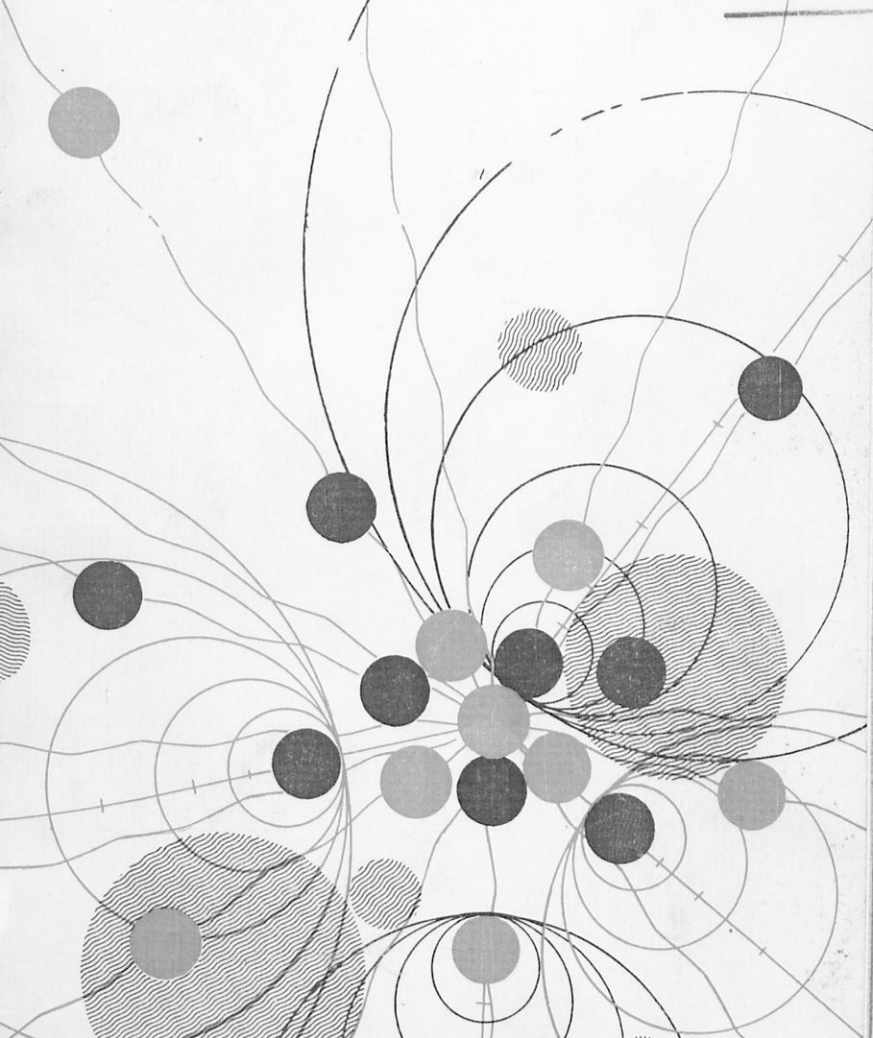


**002
ΚΛΣ
ΣΤ3
180**

Ε 3^η φ. 5
Κρέμου (2)

Δ. ΚΡΕΜΟΥ

ΠΥΡΗΝΙΚΗ



Ψηφιοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής

Δ. ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΙΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

Ε 3^η 053
Καύρα (α)

ΠΥΡΗΝΙΚΗ



Καύρα (α)
Σε 1942

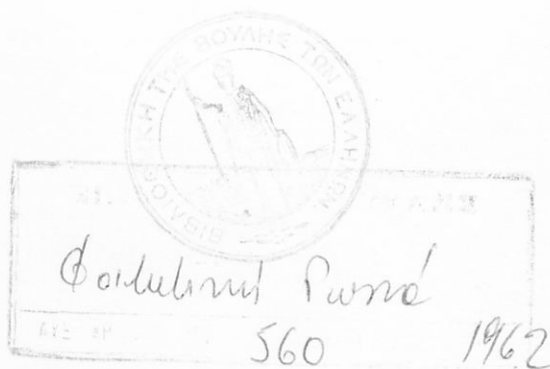
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

Δ. ΚΡΕΜΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΟΥ ΚΟΛΛΕΓΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

Ε 3^η ΦΣΣ

Κέρμα (8)

Π Υ Ρ Η Ν Ι Κ Η



ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟΝ "ΦΟΙΤΗΤΙΚΗ ΓΩΝΙΑ," - ΑΣΚΛΗΠΙΟΥ 3
ΑΘΗΝΑΙ - 1962

002
M8
ET3
180

ΕΡΕΥΝΑ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ

Π Υ Ρ Η Ν Ι Κ Η

ΕΡΕΥΝΑ - ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ

Στὸ γιό μου τὸν Παῦλο

Καταγραφή των εργασιών της

Τὸ περιεχόμενο τοῦ βιβλίου αὐτοῦ ἀντιστοιχεῖ σὲ μιὰ σειρά μαθημάτων, ποὺ ἐδίδαξα στὰ 1961 στὸ Μορφωτικὸ Σύλλογο «Ἀθήναιον».

