



ΑΝΟΙΚΤΑ  
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΑ  
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



## ΦΥΣΙΚΗ ΙΙ (Θ)

Χασάπης Δημήτριος  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΕ



## Άδειες Χρήσης

---

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.

## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



## ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ - ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

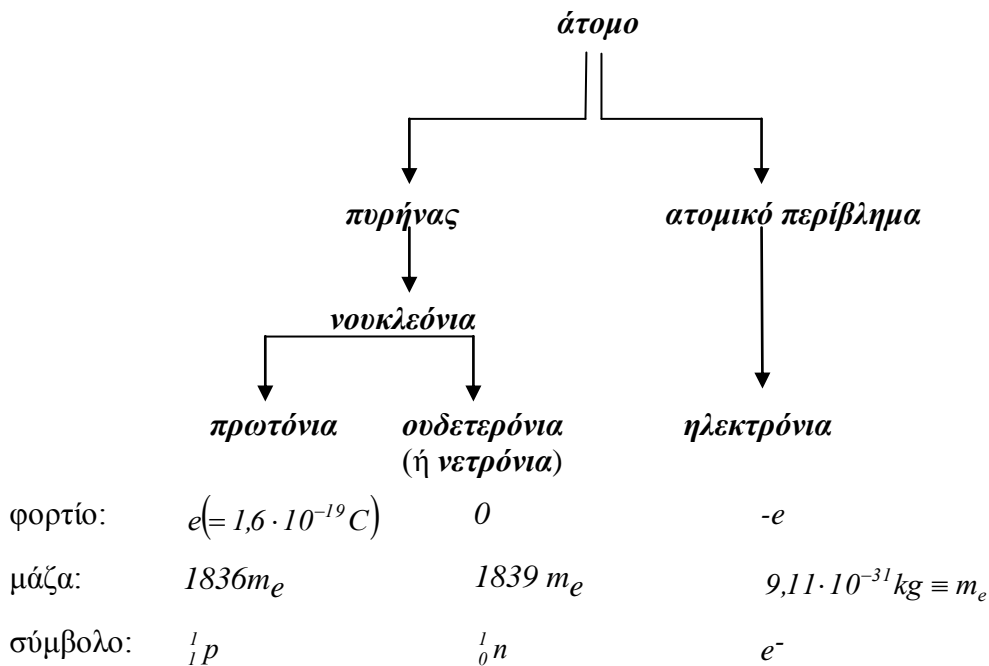
### 7. Άτομα

Όλα τα μέχρι σήμερα γνωστά υλικά αποτελούνται από μικροσκοπικές μονάδες, **τα άτομα**, ή συγκροτήματα ατόμων, **τα μόρια**. Οι μικροσκοπικές αυτές μονάδες αποτελούν την ελάχιστη δυνατή ποσότητα ύλης, η οποία εξακολουθεί να έχει τις ίδιες χημικές ιδιότητες με το υπό εξέταση υλικό. Αν δηλαδή τις διασπάσουμε (π.χ. μέσω βομβαρδισμού με άλλα σωματίδια), θα διαπιστώσουμε, ότι τα θραύσματα έχουν εντελώς διαφορετικές ιδιότητες από τα συγκεκριμένα άτομα (ή μόρια). Εξάλλου αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι όλα τα άτομα ενός συγκεκριμένου στοιχείου είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους.

#### 7.1 Δομή και χαρακτηρισμός των ατόμων

Όπως διαπιστώθηκε με την βοήθεια πειραμάτων σκέδασης, κατά τα οποία βομβαρδίζουμε ένα υλικό με διάφορα ηλεκτρικώς φορτισμένα ή μη σωματίδια και παρατηρούμε την σκέδαση τους, τα άτομα αποτελούνται από έναν κεντρικό **πυρήνα** και από έναν αριθμό περί τον πυρήνα περιφερόμενων ηλεκτρονίων, τα οποία συνθέτουν το **ατομικό περίβλημα**. Τα κύρια χαρακτηριστικά της σήμερα παραδεκτής δομής του ατόμου αποδίδονται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα.

ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ σχηματικά



Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, ο πυρήνας αποτελείται από **πρωτόνια** (θετικώς με ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο φορτισμένα σωματίδια, σύμβολο  ${}^1_1 p$ ) και **ουδετερόνια** (ηλεκτρικώς ουδέτερα - όπως φανερώνει και το όνομα τους - σωματίδια, σύμβολο  ${}^1_0 n$ ). Γύρω από τον πυρήνα περιφέρονται τόσα **ηλεκτρόνια** (φορτίο ίσο και αντίθετο με εκείνο του πρωτονίου, αμελητέα μάζα, σύμβολο  $e^-$ ), όσα και τα εντός του πυρήνος πρωτόνια.

Έτσι τα άτομα είναι υπό κανονικές συνθήκες ηλεκτρικώς ουδέτερα.

Ο πυρήνας συγκεντρώνει το σύνολο σχεδόν της μάζας του ατόμου παρά το γεγονός, ότι η διάμετρος του ( $\sim 10^{-14}$  m) είναι κατά 10000 περίπου φορές μικρότερη από εκείνη του ατόμου. Η συγκέντρωση ύλης στον πυρήνα ανέρχεται στην τρομακτική τιμή των  $10^{11} \text{ kg/cm}^3$ , δηλαδή σε εκατό εκατομμύρια τόνους ανά κυβικό εκατοστόμετρο!

Για τον χαρακτηρισμό των ατόμων χρησιμοποιείται ο ακόλουθος, **συμβολικός τρόπος γραφής**:

$${}^A_Z \left( \begin{array}{l} \text{σύμβολο} \\ \text{στοιχείου} \end{array} \right)$$

όπου  $Z = \text{ατομικός αριθμός} = \text{αριθμός πρωτονίων του πυρήνος} = \text{αριθμός ηλεκτρονίων του ατομικού περιβλήματος}$ , όταν το άτομο είναι ουδέτερο.

$A = \text{μαζικός αριθμός} = \text{αριθμός νουκλεονίων του πυρήνος}$

Π.χ.  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ ,  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ,  ${}_{10}^{22}\text{Ne}$

Όταν αναφερόμαστε σε έναν συγκεκριμένο πυρήνα χωρίς να μας ενδιαφέρει το ατομικό περίβλημα, χρησιμοποιούμε συχνά τον όρο «**νουκλίδιο**»

## 7.2 Ισότοπα

Οι χημικές ιδιότητες ενός στοιχείου καθορίζονται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων του, ο οποίος -όπως προαναφέραμε- πάντα για ουδέτερα εννοείται άτομα είναι ίσος με εκείνον των πρωτονίων του πυρήνα. Επομένως στοιχεία με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες, ακόμη και αν έχουν διαφορετικό αριθμό ουδετερονίων. Επειδή λοιπόν τα στοιχεία αυτά βρίσκονται στην ίδια θέση του Περιοδικού Πίνακα (στον οποίο ως γνωστόν κατατάσσουμε τα διάφορα χημικά στοιχεία σύμφωνα με τον ατομικό τους αριθμό και άρα σύμφωνα με τις χημικές τους ιδιότητες), καλούνται **ισότοπα** :

Τα **ισότοπα** ενός στοιχείου διαφέρουν ως προς τον αριθμό των πρωτονίων.

