο και αυτό γυρνούσε προς τα πίσω και σε χτυπούσε».

Κατανομή θετικού φορτίου

Κατά Thomson  $r \sim 10^{-10} \text{m}$

Κατά Rutherford  $r \sim 10^{-15} \text{m}$ .

Ο πυρήνας καταλαμβάνει ένα ποσοστό περίπου ίσου με το 12% μόνο του συνολικού όγκου του ατόμου, περιέχει το 95% της μάζας του ατόμου και όλο το θετικό φορτίο

**Ατομικός αριθμός Z** ενός πυρήνα ονομάζεται ο αριθμός των πρωτονίων που περιέχει

**Μαζικός αριθμός A** είναι ο αριθμός των νουκλεονίων που περιέχει. Ο μαζικός αριθμός είναι ακέραιος και πλησιάζει το ατομικό βάρος του ατόμου.

Ο αριθμός των νετρονίων συμβολίζεται με το N.

Ισχύει

$$A = Z + N \quad (12.1)$$

Ένας πυρήνας συμβολίζεται ως



όπου  $\Sigma$  το χημικό σύμβολο του στοιχείου

[https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom\\_el.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_el.html)

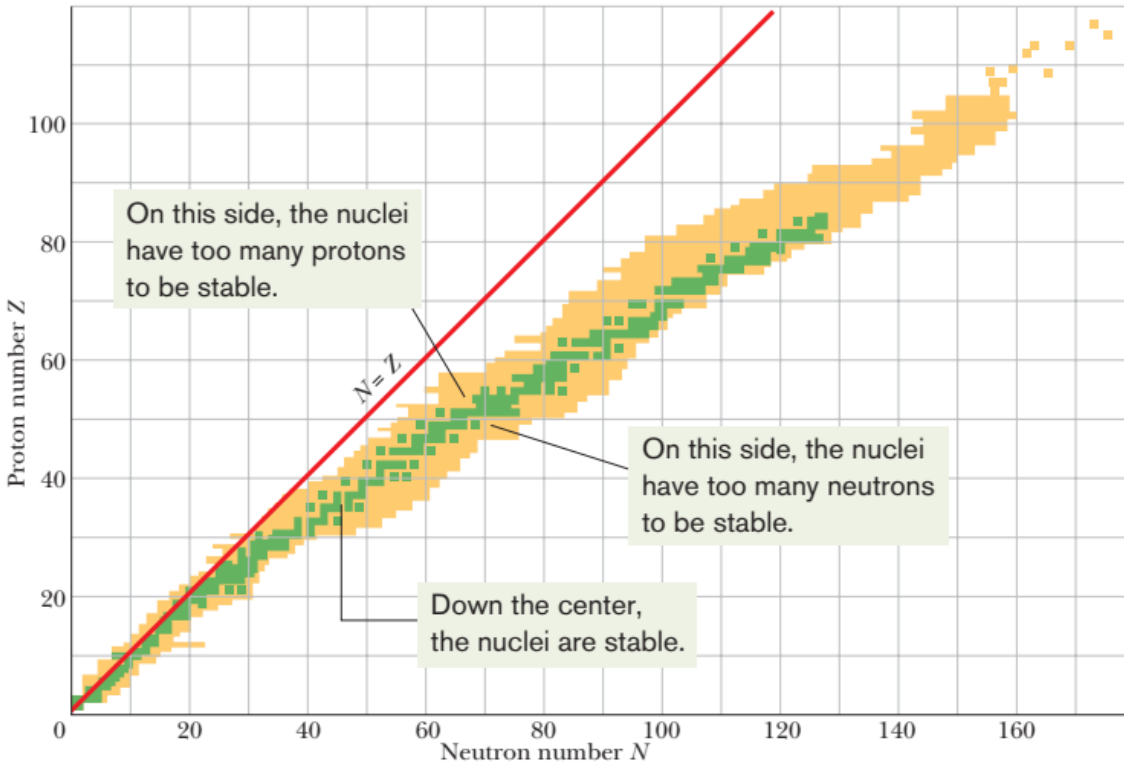
Πυρήνας	Μαζικός αριθμός $A$ (ολικός αριθμός πυρηνικών σωματιδίων)	Ατομικός αριθμός $Z$ (Ολικός αριθμός πρωτονίων)	Νετρονικός αριθμός, $N = A - Z$
${}^1_1\text{H}$	1	1	0
${}^2_1\text{D}$	2	1	1
${}^4_2\text{He}$	4	2	2
${}^6_3\text{Li}$	6	3	3
${}^7_3\text{Li}$	7	3	4
${}^9_4\text{Be}$	9	4	5
${}^{10}_5\text{B}$	10	5	5
${}^{11}_5\text{B}$	11	5	6
${}^{12}_6\text{C}$	12	6	6
${}^{13}_6\text{C}$	13	6	7
${}^{14}_7\text{N}$	14	7	7
${}^{16}_8\text{O}$	16	8	8
${}^{23}_{11}\text{Na}$	23	11	12
${}^{65}_{29}\text{Cu}$	65	29	36
${}^{200}_{80}\text{Hg}$	200	80	120
${}^{235}_{92}\text{U}$	235	92	143
${}^{238}_{92}\text{U}$	238	92	146

**ΠΙΝΑΚΑΣ 45-2 Μάζες ατόμων ελαφρών στοιχείων**

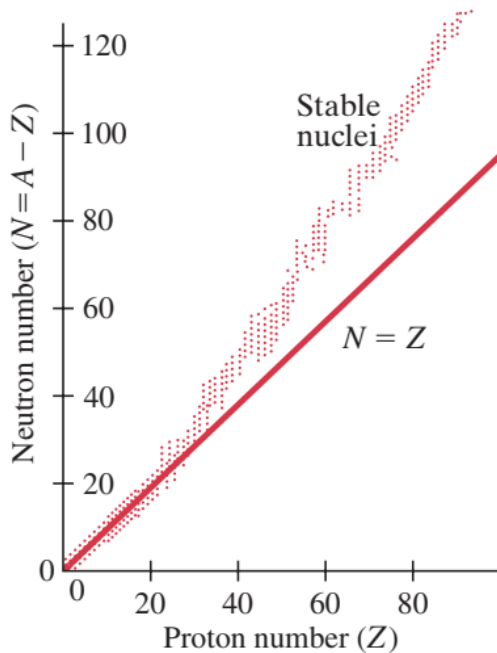
Στοιχείο	Ατομικός αριθμός, $Z$	Νετρονικός αριθμός, $N$	Ατομική μάζα, ( $u$ )	Μαζικός αριθμός, $A$
Υδρογόνο (H)	1	0	1,00783	1
Δευτέριο (H)	1	1	2,01410	2
Ήλιο (He)	2	1	3,01603	3
Ήλιο (He)	2	2	4,00260	4
Λίθιο (Li)	3	3	6,01512	6
Λίθιο (Li)	3	4	7,01600	7
Βηρύλλιο (Be)	4	5	9,01218	9
Βόριο (B)	5	5	10,01294	10
Βόριο (B)	5	6	11,00931	11
Άνθρακας (C)	6	6	12,00000	12
Άνθρακας (C)	6	7	13,00336	13
Άζωτο (N)	7	7	14,00307	14
Άζωτο (N)	7	8	15,00011	15
Οξυγόνο (O)	8	8	15,99491	16
Οξυγόνο (O)	8	9	16,99913	17
Οξυγόνο (O)	8	10	17,99916	18

Πηγή: *Encyclopedia of Physics*, Lerner and Trigg, eds. (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1981.)

## Διάγραμμα Serge







**Ισότοποι πυρήνες** ονομάζονται οι πυρήνες με ίδιο  $Z$  και διαφορετικό  $N$

**Μερικά στοιχεία χωρίς ισότοπα είναι τα**

**F,Na,Al,P,Mn,Au**

**Ισότοπα του H**

Απλό υδρογόνο  ${}_1\text{H}^1$

Βαρύ υδρογόνο (Δευτέριο)  ${}_1\text{H}^2$

Υπερβαρύ υδρογόνο (Τρίτιο)  ${}_1\text{H}^3$

**Ισότοπα του U**

${}_{92}\text{U}^{234}$  ουράνιο – 234 , 0.006%

${}_{92}\text{U}^{235}$  ουράνιο -235 , 0.714%

${}_{92}\text{U}^{238}$  ουράνιο -238 99.286%

Το  ${}_{92}\text{U}^{235}$  παίζει ρόλο στην εκμετάλλευση της Ατομικής Ενέργειας

Από την ύπαρξη των ισοτόπων εξηγείται γιατί τα ατομικά βάρη των στοιχείων δεν είναι ακέραιο αριθμοί. Τα ισότοπα έχουν κοινές χημικές ιδιότητες αλλά διαφορετικές φυσικές ιδιότητες. Ο διαχωρισμός των ισοτόπων γίνεται με φυσικές μεθόδους.

Εκτός από τα ισότοπα που υπάρχουν στην φύση υπάρχουν και τα τεχνητά τα οποία παράγονται τεχνητά ως προϊόντα πυρηνικών αντιδράσεων. Αυτά ονομάζονται **ραδιοισότοπα** ή **ραδιενεργά ισότοπα** και διασπώνται μόνα τους. Τέτοια είναι  ${}_{15}\text{P}^{30}$ ,  ${}_{6}\text{C}^{14}$ ,  ${}_{52}\text{I}^{131}$ ,  ${}_{27}\text{Co}^{60}$

**Ισοβαρείς πυρήνες** ονομάζονται οι πυρήνες που έχουν τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων  $A$  αλλά διαφορετικό αριθμό πρωτονίων  $Z$ .

π.χ,  ${}_{1}\text{H}^3$  με  ${}_{2}\text{He}^3$  το ισότοπο  ${}_{6}\text{C}^{14}$  με το  ${}_{7}\text{N}^{14}$

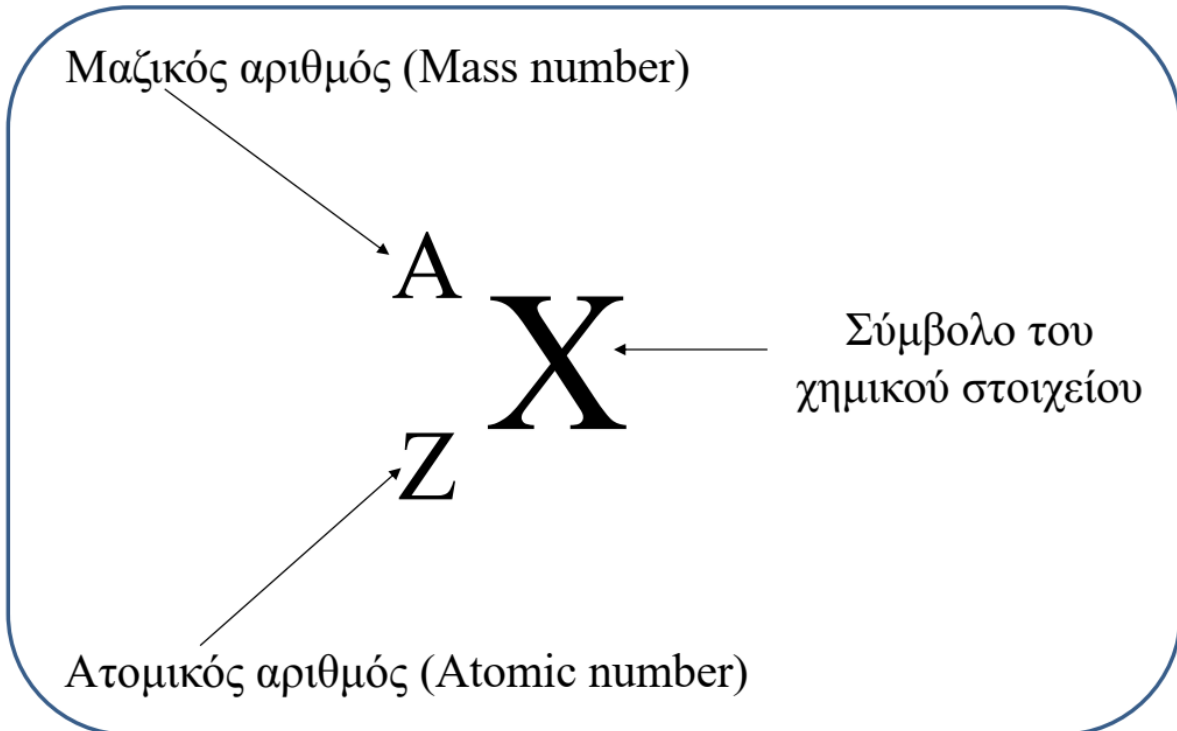
**Ο μητρικός και ο θυγατρικός πυρήνας κατά την εκπομπή σωματιδίου  $\beta$  είναι ισοβαρείς.**

**Ισότονοι πυρήνες** είναι οι πυρήνες με το ίδιο  $N$  και διαφορετικό  $Z$ , όπως  ${}_{6}\text{C}^{14}$  και  ${}_{7}\text{N}^{15}$

**Ισοδιαφορικοί** είναι οι πυρήνες με την ίδια διαφορά  $N-Z$ , όπως  ${}_{92}\text{U}^{238}$  και το  ${}_{90}\text{Th}^{234}$ , επειδή  $(238-92)=(234-90)=54$ .

**Υπερουράνια στοιχεία** ονομάζονται τα τεχνητά στοιχεία που δεν υπάρχουν στην φύση και έχουν  $Z > 92$ . Είναι όλα ραδιενεργά.

Παράδειγμα παραγωγής του  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$



Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων  $Z$  λέγονται **ισοτοπικοί**.

Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων  $A$  λέγονται **ισοβαρείς**.

Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νετρονίων  $N$  λέγονται **ισότονοι**.

## 12.2 Ακτίνα του πυρήνα.

$$1 \text{ femtometer} = 1 \text{ fermi} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m.}$$

Ο πυρήνας θεωρείται σφαιρικός αλλά υπάρχουν νουκλίδια με ελλειπτικό σχήμα. Η ενεργός ακτίνα  $r$  δίνεται από την σχέση

$$r = r_0 A^{1/3}, \quad (12.2)$$

A είναι ο μαζικός αριθμός

$$r_0 \sim 1.2 \text{ fm}$$

Ο όγκος του πυρήνα

$$V = 4\pi \frac{r^3}{3} = 4\pi r_0^3 A \quad (12.3)$$

Ο όγκος είναι ανάλογος του A δηλαδή προς την ολική μάζα.

Η πυκνότητα  $\rho$

$$\rho = \frac{A}{V} = \frac{A}{4\pi r_0^3 A} = \frac{1}{4\pi r_0^3} \quad (12.4)$$

Δηλαδή είναι προσεγγιστικά σταθερή για όλους τους πυρήνες

Για την μέτρηση της μάζας των ατόμων και των πυρήνων χρησιμοποιείται η Φυσική κλίμακα των ατομικών μαζών. Σαν μονάδα λαμβάνεται η **ατομική μονάδα μάζας u** ή (amu). Το 1 u είναι 1/12 της μάζας του ισοτόπου  ${}^6\text{C}^{12}$ .

$$1 \text{ u} = 1.660\,538\,86 \times 10^{-27} \text{ kg}. \quad (12.5)$$

Ο μαζικός αριθμός A μάς δίνει κατά προσέγγιση και την μάζα του πυρήνα σε μονάδες u. Για παράδειγμα ο πυρήνας  ${}^{197}\text{Au}$  προσεγγιστική μάζα 197u με μάζα πυρήνα 196.966552u

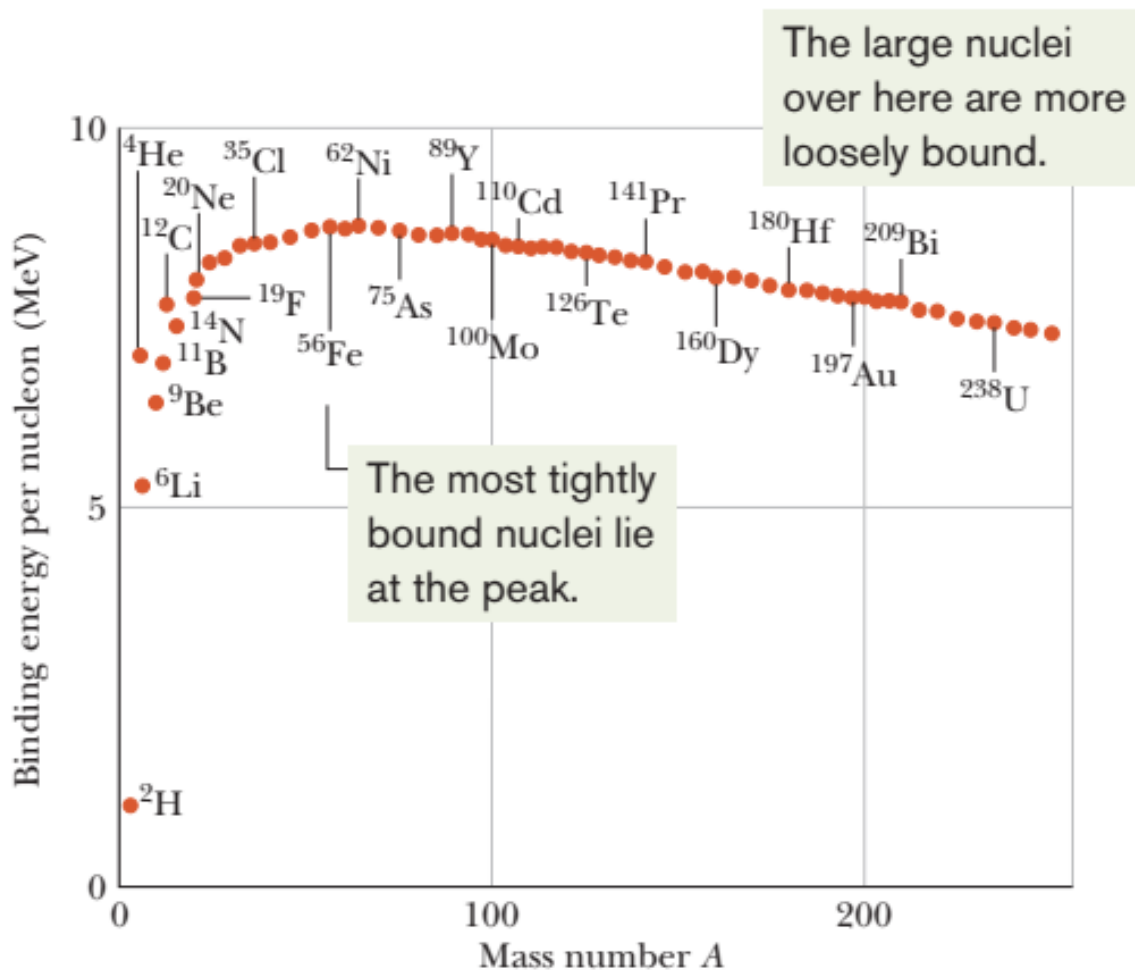
Η μάζα  $m$  του πυρήνα έπρεπε να ισούται με το άθροισμα των μαζών των  $p$  και  $n$  του,  $Zm_p+Nm_n$ . Στην πραγματικότητα εμφανίζεται ένα **έλλειμα μάζας  $\Delta m$**  και η μάζα  $m$  είναι μικρότερη από  $Zm_p+Nm_n$

$$\Delta m=( Zm_p+Nm_n)-m \quad (12.6)$$

Δηλαδή τα  $p$  και  $n$  κατά την ένωση τους για την δημιουργία πυρήνα χάνουν μέρος από την μάζα τους. Το έλλειμα μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια που ονομάζεται **ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα  $\Delta E_{be}$**

$$\Delta E_{be}=\Delta m c^2 \quad (12.7)$$

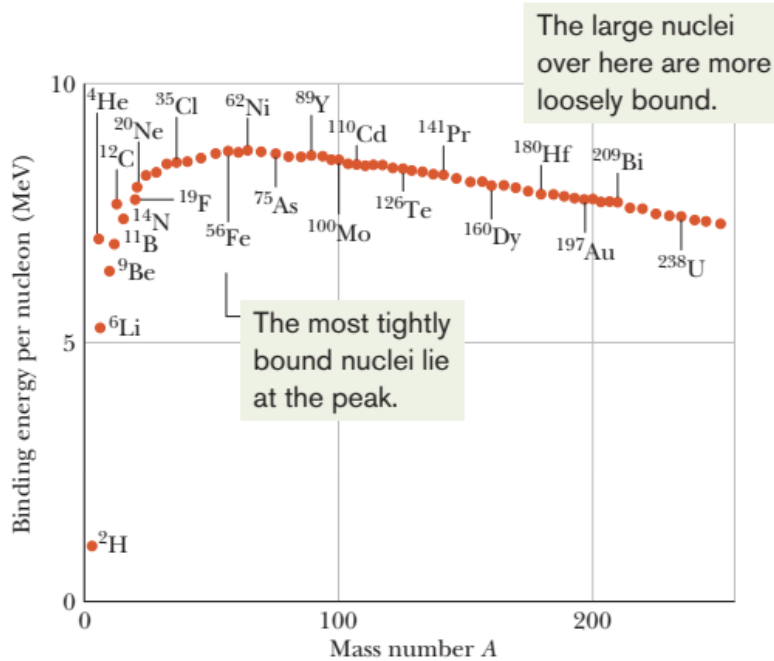
<https://www.youtube.com/watch?v=r40h66qiF5I>



Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης τόσο πιο σταθερός είναι ο πυρήνας. Αντίθετα για τη διάσπαση του πυρήνα αυτός πρέπει να απορροφήσει ενέργεια τουλάχιστον ίση με  $\Delta E_{\text{be}}$ .