Προσπάθειά μου εἶναι νὰ δώσω μιὰ σύντομη καὶ σαφῆ εἰκόνα σχετικὰ μὲ τὴν πυρηνικὴ ἐνέργεια ἀπ' τὴ θεωρητικὴ τῆς καὶ τὴν πρακτικὴ τῆς πλευρά.

Το παρόν βιβλίο είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας
του Ινστιτούτου Εκπαιδευτικής Πολιτικής με το
Εργαστήριο Ψηφιακών Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση
του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου της Αθήνας.
Η επιμέλεια του βιβλίου ανήκει στην Επιστήμονα
Καθηγήτρια Ειδικής Παιδαγωγικής, Δρ. Ελένη
Καλλιγά, η οποία ανέλαβε και την επιμέλεια των
εικόνων και των παραπομπών.

1. ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΚΑΙ Η ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ

1.1 Τα τελευταία είκοσιπέντε χρόνια τοῦ δέκατου ἔνατου αἰώνα μποροῦν νὰ θεωρηθοῦν σταθμὸς γιὰ τὴν ἱστορία τῶν φυσικῶν ἐπιστημῶν. Σταθμὸς, γιὰτὶ συμπίπτουν μὲ τὴν ἀνακάλυψη βασικῶν ἀρχῶν καὶ τὴ διατύπωση — καὶ κατανόηση — θεμελειωδῶν νόμων, ποὺ μᾶς ἔδωσαν τὴ δυνατότητα νὰ γνωρίσουμε τὸν ἐσωτερικὸ κόσμον τῆς ὕλης — τὸ **μικρόκοσμον** τῆς φυσικῆς, ὅπως τὸν λέμε σήμερον.

Ὁ μικρόκοσμος αὐτὸς ἔχει γιὰ μᾶς διπλὴ σημασία. Κατὰ πρῶτον λόγον μᾶς ἀνοίγει καινούργιους ὁρίζοντες γιὰ τὴ γνώση αὐτῆ καθ' ἑαυτή, κ' ὕστερον μᾶς προσφέρει μιὰ νέα δύναμη, μιὰ τεράστια δύναμη — τὴν **ἀτομικὴ ἐνέργεια** — ποὺ ἢ μελλοντικὴ χρησιμοποίησή της, σὲ εἰρηνικοὺς τομεῖς, θ' ἀλλάξει ἀναμφισβήτητα τὴν ὄψη τοῦ κόσμου, παρέχοντας στὸν ἀνθρώπον μέσα γιὰ τὸ ἀνέβασμα τοῦ πολιτισμοῦ του.

1.2 Ἀπ' τὰ παλιὰ κιόλας χρόνια, ἀπ' τὴν ἐποχὴ τῶν ἀρχαίων ἐλλήνων φιλοσόφων τῆς Ἰωνίας (Δημόκριτον, Ἐμπεδοκλῆ κλπ.), εἶχε διατυπωθῆ ἡ θεωρία πὸς ἡ ὕλη δὲν εἶναι κάτι τὸ συμπαγές, ἀλλὰ πὸς τὸ κάθε ὑλικὸ ἀντικείμενον εἶναι φτιαγμένο, **σὲ ἀσυνεχῆ μορφή**, ἀπὸ ἓνα μεγάλο πλῆθος ἀπὸ πολὺ μικρὰ σωματίδια, ποὺ ὁ Δημόκριτος πρωτονόμασε **ἀτόμους**. Βέβαια οἱ ἀτομοὶ τοῦ Δημόκριτου δὲν ταυτίζονται μὲ τὰ ἀτομα κάτω ἀπ' τὴ σημερινή τους ἔννοια, ὅμως ἡ διατύπωση αὐτὴ μπορούμε νὰ ποῦμε πὸς στάθηκε ἡ ἀρχὴ γιὰ τὸ πλάτεμα τῆς γνώσης.

1.3 Παρ' ὅλα αὐτὰ ἡ θεωρία τῆς συγκρότησης τῆς ὕλης ἀπὸ κομματάκια, **μὴ διαίρετά** ἐπ' ἄπειρον, στάθηκε σὰ φιλοσοφικὴ μόνον δοξασία καὶ σὰ λογικὴ ὑπόθεση γιὰ πολλοὺς αἰῶνες. Στὸν ἄγγλον Dalton ἀνήκει ἡ τιμὴ τῆς πρώτης ἐπιστημονικῆς ἐπιβεβαίωσης ὅτι ὅλα τὰ σώματα — στερεά, ὑγρά ἢ ἀέρια, ὁρ-

γανικά ή ανόργανα, ζωντανά ή νεκρά — είναι φτιαγμένα από σωματίδια που ονομάζουμε **μόρια**.