Π.χ. Μερικά από τα ισότοπα του Ουρανίου:

άτομο	πρωτόνια	ουδετερόνια	συχνότητα εμφάνισης στη φύση
${}_{92}^{234}\text{U}$	92	142	0,0057%
${}_{92}^{235}\text{U}$	92	143	0,72%
${}_{92}^{238}\text{U}$	92	146	99,27%

### 7.3 Μάζα και διαστάσεις των ατόμων

Όταν μιλάμε για την μάζα ενός ατόμου, αναφερόμαστε συνήθως στην *σχετική μάζα*  $M$ , η οποία μας δείχνει πόσο μεγαλύτερη είναι η (απόλυτη) μάζα του συγκεκριμένου ατόμου, από το 1/12 της (απόλυτης) μάζας του ατόμου του άνθρακα  $^{12}_6\text{C}$ .

Η παραπάνω (σχετική) μάζα αναφέρεται δε συνήθως λανθασμένα ως «ατομικό βάρος», εξ αιτίας της σύγχυσης η οποία επικρατεί, όσον αφορά την σημασία των όρων «μάζα» και «βάρος».

Η σχετική μάζα του ελαφρύτερου στοιχείου, του Υδρογόνου, είναι 1,008, ενώ του βαρύτερου, του Ουρανίου, 238,03.<sup>1</sup>

Η *απόλυτη μάζα* μετράται σε kg. Για λόγους δε σκοπιμότητας (βλ. παραπάνω) έχει εισαχθεί η *ατομική μονάδα μάζας*  $u$ , η οποία ισούται με το 1/12 της απόλυτης μάζας του ισοτόπου  $^{12}_6\text{C}$ :

$$\text{ατομική μονάδα μάζας: } \boxed{1u =: \frac{m(^{12}_6\text{C})}{12} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \quad (\text{ή } \boxed{1\text{kg} = 6,022045 \cdot 10^{26} u})$$

Η απόλυτη μάζα  $m$  ενός ατόμου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την σχετική του μάζα  $M$  με την ατομική μονάδα μάζας:

$$\boxed{m = M \cdot u} \quad [7.1]$$

Η διάμετρος τώρα του ατόμου αναφέρουμε απλώς, ότι -όπως προκύπτει από έγκυρες πειραματικές μετρήσεις- είναι της τάξεως των  $10^{-10}$  m, ενώ η διάμετρος του πυρήνα της τάξεως των  $10^{-14}$  m.

### 7.4 Ατομικό περίβλημα

Επειδή τα άτομα διαφεύγουν -λόγω του μικροσκοπικού τους μεγέθους- της άμεσης παρατήρησης, η μόνη δυνατότητα περιγραφής της δομής τους είναι η χρήση «*ατομικών μοντέλων*». Τα μοντέλα αυτά «ζουν και πεθαίνουν» ανάλογα με την ικανότητα τους να εξηγούν την μακροσκοπική, παρατηρήσιμη συμπεριφορά των ατόμων. Έτσι βρίσκονται σε διαρκή εξέλιξη και βελτίωση. Ας δούμε λοιπόν τα κυριότερα εξ αυτών:

**Μοντέλο του Rutherford:** Τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα, όπως οι πλανήτες γύρω από τον ήλιο. Με άλλα λόγια, το άτομο αποτελεί ένα είδος μικροσκοπικού πλανητικού συστήματος, στο οποίο όμως τον ρόλο της κεντρομόλου δύναμης παίζει η ηλεκτρική δύναμη Coulomb μεταξύ του θετικού πυρήνα και των αρνητικών ηλεκτρονίων, και όχι η συντριπτικά ασθενέστερη βαρυτική έλξη.

<sup>1</sup> Οι «περίεργοι» δεκαδικοί αριθμοί προκύπτουν επειδή εννοείται η μέση τιμή για όλα τα ισότοπα ενός στοιχείου, λαμβανομένης υπόψη της συχνότητας με την οποία συναντώνται στην φύση.

Σύμφωνα τώρα με τους νόμους της Ηλεκτροδυναμικής το κεντρομόλως επιταχυνόμενο, όπως και κάθε επιταχυνόμενο ηλεκτρικό φορτίο, θα έπρεπε να ακτινοβολεί διαρκώς ενέργεια. Το γεγονός αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την διαρκή ελάττωση της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου. Έτσι το ηλεκτρόνιο θα έπεφτε μέσα σε ελάχιστο χρόνο επί του πυρήνα διαγράφοντας μια σπειροειδή τροχιά. Το άτομο του Rutherford είναι επομένως *ασταθές*.

**Μοντέλο του Bohr:** Ο Bohr επέκτεινε το μοντέλο του Rutherford προκειμένου να εξηγήσει την ευστάθεια του ατόμου και την εκπομπή ακτινοβολίας συγκεκριμένων διακριτών συχνοτήτων. Προς τον σκοπό αυτό εισήγαγε δύο συνθήκες, οι οποίες κινούνταν έξω από τα πλαίσια της κλασικής Φυσικής και βρήκαν την εξήγησή τους αργότερα μέσω της Κβαντομηχανικής.

### 7.4.1 Συνθήκες του Bohr

**1<sup>η</sup> Συνθήκη του Bohr:** Τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου κινούνται χωρίς να ακτινοβολούν επί συγκεκριμένων (κυκλικών) τροχιών, οι οποίες καλούνται *σταθερές ή επιτρεπόμενες* και καθορίζονται από την επόμενη *κβαντική συνθήκη*:

Η στροφορμή ενός γύρω από τον πυρήνα περιστρεφόμενου ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  :

$$\boxed{L = mrv = n\hbar} \quad [7.2]$$

όπου  $L$  = τροχιακή στροφορμή ηλεκτρονίου

$m$  = μάζα ηλεκτρονίου

$r$  = ακτίνα διαγραφομένης τροχιάς

$v$  = ταχύτητα ηλεκτρονίου

$n = 1, 2, 3, \dots$  = *κύριος κβαντικός αριθμός*

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js : *σταθερή του Plank.*

**2<sup>η</sup> Συνθήκη του Bohr:** Ένα άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά από μια τροχιά μεγαλύτερου κύριου κβαντικού αριθμού σε μια τροχιά μικρότερου κύριου κβαντικού αριθμού. Η ενέργεια δε του εκπεμπόμενου φωτονίου ισούται με την διαφορά της τελικής από την αρχική ενέργεια του ηλεκτρονίου:

$$\boxed{E = h\nu = E_{\text{αρχ}} - E_{\text{τελ}}} \quad [7.3]$$

όπου  $E$  = ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου

$\nu$  = εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

$E_{\text{αρχ}}$  = ολική *αρχική* ενέργεια ηλεκτρονίου

$E_{\text{τελ}}$  = ολική *τελική* ενέργεια ηλεκτρονίου

Το μοντέλο του Bohr παρά το γεγονός, ότι μας επιτρέπει να υπολογίσουμε εύκολα και με