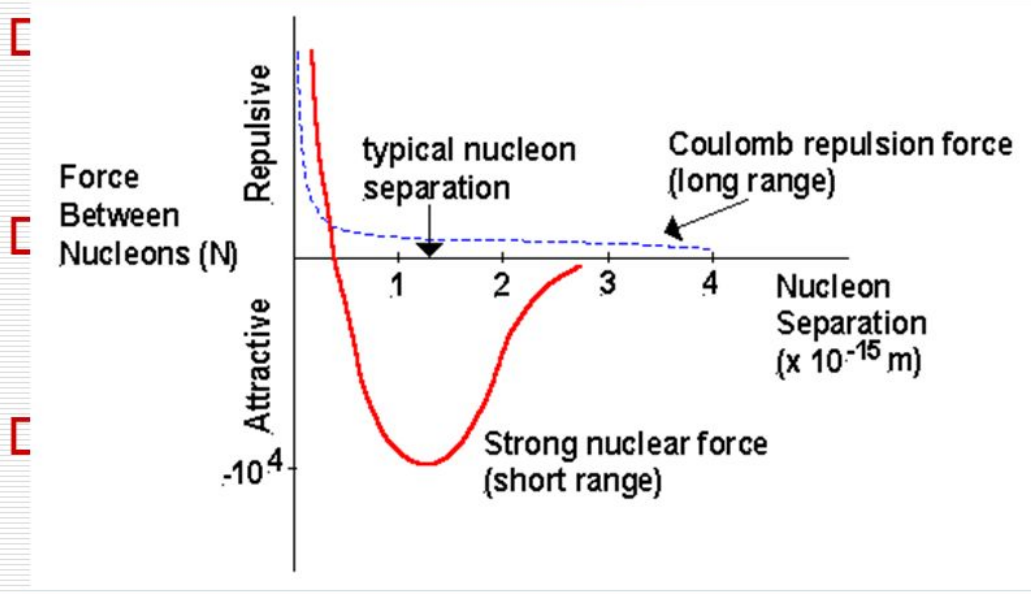
Οι πυρήνες που βρίσκονται δεξιά του διαγράμματος όπως π.χ. το  $^{238}\text{U}$  για να αποκτήσουν μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης πρέπει να χωριστούν σε δύο πυρήνες κοντά στην κορυφή του διαγράμματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **σχάση**. Η σχάση είναι αυθόρμητη σε πυρήνες μεγάλου A. Μπορεί να έχουμε και εξαναγκασμένη σχάση όπως στα πυρηνικά όπλα. Οι πυρήνες που βρίσκονται αριστερά του διαγράμματος όπως π.χ. το  $^1\text{H}$  αν συνενωθούν δημιουργήσουν πυρήνα κοντά στην κορυφή όπως το

${}^4\text{He}$  έχοντας μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **σύντηξη**.



Σε κάθε πυρήνα λόγω του φορτίου των πρωτονίων δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί απωστικές δυνάμεις σε κάθε θετικό φορτίο που πλησιάζει τον πυρήνα. Όταν το φορτισμένο σωματίδιο πλησιάζει σε μία απόσταση μικρότερη μιας τιμής  $r_0$  η απωστική δύναμη ελαττώνεται. Σε ακόμη μικρότερη απόσταση η δύναμη από απωστική γίνεται ελκτική

## Strong Nuclear Force



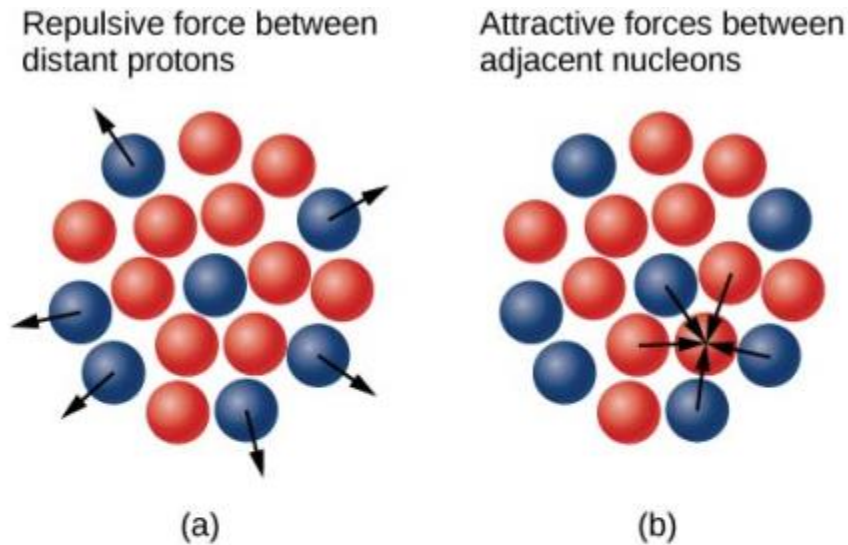
Έτσι για  $r < r_0$  παύει να ισχύει ο νόμος του Coulomb. Το φαινόμενο οφείλεται σε ένα δυναμικό πεδίο που υπάρχει στον πυρήνα που ονομάζεται πυρηνικό πεδίο. Στο πυρηνικό πεδίο οφείλονται οι δυνάμεις που ονομάζονται δυνάμεις ανταλλαγής που έχουν σαν αποτέλεσμα τα ομώνυμα φορτία να έλκονται και τα ετερόνυμα να απωθούνται

### Ισχυρή πυρηνική δύναμη

- p-p έλκονται με ισχυρή πυρηνική δύναμη απωθούνται με ηλεκτροστατικές δυνάμεις



- p-n έλκονται με ισχυρή πυρηνική δύναμη
- n-n έλκονται με ισχυρή πυρηνική δύναμη



**Figure 10.5** (a) The electrostatic force is repulsive and has long range. The arrows represent outward forces on protons (in blue) at the nuclear surface by a proton (also in blue) at the center. (b) The strong nuclear force acts between neighboring nucleons. The arrows represent attractive forces exerted by a neutron (in red) on its nearest neighbors.

## Ασθενής πυρηνική δύναμη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13

### ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

#### 13.1 Το ηλεκτρόνιο, $-1e^0$

Είναι σωματίο αρνητικά φορτισμένο με το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο ( $-e$ ).

$$q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{Kg}$$

$$m_e = 0.0055 \text{u}$$

Τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από τους πυρήνες των ατόμων ή είναι ελεύθερα και κινούνται μέσα στη μάζα των σωμάτων μεταξύ των ατόμων και στο κενό.

Ηλεκτρόνια προέρχονται και από την διάσπαση πυρήνων ατόμων και αποτελούν **τα σωματΙΑ β ή ακτίνες β**. Δέσμη που αποτελείται από ταχέα ηλεκτρόνια αποτελεί τις **καθοδικές ακτίνες**

#### 13.2 Το πρωτόνιο $1p^1$ ή $1H^1$

Είναι σωματίδιο ηλεκτρικά φορτισμένο με το με το στοιχειώδες θετικό ηλεκτρικό φορτίο ( $+e$ ).

$$q_p = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$m_p = 1.672 \times 10^{-27} \text{Kg}$$

$$m_p=1.0076u$$

Ισχύει  $m_p=1836m_e$

Το ιονισμένο άτομο του απλού Η είναι ένα πρωτόνιο.

### 13.3 Το νετρόνιο $n^1$

Είναι ηλεκτρικά ουδέτερο

$$q_n=0$$

$$m_n=1.674 \times 10^{27} \text{Kg}$$

$$m_n=1.0089u$$

Πρακτικά  $m_n=m_p$ . Το  $n$  είναι συστατικό όλων των πυρήνων πλήν του ατόμου του απλού Η. Δεν εμφανίζεται ελεύθερο στη φύση. Εμφανίζεται ως προϊόν σε μερικές πυρηνικές αντιδράσεις και είναι βραχύβιο. **Δεν ιονίζει την ύλη και περνά μέσα από αυτή.**

**Τα  $p$  και  $n$  ονομάζονται νουκλεόνια.**

### 13.4 Το φωτόνιο , $\gamma$

Τα φωτόνια συμπεριφέρονται σαν σωματίδια με μάζα και ορμή.

Η μάζα ηρεμίας τους είναι μηδέν. Ισχύει

$$E=hf \quad (13.1)$$

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2} \quad (13.2)$$

Η ορμή

$$p = \frac{hf}{c} \quad (13.3)$$

### 13.5 Τα μεσόνια μ

Είναι φορτισμένα θετικά ή αρνητικά ή είναι ουδέτερα.

$$Q_{\mu} = \pm q_e$$

$$m_{\mu} = \kappa m_e \text{ με } (1 < \kappa < 1836)$$

για  $\kappa = 207$  ονομάζονται μεσόνια μ η μιόνια

για  $\kappa = 270$  ονομάζονται μεσόνια π η πιόνια

για  $\kappa = 365$  ονομάζονται μεσόνια τ

Προέρχονται από συγκρούσεις ατόμων με σωματίδια υψηλής ενέργειας και βρίσκονται στην κοσμική ακτινοβολία. Είναι βραχύβια σωματίδια.

### 13.5 Το ποζιτρόνιο $\pi^+$

Είναι σωματίο θετικά φορτισμένο με το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (+e) και μάζα ίση με την μάζα του ηλεκτρονίου.

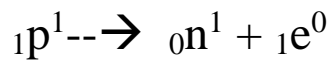
$$q_{\pi} = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$m_{\pi} = 9.1 \times 10^{-31} \text{Kg}$$

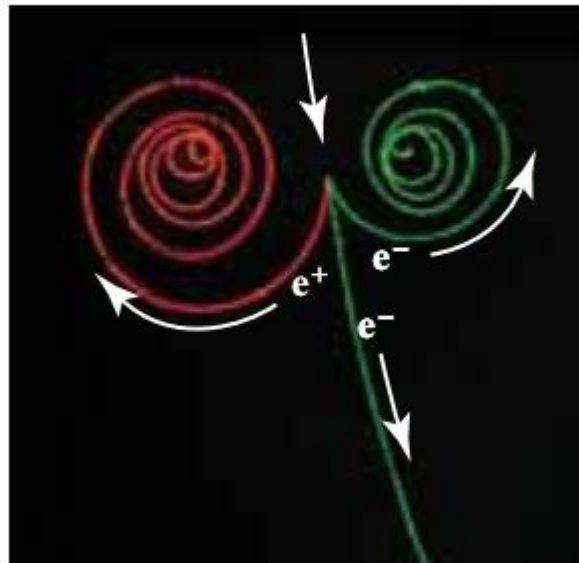
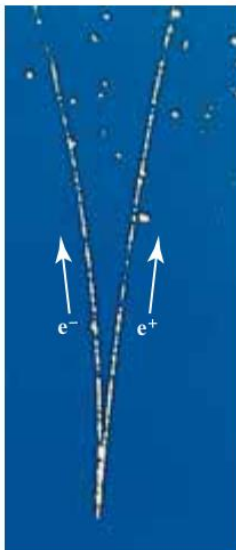
$$m_{\pi} = 0.0055 \text{u}$$

Το  $\pi^+$  το είχε προβλέψει ο Dirac (1928) και παρατηρήθηκε από τον Anderson (1932). Είναι στοιχείο της **αντιύλης**. Η αντιύλη είναι

μία μορφή της ύλης πού έχει κατοπτρικές ιδιότητες από την συνηθισμένη ύλη. Είναι βραχύβιο. Παράγεται σε ορισμένες μεταστοιχειώσεις και κατά την δίδυμη γένεση. Ενώνεται με το ηλεκτρόνιο κατά την εξαύλωση. Η **μεταστοιχείωση** του ραδιενεργού ισοτόπου του P



**Δίδυμη γένεση ή υλοποίηση** ονομάζουμε το φαινόμενο που από ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας παράγονται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο όταν το φωτόνιο περάσει δίπλα από ένα βαρύ πυρήνα



$$h\nu \rightarrow -{}_1^0\text{e}^- + {}_1^0\text{e}^+ \quad (13.4)$$

$$\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+} \quad (\text{pair production}). \quad (13.5)$$

$$hf = 2mc^2 + E_k \quad (13.6)$$

Για να γίνει δίδυμη γένεση πρέπει

$$hf \geq 2mc^2 \quad (13.7)$$

Προκύπτει ότι  $hf \sim 1\text{MeV}$

Στην **εξαύλωση** ένα ηλεκτρόνιο έρχεται σε επαφή με ένα ποζιτρόνιο. Τα σωμάτια εξαφανίζονται και δημιουργούνται δύο όμοια φωτόνια που κινούνται αντίθετα σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής.

$$-{}_1e^0 + {}_1e^0 \rightarrow 2hf \quad (13.8)$$

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma \quad (\text{annihilation}). \quad (13.9)$$

### **Υλη+Αντιύλη-→φωτόνια**

Εάν  $E_k$  είναι η συνολική κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου πριν την σύγκρουση ισχύει

$$E_k + 2mc^2 = 2hf \quad (13.20)$$

Η ενέργεια του κάθε φωτονίου είναι τουλάχιστον  $0.5\text{MeV}$ .

Το ποζιτρόνιο βρίσκεται στην κοσμική ακτινοβολία όπου φωτόνια υψηλής ενέργειας υφίστανται δίδυμη γένεση.

### 13.6 Το αντιπρωτόνιο ${}_{-1}p^1 \alpha$ ,

Είναι το κατοπτρικό σωματίδιο του  $\pi$  στην αντιύλη

$$q_{\alpha} = -1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$m_{\alpha} = 1.672 \times 10^{-27} \text{Kg}$$

$$m_{\alpha} = 1.0076 \text{u.}$$

Είναι βραχύβιο και συμπεριφέρεται όπως το ποζιτρόνιο.

### 13.7 Το νεutrίνο $\nu$

Είναι σωματίο με αμελητέα μάζα  $\sim 0$  χωρίς φορτίο και κινείται με ταχύτητα περίπου ίση με την ταχύτητα του φωτός. Παράγεται κατά την μετατροπή πρωτονίου σε νετρόνιο,



### 13.8 Το αντινεutrίνο $\bar{\nu}$

Είναι το αντίστοιχο σωματίο του  $\nu$  στην αντιύλη. Έχει αντίθετο spin από το  $\nu$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14

### ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

**14.1 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ** Ονομάζεται το φαινόμενο της αυτόματης και ανεξαρτήτως συνθηκών εκπομπής ακτινοβολίας από διάφορα στοιχεία. Η ραδιενέργεια είναι ενδοατομικό, πυρηνικό φαινόμενο λόγω του μη επηρεασμού της ούτε από φυσικές αλλά ούτε από χημικές μεταβολές. Τα στοιχεία στα οποία παρατηρείται το φαινόμενο αυτό καλούνται **ραδιοϊσότοπα** και χωρίζονται στα **φυσικά** και στα **τεχνητά**. Φυσικά ραδιενεργά καλούνται τα ραδιενεργά στοιχεία που απαντώνται στην φύση. Τέτοια είναι κυρίως τα βαριά στοιχεία όπως το Ουράνιο το Θόριο κλπ. Ενώ τα τεχνητά ραδιενεργά είναι τα ισότοπα που δεν απαντώνται στην φύση αλλά κατασκευάζονται από τον άνθρωπο. Η εκπεμπομένη ακτινοβολία από τα ραδιενεργά στοιχεία καλείται **ραδιενεργή ακτινοβολία**.

Η ραδιενεργή ακτινοβολία αποτελείται γενικώς από τρία είδη ακτινοβολιών που αυθαίρετα ονομάστηκαν άλφα, βήτα, γάμμα. Οι ακτινοβολίες άλφα και βήτα είναι σωματιδιακές ακτινοβολίες, ιονιστικές ενώ η γάμμα είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εμμέσως ιονίζουσα την ύλη.

**Εμβέλεια** ενός σωματιδίου ορίζουμε τον δρόμο εντός ενός μέσου τον οποίο θα διανύσει ένα σωματίο μέχρι να μηδενισθεί η ενέργεια του λόγω του ιονισμού, η και άλλων αλληλεπιδράσεων με τα μόρια του μέσου. Η εμβέλεια ενός δεδομένου



σωματιδίου εξαρτάται απο την ενέργεια του το είδος και την κατάσταση του μέσου.

**Ενεργό εμπέλεια** Ορίζουμε το ελάχιστο πάχος του στρώματος της ύλης δια μέσου του οποίου το σωματίο δεν μπορεί να διέλθει.

## 14.1 ΝΟΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ



.Εαν θεωρήσουμε οτι σε χρόνο  $t=0$  υπάρχουν  $N_0$  πυρήνες ενός ραδιοισοτόπου τότε μετα απο χρόνο  $t$  ο αριθμός των πυρήνων του ραδιοισοτόπου θα είμαι

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (14.1),$$

όπου η  $\lambda$  καλείται **σταθερά διάσπασης**. Το αρνητικό σημείο στην σχέση 14.1 δηλώνει πως αυξανόμενου του χρόνου ο αριθμός των πυρήνων  $N$  ελαττώνεται.

Η σχέση 14.1 προκύπτει από το σκεπτικό ότι ενώ δεν μπορούμε να προβλέψουμε ποιος πυρήνας θα διασπαστεί ο ρυθμός διάσπασης θα είναι ανάλογος του  $N$ . Δηλαδή ένα  $N_0$  είναι αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων ραδιενεργού στοιχείου σε χρόνο  $t=0$  και  $N$  ο αριθμός αυτός την χρονική στιγμή  $t$  τότε σε χρόνο  $dt$  η μεταβολή του αδιάσπαστου πυρήνα είναι  $dN$ . Ο ρυθμός διάσπασης θα είναι

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (14.2)$$

Όπου  $\lambda$  σταθερά αναλογίας που λέγεται **σταθερά διάσπασης** και εξαρτάται από την φύση του ραδιενεργού

Η σχέση (14.2) γράφεται

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad (14.3)$$

Ολοκληρώνοντας την (14.3)

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^t dt,$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0).$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t.$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{radioactive decay}), \quad (14.4)$$

Σύνηθως το αρχικό ραδιοϊσότοπο καλείται **Μητρικό** ενώ οι πυρήνες που προέκυψαν από την διάσπαση των μητρικών πυρήνων λέγονται **Θυγατρικοί**.

Ο αριθμός των θυγατρικών πυρήνων  $\Theta$

$$\Theta = N - N_0$$

Το μέγεθος που μετρούμε είναι ο **ρυθμός διάσπασης** η **ενεργότητα** η και απλώς **ραδιενέργεια** ,  $R$

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (14.5)$$

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{radioactive decay}), \quad (14.6)$$

Όπου  $R_0$  είναι η ραδιενέργεια σε  $t=0$ .

Η σχέση (14.5) σε συνδιασμό με την (14.4) δίνει

$$R = \lambda N, \quad (14.7)$$

Σαν μονάδα ενεργότητας η ραδιενέργειας θεσπίστηκε στο Διεθνές σύστημα (S.I.) το **becquerel, bc**. Το ένα bc είναι ίσο με μία πυρηνική διάσπαση το δευτερόλεπτο.

$$1 \text{ becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ decay per second.}$$

Λέγοντας 10 bc εννούμε 10 διασπάσεις το δευτερόλεπτο. Εάν οι πυρήνες της ραδιενεργού ουσίας είναι αραιωμένοι σε κάποιον όγκο ή σε κάποια επιφάνεια τότε έχουμε αντίστοιχα το bc/m<sup>3</sup> (για αέρα), το bc/l (για υγρά) ή bc/m<sup>2</sup> για το έδαφος.

**Παλαιότερη μονάδα ήταν το 1Ci**

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

Ο χρόνος κατά τον οποίο η ραδιενέργεια η με άλλα λόγια ο χρόνος κατα τον οποίο ο αριθμός των πυρήνων που υφίσταται διάσπαση ελαττώνεται στο μισό καλείται χρόνος ημισείας ζωής η χρόνος υποδιπλασιασμού και συμβολίζεται με  $T_{1/2}$

Εάν στην σχέση (14.4) θέσω  $t=T_{1/2}$ , τότε προκύπτει η σχέση,

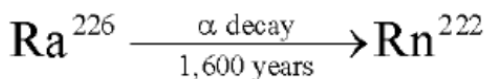
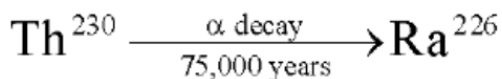
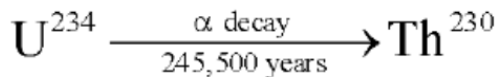
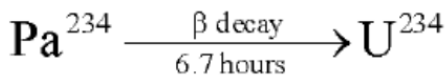
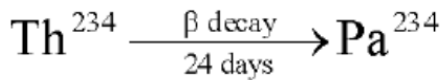
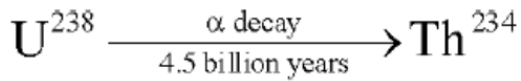
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (14.8)$$

Από την 14.8 προκύπτει

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (14.9)$$

Από την (14.9) προκύπτει ότι ο  $T_{1/2}$  είναι ανεξάρτητος του  $N_0$  δηλαδή είναι ίδιος για κάθε ποσότητα του στοιχείου.

## Ο χρόνος ημιζωής (half-life) μερικών φυσικών ραδιενεργών πυρήνων



• Πολλά ραδιενεργά υλικά διασπώνται διαδοχικά σε μια σειρά πυρηνικών αντιδράσεων.