Σήμερα ξέρουμε πώς κάθε υλικό σώμα είναι σύνολο μορίων κι' άκόμα, πώς όλα τα μόρια δέν είναι όμοια μεταξύ τους. Για τó κάθε χημικό είδος υπάρχουν διαφορετικά μόρια, διαφορετικά στο σχήμα και στο μέγεθος και — σαν αποτέλεσμα — στις χημικές ιδιότητές τους. Έτσι, σαν παράδειγμα, όλα τα μόρια του νερού είναι όμοια μεταξύ τους, αλλοιώτικα όμως άπ' τα μόρια του άλατιού που, με τή σειρά τους, είναι πάλι μεταξύ τους όμοια.

1.4 Σήμερα γνωρίζουμε γύρω στα 1.200.000 διάφορα χημικά είδη, γεγονός που μεταφράζεται στην ύπαρξη 1.200.000 διαφορετικών ποικιλιών μορίων.

Σε τί όμως συνίσταται ή διαφορά ανάμεσά τους; Για να δωθή άπάντηση στο ερώτημα αυτό πρέπει να προχωρήσουμε στην έσωτερική εξέταση του κάθε μορίου, που δέν είναι άπλό αντικείμενο αλλά σύνθετο.

Κάθε μόριο είναι, κατά κανόνα, σύνολο άπο πλό μικρά υλικά σωματίδια που ονομάζουμε **άτομα**. Σ' αντίθεση όμως με τα μόρια, τα άτομα περιορίζονται σε πολύ λίγες ποικιλίες — άπ' τήν άποψη μεγέθους και σχήματος — ποικιλίες που συμποσούνται γύρω στις έκατό μόνο.

Στα υλικά σώματα ή κατά ποιοτικό και ποσοτικό τρόπο συγκρότηση των δλίγων μορφών ατόμων δημιουργεί τó τεράστιο πλήθος των διαφόρων ειδών μορίων. Άς πάρουμε, σαν παράδειγμα, δυό μόνον είδη ατόμων κι' άς τα ονομάσουμε **άτομα A** και **άτομα B** αντίστοιχα.

Ένα μόριο μπορεί να συγκροτηθ ή άπο ένα άτομο A και ένα B (**μόριο AB**), όμως μπορεί να συγκροτηθ ή και μόριο με δυό άτομα A και ένα B (**μόριο A₂B**), άλλο μόριο με δυό B και ένα A (**μόριο AB₂**) κ.ο.κ.

Καθ' ένα άπ' τα μόρια αυτά (AB, A₂B, AB₂,) θ' αντιπροσωπεύει κι' άπο ένα διάφορο χημικό είδος. Έτσι, αν τó μόριο AB συνιστά, σαν σύνολο, ένα σώμα υγρό, άχρωμο κι'

ελαφρό, δὲν ἀποκλείεται τὸ μόριο A_2B νὰ συνιστᾷ σῶμα δλό-
τελα διάφορο, δηλαδὴ στερεό, ἔγχρωμο καὶ βαρῦ.

Ἔτσι καὶ μὲ δυὸ μόνον εἶδη ἀτόμων εἶναι — θεωρητικὰ —
δυνατὴ ἡ συγκρότηση ἄπειρου πλήθους διαφορετικῶν μορίων.
Κατὰ μείζονα λόγο, ἡ συγκρότηση αὐτὴ εἶναι δυνατὴ — καὶ
πραχτικὰ — σὲ μεγάλη ποικιλία, ἀπ' τὸ γεγονὸς ὅτι τὰ εἶδη
ἀτόμων δὲν εἶναι δυό, ἀλλὰ γύρω στὰ ἑκατό.

1.5 Κι' ἄς πάρουμε ἓνα πῶ συγκεκριμένο παράδειγμα. Ἡ
ζάχαρη — ἡ κοινὴ ζάχαρη — εἶναι φτιαγμένη ἀπὸ μόρια συγ-
κροτημένα ἀπὸ ἄτομα τριῶν λογίων — ἄτομα ἄνθρακα (C),
ὀξυγόνου (O) καὶ ὕδρογόνου (H) — καὶ μάλιστα σὲ τρόπο
πὺν κάθε μόριο ζάχαρης νὰ περιέχει 12 ἄτομα C, 22 ἄτομα H
καὶ ἔντεκα ἄτομα ὀξυγόνου. Γιὰ τὸ λόγο αὐτὸ τὸ μόριο τῆς ζά-
χαρης τὸ γράφουμε $C_{12}H_{22}O_{11}$.

Παράλληλα ὅμως καὶ τὸ οἰνόπνευμα — ὕλικὸ δλότελα διά-
φορο ἀπ' τὴ ζάχαρη — ἀποτελεῖται ἀπὸ μόρια φτιαγμένα ἀπὸ
ἄτομα C, ἄτομα O καὶ ἄτομα H, σὲ διαφορετικὸ πλῆθος, καὶ
μάλιστα μόρια μὲ δυὸ ἄτομα C, ἕξι H καὶ ἓνα μόνο O, ἔτσι
πὺν νὰ συμβολίζεται μὲ τὸν τύπο C_2H_6O .