ακρίβεια το φάσμα του απλούστερου όλων των ατόμων, του Υδρογόνου, αδυνατεί να εξηγήσει π.χ. την *λεπτή υφή του φάσματος του Υδρογόνου*: Αν εξετάσουμε το φάσμα του Υδρογόνου με μεγαλύτερη ανάλυση, θα παρατηρήσουμε, ότι πολλές από τις «γραμμές» του αποτελούνται από δύο ξεχωριστές γραμμές, ευρισκόμενες η μία κοντά στην άλλη.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αδυναμίες αυτές ο *Sommerfeld* διεύρυνε το ατομικό μοντέλο του Bohr εισάγοντας εκτός της κυκλικής και ελλειπτικές τροχιές. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Sommerfeld σε κάθε τιμή του κύριου κβαντικού αριθμού αντιστοιχούν  $n$  τροχιές οι οποίες αριθμούνται μέσω του *δευτερεύοντος κβαντικού αριθμού*  $l = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$ . Στην μέγιστη τιμή του  $l$  (για δεδομένο  $n$ ) αντιστοιχεί πάντα μια κυκλική τροχιά, ενώ στις υπόλοιπες αντιστοιχούν ελλειπτικές τροχιές, η εκκεντρότητα των οποίων αυξάνεται με ελαττούμενη τιμή του  $l$ .

Ένα ηλεκτρόνιο κινούμενο επί μιας ελλειπτικής τροχιάς έχει μεγαλύτερη ταχύτητα στο πλησίον του πυρήνα ευρισκόμενο τμήμα απ' ότι στο πιο απομακρυσμένο. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται - σύμφωνα με την θεωρία της Σχετικότητας - μια αντίστοιχη αυξομείωση της μάζας του ηλεκτρονίου. Έτσι οι τροχιές του ηλεκτρονίου, οι οποίες ανήκουν στον ίδιο κύριο κβαντικό αριθμό έχουν διαφορετικές ενέργειες.

Εκτός του κύριου ( $n$ ) και δευτερεύοντος ( $l$ ) κβαντικού αριθμού και προκειμένου να εξηγηθούν τα χαρακτηριστικά πολυπλοκότερων φασμάτων εισήχθησαν άλλοι δύο κβαντικοί αριθμοί:

**Ο μαγνητικός κβαντικός αριθμός  $m$** , ο οποίος παίρνει τις  $(2l + 1)$  τιμές:  $-l, -l+1, \dots, 0, \dots, l-1, l$ , και περιγράφει τον προσανατολισμό των τροχιών στον χώρο.

**Ο κβαντικός αριθμός του spin  $s$** , ο οποίος περιγράφει τον προσανατολισμό της ιδιοπεριστροφικής ορμής του ηλεκτρονίου σε σχέση με την φορά της τροχιακής του ορμής.

## 7.4.2 Φλοιώδης δομή του ατομικού περιβλήματος

Στα πλαίσια του διευρυμένου (μέσω της εισαγωγής του μαγνητικού κβαντικού αριθμού και του κβαντικού αριθμού του spin) μοντέλου των Bohr - Sommerfeld συνηθίζεται να θεωρούμε, ότι όλες οι τροχιές, οι οποίες ανήκουν στον ίδιο κύριο κβαντικό αριθμό  $n$  (και οι οποίες έχουν χονδρικός σχεδόν την ίδια ενέργεια), αποτελούν έναν *φλοιό*. Για λόγους δε ιστορικούς, ο εσωτερικός φλοιός ( $n=1$ ) συμβολίζεται με το γράμμα K, ο αμέσως εξωτερικότερος ( $n=2$ ) με το γράμμα L, κ.ο.κ. Ο αριθμός των τροχιών, οι οποίες περιέχονται σε κάθε φλοιό, προκύπτει από τις τιμές των τεσσάρων κβαντικών αριθμών. Όπως δε φαίνεται και από τον Πίνακα 7.4.2

Ο φλοιός με τον κύριο κβαντικό αριθμό  $n$  περιέχει  $n^2$  τροχιές.

Η ταξινόμηση των χημικών στοιχείων κατά αύξουσα ατομική μάζα καταδεικνύει μια περιοδικότητα των χημικών ιδιοτήτων και οδήγησε ως γνωστόν στην δημιουργία του Περιοδικού Πίνακα από τον Mendelejeff. Ο εν λόγω πίνακας εξηγείται επακριβώς, αν δεχθούμε, ότι η δομή του ατομικού περιβλήματος ακολουθεί τους παρακάτω δύο κανόνες:

α) Όλα τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου κινούνται επί εκείνων των επιτρεπομένων - σύμφωνα με το διευρυμένο μοντέλο των Bohr - Sommerfeld («μοντέλο των φλοιών»)- τροχιών, επί των οποίων έχουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια.



Πίνακας 7.4.2: «Φλοιοί – τροχιές – ηλεκτρόνια» και κβαντικοί αριθμοί				
K	n=1	l=0	m=0	μια κυκλική τροχιά
L	n=2	$l=0$	$m=0$	μια ελλειπτική
		$l=0$	$\left. \begin{matrix} m=-1 \\ m=0 \\ m=1 \end{matrix} \right\}$	και τρεις κυκλικές τροχιές
M	n=3	$l=0$	$m=0$	μια πολύ έκκεντρη ελλειπτική τροχιά
		$l=1$	$\left. \begin{matrix} m=0 \\ m=\pm 1 \end{matrix} \right\}$	τρεις ελλειπτικές τροχιές με μικρότερη εκκεντρότητα
		$l=2$	$\left. \begin{matrix} m=0 \\ m=\pm 1 \\ m=\pm 2 \end{matrix} \right\}$	και πέντε κυκλικές τροχιές

σε κάθε τροχιά έχουμε δύο δυνατότητες προσανατολισμού του spin: παράλληλα και αντιπαράλληλα προς την τροχιακή ορμή (δηλαδή  $s = \pm 1/2$ )

β) **Απαγορευτική αρχή του Pauli:** Δύο ηλεκτρόνια ενός ατόμου πρέπει να διαφέρουν σε έναν τουλάχιστον κβαντικό αριθμό.

Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli σε κάθε τροχιά μπορούν να κινούνται δύο το πολύ ηλεκτρόνια, των οποίων τα spin θα είναι αντιπαράλληλα. Αυτό σημαίνει, ότι οι  $n^2$  τροχιές του φλοιού n μπορούν να δεχτούν  $2(n^2)$  ηλεκτρόνια.

Το μοντέλο των ατομικών φλοιών παραμένει ακόμη και σήμερα δημοφιλές κυρίως λόγω της παραστατικότητάς του, αν και έχει αρκετές αδυναμίες. Π.χ. δεν εξηγεί την απαγορευτική αρχή του Pauli, απλώς την δέχεται αξιωματικά. Δεν εξηγεί τα κριτήρια μετάβασης από μια τροχιά σε άλλη, δεν εξηγεί τις δύο τιμές του κβαντικού αριθμού του spin, δεν μπορεί καν να εξηγήσει το φάσμα του Ηλίου, κ.λ.π. Όλες αυτές οι αδυναμίες ξεπερνιούνται μόνο στα πλαίσια του **κυματικού μοντέλου του ατόμου**, το οποίο είναι γέννημα θρέμμα της Κβαντομηχανικής.