• Έτσι, το αέριο Ραδόνιο (Radon) προέρχεται από το Ουράνιο του εδάφους.

• Μεσολαβούν 6 διαδοχικές αντιδράσεις για να διασπασθεί το U-238 σε Rn-222.

Ο αριθμός  $N$  των αδιάσπαστων πυρήνων μετά από  $n$  χρόνους  $T_{1/2}$  δίνεται από την σχέση

$$N = \frac{N_0}{2^n} \quad (14.10)$$

Ο χρόνος ζωής ή μέσος χρόνος ζωής  $\tau$  είναι ο χρόνος  
όπου  $N$  και  $R$  ελαττώνονται στο  $1/e$  της αρχικής τιμής  
τους

Εάν στην 14.6

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{radioactive decay}),$$

θέσουμε  $t = \tau$  προκύπτει

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = 1.44 T_{1/2} \quad (14.11)$$

και

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2. \quad (14.12)$$

Από την (14.6)



$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{radioactive decay}),$$

την

$$R = \lambda N, \quad (14.7)$$

Και την (14.4)

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{radioactive decay}),$$

Προκύπτει

$$R_0 = N_0 \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (14.13)$$

Η ραδιενέργεια εξαρτάται από τον αριθμό των πυρήνων και από τον χρόνο ημισείας ζωής. Για παράδειγμα ενα λάβουμε το  $^{131}\text{I}$ , με  $T_{1/2}=8.04\text{d}$  η  $T_{1/2}=695000\text{ s}$  και θεωρήσουμε ότι σε  $t=0$  έχουμε  $N_0=1 \times 10^6$  πυρήνες

τότε μετά απο 8 περίπου ημέρες θα έχουν απομείνει  $5 \times 10^5$  πυρήνες  
**δηλαδή οι μισοί.**

Η ραδιενέργεια στην αρχή, όταν ο αριθμός των πυρήνων ήταν  $N_0 = 1 \times 10^6$  σύμφωνα με τον τύπο (14.13) ήταν  $R_0 = 1bc$ , μετά το τέλος των 8.04d είναι  $0.5bc$ .

Αντιστρόφως απο τον τύπο (14.13) εάν ξέρουμε τα  $bc$  και το ειδος των ραδιενεργών πυρήνων δηλαδή το  $T_{1/2}$ , μπορούμε να βρούμε πόσους ραδιενεργούς πυρήνες έχουμε. Έτσι εαν σε ένα λίτρο γάλατος μετρησουμε  $300bc$  που οφείλονται στο  $^{131}\text{I}$  τότε αυτό περιέχει  $300 \times 10^6$  πυρήνες  $^{131}\text{I}$ . Για να υπάρξει αίσθηση της τάξης μεγέθους αναφέρουμε ότι το  $1g$   $^{131}\text{I}$  υπάρχουν  $46 \times 10^{20}$  πυρήνες  $^{131}\text{I}$  ! με ραδιενέργεια  $459 \times 10^{13}$  διασπάσεις το δευτερόλεπτο.

Στον επόμενο πίνακα I φαίνονται ενδεικτικά τα  $T_{1/2}, N_0, R_0$   
ορισμένων στοιχείων

Στοιχείο	$T_{1/2}$	$N \times 10^{21}$	$R_0(\text{bc})$
$^{131}\text{I}$	8.04d	4.6	$4.59 \times 10^{15}$
$^{137}\text{Cs}$	30.17y	4.4	$3.2 \times 10^{12}$
$^{90}\text{Sr}$	29y	6.7	$5.08 \times 10^{12}$
$^{239}\text{Pu}$	24110y	2.52	$2.3 \times 10^9$
$^{235}\text{U}$	$704 \times 10^6 \text{y}$	2.56	80000
$^{238}\text{U}$	$4.468 \times 10^{12} \text{y}$	2.53	12450

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Ανάλογες σχέσεις ισχύουν και για τις μάζες των ραδιενεργών στοιχείων

$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad (14.14)$$

$$m = \frac{m_0}{2^{\nu}} \quad (14.15)$$

Όταν λέμε μετά από χρόνο  $T_{1/2}$  η μάζα του ραδιενεργού στοιχείου που έμεινε είναι η μισή της αρχικής εννοούμε την αδιάσπαστη μάζα και όχι την συνολική μάζα. Εάν έχουμε 10g ραδιενεργού στοιχείου μετά από χρόνο  $T_{1/2}$  θα έχουμε

10g=5g μητρικών πυρήνων + 5g θυγατρικών πυρήνων

Σε μία πυρηνική αντίδραση ισχύει

$$\left( \begin{array}{c} \text{system's initial} \\ \text{total mass energy} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{system's final} \\ \text{total mass energy} \end{array} \right) + Q$$

$$E_{0i} = E_{0f} + Q. \quad (14.16)$$

Από την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας

$$E=mc^2 \quad (14.17),$$

η (14.16) γίνεται

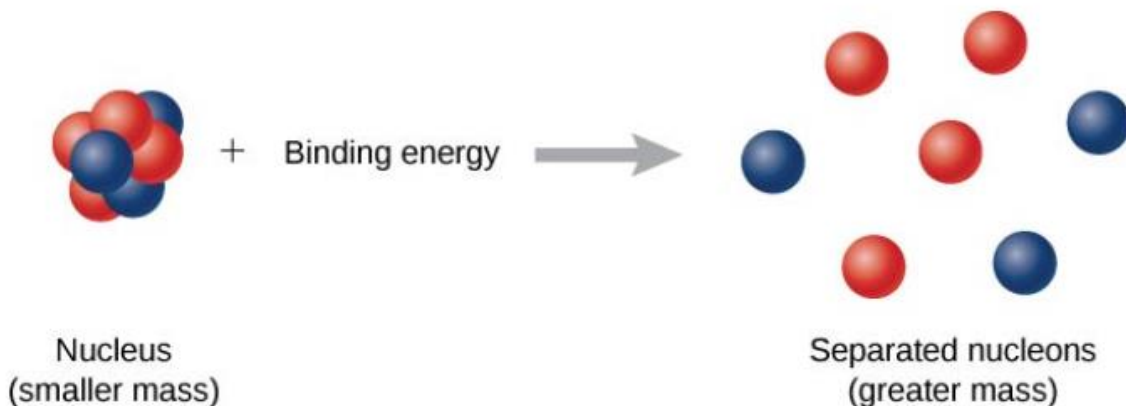
$$M_i c^2 = M_f c^2 + Q \quad (14.17)$$

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2 = -\Delta M c^2, \quad (14.18)$$

Όπου  $Q$  είναι η ενέργεια της πυρηνικής αντίδρασης

Καί  $\Delta M$  είναι το έλλειμα μάζας.

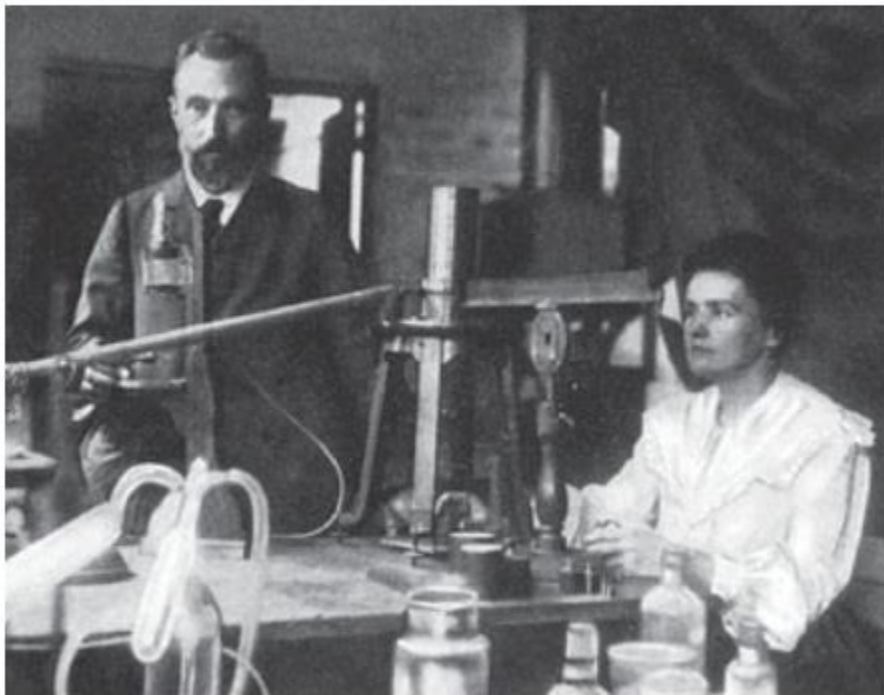
$$\Delta M = M_f - M_i. \quad (14.19).$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15

### ΠΗΓΕΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

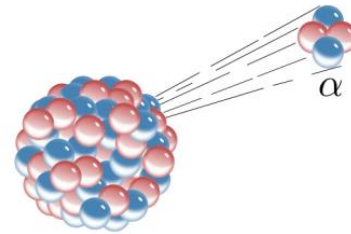
**FIGURE 30–3** Marie and Pierre Curie in their laboratory (about 1906) where radium was discovered.



## Είδη αυθόρμητης διάσπασης πυρήνων (ραδιενέργειας) και τα αντίστοιχα είδη ακτινοβολίας

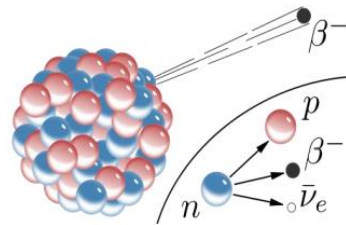
### α-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα συσμάτωμα από 2 πρωτόνια και δύο νετρόνια  
= διώχνει ένα σωματίδιο άλφα  
( δηλαδή έναν πυρήνα ηλίου,  ${}^4\text{He}$  )



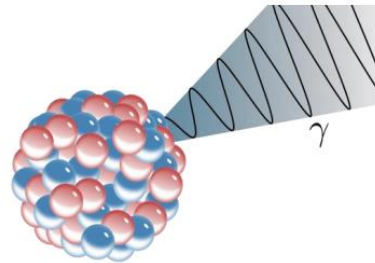
### β-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα ηλεκτρόνιο ( $e^-$ )  
ή ποζιτρόνιο ( $e^+$ )

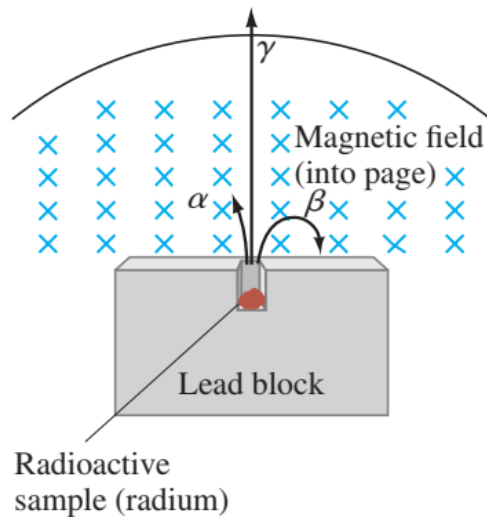


### γ-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα φωτόνιο ( $\gamma$ )  
→ η μόνη περίπτωση που μένει ο ίδιος, απλά με χαμηλότερη ενέργεια

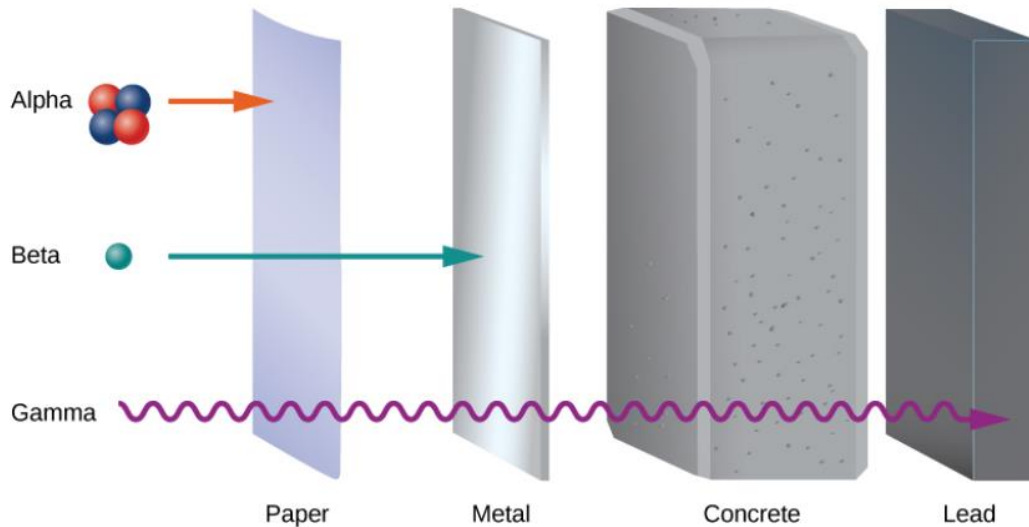


**FIGURE 30-4** Alpha and beta rays are bent in opposite directions by a magnetic field, whereas gamma rays are not bent at all.



$$F=0 \vee B=0$$

$$F = -q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$



**Ακτίνες άλφα:** Οι ακτίνες άλφα είναι σωματιδιακής φύσης. Βρέθηκε ότι το σωματίο άλφα ταυτίζεται με ένα διπλα φορτισμένο ιόν Ηλίου, δηλαδή δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. **Το φάσμα των ακτίνων άλφα είναι γραμμικό** δηλαδή εμφανίζονται ακτίνες άλφα σε ορισμένες και συγκεκριμένες ενέργειες. **Η εμβέλεια των άλφα στον αέρα είναι της τάξης των cm.**

Η κλασική ερμηνεία της  $\alpha$  διάσπασης βασίζεται στο ότι μέσα στους πυρήνες υπάρχουν πυρήνες  $\text{He}$  έχοντας κινητική ενέργεια. Στην περίπτωση που η κινητική ενέργεια είναι αρκετή ώστε να υπερνικήσουν τις δυνάμεις ανταλλαγής τότε βγαίνουν έξω από τους πυρήνες χωρίς να επιδράσει στους πυρήνες εξωτερικό αίτιο. Όσο μεγαλύτερη κινητική ενέργεια έχουν τα σωματία  $\alpha$  τόσο μικρότερο μέσο χρόνο ζωής  $\tau$  έχουν.

Η κβαντική ερμηνεία της α διάσπασης στηρίζεται στο φαινόμενο σήραγγας. Τα σωμάτια α θεωρούνται κυματοδέματα τα οποία πέφτουν στο φράγμα δυναμικού που περιβάλλει τον πυρήνα όποτε μέρος τους ανακλάται και μέρος τους διαθλάται. Το αποτέλεσμα της διάθλασης είναι η έξοδος του σωματίου α από τον πυρήνα.

...και οι εφαρμογές

**α. Η ακτινοβολία άλφα των πυρήνων**

**β. Η πυρηνική σύντηξη στα άστρα**

➤ Το φαινόμενο: Παρότι δεν έχει ενέργεια αρκετή για να διαφύγει από τον πυρήνα το σωματίδιο α «δραπετεύει» τελικά από αυτόν χάρις στο φαινόμενο της σήραγγας.

➤ Βασική πρόβλεψη: Λόγω της εκθετικής ευαισθησίας του φαινομένου, οι χρόνοι ζωής των πυρήνων που υφίστανται διάσπαση άλφα παρουσιάζουν γιγάντιες μεταβολές συναρτήσει της ενέργειας του εκπεμπόμενου σωματιδίου άλφα.

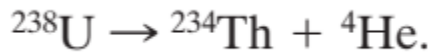
Η εσωτερική θερμοκρασία (~10<sup>6</sup> K) των άστρων δεν προσδίδει στους πυρήνες αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να υπερβούν τη μεταξύ τους άπωση Coulomb και να «αγγίζονται» ο ένας τον άλλον, οπότε μπορεί να λάβει χώρα πυρηνική σύντηξη. Η σύντηξη παρόλα αυτά συμβαίνει – τα άστρα «δουλεύουν» - χάρις στο φαινόμενο της σήραγγας. Οι πυρήνες δεν υπερπηδούν το μεταξύ τους φράγμα Coulomb – αφού δεν έχουν την αναγκαία ενέργεια – αλλά το διαπερνούν ανοίγοντας ...σήραγγα.

ΜΕΛΕΤΗ: Σ. Τραχανά, *Κβαντομηχανική I*, σελ. 261 – 276 (επιλεκτικά).

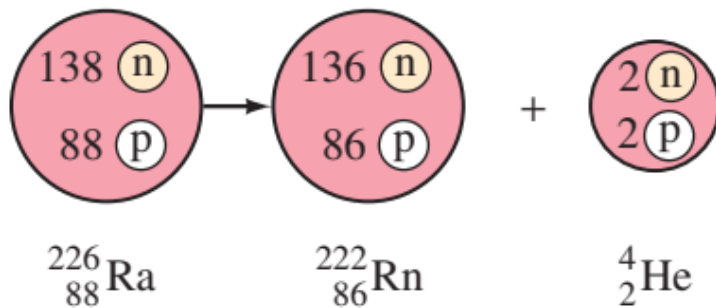
$$I = I_0 e^{-\mu d} = \frac{I_0}{e^{\mu d}}$$



Η α διάσπαση του U γίνεται αυθόρμητα.



Με  $Q=4.25\text{MeV}$



Η διάσπαση



Δεν ευνοείται ενεργειακά διότι η μάζα των προϊόντων είναι μεγαλύτερη από την

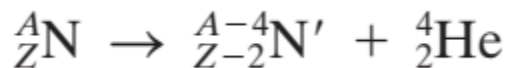
μάζα του  $^{232}_{92}\text{U}$

$$228.028741 \text{ u} + 2(1.007825 \text{ u}) + 2(1.008665 \text{ u}) = 232.061721 \text{ u},$$

> (232.037156 u)

## Με αποτέλεσμα να παραβιάζεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Ο γενικός τύπος της α- διάσπασης είναι



Ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν ακτίνες α είναι τα  ${}^{232}\text{Th}$ ,  ${}^{226}\text{Ra}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ .

Συνήθως βρίσκονται σε ορυχεία ουρανίου, αέριο ραδόνιο, καπνό τσιγάρων. Τα φωσφατικά λιπάσματα που χρησιμοποιούνται στις καλλεέργειες καπνού περιέχουν  ${}^{210}\text{Pb}$  και  ${}^{210}\text{Po}$  που είναι ραδιοϊσότοπα που προέρχονται από την φυσική διάσπαση του ραδονίου. Αυτά τα ραδιοϊσότοπα επικάθονται στις ίνες των φύλλων του καπνού και εκπέμπουν ακτίνες άλφα.

Οι λάμπες αερίου από προπάνιο ή κηροσίνη που χρησιμοποιούνται σε συνδιασμό με σχάρες πάνω από την φλόγα αποτελούν πηγές ακτίνων

άλφα. Πραγματι οι σχάρες για αυτές τις λάμπες περιέχουν 250-450mg θορίου το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία άλφα

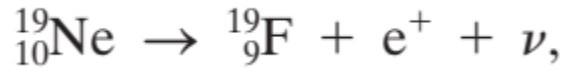
**Ακτίνες βήτα:** Οι ακτίνες βήτα είναι και αυτές σωματιδιακής φύσης.

Τα πειράματα έδειξαν ότι οι ακτίνες βήτα είναι ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά εκπέμπονται από τους πυρήνες και δεν πρέπει να συγχέονται με τα περιφερειακά ατομικά ηλεκτρόνια. Ένας πυρήνας μπορεί να εκπέμψει αυθόρμητα είτε ηλεκτρόνια είτε ποζιτρόνια.

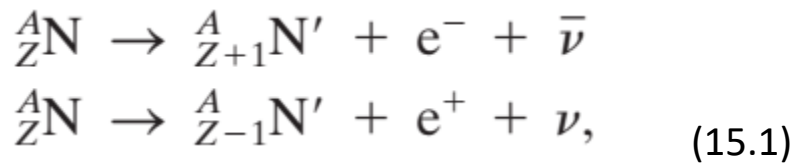
**Το ενεργειακό φάσμα των ακτίνων βήτα είναι συνεχές** πράγμα που σημαίνει ότι οι ενέργειές τους κατανέμονται από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή. Αυτή η μέγιστη τιμή είναι χαρακτηριστική για τον διασπώμενο πυρήνα. Η εμβέλεια των σωματίων βήτα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των άλφα της ίδιας ενέργειας και για το αυτό μέσο. **Η εμβέλεια των βήτα στον αέρα είναι της τάξεως των 5m.**

Η ενεργός εμβέλεια των βήτα ενέργειας  $E=1.545 \text{ MeV}$  στο Al είναι 0.25cm.