Ὅπως φαίνεται καθαρὰ ὅλες οἱ διαφορὲς ἀνάμεσα στὶς φυ-
σικὲς καὶ χημικὲς ιδιότητες τῆς ζάχαρης — ἀπ' τὴ μιὰ μεριά —
καὶ τοῦ οἰνοπνεύματος — ἀπ' τὴν ἄλλη — δὲν μποροῦν παρὰ
νὰ ἔχουν σὰν αἰτία τὴ διαφορετικὴ ποσοτικὴ σύνθεση τῶν μο-
ρίων τους, παρ' ὅλη τὴν ἀπόλυτη ποιοτικὴ ταυτότητά τους.

1.6 Ὅπως ὅμως γιὰ τὰ μόρια, ἔτσι καὶ γιὰ τὰ ἄτομα
μπαίνει ἡ ἴδια ἐρώτηση. Σὲ τί συνίσταται ἡ διαφορὰ ἀνάμεσα
στὸ κάθε εἶδος ἀτόμων; Τί σημαίνει ὅτι τὸ ἄτομο A εἶναι διά-
φορο ἀπ' τὸ B; Τί σημαίνει ὅτι τὰ ἄτομα τοῦ ἄνθρακα (C)
εἶναι ἀλλοιώτικα σὲ σχέση μὲ τὰ ἄτομα τοῦ ὀξυγόνου (O);

Γιὰ νὰ δώσουμε καὶ σ' αὐτὴν τὴν ἐρώτηση μιὰν ἀπάντηση
πρέπει νὰ λάβουμε ὑπ' ὄψη μας πὺς καὶ τὰ ἄτομα εἶναι σωμα-
τίδια σύνθετα, σὲ τρόπο πὺν οἱ ποιοτικὲς διαφορὲς τους νὰ
μποροῦν ν' ἀποδοθοῦν στὴ διαφορετικὴ ἐπὶ μέρους συγκρό-
τησή τους.

“Υστερα από μελέτες κι’ έρευνες έξιηντα περίπου χρόνων διατυπώθηκε ή θεωρία, πού επιβεβαιώθηκε και πειραματικά, πώς όλα τα άτομα είναι συνδυασμοί από τριών λογίων μικρότερα σωματίδια, δηλαδή πρωτόνια (p), ήλεκτρόνια (e) και νετρόνια (n).

Όλα τα άτομα, με μιὰ μόνο εξαίρεση για τὸ άτομο τοῦ ὕδρογόνου (1), περιέχουν πρωτόνια, νετρόνια κι’ ήλεκτρόνια, σὲ διαφορετικό ἐκάστοτε ἀριθμό. Ἡ ποσοτική διαφορά — στὸ πλήθος τῶν p, n, e — δὲν μπορεῖ παρὰ νὰ εἶναι ἡ αἰτία ὅλων τῶν ποιοτικῶν διαφορῶν ἀνάμεσα στὰ διάφορα εἶδη ἀτόμων.

Σὰν παράδειγμα, τὸ άτομο τοῦ ἀνθρακα (C) εἶναι φτιαγμένο ἀπὸ 6p, 6n κι’ 6e, και εἶναι ὁλότελα διαφορετικό ἀπ’ τὸ άτομο τοῦ σιδήρου (Fe) πού εἶναι φτιαγμένο ἀπὸ 26p, 30n και 26e.

Ἀπ’ ὅλα αὐτὰ βγαίνει τὸ συμπέρασμα πὼς, σὲ τελευταία ἀνάλυση, ὅλες οἱ μορφές τῆς ὕλης περιέχουν συγκροτήματα ἀπὸ τριῶν μόνον λογίων σωματίδια : πρωτόνια, νετρόνια, ήλεκτρόνια.

Ἀπ’ τὰ τρία αὐτὰ εἶδη προκύπτουν, σὰν ἄμεσοι συνδυασμοί, τὰ άτομα — συμποσούμενα σὲ 100 περίπου εἶδη — κι’ ἀπ’ τοὺς συνδιασμοὺς τῶν ἀτόμων τὰ μόρια, πού φτάνουν στὸν τεράστιο ἀριθμὸ τῶν 1.200.000, πάνω - κάτω, διαφορετικῶν συνδυασμῶν.

1.7 Πρὶν προχωρήσουμε στὴν παραπέρα ἐξέταση τῶν ὑποατομικῶν συστατικῶν (p, n, e), εἶναι ἀπαραίτητο νὰ ρίξουμε μιὰ ματιὰ πάνω στὸ μέγεθος τῶν ἀτόμων και τῶν μορίων, πὸ σωστὰ πάνω στὴν τάξη μεγέθους τους. Λέμε πὼς τὰ μόρια, τὰ άτομα και τὰ ὑποατομικά συστατικά τους (p, n, e) εἶναι **ἀπείρως μικρὰ σωματίδια**, μὴ ὁρατὰ μετὰ τὸ ὀποιοδήποτε μικροσκόπιο. Ὅμως αὐτὸ δὲ φθάνει, πρέπει νὰ σχηματίσουμε μιὰ πὸ σαφῆ εἰκόνα για τὸ πόσο μικρὰ εἶναι. Κι’ ἄς πάρουμε, για τὸ σκοπὸ αὐτό, ἓνα συγκεκριμένο παράδειγμα. Ἄν ἐξετάσουμε μιὰ σταγόνα νερό, μιὰ συνηθισμένη σταγόνα βάρους ἑνὸς

(1) Τὸ άτομο τοῦ ὕδρογόνου, τοῦ συνηθισμένου ὕδρογόνου, περιέχει μόνον ἓνα p και ἓνα e.