Στα πλαίσια του κυματομηχανικού μοντέλου του ατόμου οι τροχιές του Bohr αντικαθίστανται μέσω τρισδιάστατων στάσιμων κυμάτων, έκαστο των οποίων έχει συγκεκριμένη ενέργεια και συχνότητα και παριστάνει μια «κατάσταση» ενός ηλεκτρονίου. Έτσι στην θέση της μεταπήδησης από μια τροχιά σε μια άλλη έρχεται η μετάβαση από μια κατάσταση ( $\approx$  τρισδιάστατο στάσιμο κύμα) σε μια άλλη. Η ένταση των παραπάνω κυμάτων σε ένα σημείο του χώρου αποτελεί το μέτρο της πιθανότητας να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο στην συγκεκριμένη θέση.

## 7.5 Ο πυρήνας

### 7.5.1 Έλλειμμα μάζας – ενέργεια σύνδεσης

Η μάζα ενός πυρήνα μπορεί να προσδιοριστεί με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια με την βοήθεια των *φασματογράφων μάζας*. Από τέτοιου είδους ακριβείς μετρήσεις προκύπτει, ότι η μάζα ενός ατομικού πυρήνα είναι πάντα μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων, εκ των οποίων αποτελείται:

Η διαφορά μάζας  $\Delta m$  μεταξύ της μάζας ενός πυρήνα και του αθροίσματος των μαζών των νουκλεονίων, εκ των οποίων αποτελείται ο συγκεκριμένος πυρήνας, καλείται **έλλειμμα μάζας**.

Με άλλα λόγια, όταν μεμονωμένα νουκλεόνια συνδέονται για την δημιουργία ενός πυρήνα, χάνουν ένα μέρος της μάζας τους. Η μάζα αυτή δεν εξαφανίζεται, αλλά μετατρέπεται - σύμφωνα με την *αρχή ισοδυναμίας μεταξύ μάζας και ενέργειας*- σε ενέργεια. Η ενέργεια αυτή καλείται **ενέργεια συνδέσεως  $W$**  και ελευθερώνεται κατά την συνένωση των νουκλεονίων σε έναν πυρήνα:

**Ενέργεια συνδέσεως  $W$**  καλείται η ενέργεια, η οποία ελευθερούται κατά την δημιουργία ενός πυρήνα από μεμονωμένα νουκλεόνια.

Αν αντιθέτως θέλουμε να διασπάσουμε έναν πυρήνα σε μεμονωμένα νουκλεόνια, θα πρέπει να του προσφέρουμε ενέργεια ίση προς την ενέργεια συνδέσεως.

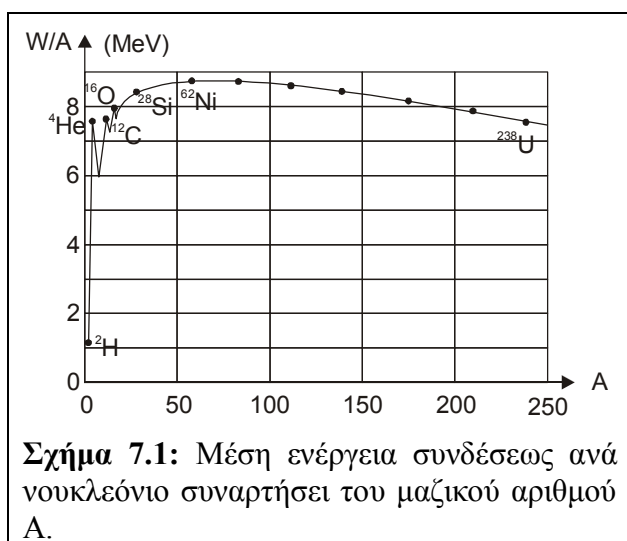
Σύμφωνα με την αρχή ισοδυναμίας μεταξύ μάζας και ενέργειας του Einstein, μεταξύ του ελλείμματος μάζας και της ενέργειας συνδέσεως ισχύει η σχέση:

$$W = \Delta m c^2 \quad [7.4]$$

όπου  $W$  = ενέργεια συνδέσεως

$\Delta m$  = έλλειμμα μάζας

$c = 3 \cdot 10^8$  m/s = ταχύτητα του φωτός στο κενό.



Σημειώνουμε ότι η ενέργεια συνδέσεως των διαφόρων πυρήνων είναι κατά  $10^6$  περίπου φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια αναδιάταξης των ηλεκτρονίων. Η ίδια αναλογία ισχύει επομένως και για την ενέργεια, η οποία συνοδεύει τις πυρηνικές (διάσπαση του πυρήνα) και χημικές (π.χ. καύση χημικών καυσίμων) αντιδράσεις αντίστοιχα.

Η ενέργεια συνδέσεως διαφέρει από πυρήνα σε πυρήνα και αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για τον συγκεκριμένο πυρήνα. Ιδιαίτερο όμως πρακτικό ενδιαφέρον έχει η μέση ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο: αν κατορθώσουμε να αυξήσου-

## 7.5.2 Φυσική ραδιενέργεια

## 7.5.3 Νόμος της φυσικής ραδιενέργειας

με την μέση ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο, κερδίζουμε την αύξηση ως εκλυόμενη ενέργεια. Όπως τώρα φαίνεται στο σχήμα 7.1, την μεγαλύτερη (μέση) ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο έχουν πυρήνες, των οποίων ο μαζικός αριθμός  $M$  είναι γύρω στο 50. Επομένως:

Πυρηνική ενέργεια ελευθερούται κατά την συνένωση ελαφριών πυρήνων («*πυρηνική σύντηξη*») ή κατά την διάσπαση βαρέων πυρήνων («*πυρηνική διάσπαση*»), λόγω της αύξησης της μέσης ενέργειας συνδέσεως ανά νουκλεόνιο.

## 7.5.2 Φυσική ραδιενέργεια

Μεταξύ των νουκλεονίων (πρωτονίων και ουδετερονίων) του πυρήνα αναπτύσσονται δύο είδη δυνάμεων: απωστικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ των ομωνύμων πρωτονίων και ελκτικές δυνάμεις μεταξύ όλων των νουκλεονίων, οι οποίες καλούνται *ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις* και είναι καθαρά κβαντομηχανικής φύσεως. Οι ελκτικές ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις είναι, όπως προδίδει και το όνομα τους, πολύ ισχυρότερες από τις απωστικές δυνάμεις Coulomb, έχουν όμως πολύ μικρή εμβέλεια ( $< 10^{-15}$  cm). Αντιθέτως οι δυνάμεις Coulomb έχουν άπειρη εμβέλεια. Αποτέλεσμα τούτου είναι η αστάθεια των βαρύτερων και κατά συνέπεια ογκωδέστερων πυρήνων. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για τους πυρήνες με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 84. Οι πυρήνες αυτοί διασπώνται λοιπόν αυθόρμητα εκπέμποντας την λεγόμενη *ραδιενεργό ακτινοβολία*, φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζεται ως *φυσική ραδιενέργεια*.