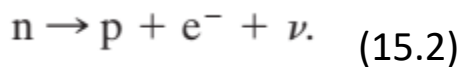
Ισχύει η αρχή διατήρησης του φορτίου



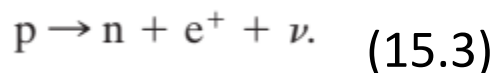
Ο γενικός τύπος για την διάσπαση β είναι



Τα  $e^{-}$ ,  $e^{+}$  και  $\nu$  δεν προϋπάρχουν στον πυρήνα αλλά δημιουργούνται κατά την β διάσπαση. Έτσι για τη  $\beta^{-}$  διάσπαση



Ενώ για την  $\beta^{+}$

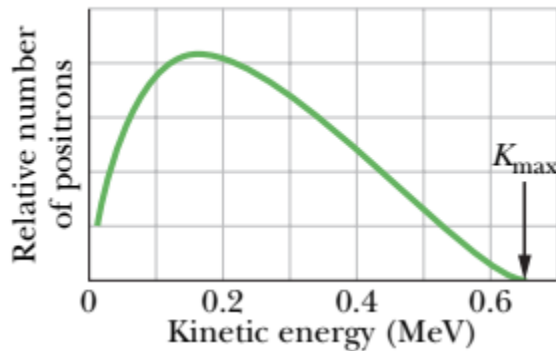


Διάσπαση  $\beta^{+}$  έχουμε όταν

Αριθμός  $p \gg$  αριθμός  $n$  ή  $A \gg Z-A$

Διάσπαση  $\beta^-$  έχουμε όταν

Αριθμός  $n \gg$  αριθμός  $p$  ή  $Z-A \gg A$



$$Q = K_{\max} \quad (15.4)$$

Την κινητική ενέργεια των σωματιδίων  $\beta$  την δίνουν οι πυρήνες (ενέργεια σύνδεσης) και όμοιοι ασταθείς πυρήνες έχουν ίδια ενέργεια σύνδεσης οπότε θα έπρεπε να έχουν την ίδια κινητική ενέργεια. Ο Pauli έκανε την υπόθεση ότι παράγεται και  $\nu$  με τις γνωστές ιδιότητες του κατά την μετατροπή του  $n$  σε  $p$  οπότε κατανέμεται η ενέργεια στα  $\beta$  και  $\nu$ .

Ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν ακτίνες βήτα είναι τα  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{130}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ , και βρίσκονται σε πυρηνικά εργοστάσια ,γυαλιά μυωπίας, σφραγίσματα δοντιών. Συγκεκριμένα οι φακοί των γυαλιών περιέχουν σπάνιες γαίες οι οποίες προστίθενται στο πυρίτιο για να βελτιωθεί η ποιότητα των φακών. Αυτές οι σπάνιες γαίες περιέχουν συχνά ραδιενεργό θόριο η ουράνιο τα οποία διασπώνται εκπέμποντας ακτίνες βήτα αλλά και αλφα και γάμμα.

Η πορσελάνη που χρησιμοποιείται στα τεχνητά δόντια η στα σφραγίσματα περιέχει ραδιενεργό Ουράνιο η Δημήτριο τα οποία εκπέμπουν ακτινες αλφα ,βητα και γάμμα.

**Ακτίνες γάμμα  $\gamma$**  :Είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία πέρχεται απο την αποδιέγερση των πυρήνων. Επειδή η ακτίνοβολία γάμμα δεν είναι άμεσα ιονιστική ακτινοβολια η διεισδυτική της ικανότητα είναι 100 φορές μεγαλύτερη των ακτίνων βήτα. Για τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες γενικότερα ισχύει η σχέση,

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (15.5)$$

όπου  $I$  η ένταση της ακτινοβολίας γάμμα σε βάθος  $d$  σε ένα υλικό σώμα,  $I_0$  η ένταση σε βάθος μηδέν και  $\mu$  ο συντελεστής απορρόφησης του μέσου ο οποίος εξαρτάται από το υλικό και την ενέργεια των γάμμα και μάλιστα ελαττώνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια των γάμμα. Επίσης η τιμή του  $\mu$  είναι μεγαλύτερη για τα βαριά στοιχεία(Π.χ Pb).

Ποτέ πυρήνας δεν εκπέμπει μόνο  $\gamma$ . Υπάρχουν όμως πυρήνες που εκπέμπουν μόνο  $\alpha$  ή  $\beta$  χωρίς  $\gamma$ . Όταν ένας πυρήνας εκπέμπει  $\alpha$  ή  $\beta$  τότε ο θυγατρικός πυρήνας τις περισσότερες φορές είναι ασταθής. Στην κατάσταση αστάθειας παραμένει ελάχιστο χρονικό διάστημα και μετά μεταπίπτει σε ευσταθή κατάσταση. Κατά την μετάπτωση εκπέμπεται φωτόνιο , ακτίνα  $\gamma$ .

Πηγές των ακτίνων γάμμα είναι τα χρησιμοποιούμενα σκευάσματα στην πυρηνική ιατρική,οικοδομικά υλικά, κα. Ειδικότερα την ακτινοβολία γάμμα την χρησιμοποιούν συχνά για την ακτινοβολήση των τροφίμων όπως της πατάτας, με σκοπό την αποστείρωση και διατήρηση των προϊόντων.Η ακτινοβολήση αυτή δεν κάνει την τροφή ραδιενεργή αλλά αποτελεί κίνδυνο για εκείνους που δουλεύουν στον

εργασιακό χώρο που γίνεται η ακτινοβόληση. Η πηγή ακτινοβολίας-γ που χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι το  $^{60}\text{Co}$ . Το  $^{60}\text{Co}$  παρασκευάζεται από με την ακτινοβόληση του φυσικού μη ραδιενεργού Co με νετρόνια σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα. Οι ακτίνες γάμμα συχνά συνυπάρχουν με τις ακτίνες βήτα και άλφα.

## Ραδιοχρονολόγηση

Η μέτρηση της συγκέντρωσης ορισμένων ραδιοισοτόπων σε υλικά μας βοηθάει στην χρονολόγηση τους. Εφαρμόζεται στην χρονολόγηση αρχαιολογικών αντικειμένων και γεωλογικών δειγμάτων. Παράδειγμα ραδιοχρονολόγησης είναι η ραδιοχρονολόγηση με ραδιενεργό άνθρακα. Το ασταθές ισότοπο  $^{14}\text{C}$  είναι προϊόν πυρηνικών αντιδράσεων ανάμεσα στην κοσμική ακτινοβολία και τους πυρήνες των ατόμων που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Τα φυτά με την πρόσληψη C προσλαμβάνουν και το ισότοπο  $^{14}\text{C}$ . Το ποσοστό στα φυτά είναι ίδιο με το ποσοστό που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Μετά το τέλος της ζωής τους το φυτό σταματά την πρόσληψη C και το ασταθές ισότοπο  $^{14}\text{C}$  υφίσταται διάσπαση  $\beta^-$  κατά το σχήμα





Ο  $T_{1/2}$  του  $^{14}\text{C}$  είναι 5730y. Μετρώντας το ποσοστό του  $^{14}\text{C}$  στα δείγματα μπορούμε να υπολογίσουμε το χρονικό διάστημα που παρήλθε από τον θάνατο του οργανισμού. **Η μέθοδος αυτή λέγεται ραδιοχρονολόγηση με C**

Παράδειγμα

Η ενεργότητα του ατμοσφαιρικού άνθρακα λόγω της παρουσίας του  $^{14}\text{C}$  είναι  $0.255 \frac{\text{Bq}}{\text{g}}$  Σε ανάλυση ενός αρχαιολογικού δείγματος 400g παρατηρήθηκαν 139 διασπάσεις ανά ώρα. Πόση είναι η ηλικία του δείγματος; ( $T_{1/2} = 5730\text{y}$ )

Απάντηση

$$\frac{139 \text{ διασπάσεις}}{h} = \frac{139 \text{ διασπάσεις}}{3600s} = 0.038 \text{Bq στα } 400 \text{ mg}$$

$$\frac{0.038 \text{Bq}}{400 \text{mg}} = \frac{0.038 \text{Bq}}{400 \times 10^{-3} \text{g}} = 0.0965 \frac{\text{Bq}}{\text{g}}$$

$$R_0 = 0.255 \text{Bq}$$

$$R = 0.0965 \text{Bq}$$

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \rightarrow \ln R = \ln R_0 - \lambda t \rightarrow \lambda t = \ln R_0 - \ln R \rightarrow t = \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)}{\lambda}$$

$$= \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)}{\frac{\ln 2}{T_{1/2}}} - t = 8030 \text{y}$$

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16**

### **ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ**

**Δοσιμετρία είναι η μέτρηση της δόσης με την βοήθεια των δοσιμέτρων.** Η δοσιμετρία ασχολείται με την μέτρηση με φυσικές μεθόδους της ποσότητας ακτινοβολίας που παράγει φυσικό, χημικό η βιολογικό φαινόμενο.

Όταν σε ένα ανοιχτό χώρο υπάρχει ακτινοβολία, κυρίως γάμμα ή X οποιοδήποτε σώμα κι αν βρεθεί σε αυτό τον χώρο θα εκτεθεί στην υπάρχουσα ακτινοβολία. Για να ξέρουμε πόση είναι η ακτινοβολία στον περιβάλλοντα χώρο και πόση είναι η έκθεση του σώματος στην ακτινοβολία, υπολογίζουμε τον ιονισμό που προκαλεί η ακτινοβολία στον αέρα.



## 16.1 Δόση έκθεσης σε ακτινοβολία, $E_R$

**Μονάδα :Roentgen**

Σύμβολο μονάδας :R ή r

Ως δόση έκθεσης ακτινοβολίας ορίζουμε τον λόγο,

$$E_R = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad (16.1)$$

όπου  $\Delta Q$  είναι τό άθροισμα των ηλεκτρικών φορτίων όλων των ιόντων του ίδιου προσήμου, που παράγονται στον αέρα μάζης  $\Delta m$ .

Ως μονάδα δόσης έκθεσης ορίζεται το Roentgen (R). εξ ορισμού ένα R είναι η ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (X, η  $\gamma$ ) που παράγει ολικό φορτίο  $2.58 \times 10^{-4}$  Cb σε 1Kg αέρα σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

## 16.2 Απορροφούμενη δόση, D

**Μονάδα :Gray (Gy) ,παλαιότερη μονάδα το rad**

Σύμβολο μονάδας :Gy

Απορροφούμενη δόση ή απλώς δόση μιας ακτινοβολίας γύρω από ένα σημείο, είναι η ενέργεια  $\Delta E$  η οποία δίνεται απο την ακτινοβολία στη μάζα  $\Delta m$ , περί το ενδιαφέρον σημείο, δια της μάζας  $\Delta m$ , δηλαδή,

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (16.2)$$

Μονάδα απορροφούμενης δόσης είναι το Gray (Gy). Εξ ορισμού

**1Gy=1J/Kg ύλης** και για ζωντανούς οργανισμούς **1Gy=1J/Kg ιστού**.

Μία παλαιότερη μονάδα απορροφούμενης δόσης είναι τό **rad** το οποίο ισούται με **1rad=0.01J/Kg** ύλης η ιστού. Προφανώς ισχύει,

$$1\text{Gy} = 100 \text{ rad} \quad (16.3)$$

Η απορροφούμενη δόση εξαρτάται

- α) Απο την φύση της ακτινοβολίας
- β) Από την ένταση της ακτινοβολίας
- γ) Από την φύση του απορροφητικού υλικού.

Η ενέργεια που θα απορροφηθεί και η οποία παρουσιάζεται την πρώτη στιγμή σαν διέγερση του ατόμου η του πυρήνα θα επαναδοθεί αργότερα σαν ακτινοβολία ή θα δεσμευτεί σαν χημική ενέργεια του συστήματος απορρόφησης.

Η απορροφούμενη δόση ή δόση σε rad, έχει την πιο καθαρή Φυσική σημασία εναντι των άλλων δόσεων. Λόγω του ορισμού της η απορροφούμενη δόση φέρει τον χαρακτηρισμό **ενεργειακή δόση**.

Γιά τον αέρα ισχύει,  $1R=0.87\text{rad}$ , οπότε για μονάδες έκθεσης σε ακτινοβολία  $E_R$  μονάδες R η δόση απορροφήσεως τού αέρα  $D_{air}$  θα ισούται με,

$$D_{air} = 0.87E_R \text{ [rad]} \text{ (16.4)}$$

Γιά το νερό ή τους μαλακούς ιστούς η σχέση ανάμεσα στο rad και το R είναι,

$$1R = 0.96\text{rad} \text{ (16.5)}$$

Για το **ανθρώπινο σώμα**, χωρίς μεγάλο σφάλμα, ισχύει

$$1R = 1\text{rad}. \text{ (16.6)}$$

**Δηλαδή εάν ένας άνθρωπος εκτεθεί σε ακτινοβολία 1R θα απορροφήση δόση 1 rad.**

Η σχέση που συνδέει την **απορροφούμενη δόση ακτινοβολίας D** απο ένα μέσο με **μαζικό συντελεστή απορρόφησης  $\mu_m$**  και την δόση έκθεσης είναι,

$$D = D_{air} \frac{\mu_m}{\mu_{air}} \quad (16.7)$$

όπου  $\mu_{air}$  **μαζικός συντελεστής απορρόφησης του αέρα.**

Η απορρόφηση της ιονιστικής ακτινοβολίας κατ'αρχή δημιουργεί ιονισμούς και διεγέρσεις των ατόμων της ύλης. Αυτό γίνεται σε χρόνο της τάξης του  $10^{-15}$  sec. Η αλληλεπιδράσεις που γίνονται σε αυτή την χρονική κλίμακα αποτελούν τις στοιχειώδεις αντιδράσεις ανάμεσα στην ακτινοβολία και στην ύλη. Τό αποτέλεσμα των στοιχειωδών αντιδράσεων είναι η δημιουργία φορτισμένων ριζών και διεγερμένων μορίων που αποτελεί τις **πρωτογενείς αντιδράσεις** κατά τις οποίες οι ρίζες και τα διεγερμένα μόρια αντιδρούν μεταξύ τους προκαλώντας πια σε επίπεδο κυττάρων τις **δευτερογενείς αντιδράσεις** οι οποίες μπορεί να διαρκέσουν πολλές ώρες. **Οι δευτερογενείς αντιδράσεις έχουν σαν αποτέλεσμα αλλαγές στην υφή των κυττάρων οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε παρατηρήσιμες βιολογικές**

**μεταλλάξεις και καταστροφές. Η περίοδος των βιολογικών αυτών φαινομένων μπορεί να διαρκέσει για χρόνια και υπεισέρχεται σε μακρομόρια και σε αντίστοιχες κυτταρικές αλλοιώσεις.**

**Τα διάφορα είδη ακτινοβολιών προκαλούν για την ίδια δόση απορρόφησης διαφόρου βαθμού βιολογικές ανωμαλίες.** Αυτό οφείλεται στο ότι διάφορα σωματρία αποθέτουν περισσότερη ή λιγότερη ενέργεια ανα μονάδα μήκους διαδρομής κάτι που σχετίζεται με την ικανότητας ιονισμού τους . **Η εναποτιθέμενη ενέργεια από ένα σωματίδιο ανα μονάδα μήκους διαδρομής εντός του μέσου ορίζεται ως LET (Linear Energy Transfer) του σωματιδίου. Οσο περισσότερο φορτίο έχει ένα σωματίδιο και όση λιγότερη ταχύτητα τόσο μεγαλύτερο LET έχει.**

Για τούς λόγους αυτούς καθορίστηκε το 1945 ένα μέτρο της σχετικής βιολογικής δραστικότητας των ακτινοβολιών το RBE.

### **16.3 Σχετική Βιολογική Δραστικότητα (Relative Biological Effectiveness) RBE**

Μονάδα :Αδιάστατο μέγεθος



Σύμβολο μονάδας :-----

Ο ορισμός του RBE προκύπτει από την ακόλουθη σχέση,

$$RBE = \frac{\text{Δόση Standard Ακτινοβολίας για να παράγει δεδομένο βιολογικό φαινόμενο}}{\text{Δόση υπό συζήτηση ακτινοβολίας για να παράγει τό ίδιο βιολογικό φαινόμενο}} \quad (16.7.α)$$

Σάν Standard ακτινοβολία παίρνεται η ακτινοβολία - X των 200KeV.

Μέσες τιμές του RBE για διάφορα είδη ακτινοβολιών δίνονται στον πίνακα II

Ακτινοβολια	γ,X	β <sup>±</sup> ,e	α	Βαριά Ιόντα	Νετρόνια Θερμικά	Νετρόνια Ταχεία>10MeV
Μέσο RBE	1	1	15	20	3	10

Πίνακας II

#### 16.4 Δόση Ακτινοβόλησης Ανθρώπου (Roentgen Equivalent Man) rem

ή Ενεργό ισοδύναμο Δόσης ή Βιολογικό Ισοδύναμο Δόσης  $D_{sv}$

Μονάδα :rem (για την Δόση απορρόφησης σε rad)

Σύμβολο μονάδας :rem

Μονάδα : Sievert (για Δόση απορροφησης σε Gy)

Σύμβολο μονάδας : Sv

Το πιο ακριβές αποτέλεσμα της επίδρασης της οποιας ακτινοβολίας στον άνθρωπο θα το εκφράζει η **απορροφούμενη δόση επί την σχετική βιολογική δραστηριότητα αυτής της ακτινοβολίας**. Με τον τρόπο αυτό ορίζεται η δόση ακτινοβολήσεως ανθρώπου το rem. Έτσι,

$$\text{rem} = \text{RBE} \times D \quad (16.8)$$

ή ισοδύναμα,

$$\text{rem} = \text{RBE} \times \text{δόση σε rad} \quad (16.9)$$

Το rem μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε ζωντανό οργανισμό, θεωρώντας κατάλληλο RBE.

Εάν αντί για την δόση απορρόφησης σε rad χρησιμοποιήσουμε την δόση απορρόφησης σε Gy τότε αντί για την δόση ακτινοβολήσεως ανθρώπου παίρνουμε το ενεργό ισοδύναμο δόσης σε Sv. Έτσι,

$$D_{Sv} = RBE \times D, \quad D \text{ σε Gy} \quad (16.10)$$

$$1Sv = 1RBE \times 1 Gy \quad (16.11)$$

Προφανώς,

$$1Sv = 100 \text{ rem} \quad (16.12)$$

Ή

$$1\text{rem} = 0.01Sv \quad (16.13)$$

Στην περίπτωση που ο ζωντανός οργανισμός εκτίθεται σε φάσμα ακτινοβολίας θα πρέπει να αθροίση κανένας την επί μέρους δόση σε rem κάθε μιάς ακτινοβολίας.

$$\text{rem}_{\text{ολικό}} = \text{rem}_1 + \text{rem}_2 + \dots + \text{rem}_N \quad (16.14)$$

Γιά παράδειγμα εάν ένας άνθρωπος δέχεται δόση 50 mrad ακτινοβολίας γ και 20 mrad ακτινοβολίας α τότε ,

$$\text{rem}_1 = 1 \times 50 \text{ mrad},$$

$$\text{rem}_2 = 10 \times 20 \text{ mrad},$$

καί,

$$\text{rem}_{\text{ολικό}} = \text{rem}_1 + \text{rem}_2 = 1 \times 50 \text{ mrad} + 10 \times 20 \text{ mrad} = 250 \text{ mrem.}$$

Στην περίπτωση που έχουμε μία ομάδα ανθρώπων, για παράδειγμα σε ένα χώρο εργασίας τότε μιλάμε για **συλλογικό ενεργό ισοδύναμο δόσης** που είναι το άθροισμα των ενεργών ισοδυνάμων κάθε ανθρώπου και εκφράζεται σε **ανθρωπο-Sv**.

Όταν υπάρχουν διασκορπισμένοι πυρήνες στο περιβάλλον με πολύ μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού τότε ορίζουμε το **προβλεπόμενο συλλογικό ενεργό ισοδύναμο δόσης**, δηλαδή το συλλογικό ενεργό ισοδύναμο δόσης που θα απορροφήσουν οι επόμενες γενεές στο πέρασμα του χρόνου.

Για **εσωτερική ακτινοβολία**, π.χ. από λήψη ραδιενεργού τροφής ή εισπνοή ραδιενεργού αερίου ορίζεται το **δεσμευμένο ενεργό ισοδύναμο δόσης**.

Στην δοσιμετρία σημαντικό ρόλο παίζει και ο **ρυθμός δόσης ακτινοβολίας** δηλαδή η δόση ακτινοβολίας στην μονάδα του χρόνου. Ο ρυθμός δόσης ακτινοβολίας μετράται σε Sv/min (rem/min),

$Sv/h$  (rem/h),  $Sv/d$  (rem/d),  $Sv/y$  (rem/y). Εάν η ακτινοβολία γίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα τότε μιλάμε για **απότομη ή οξεία έκθεση** ενώ εάν η ακτινοβολία γίνει σε μεγάλο χρονικό διάστημα τότε μιλάμε για **παρατεταμένη έκθεση**. Η έκθεση σε ακτινοβολία χωρίζεται επίσης στην **ολόσωμη** και την **μερική έκθεση**.

Η ολόσωμη έκθεση είναι εκείνη η έκθεση στην ακτινοβολία στην οποία όλα τα όργανα του σώματος εκτίθενται στην ακτινοβολία. Η ολόσωμη έκθεση δεν είναι κατ'ανάγκη ομοιόμορφη.

Η μερική έκθεση είναι εκείνη η έκθεση στην ακτινοβολία κατά την οποία ένα μέρος ή όργανο του σώματος δέχεται την ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ραδιενεργή πηγή βρίσκεται μέσα στο σώμα ή το σώμα είναι εν μέρει καλυμμένο - προστατευμένο ή όταν η πηγή είναι εξωτερική αλλά ακτινοβολεί προς μία κατεύθυνση.

Σημαντικό ρόλο στην δοσιμετρία παίζει και η

δόση του **50% - LD50/30d**. Το LD50/30d (Lethal Dose) είναι η δόση που θανατώνει το 50% των εκτεθέντων οργανισμών μέσα στο διάστημα 30 ημερών μετά την ακτινοβολία.