ΠΙΝΑΚΑΣ — 1
ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΔΗ ΑΤΟΜΩΝ

(Z : πλήθος πρωτονίων, N : πλήθος νετρονίων, E : πλήθος ηλεκτρονίων σε ουδέτερο άτομο).

	Σύμβ.	Πυρήνας		E	Νουκλεόνια (Z + N)
		Z	N		
Υδρογόνο	${}_1\text{H}^1$	1	0	1	1
Βαρύ υδρογόνο	${}_1\text{H}^2$	1	1	1	2
Άνθρακας	${}_6\text{C}^{12}$	6	6	6	12
Άζωτο	${}_7\text{N}^{14}$	7	7	7	14
Όξυγόνο	${}_8\text{O}^{16}$	8	8	8	16
Νάτριο	${}_{11}\text{Na}^{23}$	11	12	11	23
Χλώριο	${}_{17}\text{Cl}^{35}$	17	18	17	35
Άσβέστιο	${}_{20}\text{Ca}^{40}$	20	20	20	40
Σίδηρος	${}_{26}\text{Fe}^{56}$	26	30	26	56
Άργυρος	${}_{47}\text{Ag}^{107}$	47	60	47	107
Χρυσός	${}_{79}\text{Au}^{197}$	79	118	79	197
Μόλυβδος	${}_{82}\text{Pb}^{207}$	82	125	82	207
Ράδιο	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	88	138	88	226
Ουράνιο	${}_{92}\text{U}^{238}$	92	146	92	238
Μεντελέβιο	${}_{101}\text{Mv}^{256}$	101	155	101	256

χιλιοστογράμμου (1 mgr), βρίσκουμε — ύστερα από ύπολογισμούς — πώς περιέχει μέσα της γύρω στα 6.10^{19} μόρια, δηλαδή μόρια τόσα πού ν' αποδίδονται μ' έναν αριθμό με πρωτοψηφίο τὸ 6 ἀκολουθούμενο ἀπὸ 19 μηδενικά. Σαφέστερη ὁμως εἰκόνα σχηματίζουμε ἂν σκεφτοῦμε πώς, γιὰ νὰ μετρήσουμε τὸ πλῆθος αὐτὸ — μ' ἕναν ρυθμὸ ἑνὸς ἑκατομμυρίου μορίων στὸ δευτερόλεπτο — θὰ χρειαστοῦμε πάνω ἀπὸ ἕνα ὀλόκληρο ἑκατομμύριο χρόνια!

Βέβαια ὅλα τὰ μόρια δὲν εἶναι οὔτε τόσο μικρὰ οὔτε τόσο μεγάλα, ὅπως εἶναι τὰ μόρια τοῦ νεροῦ, ὅμως φαίνεται καθαρὰ πὼς εἶναι τόσο ἀπειροελάχιστο τὸ μέγεθός του πὸ οὔτε κὰν σκέψη δὲ γίνεται γιὰ παρατήρηση μὲ μικροσκόπιο. Τὰ συμπεράσματα αὐτὰ βγῆκαν ἀπὸ καθαρὰ λογικοὺς ὑπολογισμοὺς, βασισμένους στὴν παρατήρηση, κι' ὀφείλονται κυρίως στὸν αὐστριακὸ J. Loschmidt (1865).

1.8 Κι' ἄς ἔρθουμε τώρα στὴν ἐξέταση τῶν θεμελειωδῶν συστατικῶν τῆς ὕλης (πρωτονίων, νετρονίων, ἠλεκτρονίων).

Τὸ πρωτόνιο (p) εἶναι ἕνα ὕλικὸ σωματίδιο μὲ μᾶζα — δηλαδή μὲ ποσὸ ὕλης — ἴση πρὸς $1,673.10^{-24}$ γραμμάρια⁽¹⁾. Ἡ ἀπειροελάχιστη αὐτὴ τιμὴ ὀδηγεῖ στὴν ἀνάγκη νὰ μὴ χρησιμοποιοῦμε γιὰ μονάδα μᾶζας τὸ γραμμάριο (gr) — πὸν πέφτει τεράστια μεγάλο γιὰ τὰ σωματίδια τοῦ μικρόκοσμου — ἀλλὰ μιὰν ἄλλη μονάδα, πιὸ μικρὴ, πὸν ὀνομάστηκε **μονάδα ἀτομικῆς μᾶζας** (συμβολ. MAM)⁽²⁾. Ἡ μονάδα αὐτὴ ἀντιστοιχεῖ σὲ μιὰ μᾶζα λίγο πιὸ μικρὴ ἀπ' τὴ μᾶζα τοῦ πρωτονίου, σὲ τρόπο πὸν τὸ πρωτόνιο ν' ἀποδίνεται — στὸ σύστημα αὐτὸ — σὰν σωματίδιο μὲ μᾶζα