Η ραδιενεργός ακτινοβολία αποτελείται από:

**α) Σωματίδια  $\alpha$**  = πυρήνες Ηλίου, αποτελούμενοι από δύο πρωτόνια και δύο ουδετερόνια.

**β) Σωματίδια  $\beta$**  = ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια, η ταχύτητα τους μπορεί να φτάσει μέχρι και το 99,9% της ταχύτητας του φωτός.

**γ) Σωματίδια  $\gamma$**  = κβάντα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πολύ μεγάλης ( $\sim 10^{20}$  Hz) συχνότητας, άρα και ενέργειας.

## 7.5.3 Νόμος της φυσικής ραδιενέργειας

Πειραματικές μετρήσεις έδειξαν, ότι ο αριθμός  $dN$  των πυρήνων, οι οποίοι διασπώνται μέσα σε χρόνο  $dt$ , είναι ανάλογος του αριθμού  $N$  των κατά την δεδομένη χρονική στιγμή υπαρχόντων, μη διασπασθέντων πυρήνων:  $dN = -\lambda N dt$  [7.5]

(Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει, ότι έχουμε *ελάττωση* του αριθμού των ραδιενεργών πυρήνων με την πάροδο του χρόνου).

Η σταθερά αναλογίας  $\lambda$  καλείται *σταθερά διασπάσεως* και εξαρτάται μόνο από το είδος του πυρήνα.

Η εξίσωση [ 7.5 ] μπορεί να γραφεί και στην μορφή:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad [ 7.5\alpha ]$$

Ο ρυθμός των διασπάσεων ( $dN/dt$ ) καλείται και *ραδιενεργός δραστηριότητα* της συγκεκριμένης ποσότητας του ραδιενεργού υλικού.

Μονάδα μέτρησης της ραδιενεργούς δραστηριότητας είναι το  $\boxed{\text{Becquerel} \equiv \text{Bq} = 1\text{s}^{-1}}$ .

Συχνά χρησιμοποιείται η  $\boxed{\text{ειδική ραδιενεργή δραστηριότητα} = \frac{\text{ραδιενεργή δραστηριότητα}}{\text{μάζα}}}$ ,

η οποία μετράται σε Bq/g. Τιμές της ειδικής **ραδιενεργής δραστηριότητας** ορισμένων ραδιενεργών ισοτόπων περιέχονται στον Πίνακα 7.5.3.

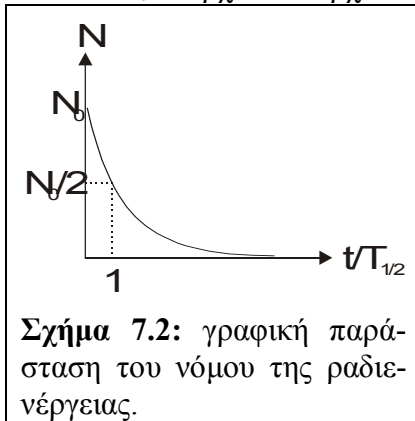
<b>Πίνακας 7.5.3: Ειδική ραδιενεργή δραστηριότητα μερικών ισοτόπων (Bq/g)</b>					
Μόλυβδος	$({}^{214}_{82}\text{Pb})$	$1,22 \cdot 10^{18}$	Θόριο	$({}^{230}_{90}\text{Th})$	$7,03 \cdot 10^8$
Βισμούθιο	$({}^{214}_{83}\text{Bi})$	$1,67 \cdot 10^{18}$	Θόριο	$({}^{234}_{90}\text{Th})$	$8,47 \cdot 10^{14}$
Πολώνιο	$({}^{218}_{84}\text{Po})$	$1,05 \cdot 10^{19}$	Ουράνιο	$({}^{234}_{92}\text{U})$	$2,1 \cdot 10^8$
Ραδόνιο	$({}^{222}_{86}\text{Rn})$	$5,74 \cdot 10^{15}$	Ουράνιο	$({}^{238}_{92}\text{U})$	$1,22 \cdot 10^4$
Ράδιο	$({}^{226}_{88}\text{Ra})$	$3,7 \cdot 10^{10}$			

Ολοκλήρωση της [7.5] δίνει:

$$dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}} : \text{νόμος της ραδιενέργειας} \quad [7.6]$$

όπου  $N_0 =$  αρχικά υπάρχοντες ραδιενεργοί πυρήνες



Η εκθετική ελάττωση του αριθμού των μη διασπασθέντων πυρήνων με την πάροδο του χρόνου αποδίδεται ποιοτικά στο σχήμα 7.2.

Ο χρόνος  $T_{1/2}$ , εντός του οποίου έχει διασπασθεί το ήμισυ των αρχικώς υπαρχόντων ραδιενεργών πυρήνων, καλείται **χρόνος υποδιπλασιασμού** ή **ημιζωή**. Ο χρόνος υποδιπλασιασμού μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση [7.6] θέτοντας  $N = N_0/2$ :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp[-\lambda T_{1/2}] \Leftrightarrow \frac{1}{2} = \exp[-\lambda T_{1/2}] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln[\exp[-\lambda T_{1/2}]] \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda T_{1/2} \Rightarrow T_{1/2} = -\frac{\ln(1/2)}{\lambda} = -\frac{\ln 1 - \ln 2}{\lambda} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}} : \text{χρόνος υποδιπλασιασμού} \quad [7.7]$$

Όπως βλέπουμε, ο χρόνος υποδιπλασιασμού εξαρτάται μόνο από την σταθερή διασπάσεων  $\lambda$

και είναι κατά συνέπεια χαρακτηριστικός για το συγκεκριμένο ραδιενεργό στοιχείο. Στον Πίνακα 7.5.3.α δίδεται ο χρόνος υποδιπλασιασμού ορισμένων από τα σπουδαιότερα ραδιενεργά νουκλίδια.

<b>Πίνακας 7.5.3α: Χρόνος υποδιπλασιασμού μερικών ραδιενεργών νουκλιδίων</b>					
Φώσφορος	$^{32}_{15}P$	14,3 d	Στρόντιο	$^{90}_{38}Sr$	29 α
Χλώριο	$^{36}_{17}Cl$	$3 \cdot 10^5 a$	Ράδιο	$^{226}_{88}Ra$	1601 α
Χλώριο	$^{38}_{17}Cl$	38 min	Ουράνιο	$^{234}_{92}U$	$2,5 \cdot 10^5 a$
Κάλιο	$^{42}_{19}K$	12,4 h	Ουράνιο	$^{235}_{92}U$	$7,1 \cdot 10^8 a$
Κοβάλτιο	$^{60}_{27}Co$	5,25 α	Ουράνιο	$^{238}_{92}U$	$4,5 \cdot 10^9 a$
Στρόντιο	$^{89}_{38}Sr$	54 d	Πλουτόνιο	$^{239}_{94}Pu$	$2,44 \cdot 10^4 a$

## 7.6 Επίδραση ραδιενεργούς ακτινοβολίας

Τόσο η φυσική όσο (και κυρίως) η τεχνητή ραδιενέργεια (βλ. κεφ. 7.8) βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές στην σύγχρονη Ιατρική, Βιολογία και Τεχνολογία γενικότερα. Οι εν λόγω εφαρμογές αποτελούν αντικείμενο εξειδικευμένων κλάδων των αντιστοίχων επιστημών και δεν είναι δυνατόν να αναλυθούν στα πλαίσια του παρόντος συγγράμματος. Εκείνο όμως το οποίο μπορούμε να επισημάνουμε, είναι ότι όλες αυτές οι εφαρμογές στηρίζονται στις βιολογικές και μη δράσεις της ραδιενεργούς ακτινοβολίας, τα κύρια γνωρίσματα των οποίων περιγράφουμε παρακάτω.