## 16.5 Βιολογικός χρόνος υποδιπλασιασμού $T_b$

Είναι γνωστό ότι οι μέρος από τις διάφορες ουσίες, ραδιενεργές ή μη, που εισέρχονται στον οργανισμό του ανθρώπου αποβάλλεται με τον μεταβολισμό. Έτσι για ένα ραδιοϊσότοπο που έχει εισέλθει στον οργανισμό η **ενεργή σταθερά διάσπασης  $\lambda_e$**  θα αποτελείται από το άθροισμα δύο όρων. **Ο ένας όρος θα αντιπροσωπεύει την φυσική σταθερά διάσπασης  $\lambda$  του ραδιοϊσοτόπου και ο άλλος την βιολογική σταθερά διάσπασης  $\lambda_b$** . Ισχύει δηλαδή η σχέση,

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_b \quad (16.15)$$

Αφού μιλάμε για ποσότητα ραδιοϊσοτόπου στον οργανισμό , αναφερόμαστε στην συγκέντρωση  $C_t$  αυτού. Η συγκέντρωση  $C_t$  του ραδιοϊσοτόπου στον οργανισμό μετά από χρόνο  $t$  δίνεται από την σχέση,

$$C_t = C_0 e^{-\lambda_e t} = C_0 e^{-(\lambda + \lambda_b)t} = C_0 e^{-\lambda t} e^{-\lambda_b t} \quad (16.16)$$

όπου  $C_0$  η συγκέντρωση του ραδιοϊσοτόπου σε χρόνο  $t=0$ , μόλις δηλαδή εισήλθε στον οργανισμό.

Από την σχέση (16.16) προκύπτει η σχέση,

$$\frac{\ln 2}{T_e} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} + \frac{\ln 2}{T_b} \rightarrow \frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b} \quad (16.17)$$

όπου  $T_b$  είναι ο βιολογικός χρόνος υποδιπλασιασμού, ή βιολογικός χρόνος ημίσειας ζωής δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να αποβληθεί η μισή ποσότητα του ραδιοϊσοτόπου από το ανθρώπινο σώμα.

Ο  $T_e$  είναι ο ενεργός χρόνος υποδιπλασιασμού, ή ενεργός χρόνος ημίσειας ζωής δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να αποβληθεί η μισή ποσότητα του ραδιοϊσοτόπου από το ανθρώπινο σώμα αφού ληφθεί υποψη και ο χρόνος ημίσειας ζωής λόγω της ραδιενεργής διάσπασης.

Ο βιολογικός χρόνος υποδιπλασιασμού εξαρτάται από το είδος του ραδιοϊσοτόπου, από τον οργανισμό, από τον τύπο της χημικής ουσίας που περιέχει το ραδιοϊσότοπο, αν είναι διαλυτή ή όχι κ.λ.π. Επειδή

$$\frac{1}{T_e} > \frac{1}{T_{1/2}} \quad (16.18)$$

Και

$$\frac{1}{T_e} > \frac{1}{T_b} \quad (16.19)$$

έπεται ότι πάντοτε  $T_e < T_{1/2}$  και  $T_e < T_b$ .

Παράδειγμα:

Εστω ότι για θεραπευτικούς σκοπούς χορηγήθηκε το ραδιοϊσότοπο  $^{59}\text{Fe}$  με  $T_{1/2}=46.3\text{d}$  και  $T_b=65\text{d}$ . Εφαρμογή τού τύπου (16.17) δίνει  $T_e=27\text{d}$  δηλαδή μετά από 27d θα έχει αποβληθεί η μισή ποσότητα του ραδιοϊσοτόπου από τον οργανισμό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 17

### ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ

#### 17.1 Βιολογικές επιπτώσεις ιονιζουσών ακτινοβολιών σε κυτταρικό επίπεδο.

Τό κύτταρο είναι η βασική μονάδα για την λειτουργία όλων των ζωντανών οργανισμών. Το κύτταρο αποτελείται απο δύο ουσιώδη μέρη . Τον πυρήνα και το κυτταρόπλασμα. Το κυριώτερο συστατικό του πυρήνα είναι οι νουκλεοπρωτεΐνες. Αυτές αποτελούνται από πρωτεΐνες και απο DNA

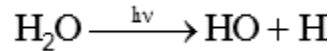


(δεσοξυριβοζονουκλεϊνικό οξύ) το μόριο του οποίου είναι αρκετά περίπλοκο και συντίθεται από άλλα μικρότερα δεσοξυριβοζονουκλεοτίδια. Το DNA κάθε κυττάρου αποτελείται από δύο γραμμικές ακολουθίες (κλώνους) από εκατοντάδες χιλιάδες δεσοξυριβοζονουκλεοτίδια. Αυτές οι γραμμικές ακολουθίες χαρακτηρίζονται ως γονίδια και είναι οι φορείς των κληρονομικών καταβολών κάθε οργανισμού.

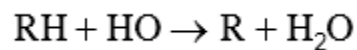
Όταν ένας ζωντανός οργανισμός εκτεθεί σε ιονίζουσα ακτινοβολία εκτεθεί σε ιονίζουσα ακτινοβολία τότε η ενέργεια αυτή απορροφάται από τα μόρια που απαρτίζουν τα κύτταρα.

**Επειδή το κύτταρο αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από  $H_2O$ , τα μόρια του  $H_2O$  έχουν την μεγαλύτερη πιθανότητα να απορροφήσουν ένα τμήμα της ενέργειας της ιονίζουσας ακτινοβολίας.**

Το μόριο του  $H_2O$  υπό την επίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας διασπάται (λόγω ιονισμού) κατά το σχήμα,



Η αντίδραση αυτή ονομάζεται **ραδιόλυση του ύδατος** . Το αποτέλεσμα της ραδιόλυσης του ύδατος είναι η δημιουργία βραχύβιων ελευθέρων ριζών που είναι πολύ δραστικές. Αυτές οι ρίζες H, HO αντιδρούν πολύ εύκολα με τα γειτονικά μόρια τα οποία μεταβάλουν επίσης σε ελεύθερες ρίζες. Εάν RH είναι μία οργανική ένωση τότε αυτή αντιδρά με μία ελεύθερη ρίζα OH κατά το σχήμα,



Στην πράξη η πιθανότητα να αντιδράση άμεσα η ιονίζουσα ακτινοβολία με κάποιο εξειδικευμένο μόριο του κυττάρου όπως το DNA, οι πρωτεΐνες ,τα ένζυμα, είναι ελάχιστη. Αυτό που συμβαίνει είναι να αντιδράσουν με το DNA τα προϊόντα της ραδιόλυσης , δηλαδή οι ελεύθερες ρίζες.

Γενικά οι αλλοιώσεις στο DNA συνδέονται με την πρόκληση μεταλλάξεων, την εμφάνιση δηλαδή κληρονομικών αλλοιώσεων στους απογόνους. Στην περίπτωση της καταστροφής των πρωτεϊνικών μορίων και εφόσον το DNA του κυττάρου δεν έχει υποστεί βλάβη, τα καταστραφόμενα πρωτεϊνικά μόρια μπορούν να αντικατασταθούν από τους βιοσυνθετικούς μηχανισμούς του κυττάρου. Αντίθετα δεν υπάρχουν μηχανισμοί για την πλήρη αποκατάσταση όλων των αλλοιώσεων που προκαλούν οι ιονίζουσες ακτινοβολίες στο DNA.

Μία πρώτη εκδήλωση του αποτελέσματος της έκθεσης σε ακτινοβολία είναι η καθυστέρηση του πολλαπλασιασμού των κυττάρων. Έτσι για δόση ακτινοβολίας 0.5mSv (50 mrem) η καθυστέρηση είναι της τάξης 1-2h, ενώ για δόση ακτινοβολίας 1-3mSv (100-300 mrem) η καθυστέρηση είναι της τάξης 3-4h, για 20mSv (2000mrem) η καθυστέρηση είναι 6h. Αυτή η καθυστέρηση πολλαπλασιασμού των κυττάρων

αποδίδεται σε αλλοιώσεις του DNA. Σε σχετικά υψηλότερες δόσεις παρουσιάζονται και άλλα φαινόμενα, όπως είναι η πρόκληση αλλοιώσεων σε κυτταρικές μεμβράνες, πράγμα που οδηγεί σε αναστολή του μηχανισμού διακίνησης ουσιών μέσα και έξω από το κύτταρο. Αυτή η αναστολή μπορεί να είναι αντιστρεπτή ή μη. **Εάν τα κύτταρα που εκτέθηκαν στην ακτινοβολία είναι σωματικά, τότε οι αλλοιώσεις αφορούν την υγεία του ατόμου που εκτέθηκε, ενώ αν είναι γεννητικά είναι δυνατόν να προκληθούν προβλήματα στην υγεία των απογόνων**

## 17.2 Ραδιοευαισθησία

Το πόσο επιδεκτική είναι μία ομάδα κυττάρων να υποστεί δεδομένο βιολογικό φαινόμενο καθορίζεται από την **ραδιοευαισθησία** της. Η δόση της ακτινοβολίας που είναι αναγκαία να παράγει δεδομένο βιολογικό φαινόμενο σε δεδομένες ομάδες διαφόρων κυττάρων ή ακόμη και σε οργανισμούς, για την περίπτωση της ολόσωμης ακτινοβολήσης είναι αντιστρόφως ανάλογη της ραδιοευαισθησίας.

Η ραδιοευαισθησία για τη περίπτωση κυτταρικού θανάτου εξαρτάται από την φύση των κυττάρων( π.χ. τα πρωτόζωα είναι ραδιοανθεκτικότερα των θηλαστικών), το μέγεθος του πυρήνα (για τα φυτικά κύτταρα), τον αριθμό των χρωμοσωμάτων, της θερμοκρασίας, της υγρασίας και κυρίως της συγκέντρωσης του οξυγόνου. **Οι βιολογικές επιπτώσεις είναι μεγαλύτερες με την παρουσία οξυγόνου. Το φαινόμενο αυτό καλείται **φαινόμενο οξυγόνου** και ο λόγος της μέγιστης ραδιοευαισθησίας παρουσία οξυγόνου προς την ραδιοευαισθησία απουσία αυτού καλείται **λόγος της δράσης του οξυγόνου.****

Κατά σειρά ραδιοευαισθησίας πιο ραδιοευαίσθητα είναι τα κύτταρα που πολλαπλασιάζονται γρήγορα όπως είναι τα καρκινικά κύτταρα. Έτσι έχουμε κατά σειρά μεγαλύτερης ραδιοευαισθησίας:

- α) Καρκινικά κύτταρα
- β)Κύτταρα επιθηλίων
- γ) Κύτταρα μυελού οστών
- δ) Κύτταρα του φακού του ματιού

ε) Κύτταρα της επιδερμίδος

Ραδιοανθεκτικά όργανα είναι οι χόνδρινοι ιστοί, τα οστά, οι μύες, το κεντρικό νευρικό σύστημα ,οι νευρώνες του εγκεφάλου.

Σημαντικό ρόλο στην ραδιοευαισθησία παίζει η ηλικία του ανθρώπου.

Όσο μεγαλύτερης ηλικίας είναι ο οργανισμός τόσο ραδιοανθεκτικότερος γίνεται. Το φαινόμενο αυτό καλείται **φαινόμενο**

**ηλικίας**. Στον πίνακα III φαίνεται η ραδιοευαισθησία διαφόρων οργανισμών για ολόσωμη έκθεση σε ακτινοβολία **DL50/30d**.

*Ραδιοευαισθησία διαφόρων ζώων. Από τη μονογραφία  
του Α. Pasinetti: «Radiological Problems».*

Είδος ζώου	Δόση (rem)	Ραδιοανθεκτικότητα
Ίνδικά χοιρίδια	200–250	Ραδιοευαίσθητα
Χοῖρος	275	
Σκύλος	300–400	
Άνθρωπος	400	Σχετικῶς
Πίθηκος	500	Ραδιοευαίσθητα
Ποντικός	400–600	Σχετικῶς Ραδιοανθεκτικά
Άγριοποντικός	600–900	
Κουνέλι	750–825	
Πτηνά	1.000	
Χελώνα	1.500	
Τρίτωνας	3.000	
Σαλιγγάρι	8.000–20.000	
Μαλάκια-Όστρακόδερμα	2.000–12.000	Ραδιοανθεκτικά
Άρθρόποδα	10.000–50.000	καί
Κοιλεντερωτά	300.000–400.000	Ίσχυρῶς
Μύκητες	30.000	Ραδιοανθεκτικά
Άμοιβάδες	100.000	
<i>Paramecium</i> (Βλεφαριδοφόρο)	300.000–350.000	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ

## 17.3 Βιολογικές επιπτώσεις ιονιζουσών ακτινοβολιών

**στον ανθρώπινο οργανισμό.**

Στην περίπτωση που η έκθεση είναι **οξεία, δηλαδή μικρός χρόνος και υψηλή δόση** τότε τα συμπτώματα ακολουθούν γενικά τρεις φάσεις. Την πρόδρομη φάση, την λανθάνουσα περίοδο και την κύρια φάση.

### **Προδρομη φάση**

Αυτή παρουσιάζεται μέσα σε λίγα λεπτά ή ώρες μετά την ακτινοβόληση. Χαρακτηρίζεται από γαστρεντερικές διαταραχές, ανορεξία, ναυτία, εμετο, διάρροια. Είναι δυνατόν τα συμπτώματα αυτά να εμφανιστούν και απο δόσεις των 50 rems.

### **Λανθάνουσα περίοδος**

Είναι η περίοδος εκείνη που απαιτείται για την ανάπτυξη της ουσιαστικής ανωμαλίας στον οργανισμό. Δεν εμφανίζονται συμπτώματα



## Κύρια φάση

Είναι η περίοδος εκδήλωσης των καταστροφών στον οργανισμό.

Στον πίνακα IV παρουσιάζονται τά κύρια συμπτώματα και ενδείξεις κατά μέσο όρο, για οξεία ,ολόσωμη ακτινοβόληση, για τρείς κατηγορίες δόσεων.

Κύρια χαρακτηριστικά των συνδρόμων της οξείας ολόσωμης ακτινοβολήσης.  
για τρεις κατηγορίες έκθεσης δόσεων.

Από τη μονογραφία του Α. Upton: «Effects of Radiation on Man»:

Χρόνος μετά την ακτινοβολήση	Κεφαλαλγική και καρδιοαγγειωτική, από δόσεις $>20 \cdot 10^3 \text{ rems}$	Γαστρεντερική από δόσεις $2 \cdot 10^3 \text{ rems}$	Αιμοποιητική από δόσεις $400 \text{ rems}$
Πρώτη μέρα	Ναυτία Έμετός Διάρροια Πονοκέφαλος Έρύθημα Έλλειψη ισορροπίας Άνησυχία Άταξία στον σφυγμό Άδυναμία Υπνηλία Κώμα Σπασμοί Σόκ Θάνατος	Ναυτία Έμετός Διάρροια	Ναυτία Έμετός Διάρροια
Δεύτερη εβδομάδα		Ναυτία Έμετός Διάρροια Πυρετός Έρύθημα Άδυνάτισμα (ισχνότητα) Κατάκλιση Θάνατος	
Τρίτη και τετάρτη εβδομάδα			Άδυνάτισμα Κούραση Ναυτία Έμετός Διάρροια Πυρετός Αίμορραγία Θάνατος ή Ανάληψη (ίσως)

#### ΠΙΝΑΚΑΣ IV

Οι επιπτώσεις της απορρόφησης ιονίζουσας ακτινοβολίας στον άνθρωπο διακρίνονται σε αιτιοκρατικές και σε πιθανοκρατικές (στοχαστικές). Οι **αιτιοκρατικές** συνέπειες εμφανίζονται με βεβαιότητα από ένα κατώφλι δόσης και πάνω, και το μέγεθος τους συνδέεται άμεσα με το μέγεθος της απορροφούμενης δόσης. Στις **πιθανοκρατικές** συνέπειες η δόση της απορροφούμενης ακτινοβολίας συνδέεται με την πιθανότητα εκδήλωσης της συνέπειας. Η πιθανότητα εκδήλωσης κάποιας πιθανοκρατικής συνέπειας είναι ανάλογη της δόσης ακτινοβολήσης

#### **Αιτιοκρατικές Επιπτώσεις στον άνθρωπο**

Αυτές παρατηρούνται σε σχετικά υψηλές δόσεις ακτινοβολήσης. Το πως θα εκδηλωθούν εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η ηλικία, το βάρος αλλά και

το είδος της περίθαλψης που θα παρασχεθεί τις πρώτες ώρες ή ημέρες

από την έκθεση. Οξεία δόση ακτινοβόλησης  $<1\text{Sv}$  (100 rem) δεν οδηγεί σε εμφανείς αλλοιώσεις στα διάφορα όργανα του ανθρώπου. Οξεία δόση ακτινοβόλησης 10–30 Sv (1000–3000 mrem) οδηγεί στον θάνατο σε μία με δύο εβδομάδες απο την έκθεση. Η  $LD_{50/30d} = 3-4\text{ Sv}$  (300–400 rem) . Αυτοί που θα επιβιώσουν απο την  $LD_{50d/30}$  θα έχουν αυξημένη πιθανότητα να παρουσιάσουν καρκίνο. Οι αιτιοκρατικές επιπτώσεις εκδηλώνονται σε μικρό σχετικό διάστημα μετά την έκθεση. Οι πιο συχνά απαντώμενες αιτιοκρατικές συνέπειες στον άνθρωπο είναι οι ακόλουθες:

α) Υπεροξύ ακτινικό σύνδρομο ( $D_{sv} > 100\text{ Sv}$  (10000 rem))

Τα συμπτώματα είναι η απώλεια του ελέγχου των κινήσεων, λήθαργος, περίοδος υπερκινητικότητας η οποία τερματίζεται με θάνατο. Το Υπεροξύ ακτινικό σύνδρομο οφείλεται σε

αλλοιώσεις της διαπερατότητας της μεμβράνης των εγκεφαλικών κυττάρων και ελάττωση της συγκέντρωσης του Na στα κύτταρα.

β) Γαστρεντερικό σύνδρομο  $D_{sv} > 10 \text{ Sv}$  (1000 rem)

Αποδίδεται στην καταστροφή των επιθηλιακών κυττάρων που καλύπτουν την γαστρεντερικότητα. Χαρακτηρίζεται από ανοιχτά έλκη στην στοματική κοιλότητα και απο αιμορραγίες του πεπτικού συστήματος, οι οποίες αν δεν είναι εκτεταμένες αντιμετωπίζονται με μεταγγίσεις. Τα συμπτώματα είναι ακατάσχετος εμετός και διάρροια. Όσο πιο μεγάλη είναι η δόση τόσο πιο σύντομα εμφανίζεται ο εμετός.

γ) Σύνδρομο του αιμοποιητικού συστήματος  $D_{sv} > 2 \text{ Sv}$  (200 rem)

Η ακτινοβολία προσβάλλει τα κύτταρα του μυελού των οστών με αποτέλεσμα να μειώνεται ο αριθμός των λευκών και ερυθρών αιμοσφαιρίων στο αίμα. Η πτώση του αριθμού των

λευκών και ερυθρών αιμοσφαιρίων είναι ανάλογη του μεγέθους της έκθεσης.

#### δ) Ακτινική πνευμονίτις $D_{sv} > 25-30 \text{ Sv}$ (2500-3000 rem)

Εμφανίζεται υπο μορφή πνευμονικού οιδήματος. Εκδηλώνεται μετα από 5-6 εβδομάδες απο την έκθεση.

### **Πιθανοκρατικές επιπτώσεις στον άνθρωπο**

Το κύριο χαρακτηριστικό των πιθανοκρατικών επιπτώσεων στον άνθρωπο, απο την έκθεση του σε ιονίζουσα ακτινοβολία είναι ότι δεν υπαρχει κατώφλι δόσης για την εμφανισή τους.

Για παράδειγμα για μέση δόση ακτινοβολήσης ίση με 1mSv (100 mrem) σε πληθυσμό 10<sup>6</sup> ατόμων αναμένονται στατιστικά 12.5 θανατηφόροι καρκίνοι και 4 με βασικές κληρονομικές ανωμαλίες. Επίσης κύριο χαρακτηριστικό των πιθανοκρατικών

επιπτώσεων είναι ότι εκδηλώνονται πολλά χρόνια μετά την έκθεση. Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της επίδρασης

ιονίζουσας ακτινοβολίας στον άνθρωπο έγκειται στο ότι ένα

μόνο σωματίο αν διανύσει ένα κύτταρο και συναντήσει το DNA, έχει αρκετή ενέργεια να δημιουργήσει αλλοιώσεις στο DNA.

Τα αποτελέσματα των πιθανοκρατικών επιπτώσεων κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Στις καρκινοπάθειες απο ραδιενέργεια και στις κληρονομικές ανωμαλίες.

#### α) Καρκινοπάθειες απο ραδιενέργεια

Οι πιο συνηθισμένες μορφές καρκινοπαθειών είναι η λευχαιμία, ο καρκίνος του στήθους του μυελού των οστών, του πνεύμονα, των οστών του θυρεοειδούς, ήπατος, λεπτού εντέρου και του δέρματος.