$$M = 1,0076 \text{ MAM}$$

Πολλὲς φορές, ὅταν δὲν ἐνδιαφέρει μεγάλη ἀκρίβεια, ἡ τιμὴ αὐτὴ στρογγυλεύεται στὴν πλησιέστερη ἀκέραια τιμὴ. Τότε

(1) Ὁ ἀριθμὸς αὐτὸς δηλώνει: μηδέν, κόμμα, εικοσιτρία μηδενικά καὶ σὲ συνέχεια τὰ ψηφία 1673.

(2) Γράφεται καὶ UMA (Unité de Masse Atomique) ἢ καὶ AMU (Atomic Mass Unit).

ὅμως — γιὰ νὰ γίνει διάκριση — δὲν χαρακτηρίζεται σὰ μᾶζα τοῦ πρωτονίου ἀλλὰ σὰν **μαζικός ἀριθμὸς** τοῦ πρωτονίου καὶ συμβολίζεται $A = 1$.

Ἄκόμα, τὸ πρωτόνιο εἶναι σωματίδιο ἠλεκτρισμένο καὶ μάλιστα μὲ θετικὸ ἠλεκτρισμό. Τὸ φορτίο του — δηλαδὴ ἡ ἠλεκτρικὴ του ποσότητα — φτάνει σ' ἓνα ἀπειροελάχιστο ὑποπολλαπλάσιο τοῦ Κουλόμπ (Cb) — ποὺ εἶναι ἡ συνηθισμένη μονάδα γιὰ τὴ μέτρηση τῆς ἠλεκτρικῆς ποσότητας⁽¹⁾ — καὶ μάλιστα συγκεκριμένα εἶναι ἴσο μὲ $4,8 \cdot 10^{-10}$ Cb. Γιὰ τὸν ἴδιο λόγο, ὅπως καὶ γιὰ τὴ μᾶζα, πέρνουμε καὶ δῶ μιὰ μονάδα ποὺ ὀνομάζουμε **ἠλεκτρονικὴ μονάδα φορτίου** (συμβ. HM) καὶ ποὺ τὴ θεωροῦμε ἴση ἀκριβῶς πρὸς $4,8 \cdot 10^{-10}$ Cb.

Ἔτσι εἶναι φανερὸ πὼς τὸ φορτίον τοῦ πρωτονίου — στὸ σύστημα αὐτὸ — θὰ ἔχει τιμὴ

$$Q = 1 \text{ HM}$$

1.9 Τὸ νετρόνιο (n) εἶναι σωματίδιο κατὰ τι βαρύτερο ἀπ' τὸ πρωτόνιο τόσο ποὺ ἡ μᾶζα του ν' ἀνέρχεται σὲ

$$M = 1,0089 \text{ MAM}$$

καὶ ὁ μαζικός ἀριθμὸς του νὰ θεωρεῖται καὶ ἔδῳ ἴσος μὲ τὴ μονάδα ($A = 1$). Ἀντίθετα ὅμως, τὸ νετρόνιο δὲ φέρει ἠλεκτρικὸ φορτίο, εἶναι μᾶλλον λόγια ἀνηλέκτριστο σωματίδιο μὲ μηδενικὸ φορτίο

$$Q = 0$$

καὶ σ' αὐτὴν ἀκριβῶς τὴν ιδιότητά του ὀφείλει τὴν ὀνομασία του⁽²⁾.

1.10 Τὸ τρίτο ἀπ' τὰ σωματίδια τοῦ μικρόκοσμου, τὸ ἠλεκτρόνιο (e), εἶναι πολὺ διάφορο ἀπ' τὰ δυὸ προηγούμενα ἀπ' τὴν ἀποψη τῆς μᾶζας, γιὰτὶ εἶναι πάρα πολὺ ἐλαφρότερο καὶ μάλιστα κατὰ 2000 περίπου φορὲς πιὸ ἐλαφρὸ ἀπ' τὸ προ-

(1) Γιὰ τὸ πόσο εἶναι ἓνα Cb φτάνει τὸ παράδειγμα ἐτοῦτο: σὲ μιὰ συνηθισμένη ἠλεκτρικὴ λάμπα τῶν 50 κεριῶν περνᾶνε 15 Cb στὸ κάθε πρῶτο λεπτό.

(2) Ἀπ' τὴ λατινικὴ λέξις neutrus (οὐδέτερος). Πιὸ παλιὰ τὸ νετρόνιο τὸ λέγαμε καὶ οὐδετερόνιο.