**Βιολογική δράση ραδιενέργειας:** Τα σωματίδια αλλά και τα φωτόνια προκαλούν κατά μήκος της διαδρομής τους τόσο τον ιονισμό ατόμων όσο και την διάσπαση μορίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση ασυνήθων χημικών αντιδράσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται μόνον μεταξύ ιονισμένων ατόμων. Εξάλλου η διάσπαση ακόμη και μεμονωμένων μορίων επηρεάζει την λειτουργία των κύτταρων, επειδή αυτή εξαρτάται ακριβώς από την συμπεριφορά μεμονωμένων μορίων. Έτσι η ραδιενέργεια μπορεί να προκαλέσει την νέκρωση ή (σχεδόν ακόμη χειρότερα) τον εκφυλισμό των προσβληθέντων κύτταρων. Ένας υγιής οργανισμός μπορεί φυσικά να αντιμετωπίσει τις παραπάνω βλάβες, μόνον όμως όταν περιορίζονται σε μερικά μόνο κύτταρα. Σε διαφορετική περίπτωση η ραδιενέργεια προκαλεί σωματικές και γενετικές βλάβες.

Τις μεγαλύτερες μεταβολές προξενούν τα σωματίδια α, επειδή προκαλούν - λόγω της μεγάλης τους μάζας - ιονισμούς κρούσεως ήδη σε πολύ μικρή διαδρομή. Από την άλλη έχουν ως εκ τούτου μικρή διεισδυτική ικανότητα. Έτσι είναι δραστικά μόνον όταν η πηγή τους βρε-

θεί εντός του οργανισμού. Αντιθέτως τα σωματίδια  $\gamma$  χαρακτηρίζονται από μικρή δραστηριότητα μεγάλη όμως διεισδυτικότητα. Το τελευταίο σε συνδυασμό με τις περιορισμένες δυνατότητες θωράκισης τις κάνει ιδιαίτερα επικίνδυνες. Τα σωματίδια  $\beta$  έχουν, όσον αφορά την δραστηριότητα και διεισδυτικότητα μια ενδιάμεση θέση.

**Μη βιολογική δράση της ραδιενέργειας:** Η επίδραση της ραδιενεργούς ακτινοβολίας επί των διαφόρων υλικών επηρεάζει τις ιδιότητές τους μέσω δύο κυρίως μηχανισμών. Κατά πρώτον μέσω της διάσπασης μορίων, των οποίων η επανένωση γίνεται συχνά σε διαφορετική διάταξη από πριν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των φυσικών κυρίως ιδιοτήτων του συγκεκριμένου υλικού. Η αναδιάταξη αυτή των μορίων έχει μεγαλύτερη επίδραση στην περίπτωση υλικών, τα οποία αποτελούνται από μακρομόρια. Έτσι πολλά πλαστικά μπορούν μέσω της ραδιενέργειας να αποκτήσουν π.χ. μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αντοχή.

Η έκθεση εξάλλου ενός υλικού με κρυσταλλική δομή σε σωματίδια υψηλής ενέργειας μπορεί να προκαλέσει εκσφενδονισμό μεμονωμένων ιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του κρυστάλλου, όπως π.χ. την διαύγεια του, το χρώμα του, την ηλεκτρική του αγωγιμότητα κ.λ.π.

Υπάρχουν βέβαια και υλικά (όπως τα μέταλλα και τα κεραμικά), τα οποία είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στην έκθεση σε ραδιενεργή ακτινοβολία. Μόνον πάρα πολύ έντονη και μακροχρόνια έκθεση μπορεί να μεταβάλλει, αισθητά τις ιδιότητές τους.

## 7.7 Δοσιμετρία

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την επίδραση ραδιενεργούς ακτινοβολίας (γενικότερα κάθε *ιονίζουσας* ακτινοβολίας, όπως π.χ. ακτίνες Röntgen, ακτίνες ουδετερονίων κ.λ.π.) επί των διαφόρων υλικών εισάγουμε την δόση ενέργειας  $D$  και τον ρυθμό δόσεως  $\dot{D}$ :

**Απορροφηθείσα δόση ενέργειας** (ή **ακτινοβολίας**) καλείται το πηλίκο της απορροφηθείσας από ένα υλικό ενέργειας  $E$  προς την μάζα  $m$  του υλικού:

$$D = \frac{dE}{dm} \stackrel{\text{για ομοιόμορφη απορρόφηση}}{=} \frac{E}{m} \quad [7.8]$$

Μονάδα μέτρησης:  $[D] = \frac{J}{kg} \equiv Gy(Gray)^2$

**Ρυθμός δόσεως**  $\dot{D}$  καλείται το πηλίκο της δόσεως προς τον χρόνο απορρόφησής της:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \stackrel{\text{αν σταθερός } D}{=} \frac{D}{t} \quad [7.9]$$

Όσον αφορά την βιολογική δράση της ραδιενεργούς ακτινοβολίας, θα πρέπει να σημειώσουμε, ότι δεν περιγράφεται πλήρως μέσω της δόσεως, επειδή εξαρτάται και από το είδος της ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό εισήχθη η ισοδύναμη ή **βιολογικά ισοδύναμη δόση**  $D_\beta$  ως μέτρο της δράσης της ακτινοβολίας επί του ανθρωπίνου οργανισμού. Η βιολογική δόση υπο-

<sup>2</sup> Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν το rad: 1Gy = 100 rad.

λογίζεται πολλαπλασιάζοντας την δόση  $D$  με τον χαρακτηριστικό για το είδος της ακτινοβολίας «**παράγοντα ποιότητας**»  $Q$ :

$$D_{\beta} = QD \quad [ 7.10 ]$$

Η μονάδα μέτρησης της βιολογικής δόσης ονομάζεται “**Sievert**” ( $Sv$ )<sup>3</sup>.

Ο παράγοντας ποιότητας είναι ουσιαστικά αδιάστατο μέγεθος, το οποίο υπολογίζεται πειραματικά, συγκρίνοντας το βιολογικό αποτέλεσμα της απορροφηθείσας δόσης ενός συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας με εκείνο, το οποίο επιφέρει δόση 0,01Gy ακτινών Röntgen. Αυτό σημαίνει ουσιαστικά, ότι η βιολογική δόση  $D_{\beta}$  δεν αποτελεί γνήσιο φυσικό μέγεθος. Στον Πίνακα 7.7 δίδεται ο παράγοντας ποιότητας ορισμένων ειδών ακτινοβολίας.