Η εκδήλωση των κρουσμάτων λευχαιμίας αρχίζει σχεδόν αμέσως μετά την έκθεση του πληθυσμού και φτάνει το μέγιστο επτά χρόνια μετά την έκθεση. Το 50% των κρουσμάτων της λευχαιμίας αναμένεται εντός διαστήματος 12.5 ετών μετα την έκθεση. Οι εντοπισμένοι καρκίνοι αρχίζουν να εμφανίζονται

επτά χρόνια μετά την έκθεση και φτάνουν το μέγιστο χρόνο για να εκδηλωθούν τα σαράντα χρόνια. Το 50% των εντοπισμένων καρκίνων αναμένεται να εκδηλωθεί 25 χρόνια μετά την έκθεση.

### β) Κληρονομικές ανωμαλίες

Οι κληρονομικές ανωμαλίες συνδέονται με την πρόκληση αλλοιώσεων στο DNA αλλά και στα χρωματοσώματα, δηλαδή στα οργανίδια εκείνα του κυττάρου στα οποία είναι κυρίως συγκεντρωμένο το DNA. Οι κληρονομικές αλλοιώσεις διακρίνονται στις μεταλλάξεις και στις χρωματικές αλλοιώσεις.

### Ι) Χρωματοσωματικές αλλοιώσεις

Οι χρωματοσωματικές αλλοιώσεις προκύπτουν από μη επιδιορθούμενες βλάβες των χρωματοσωμάτων που είναι ορατές με το μικροσκόπιο. Τα κύτταρα με χρωματοσωματικές αλλοιώσεις δεν είναι συνήθως βιώσιμα, επομένως δεν



συμμετέχουν στην δημιουργία απογόνων. Στην περίπτωση όμως που έχουμε απογόνους που προέρχονται από γεννητικά κύτταρα με χρωματοσωματικές αλλοιώσεις εκδηλώνουν συνήθως κληρονομικές ανωμαλίες π.χ σύνδρομο DOWN (μογγολισμός). Η σχέση ανάμεσα στην συχνότητα πρόκλησης χρωματοσωματικών αλλοιώσεων και στην δόση ακτινοβολίας είναι εκθετική.

## II Μεταλλάξεις

Τα κύτταρα που φέρουν μεταλλάξεις είναι βιώσιμα ενώ οι μεταλλάξεις δεν είναι ορατές με το μικροσκόπιο. Η σχέση ανάμεσα στην συχνότητα πρόκλησης μεταλλάξεων και στην δόση ακτινοβολίας είναι γραμμική. Ο μηχανισμός των μεταλλάξεων είναι υπολειπόμενου τύπου. Δηλαδή για να εκδηλωθεί μία μετάλλαξη σε ένα άτομο θα πρέπει το άτομο αυτό να έχει προέλθει από ένα σπερματοζώαριο και ένα ωάριο που να έχουν την ίδια ακριβώς μετάλλαξη. Εάν την μετάλλαξη

τη έχει ένα μόνο από τα δύο γεννητικά κύτταρα η μετάλλαξη δε εκδηλώνεται στον απόγονο. Ο απόγονος όμως έχει μεγάλη πιθανότητα να είναι φορέας της μετάλλαξης και η μετάλλαξη να φθάσει στους απογόνους του. Έτσι τα άτομα που είναι απόγονοι ενός αρχικού ατόμου που εκτέθηκε σε ακτινοβολία και του οποίου τα γεννητικά κύτταρα φέρουν μεταλλάξεις έχουν αυξημένες πιθανότητες να έχουν τις ίδιες μεταλλάξεις ανεξάρτητα πόσες γενιές έχουν περάσει. Έτσι είναι δυνατόν μετά από πολλές γενεές να μεταβιβαστεί στον απόγονο η ίδια μετάλλαξη από τους γονείς του που έχουν κάποιο κοινό μακρινό πρόγονο με την ίδια μετάλλαξη. Παράδειγμα μετάλλαξης υπολειπόμενου τύπου είναι η μεσογειακή αναιμία. Άλλα είδη μεταλλάξεων είναι το σύνδρομο DOWN, η αλκαπτονουρία (μαύρα ούρα), ο διαβήτης, το γλαύκωμα, η μυωπία, η πλατυποδία.

## 17.4 Ραδιορύπανση του ανθρώπου με ραδιοισότοπα $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{131}\text{I}$

Το μέγεθος της επίδρασης της ραδιενεργού ακτινοβολίας στον άνθρωπο καθορίζεται εκτός από τα χαρακτηριστικά του ραδιενεργού (δηλαδή είδος σωματιδίου  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , E, T) και από το κατά πόσο ένα ραδιενεργό άτομο εισχωρεί στην τροφική αλυσίδα, όπως επίσης αν απορροφάται από το πεπτικό σύστημα του ανθρώπου και σε ποιά μέρη του σώματος συσσωρεύεται περισσότερο. Τα ραδιοισότοπα που αλληλεπιδρούν περισσότερο με τον ανθρώπινο οργανισμό είναι τα  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ .

### Επίδραση του $^{90}\text{Sr}$ στον ανθρώπινο οργανισμό

Το  $^{90}\text{Sr}$  βρίσκεται στην ίδια ομάδα II του περιοδικού πίνακα με το Ca, έχει δηλαδή παραπλήσια χημική συμπεριφορά. Έτσι όταν φθάσει στον άνθρωπο ενσωματώνεται σε περιοχές του οργανισμού πλούσιες σε Ca όπως είναι τὰ οστά και τα δόντια.

Το  $^{90}\text{Sr}$  εκπέμπει κυρίως ακτινοβολία  $\beta$  και  $\gamma$  έχει  $T=29\text{y}$  και  $T_b=6.3\text{y}$ . Όταν τώρα άτομα  $^{90}\text{Sr}$  αντικαταστήσουν άτομα  $\text{Ca}$  στα οστά τότε τα άτομα  $^{90}\text{Sr}$  θα ακτινοβολούν ακτινοβολία  $\beta$  για πολλά χρόνια. Ιδιαίτερα θα επηρεασθεί ο μυελός των οστών και η καταστροφή αυτή θα δημιουργήσει σύνδρομο του αιμοποιητικού συστήματος.

Ο οργανισμός του ανθρώπου διαθέτει ένα φυσικό μηχανισμό αυτοπροστασίας από το  $^{90}\text{Sr}$ . Αυτός ο προστατευτικός μηχανισμός ονομάζεται **διαχωριστικός παράγοντας** και συνίσταται στην φυσική προτίμηση που δείχνει ο οργανισμός στην πρόσληψη  $\text{Ca}$  παρά  $^{90}\text{Sr}$ . **Ο διαχωριστικός παράγοντας λειτουργεί έτσι ώστε ο λόγος στα οστά να είναι 2-4 φορές μικρότερος από τον αντίστοιχο λόγο στην τροφή. Στον άνθρωπο φτάνει κυρίως μέσω του γάλατος και του κρέατος.**

**Επίδραση του  $^{137}\text{Cs}$  στον ανθρώπινο οργανισμό**

Το  $^{137}\text{Cs}$  εισερχόμενο στον ανθρώπινο οργανισμό κατανέμεται σε ολόκληρο το σώμα, κυρίως όμως στους μαλακούς ιστούς. Το  $^{137}\text{Cs}$  εκπέμπει σωμάτια  $\beta$  και  $\gamma$ , ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι  $T=30\text{y}$  ενώ ο  $T_b$  ποικίλει ανάλογα με την ηλικία και το φύλο. Συγκεκριμένα ο  $T_b$  του  $^{137}\text{Cs}$  φαίνεται στον πίνακα V

ΦΥΛΟ	ΗΛΙΚΙΑ	$T_b$
ΑΝΔΡΕΣ	23-55y	$105_{\pm 25}\text{d}$
ΓΥΝΑΙΚΕΣ	20-51y	$84_{\pm 20}\text{d}$
ΕΓΚΥΟΥΣ ΓΥΝΑΙΚΕΣ	16-39y	$49_{\pm 16}\text{d}$
ΠΑΙΔΙΑ	5-17y	$57_{\pm 20}\text{d}$
ΒΡΕΦΗ	17-143d	$19_{\pm 8}\text{d}$
ΠΑΙΔΙΑ	5-17	$57_{\pm 20}\text{d}$

Πίνακας V

Ο μικρός χρόνος  $T_b$  οφείλεται στο ότι ένα μέρος από το  $^{137}\text{Cs}$  αποβάλλεται από τα ούρα και τον ιδρώτα. Στον άνθρωπο φτάνει μέ τα ψάρια και τα λαχανικά.

### Επίδραση του $^{131}\text{I}$ στον ανθρώπινο οργανισμό

Το  $^{131}\text{I}$  έχει  $T_{1/2}=8.37\text{d}$  και  $T_b=180\text{d}$ , εκπέμπει σωμάτια  $\beta$  και  $\gamma$ . Η ρύπανση του ανθρώπινου οργανισμού με  $^{131}\text{I}$  γίνεται κυρίως με το γάλα και τα φρέσκα λαχανικά. Το μεγαλύτερο ποσοστό του  $^{131}\text{I}$  που εισέρχεται στον οργανισμό συγκεντρώνεται στον θυρεοειδή αδένα. Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 20% για τους ενήλικες μέχρι 50% για τα παιδιά. Τα παιδιά από εξη μηνών μέχρι 2 ετών διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 18

### ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

Κανονικά ο άνθρωπος δεν θα έπρεπε να λαμβάνει καμιά δόση πέρα από αυτές που λαμβάνει από τη φύση, από την κοσμική ακτινοβολία. Στην πράξη όμως θα πρέπει να καθοριστούν οι βασικές προϋποθέσεις για τον καθορισμό των επιτρεπτών δόσεων ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος από φυσικές και τεχνητές πηγές ακτινοβολίας. Από την μέχρι στιγμής συσσωρευμένη εμπειρία από τις βιολογικές επιπτώσεις των ακτινοβολιών και τα στατιστικά αποτελέσματα, η International Commission on Radiological Protection (ICRP) θέσπισε τις βασικές προϋποθέσεις για τον προσδιορισμό των ορίων της ισοδύναμης δόσης, για τους εργαζόμενους με τις ακτινοβολίες, για τις κύριες επιπτώσεις π.χ λευχαιμία, οι οποίες είναι:

α) Δεν υπάρχει πραγματικό κατώφλι ισοδύναμης δόσης για τις βιολογικές καταστροφές, δηλαδή δεν υπάρχει δόση κάτω από την οποία ο κίνδυνος είναι μηδενικός.

β) Υπάρχει μονοσήμαντη σχέση ανάμεσα στην ισοδύναμη δόση και της δεδομένης καταστροφής, ανεξαρτητα από τον ρυθμό δόσης, της στάθμης δόσης και το είδος της ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι η ισοδύναμη δόση που οφείλεται στα διάφορα είδη ακτινοβολίας είναι προσθετική και ότι δεν είναι δυνατόν να υπάρξει ίαση από την καταστροφή που προκαλεί η έκθεση στην ακτινοβολία.

Κατά την εξαγωγή των ορίων των επιτρεπτών δόσεων έχουν ληφθεί οι κίνδυνοι των κυριωτέρων βιολογικών επιπτώσεων όπως η αναιμία, η λευχαιμία, ο καρκίνος του δέρματος, και των οστών ο καταρράχτης κλπ.



## ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΤΗ ΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

Εξ' αιτίας του αθροιστικού χαρακτήρα των βιολογικών επιπτώσεων των ακτινοβολιών, καθορίστηκε ότι η μέγιστη επιτρεπτή δόση  $D_{\max}$  σε rem , δηλαδή η μέγιστη δόση που μπορεί να λάβει ένας άνθρωπος ηλικίας  $N$  άνω των 18 ετών μέχρι την ηλικία  $N$  , για ολόσωμη ακτινοβολήση, δίνεται απο την σχέση,

$$D_{\max}=5 (N-18) \quad (18.1)$$

Η σχέση (18.1) έχει παραχθεί παίρνοντας σαν βάση τις βιολογικές επιπτώσεις στα αιμοποιητικά όργανα, στα γονίδια, και το υαλώδες των οφθαλμών. Η σχέση (18.1) απορρέει απο το γεγονός ότι 40 χρόνια εργασίας μαζί με το αθροιστικό των επιπτώσεων θα πρέπει να δώσουν περίπου 200 rem (2Sv) δόση ακτινοβολήσης ανθρώπου. Επομένως

$$\frac{200rem}{40y} = 5 \frac{rem}{y}$$

**Η επιτρεπόμενη ημερήσια δόση είναι**

$$5 \frac{rem}{y} = \frac{5 \times 0.01 Sv}{8760 h} = 5.7 \frac{\mu Sv}{h}$$

Στην δόση αυτή των 200 rem αρχίζουν οι πρώτες επιπτώσεις των βιολογικών συνεπειών των ακτινοβολιών.

Απο την σχέση (18.1) προκύπτει ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη δόση κατ' έτος είναι 5 rem (50 mSv) και κατα εβδομάδα περίπου 100 mrem (1m Sv). Σύμφωνα με την ICRP:

I) Χορήγηση με μιά μόνο φορά δόσης 3 rem θα πρέπει να θεωρηθεί επιτρεπτή μόνο για εξαιρετική και αναγκαία περίπτωση.

II) Όταν η ολοκληρωμένη (αθροιστική ) δόση είναι γνωστή με βέβαιο τρόπο και είναι κάτω απο το όριο των που καθορίζει ο τύπος (18.1) μια συσσώρευση δόσεων με ρυθμό 3 rem κατά 13

εβδομάδες μπορεί να είναι επιτρεπτή επι χρόνο μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη ολοκληρωμένη δόση σύμφωνα με τον τύπο (18.1).

III) Όταν η ολοκληρωμένη (αθροιστική) δόση δεν είναι γνωστή με βέβαιο τρόπο τότε θα πρέπει να θεωρείται ότι ο εργαζόμενος έχει την μέγιστη ολοκληρωμένη δόση. Ο λογαριασμός θα πρέπει να γίνεται με βάση την περίοδο των δωδεκα μηνών.

IV) Όταν η ολοκληρωμένη (αθροιστική) δόση ενός εργαζόμενου είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη δόση που απορέει από τον τύπο (18.1) τότε η δόση που θα λάβη στο μέλλον θα πρέπει να είναι μικρότερη από των 5 rem (50 Sv) κατ'έτος, μέχρι η ολική δόση να είναι σε μικρότερη στάθμη της δόσης που υπολογίζεται από την σχέση (18.1).

V) Στην περίπτωση που επιβάλλεται μία ή περισσότερες οξείες ακτινοβολήσεις τότε μία δόση ολική των 12 rem (120 mSv) θα μπορούσε να δοθεί. Η δόση που λήφθηκε θα πρέπει να προστεθεί

στην αθροιστική δόση. Εάν η αθροιστική δόση είναι μεγαλύτερη της τιμής που υπολογίζεται από την σχέση (18.1) τότε το επιπλέον ποσό θα πρέπει να αναιρεθεί από μείωση των επομένων δόσεων με τέτοιο τρόπο που στο τέλος μιας περιόδου πέντε ετών η ολοκληρωμένη δόση να μη ξεπερνάει τα όρια που καθορίζονται από τον τύπο (18.1).

VI) Εάν ένα πρόσωπο λόγω ατυχήματος λάβει δόση 3-5 rem , αυτή θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην συσσωρευμένη δόση μέχρι την στιγμή του ατυχήματος. Εάν το άθροισμα των δόσεων ξεπερνάει την τιμή της μέγιστης επιτρεπτής δόσης που υπολογίζεται από την σχέση (18.1), δεν θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται το επιπλέον για τις επόμενες προβλέψεις παρά μόνο όταν το ατύχημα έγινε για μία μόνο φορά στη ζωή του προσώπου.

VII) Στην εξαιρετική περίπτωση που ένα πρόσωπο αρχίζει να εκτίθεται επαγγελματικά σε ακτινοβολία από ηλικία

μικρότερη των 18 ετών, τότε για το άτομο αυτό η ετήσια δόση δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5 rem τον χρόνο μέχρι την συμπλήρωση των 18 χρόνων και δεν πρέπει να ξεπεράσει τα 60 rem μέχρι την συμπλήρωση των 30 χρόνων.

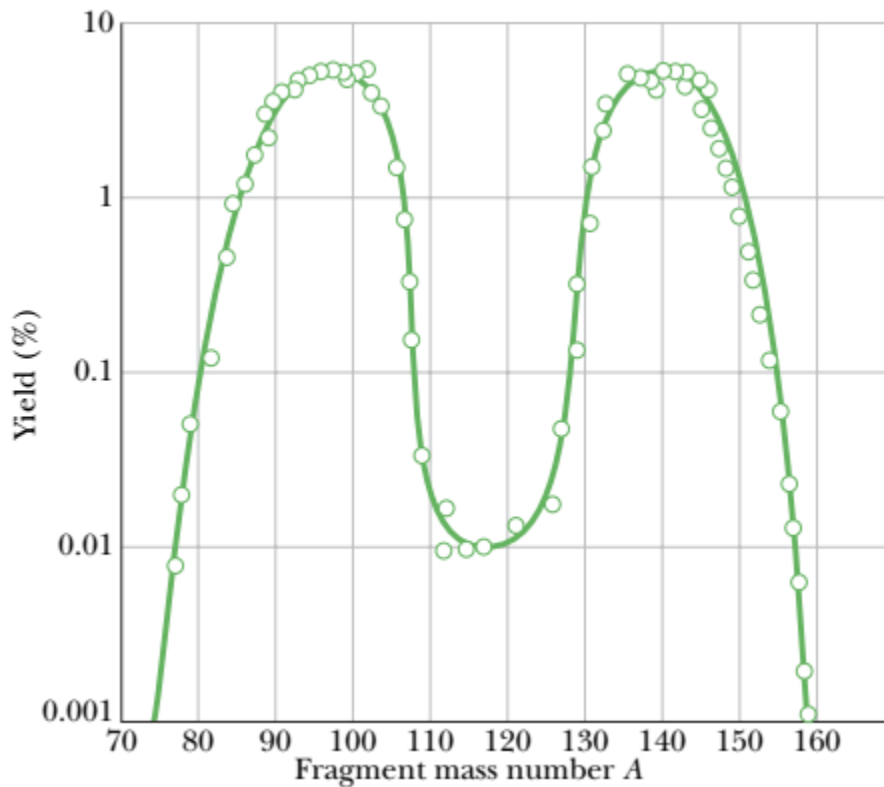
VIII) Για τις ακτινοβολήσεις του δέρματος, των οστών, και του θυρεοειδούς αδένος η μέγιστη επιτρεπόμενη δόση καθορίζεται στα 8 rem για 13 εβδομάδες και 30 rem για το έτος. Για τα εσωτερικά όργανα, εκτός των γονιδίων, των αιμοποιητικών οργάνων, του υαλώδους του οφθαλμού, η μέγιστη επιτρεπτή δόση καθορίζεται σε 4 rem για τις 13 εβδομάδες και 15 rem για το έτος. Για τους φακούς των ματιών η μέγιστη επιτρεπτή δόση καθορίζεται σε 15 rem το έτος. Για τις εξωτερικές ακτινοβολήσεις των χεριών και των ποδιών η μέγιστη επιτρεπτή δόση καθορίζεται στα 20 rem για τις 13 εβδομάδες και 75 rem για το έτος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 19

### ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

#### 19.1 Σχάση

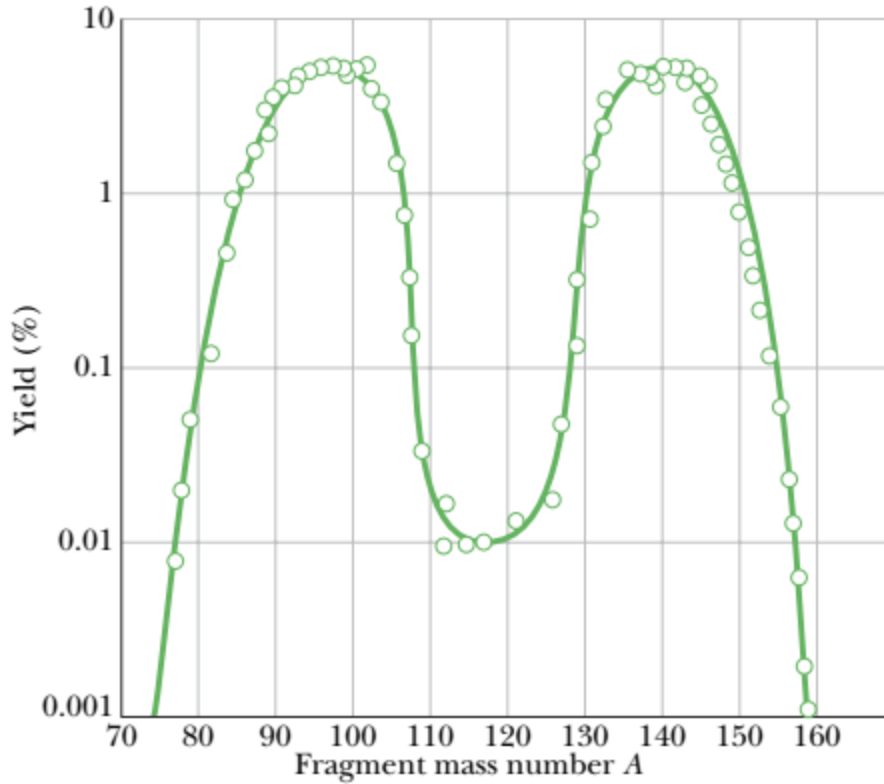
Σχάση ονομάζεται το φαινόμενο όπου ο πυρήνας μετά από βομβαρδισμό και ενσωμάτωση βλήματος σε αυτόν διασπάται σε δύο τεμάχια με την ίδια περίπου μάζα με ταυτόχρονη εκπομπή  $n$  και  $\gamma$ .