τόνιο και τὸ νετρόνιο. Συγκεκριμένα ἡ μάζα του ἀνέρχεται σὲ

$$M = 0,0005 \text{ MAM}$$

καὶ μπορεῖ, ἀπ' τὴν πλευρὰ αὐτή, νὰ θεωρηθῆ ὡς **ἄυλο συστατικό**, πάντοτε σὲ σύγκριση μὲ τὰ p καὶ n. Στρογγυλεύοντας τὴν τιμὴ τῆς μάζας του μποροῦμε νὰ τὸ χαρακτηρίσωμε ὡς σωματίδιο μὲ μαζικὸ ἀριθμὸ

$$A = 0$$

Ὅμως παρὰ τὴ μικρὴ του μάζα εἶναι αἰσθητὰ φορτισμένο, σὲ ἴδιο ποσὸ ὅπως καὶ τὸ p, ἀλλὰ μὲ ἀρνητικὸ ἠλεκτρικὸ φορτίο. Γιὰ τοῦτο χαρακτηρίζεται ὡς σωματίδιο μὲ ἠλεκτρικὴ ποσότητα

$$Q = - 1 \text{ HM}$$

ΠΙΝΑΚΑΣ — 2

ΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Σωματίδια	Σύμβ.	Μ ᾱ ζ α		Φορτίο		Μαζικὸς ἀριθμὸς
		gr	MAM	Cb	HM	
Πρωτόνιο	${}_1^1\text{p}^1$	$1,673 \cdot 10^{-24}$	1,0076	$4,8 \cdot 10^{-10}$	+ 1	1
Νετρόνιο	${}_0^1\text{n}^1$	$1,675 \cdot 10^{-24}$	1,0089	0	0	1
Ἡλεκτρόνιο	${}_{-1}^0\text{e}$	$9,105 \cdot 10^{-28}$	0,0005	$-4,8 \cdot 10^{-10}$	- 1	0

1.11 Ὅλα ἐποῦτα τὰ σωματίδια συμβολίζονται — ὅπως εἶδαμε κίβλας — μὲ τὰ μικρὰ γράμματα τοῦ λατινικοῦ ἀλφάβητου p, n, e, (ἀπ' τὶς λέξεις proton, neutron, electron). Γιὰ μεγαλύτερη σαφήνεια σὲ κάθε σύμβολο βάζουμε δυὸ δείχτες. Ὁ ἕνας ἀπ' αὐτοὺς ὑποδηλώνει τὴ μάζα (καὶ μπαίνει δεξιὰ καὶ

άνω), πὸ συγκεκριμένα τὴ μάζα σὰν μαζικὸ ἀριθμὸ μὲ τὴ στρογγυλεμένη της τιμῆ. Ἔτσι ἔχουμε :

$$\begin{aligned} \text{πρωτόνιο} & : p^1 \\ \text{νετρόνιο} & : n^1 \\ \text{ἠλεκτρόνιο} & : e^0 \end{aligned}$$

Ὁ ἄλλος δείκτης ὑποδηλώνει τὸ φορτίο (σὲ ΗΜ) καὶ μπαίνει ἀριστερὰ καὶ κάτω, σὲ τρόπο πού ὁ πλήρης συμβολισμὸς νὰ εἶναι :

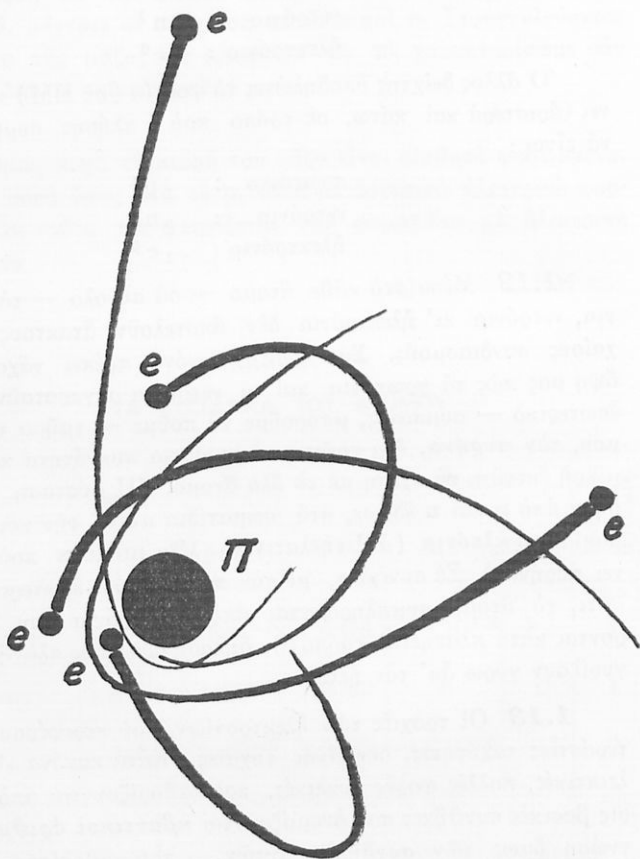
$$\begin{aligned} \text{πρωτόνιο} & : {}_1 p^1 \\ \text{νετρόνιο} & : {}_0 n^1 \\ \text{ἠλεκτρόνιο} & : {}_{-1} e^0 \end{aligned}$$