Ακτίνες Röntgen			
	1	Αργά ουδετερόνια	3
» $\gamma$	1	γρήγορα ουδετερόνια	10
» $\beta$	1	γρήγορα πρωτόνια	10
» $\alpha$	10 ~20	βαρέα πυρηνικά θραύσματα	20

Στις σύγχρονες κοινωνίες έχουν θεσπισθεί ως **ανώτατο όριο βιολογικής δόσης τα 50 mSv/a** με την προϋπόθεση, ότι δεν θα ξεπεραστούν τα **30 mSv/(13 εβδομάδες)** και τα **50 · (ηλικία σε έτη - 18)mSv** για όλη την διάρκεια της ζωής. Σημειωτέον δε ότι οι τιμές αυτές ισχύουν για άτομα, τα οποία έχουν **επαγγελματική επιβάρυνση** και υπόκεινται σε προσωπική μέτρηση δόσεως. Για άτομα, τα οποία εκτίθενται ευκαιριακά σε ακτινοβολία, τα ισχύοντα όρια είναι το 1/10 των παραπάνω, για μεγάλες δε μάζες πληθυσμού το 1/100. Στον Πίνακα 7.7α περιέχεται, η φυσιολογική δράση διαφόρων βιολογικών δόσεων ακτινών  $\gamma$ .

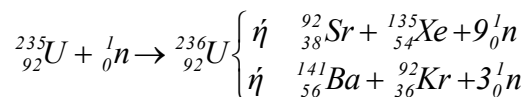
Απορροφηθείσα δόση	Δράση
< 0,5 Sv	Μικρή προσωρινή αλλαγή δεικτών αίματος
0,8 ~ 1,20 Sv	Αδιαθεσία και εμετοί στο 10% των περιπτώσεων
4 ~ 5 Sv	Θάνατοι σε ποσοστό 50% εντός 30 ημερών. Όσοι επιζήσουν συνέρχονται εντός 6 μηνών.
5,5 ~ 7,5 Sv	Θάνατοι σε ποσοστό 100%
50 Sv	Βαριά προσβολή του νευρικού συστήματος. Θάνατος εντός μιας εβδομάδας

<sup>3</sup> Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν το rem: 1 Sv = 100 rem.

## 7.8 Τεχνητή ραδιενέργεια. Σχάση

Ακόμη και ευσταθείς πυρήνες είναι δυνατόν να μετατραπούν σε ραδιενεργούς, αν τους «βομβαρδίσουμε» με κατάλληλα «βλήματα», όπως πρωτόνια, ουδετερόνια και σωματίδια α. Η κατ' αυτόν τον τρόπο εκπεμπόμενη ραδιενέργεια καλείται **τεχνητή ραδιενέργεια** και αποτελείται από τα ίδια σωματίδια με την φυσική ραδιενέργεια. Φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια είναι ως εκ τούτου το ίδιο επικίνδυνες για τους ζώντες οργανισμούς.

Από όλες τις δυνατότητες τεχνητής διάσπασης ενός αρχικά ευσταθούς πυρήνα ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον έχει η από τους Hahn και Strassmann το 1938 ανακαλυφθείσα και ως **σχάση** χαρακτηριζόμενη. Πρόκειται για την διάσπαση ενός (βαρέως) πυρήνα σε δύο περίπου ισόμαζα θραύσματα, και όχι απλώς την εκπομπή μεμονωμένων σωματιδίων α, β, γ, p, n κ.λ.π. Σημειωτέον ότι λίγοι μόνον από τους υπάρχοντες στην φύση πυρήνες μπορούν να υποστούν σχάση. Ο γνωστότερος όλων εκείνος του Ουρανίου  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Η σχάση του εν λόγω πυρήνα επιτυγχάνεται μέσω βομβαρδισμού με «αργά» (βλ. παρακάτω) ουδετερόνια και εξελίσσεται ποικιλοτρόπως. Η παρακάτω **πυρηνική αντίδραση** περιγράφει δύο από τις πολλές δυνατότητες:



Κατά την σχάση ενός πυρήνα εκλύεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας, η οποία καλείται **πυρηνική ενέργεια** και οφείλεται στο έλλειμμα μάζας: το άθροισμα των μαζών των θραυσμάτων και των εκπεμπομένων σωματιδίων είναι μικρότερο από την μάζα του αρχικού πυρήνα και των χρησιμοποιηθέντων βλημάτων. Π.χ. στην παραπάνω περίπτωση του Ουρανίου το έλλειμμα μάζας ανέρχεται σε 1% περίπου. Έτσι 1 kg Ουρανίου δίδει περίπου  $7 \cdot 10^{13}$  J, εκ των οποίων το 83% παραλαμβάνεται ως κινητική ενέργεια των θραυσμάτων, το 3% ως κινητική ενέργεια των ουδετερονίων και το 3% εκπέμπεται με μορφή ακτινοβολίας (όλα τα %% στο περίπου).

## 7.9 Αλυσιδωτή αντίδραση

Τα κατά την σχάση παραγόμενα **δευτερογενή**, όπως λέγονται, ουδετερόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη άλλων σχάσεων, αφού προηγουμένως επιβραδυνθούν σε «θερμικές» (βλ. παρακάτω) ταχύτητες. Εφόσον δε διαθέτουμε μια ελάχιστη, «κρίσιμη» ποσότητα σχάσιμου υλικού, έχουμε μια αυτοσυντηρούμενη, **αλυσιδωτή αντίδραση**.

Η αλυσιδωτή αντίδραση μπορεί να είναι **μη ελεγχόμενη**, όπως π.χ. στην περίπτωση της **ατομικής βόμβας**: Το σχάσιμο υλικό  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ή (Πλουτώνιο)  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  είναι αρχικά χωρισμένο σε αρκετές υποκρίσιμες ποσότητες. Όταν θέλουμε να εκραγεί φέρουμε τις ποσότητες αυτές σε επαφή με την βοήθεια κατάλληλα τοποθετημένων χημικών εκρηκτικών. Έτσι η μάζα γίνεται υπερκρίσιμη και αρχίζει η αλυσιδωτή αντίδραση, ενώ τα ανθεκτικά τοιχώματα του περιβλήματος εμποδίζουν την εκτόξευση σχάσιμου υλικού πριν την «καύση» του.

Αντιθέτως εις τους λεγόμενους **πυρηνικούς αντιδραστήρες** μπορούμε με διάφορα απλά, μηχανικά μέσα να ελέγχουμε την ταχύτητα μιας αλυσιδωτής αντίδρασης, επιτυγχάνοντας έτσι την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας για την παραγωγή ισχύος.