Οι σχάσιμοι πυρήνες είναι οι βαρείς πυρήνες, βρίσκονται στο τέλος του περιοδικού πίνακα όπως είναι οι πυρήνες

${}_{92}\text{U}^{235}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{233}$ ,  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ . Το  ${}_{92}\text{U}^{235}$  βρίσκεται ελεύθερο στη φύση ενώ τα άλλα είναι τεχνητά. Σαν βλήματα χρησιμοποιούνται τα **βραδέα n** δηλαδή n με μικρή κινητική ενέργεια (θερμικά νετρόνια διότι η ενέργεια τους συμπίπτει με την ενέργεια των μορίων των αερίων  $\sim 0.03\text{eV}$  ή  $0,04\text{eV}$ ). Για την σχάση άλλων βαρεών πυρήνων χρησιμοποιούνται ταχέα n.





Τα εκπεμπόμενα n ονομάζονται **στιγμαία** και εκπέμπονται εντός χρονικής διάρκειας  $10^{-14}$ s. Το 99% των νετρονίων της σχάσης είναι στιγμαία n με ενέργειες από 1MeV έως 2MeV.



Ο πυρήνας  $^{236}\text{U}$  είναι ασταθής και διασπάται σε δύο τμήματα και σε μερικά νετρόνια που ονομάζονται **δευτερογενή νετρόνια** ή **καθυστερημένα νετρόνια**.

$$^{140}\text{Xe} \rightarrow ^{140}\text{Cs} \rightarrow ^{140}\text{Ba} \rightarrow ^{140}\text{La} \rightarrow ^{140}\text{Ce}$$

$T_{1/2}$	14 s	64 s	13 d	40 h	Stable
$Z$	54	55	56	57	58

Τα προϊόντα της σχάσεως και ο αριθμός των δευτερογενών  $n$  δεν είναι πάντα ο ίδιος

$$^{94}\text{Sr} \rightarrow ^{94}\text{Y} \rightarrow ^{94}\text{Zr}$$

$T_{1/2}$	75 s	19 min	Stable
$Z$	38	39	40

Από όλους τους δυνατούς τρόπους σχάσεως του  $^{235}\text{U}$  κατά μέσο όρο εκπέμπονται  $3n$ . Όλα τα προϊόντα της σχάσεως του  $^{235}\text{U}$  είναι ραδιενεργά. Αυτά παθαίνουν διαδοχικές μεταστοιχειώσεις εκπέμποντας ακτίνες  $\beta$  και  $\gamma$  και μεταπίπτουν σε σταθερούς πυρήνες.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την σχάση ενός πυρήνα  $^{235}\text{U}$  δίνεται από την σχέση (14.18) και ισούται με  $200\text{MeV}$

### Ατομική ενέργεια = Έλλειμμα μάζας $\times c^2$

Η ατομική ενέργεια εμφανίζεται σαν

- A) Κινητική ενέργεια πυρήνων και  $n$
- B) Κινητική ενέργεια των ακτίνων  $\gamma$
- Δ) Κινητική ενέργεια των ακτίνων  $\beta$
- E) Κινητική ενέργεια των  $\nu$

Το 90% είναι η ενέργεια των πυρήνων και των  $n$  και το 5% η ενέργεια της ακτινοβολίας  $\gamma$ . Το ποσοστό αυτό 95% μετατρέπεται σε θερμότητα .

1mole  $^{235}\text{U}$  περιέχει  $N_A$  πυρήνες, δηλαδή 235g  $^{235}\text{U}$  περιέχουν  $N_A$  πυρήνες. Το 1 g  $^{235}\text{U}$  θα περιέχει  $\frac{N_A}{235} = \frac{6.032 \times 10^{23}}{235} = 2.6 \times 10^{21}$  πυρήνες.

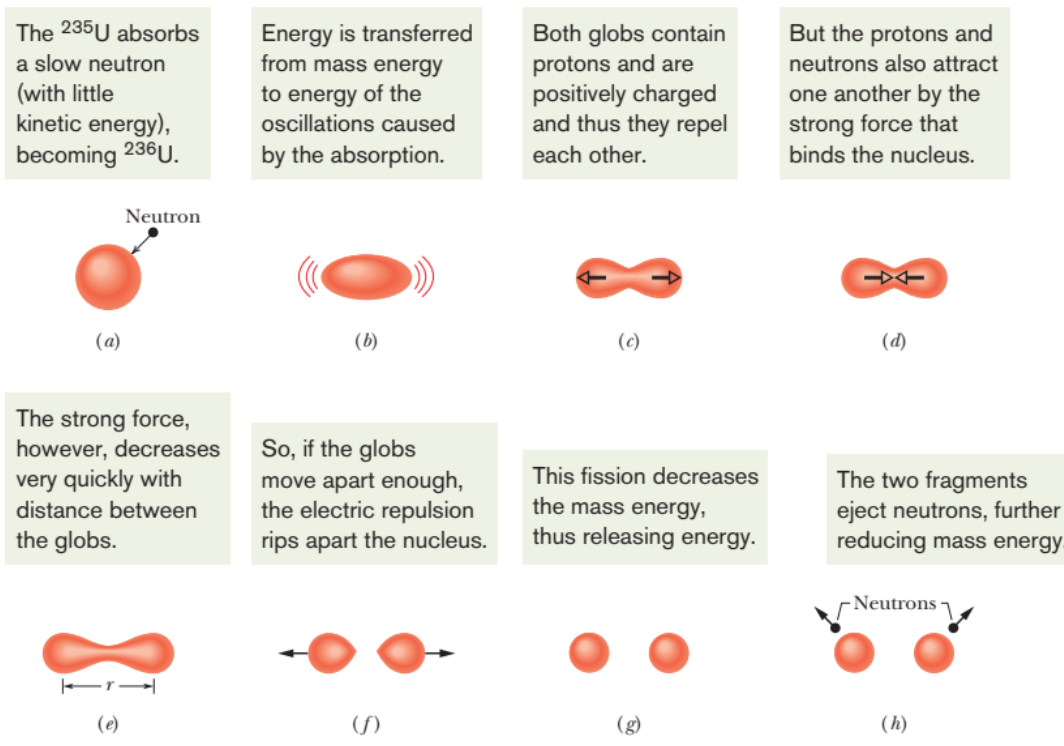
Όταν το 1g υποστεί σχάση θα ελευθερώσει ενέργεια

$$200 \times 2.6 \times 10^{31} \text{ MeV} = 8.3 \times 10^{10} \text{ J} = 23000 \text{ kWh}$$

Στην διάσπαση των φυσικών ραδιενεργών απελευθερώνεται ατομική ενέργεια που πρακτικά δεν χρησιμοποιείται γιατί αναπτύσσεται με βραδύ ρυθμό.

### Ερμηνεία της σχάσεως κατά Bohr

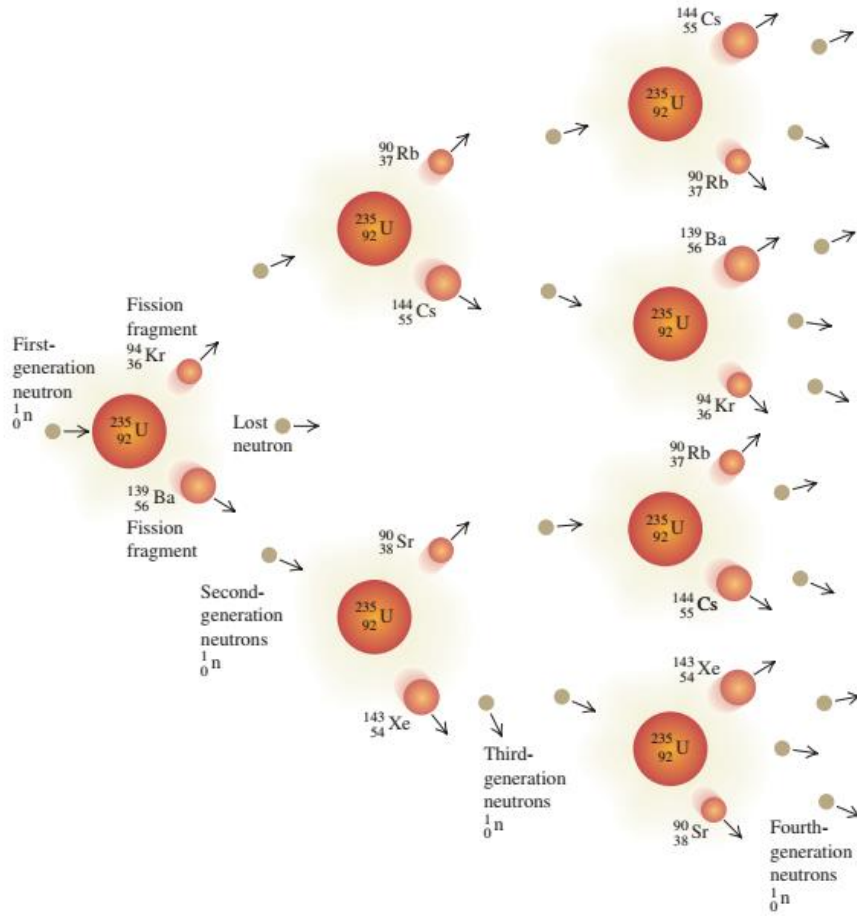
Η εισαγωγή του  $n$  στον βαρύ πυρήνα του  ${}_{92}\text{U}^{235}$  οδηγεί τον πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση.



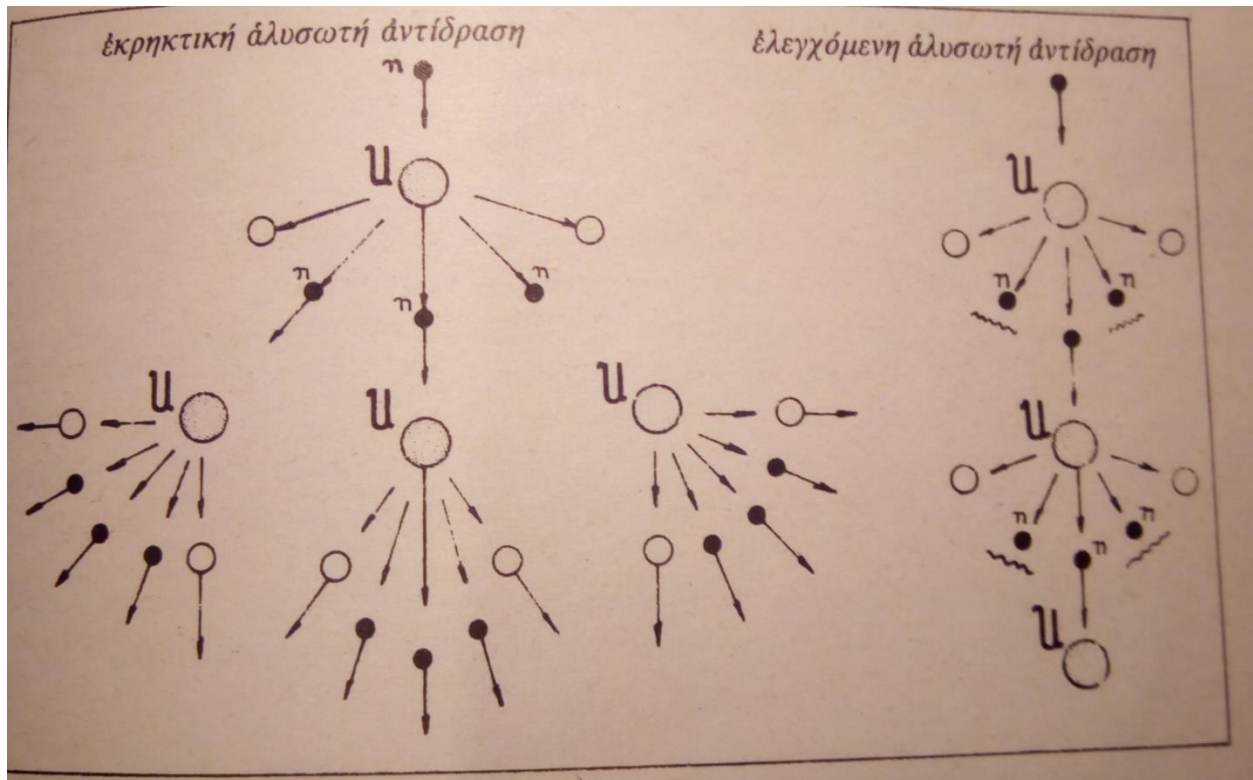
Η ταλάντωση του πυρήνα έχει σαν συνέπεια την συγκέντρωση των νουκλεονίων σε δύο περιοχές οι οποίες λόγω της συγκέντρωσης των  $p$  αποτελούν κέντρα ηλεκτρικών απώσεων. Εάν η απόσταση των κέντρων αυτών είναι μεγαλύτερη της εμβέλειας των πυρηνικών δυνάμεων τότε οι δυνάμεις Coulomb υπερτερούν και ο πυρήνας σχάζεται. Εάν η ενέργεια διεγέρσεως δεν είναι μεγάλη ο πυρήνας δεν σχάζεται. Η ενέργεια που απορρόφησε ο πυρήνας αποδίδεται σαν ακτινοβολία  $\gamma$ .

## **19.2 Αλυσιδωτή αντίδραση**

Τα  $n$  που παράγονται κατά την σχάση μπορεί να προκαλέσουν σχάση των γειτονικών πυρήνων δηλαδή μία αλυσιδωτή αντίδραση με συνεχή σχάση. Η αλυσιδωτή αντίδραση είναι αυτοσυντηρούμενη.



Διακρίνουμε την ελεγχόμενη και την εκρηκτική αλυσιδωτή αντίδραση.



**Έκρηκτική αλυσιδωτή αντίδραση** έχουμε όταν περισσότερα από ένα  $n$  πραγματοποιούν νέες σχάσεις. Με τον τρόπο αυτό απελευθερώνεται τεράστια ποσότητα ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα με την μορφή έκρηξης. Με αυτό τον τρόπο κατασκευάζεται η ατομική βόμβα.

**Ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση** έχουμε όταν μόνο ένα  $n$  από την σχάση του πυρήνα πραγματοποιεί νέα σχάση. Η ταχύτητα διασπάσεων είναι σταθερή. Για να υπάρξει μία ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση πρέπει να συντρέχουν οι εξής λόγοι:

### I) Διατήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης

Για να διατηρηθεί μία αλυσιδωτή αντίδραση τα  $n$  πρέπει να επιβραδυνθούν να γίνουν θερμικά. Η επιβράδυνση γίνεται με κατάλληλες διατάξεις τους επιβραδυντές.

### II) Έλεγχος της αλυσιδωτής αντίδρασης

Μερικά από τα παραγόμενα  $n$  πρέπει να δεσμευτούν ώστε να μην προκαλέσουν νέες σχάσεις. Για την δέσμευση των  $n$  χρησιμοποιούνται το Cd και το Bο.

### III) Εξέλιξη της αλυσιδωτής αντίδρασης

Εξαρτάται από τι μπορεί να υποστούν τα παραγόμενα  $n$ . Αυτά μπορεί να απορροφηθούν από πυρήνες  ${}_{92}\text{U}^{238}$  ή άλλες προσμίξεις χωρίς να προκαλούν σχάσεις ή να φύγουν έξω από την συσκευή.

Για να συμβεί μία αλυσιδωτή αντίδραση πρέπει η μάζα του υλικού  $m$  που παθαίνει σχάση να είναι μεγαλύτερη είτε ίση από μία **κρίσιμη μάζα  $m_k$**

Η **κρίσιμη μάζα** εξαρτάται από το σχήμα , την καθαρότητα του υλικού και την φύση του επιβραδυντή. Όσο πιο καθαρό είναι το υλικό τόσο μικρότερη είναι η  $m_k$ .

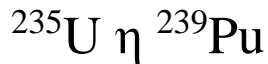
Ετσι έχουμε :

**$m < m_k \rightarrow$  η αλυσιδωτή αντίδραση σταματάει**

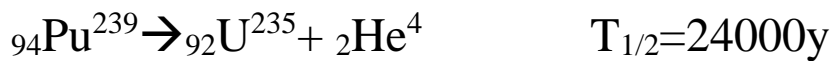
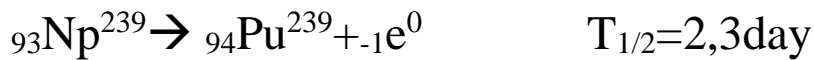
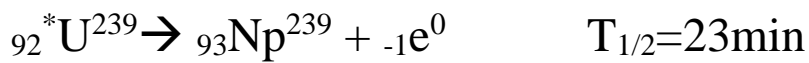
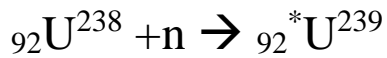
$m > m_k \rightarrow$  εκρηκτική αλυσιδωτή αντίδραση- ατομική βόμβα

$m > m_k + \text{Δέσμευση } n \rightarrow$  ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση-πυρηνικό εργοστάσιο

Στην ατομική βόμβα σαν σχάσιμο υλικό χρησιμοποιούμε

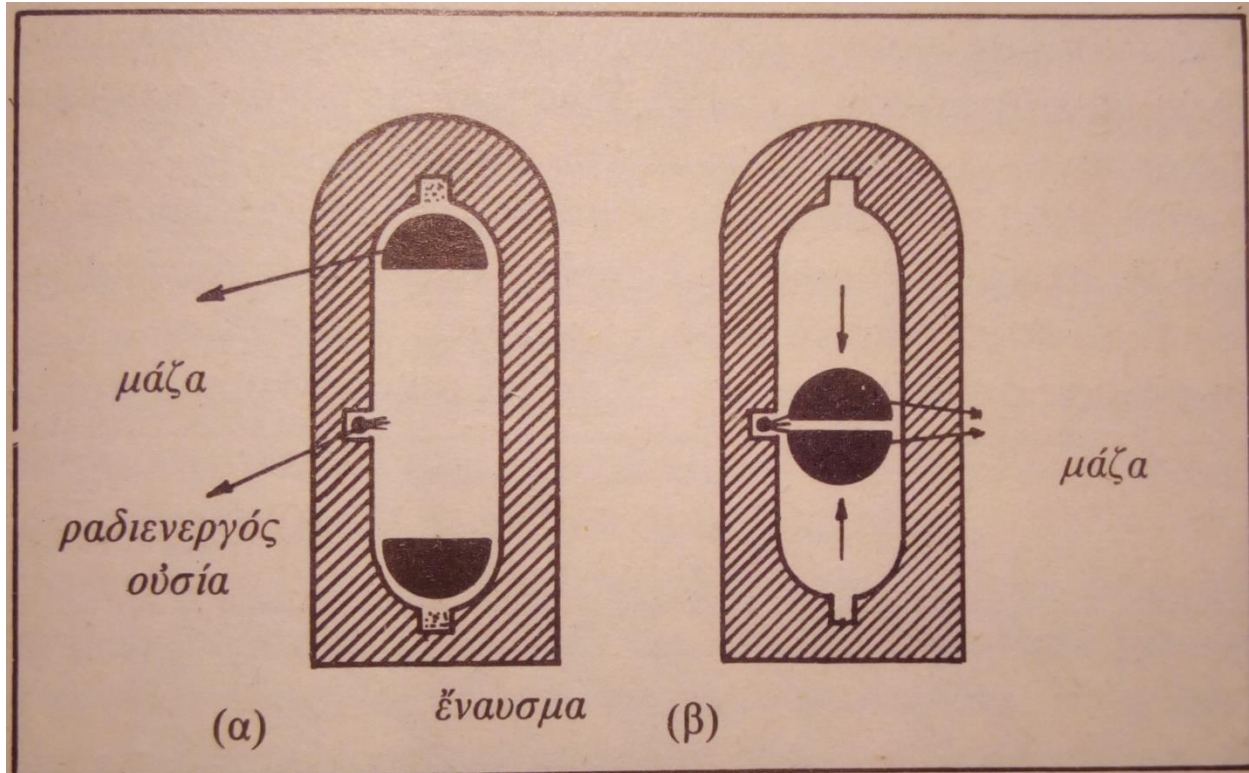


Το



Το  ${}^{239}\text{Pu}$  λόγω του  $T_{1/2}=24000\text{y}$  θεωρείται σταθερό.