## 7.9 Αλυσιδωτή αντίδραση

Ένας τυπικός πυρηνικός αντιδραστήρας αποτελείται ουσιαστικά από τα ακόλουθα συστήματα:

1. **Σχάσιμο υλικό («καύσιμο»):** Συνήθως πρόκειται για *εμπλουτισμένο* Ουράνιο, δηλαδή μείγμα  ${}_{92}^{238}\text{U}$  (χρόνος υποδιπλασιασμού  $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ a}$ ) και  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8 \text{ a}$ ), στο οποίο το σχάσιμο  ${}_{92}^{235}\text{U}$  περιέχεται σε αναλογία μεγαλύτερη εκείνης (0,7%), με την οποία απαντάται στην φύση. Το σχάσιμο υλικό περιέχεται συνήθως με την μορφή ράβδων, οι οποίες αποτελούνται από μεμονωμένα δισκία εμπλουτισμένου ουρανίου.
2. **Επιβραδυντής:** Τα εκπεμπόμενα κατά την σχάση, δευτερογενή ουδετερόνια πρέπει να επιβραδυνθούν το ταχύτερο δυνατό σε ταχύτητες της τάξεως 2000 m/s («*θερμικά ουδετερόνια*»). Διαφορετικά δεν προκαλούν σχάση άλλων πυρήνων  ${}^{235}\text{U}$ , αλλά παγιδεύονται από μη σχάσιμους πυρήνες  ${}^{238}\text{U}$ . Η εν λόγω επιβράδυνση γίνεται μέσω ελαστικής κρούσεως με πυρήνες μιας ουσίας, του *επιβραδυντού*, εντός του οποίου είναι «βυθισμένοι» οι ράβδοι Ουρανίου. Οι πυρήνες του επιβραδυντού πρέπει να είναι ελαφροί και να μην απορροφούν ουδετερόνια. Τις ιδιότητες αυτές έχουν το βαρύ ή σύνηθες ύδωρ καθώς και ο καθαρός Άνθρακας με την μορφή Γραφίτη.
3. **Ράβδοι ρύθμισης:** Η ισχύς του αντιδραστήρα μπορεί να αυξομειωθεί με την βοήθεια ράβδων ή πλακών από Κάδμιο ή Βάριο, οι οποίες παρεμβάλλονται μεταξύ των ράβδων Ουρανίου και απορροφούν μέρος των δευτερογενών ουδετερονίων.
4. **Ψυκτικό ρευστό:** Η εκλύομενη κατά την πυρηνική σχάση ενέργεια (ένα γραμμάριο φυσικού Ουρανίου παράγει τόση ενέργεια, όση περίπου και 125 τόνοι Άνθρακα!) αποδίδεται αρχικά, κυρίως ως κινητική ενέργεια των θραυσμάτων. Μέσω κρούσεων αυτών με το περιβάλλον μετατρέπεται στην συνέχεια σε θερμότητα, η οποία απάγεται με την βοήθεια καταλλήλου ψυκτικού ρευστού. Τέτοιο μπορεί να είναι για παράδειγμα σύνηθες ή βαρύ ύδωρ, το οποίο μπορεί να παίζει συγχρόνως και τον ρόλο του επιβραδυντού. Το ψυκτικό ρευστό αποδίδει την θερμότητα αυτή σε κατάλληλους εναλλάκτες, προκειμένου να μετατραπεί με την βοήθεια ατμοστροβίλων σε ηλεκτρική ενέργεια.

### Προβληματισμοί

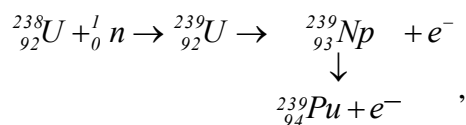
Η μέσω πυρηνικών αντιδραστήρων ειρηνική αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας περιήλθε (κυρίως μετά το ατύχημα του Τσερνομπίλ) τα τελευταία χρόνια σε κατάσταση έντονης αμφισβήτησης, λόγω των **προβλημάτων** τα οποία μπορεί να προκαλέσει σε περίπτωση ατυχήματος ή κακού σχεδιασμού.

Συγκεκριμένα, όλοι οι κατά την σχάση παραγόμενοι πυρήνες είναι ραδιενεργοί και εκπέμπουν ακτινοβολία β και γ. Το 10% περίπου της εκλύομενης ενέργειας απάγεται μέσω της εν λόγω ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μεγάλη εμβέλεια και καταστροφική δράση κυρίως των ακτινών γ επιβάλλει την λήψη πολυδάπανων (και ως εκ τούτου στις πρώην «ανατολικές» κυρίως χώρες ανύπαρκτων) και πολύπλοκων προστατευτικών μέσων.

Ραδιενεργά καθίστανται εξάλλου και όλα τα εντός της «ψυχής» του αντιδραστήρα ευρι-

σκόμμενα υλικά (π.χ. το ψυκτικό ρευστό, οι ράβδοι του σχάσιμου υλικού, ο επιβραδυντής, τα υλικά των τοιχωμάτων κ.λ.π.), τα οποία δεν επιτρέπεται ως εκ τούτου να έλθουν σε επαφή με το περιβάλλον. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί όμως να αποκλεισθεί λόγω της πάντα υπαρκτής πιθανότητας ατυχήματος, όπως δυστυχώς είδαμε και στην πραγματικότητα. Άλλωστε και υπό ομαλές συνθήκες λειτουργίας σοβαρότατο παραμένει το πρόβλημα της ασφαλούς αποθήκευσης των **ραδιενεργών αποβλήτων**, των «κομμένων» δηλαδή ράβδων ουρανίου.

Αν κάποιος τώρα πάρει υπόψη του το γεγονός, ότι τα σχάσιμα υλικά είναι στην φύση σχετικά σπάνια, τότε αντιλαμβάνεται ότι η πυρηνική ενέργεια δεν μπορεί να παίξει τον ρόλο που θέλουν να τις δώσουν κάποιες χώρες, απλώς και μόνο για να σκεπάσουν από την παγκόσμια κοινή γνώμη τον ουσιαστικό σκοπό λειτουργίας των αντιδραστήρων: την **παραγωγή πλουτωνίου**,



**βομβών!**

υλικού απαραίτητου για την **κατασκευή πυρηνικών**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. BERKLEY: ΦΥΣΙΚΗ (Τόμος 2) ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ Ε.Μ.Π, Αθήνα 1984
2. Βουδούρης Γ. : Ηλεκτροτεχνία, Έκδοση 3<sup>η</sup>, Αθήνα 1959
3. Dobrinski/Krakau/Vogel: Physik für Ingenieure, Έκδοση 4<sup>η</sup>, Teubner Stuttgart, 1976
4. Feynman, Eighton, Sands: The Feynman Lectures of Physics, Volume II, Έκδοση 16<sup>η</sup>, Addison – Wesley Publishing Company, 1983
5. Gerthsen- Kneser- Vogel: PHYSIK, Έκδοση 13<sup>η</sup>, Springer- Verlag, Berlin, 1977.
6. Halliday- Resnick: ΦΥΣΙΚΗ (Μέρος Β), Εκδόσεις Γ.Α.Πνευματικός, Αθήνα 1976.
7. Hering, Martin, Stohrer, Physik für Ingenieure, Έκδοση 5<sup>η</sup>, VDI Verlag, 1995.
8. Jackson J.D.: Klassische Elektrodynamik, Έκδοση 2<sup>η</sup>, de Gruyter, Berlin, 1983.
9. Kittel Ch.: Einführung in die Festkörperphysik, Έκδοση 5<sup>η</sup>, Oldenburg Verlag, München, 1980.
10. Kuchling, Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch, Thun 1979
11. Wagner M.: Elemente der Theoretischen Physik 2, rororo vieweg Physik, 1977.
12. Feldmann: Repetitorium der Ingenieur- Mathematik, Έκδοση 6<sup>η</sup>, Hannover 1985.