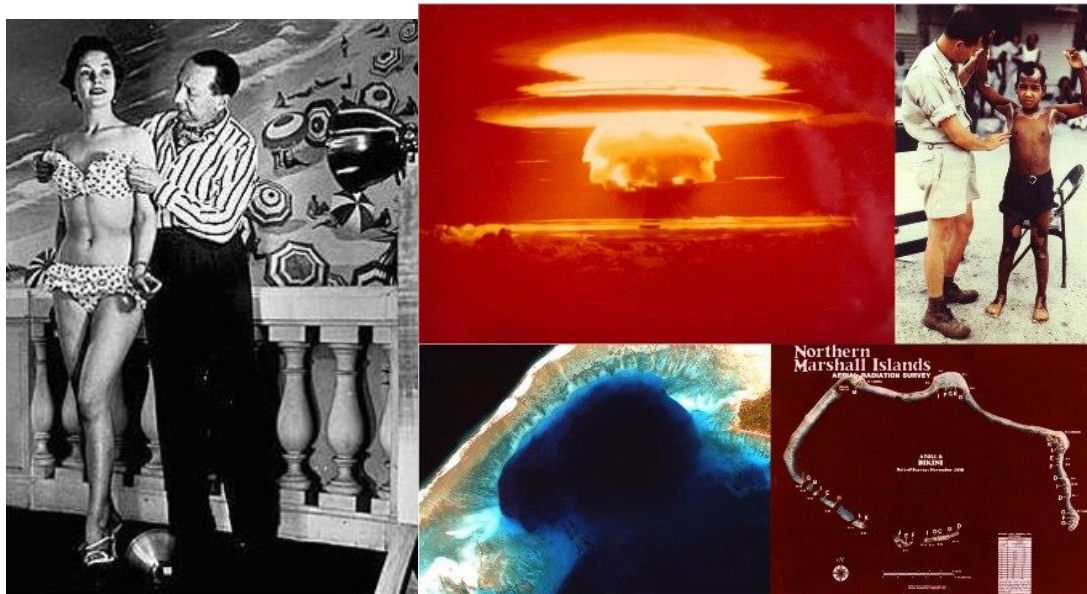




Τα αποξέσματα κατά την περίοδο της έκρηξης οφείλονται α) Στην υψηλή θερμοκρασία εκατομμυρίων βαθμών  $^{\circ}\text{C}$  και την δημιουργία θερμικού κύματος. Β) Στις μεγάλες πιέσεις και την δημιουργία ωστικού κύματος γ) Στην ακτινοβολία  $\gamma$ .

Τα προϊόντα της σχάσεως είναι ραδιενεργά και έτσι τα αποτελέσματα διατηρούνται πολλά χρόνια μετά την έκρηξη. Σαν σχάσιμο υλικό χρησιμοποιούμε καθαρό  $^{235}\text{U}$ . Το φυσικό ουράνιο  $^{238}\text{U}$  (~99,2%),  $^{235}\text{U}$  (~0,75%) και  $^{234}\text{U}$  (~0,05%)

περιέχει 0.75%  $^{235}\text{U}$  ,η κρίσιμη του μάζα είναι πολύ μεγάλη και πρακτικά αδύνατη η κατασκευή ατομικής βόμβας



### 19.3 Πυρηνικός αντιδραστήρας

Τα κύρια στοιχεία είναι

1. Το σχάσιμο υλικό – Πυρηνικό καύσιμο
2. Ο επιβραδυντής .

Χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμικών η μέσω της επιβράδυνσης. Τα ταχέα η δεν προκαλούν σχάση του  $^{235}\text{U}$ . Ο επιβραδυντής κατανέμεται μέσα στην μάζα του ουρανίου. Είναι βαρύ ύδωρ  $\text{D}_2\text{O}$  ή γραφίτης. Το πυρηνικό

καύσιμο μαζί με τον επιβραδυντή αποτελούν τον πυρήνα – καρδιά του αντιδραστήρα.

### 3. Ο ανακλαστήρας

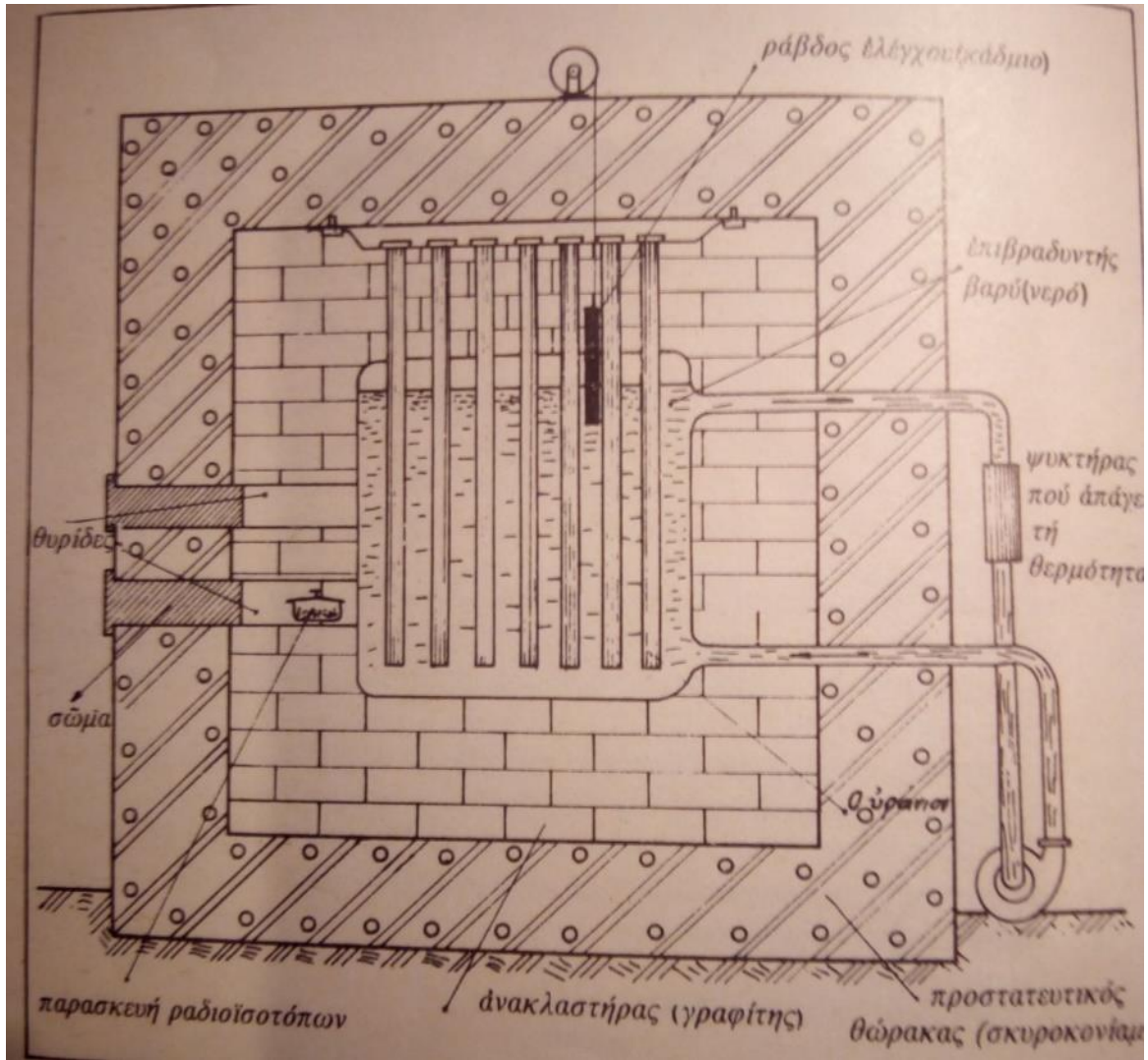
Αποτελείται από γραφίτη και περιβάλλει το καύσιμο και τον επιβραδυντή. Σε αυτόν ανακλώνται τα  $n$  και επανέρχονται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα.

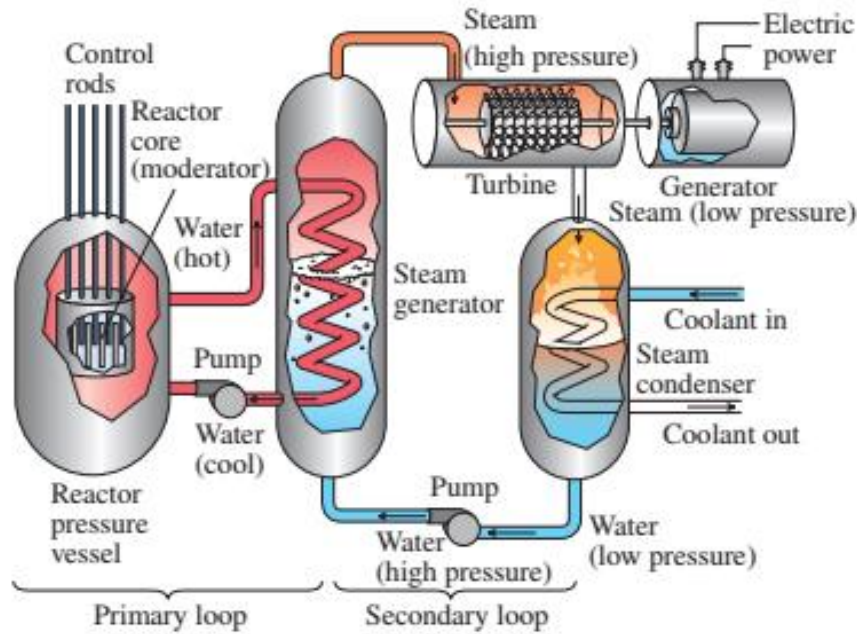
### 4. Οι δεσμευτές – Ράβδοι ελέγχου.

Αποτελούνται από Cd ή B και απορροφούν τα  $n$  και ρυθμίζουν την ταχύτητα της αλυσιδωτής αντίδρασης. Όσο περισσότερο βυθίζονται οι ράβδοι στην καρδιά του αντιδραστήρα τόσο η ταχύτητα της αντίδρασης ελαττώνεται μέχρι να μηδενιστεί.

### 5. Το προστατευτικό περίβλημα – Θώρακας

Αποτελείται από ειδικό σκυρόδεμα, περιβάλλει όλον τον αντιδραστήρα για την προστασία του προσωπικού από την ακτινοβολία.

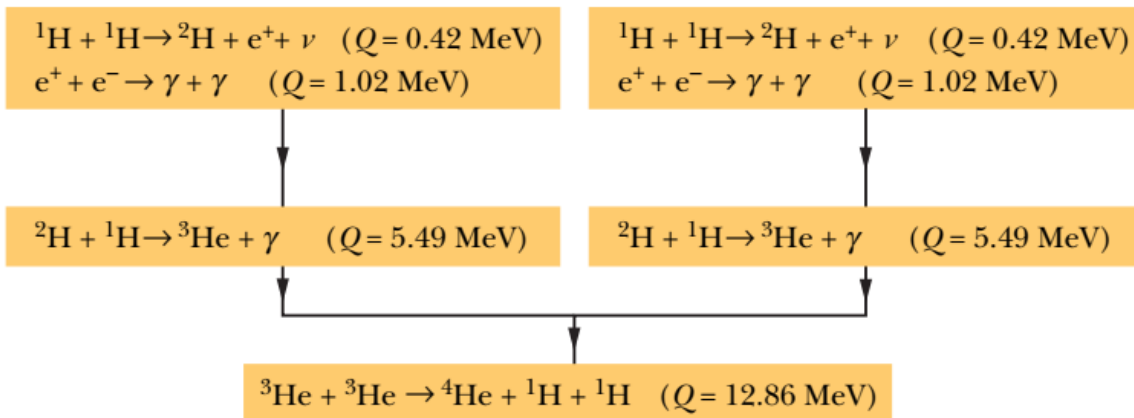


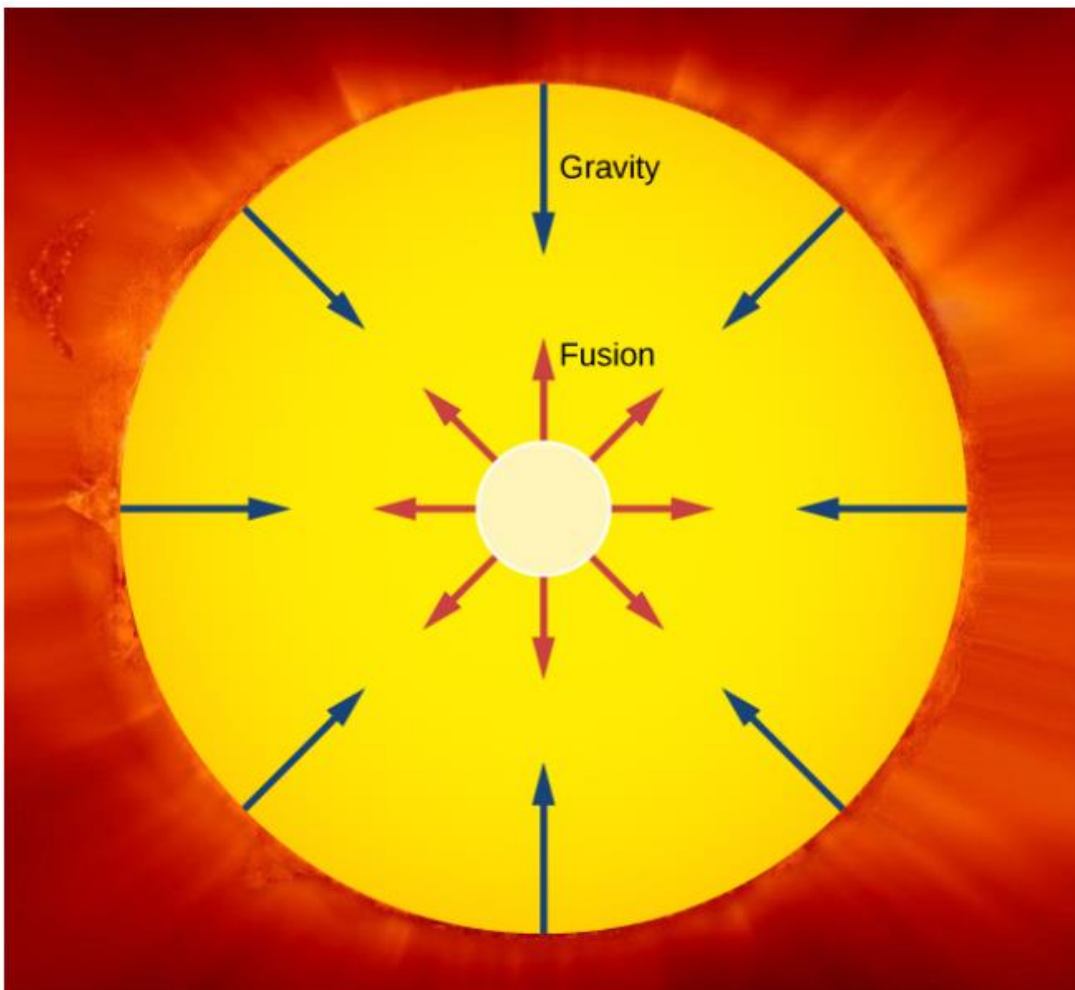


## 19.4 Σύντηξη.

Σύντηξη ονομάζεται η πυρηνική αντίδραση όπου ελαφροί πυρήνες ενώνονται σε βαρύτερους πυρήνες. Σε όλες τις αντιδράσεις σύντηξης παρατηρείται έλλειμα μάζας.

Ο κύκλος p-p παρατηρείται στον Ήλιο





Για να πραγματοποιηθεί η σύντηξη απαιτούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες εκατομμυρίων βαθμών ώστε οι πυρήνες να υπερνικήσουν, αποκτώντας αρκετή ενέργεια, τις απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις και να προσεγγίσουν μεταξύ τους. Οι αντιδράσεις αυτές λόγω των υψηλών θερμοκρασιών ονομάζονται **θερμοπυρηνικές αντιδράσεις**

Οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις μέχρι σήμερα δεν είναι ελεγχόμενες.

Για να την λειτουργία ενός αντιδραστήρα σύντηξης πρέπει να ικανοποιούνται 3 προϋποθέσεις.

1. Η πυκνότητα των σωματιδίων που αλληλοεπιδρούν να είναι υψηλή.

Ο αριθμός των δευτερονίων  $d$  ανά μονάδα όγκου πρέπει να είναι μεγάλος ώστε ο ρυθμός των συγκρούσεων  $d-d$  να είναι υψηλός. Απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες εξ αιτίας της οποίας το  $d$  θα είναι πλήρως ιονισμένο. Το ιονισμένο δευτέριο μαζί με τα ηλεκτρόνια δημιουργού ένα ιονισμένο αέριο δευτερονίων και ηλεκτρονίων (**πλάσμα**).

2. Πλάσμα σε υψηλή Θερμοκρασία  $T$

Για να υπερνικηθούν οι απωστικές δυνάμεις Coulomb τα δευτερόνια πρέπει να έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια. Για να την αποκτήσουν το πλάσμα πρέπει να βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία. Για απαιτούμενη ενέργεια  $35\text{keV}$  η θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε αυτή την ενέργεια είναι  $4 \times 10^8 \text{ K}$  που είναι 30 φορές μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του πυρήνα του Ηλίου.

3. Μεγάλος χρόνος περιορισμού  $\tau$

Η απαραίτητη υψηλή θερμοκρασία δεν μπορεί να διατηρηθεί επί μακρόν. Για να συντηρηθεί μία θερμοπυρηνική σύντηξη πρέπει να ικανοποιείται **το κριτήριο του Lawson**

$$\text{Πυκνότητα σωματιδίων} \times \text{χρόνο περιορισμού} > 10^{23} \frac{s}{m^3}$$

Ο κανόνας δηλώνει ότι για την επιτυχημένη λειτουργία ενός θερμοπυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης εφ' όσον η θερμοκρασία πλάσματος  $T$  είναι υψηλή θα πρέπει να διατηρούμε την αντίδραση μεγάλου αριθμού δευτερονίων δηλαδή δευτερόνια σε υψηλή πυκνότητα, για μικρό χρόνο ή εναλλακτικά να έχουμε μικρό αριθμό δευτερονίων να αντιδρούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Υπάρχουν 2 τεχνικές οι οποίες εφαρμόζονται για να επιτύχουμε τόσο την υψηλή  $T$  όσο του κριτηρίου του **Lawson**

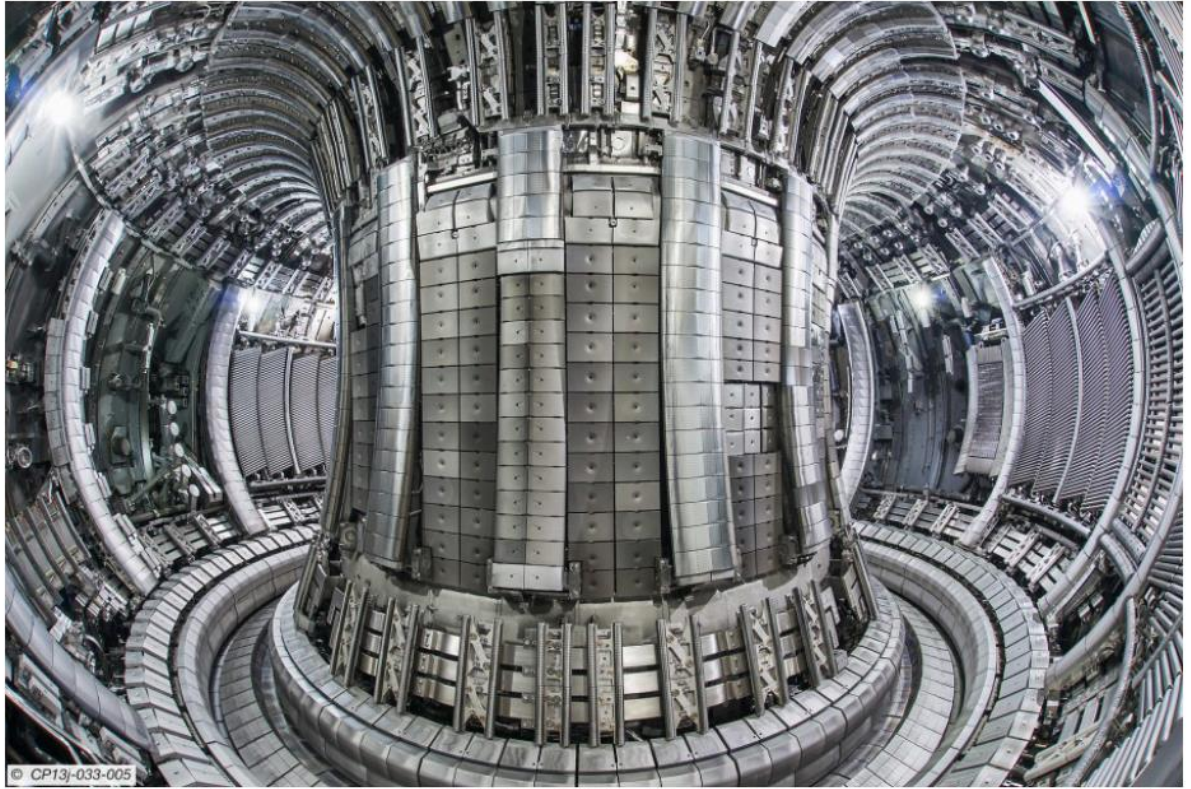
A) Η τεχνική του μαγνητικού περιορισμού

Χρησιμοποιεί ισχυρά μαγνητικά πεδία ώστε να περιορίσει το πλάσμα, ενώ η θερμοκρασία του αυξάνεται. Ο τύπος αυτός αντιδραστήρα κατασκευάστηκε για πρώτη φορά στην Ρωσία και ονομάζεται **Tokamak**

B) Η τεχνική του αδρανειακού περιορισμού

Στην τεχνική αυτή μία μικρή ποσότητα καυσίμου συμπιέζεται και θερμαίνεται τόσο γρήγορα ώστε η σύντηξή συμβαίνει πριν το καύσιμο διασταλεί και ψυχθεί.





**Figure 10.25** The Joint European Torus (JET) tokamak fusion reactor uses magnetic fields to fuse deuterium and tritium nuclei (credit: EUROfusion).

Ψυχρή σύντηξη;

Ιόν Μοριακού Υδρογόνου