1.12 Μέσα στὸ κάθε ἄτομο — σὰ σύνολο — τὰ πρωτόνια, νετρόνια καὶ ἠλεκτρόνια δὲν ἀποτελοῦν ἄτακτους καὶ τυχαίους συνδιασμούς. Σὰν πρῶτο κανόνα πρέπει νὰ ἔχουμε ὑπ' ὄψην μας πὸς τὰ πρωτόνια καὶ τὰ νετρόνια συγκροτοῦν τὸ πιὸ ἐσωτερικὸ — συμπαγές, μπορούμε νὰ ποῦμε — τμήμα τοῦ ἀτόμου, τὸν *πυρήνα*, ἓνα τμήμα μὲ τεράστια πυκνότητα καὶ πολὺ μικρὴ ἔκταση σὲ σχέση μὲ τὸ ὅλο ἄτομο. Ἡ σύσταση τοῦ πυρήνα ἀπὸ p καὶ n ἔδωσε, στὰ σωματίδια αὐτά, τὴν κοινὴ ὀνομασία *νουκλεόνια* (ἀπ' τὴ λατινικὴ λέξη nucleus πού σημαίνει πυρήνας). Σὲ συνέχεια, μὲ τὸν πυρήνα σὰν ἐσωτερικὸ κομμάτι, τὸ ἄτομο συμπληρώνεται ἀπὸ ἠλεκτρόνια πού περιφέρονται κατὰ πλανητικὸ τρόπο⁽¹⁾, δηλαδὴ σὰν τοὺς πλανῆτες πού γυρίζουν γύρω ἀπ' τὸν ἥλιο.

1.13 Οἱ τροχιῆς τῶν ἠλεκτρονίων, πού περιφέρονται μὲ τεράστιες ταχύτητες, δὲν εἶναι τυχαῖες. Κατὰ κανόνα εἶναι ἐλλειπτικῆς, πολλῆς φορὸς κυκλικῆς, καὶ καθορίζονται ἀπὸ τέσσερις βασικῆς συνθηκῆς πού ὀνομάζονται *κβαντικοὶ ἀριθμοί*. Ἡ γνώση ὅμως τῶν συνθηκῶν αὐτῶν — πού καθορίστηκαν ἀπὸ μελέτες κυρίως τοῦ ἄγγλου E. Rutherford (1904) καὶ τοῦ δανοῦ N. Bohr (1913) — δὲν ἐνδιαφέρει ἄμεσα τὴν πυρηνικὴ

(1) Αὐτὸς εἶναι ὁ λόγος πού τὰ ἠλεκτρόνια ἐνὸς ἀτόμου τὰ λέμε καὶ *πλανητικὰ ἠλεκτρόνια*.

ἐνέργεια, πὸν βασικὰ καθορίζεται μόνον ἀπὸ τὴ συγκότηση τοῦ



Σχ. 1. Ὑπόδειγμα ἀτόμου, μὲ τὸν πυρήνα του καὶ τὰ περιφερόμενα πλανητικὰ ἠλεκτρόνια.

πυρήνα. Ἔτσι ἀδιαφοροῦμε, κατὰ κανόνα, γιὰ τὰ ἠλεκτρόνια

καὶ ταυτίζουμε, τὶς πρὸ πολλὰς φορὲς, τὸν πυρήνα μὲ ὁλόκληρο τὸ ἄτομο. Μποροῦμε, γι' αὐτό, νὰ ποῦμε πῶς ἓνα εἶδος ἀτόμου διαφέρει ἀπὸ ἄλλο στὴ μορφὴ τοῦ πυρήνα του καὶ μόνο.

1.14 Ἐὰν πάρουμε σὰν παράδειγμα τὴν ἐξέταση ἑνὸς ἀτόμου ἄνθρακα (C) καὶ ἑνὸς ἄζωτου (N) ποὺ τὰ θεωροῦμε — καὶ ἔτσι εἶναι — σὰν δυὸ διαφορετικὰ ἄτομα. Ποῦ βρῖσκεται ἡ διαφορὰ τους; Σύμφωνα μὲ τὰ παραπάνω θὰ πρέπει νὰ βρῖσκεται μόνο στὸ πλῆθος τῶν p καὶ n τοῦ πυρήνα τους. Πράγματι ἓνα ἄτομο C περιέχει 6 p καὶ 6 n ἐνῶ ἓνα ἄτομο ἄζωτου περιέχει 7 p καὶ 7 n .

Οἱ διαφορὲς αὐτὲς συμβολίζονται κατὰ τὸν ἴδιο τρόπο ὅπως γίνεται καὶ γιὰ τὰ p , n καὶ e (βλ. § 1.11), δηλαδὴ μὲ δυὸ δεῖχτες, ὅπου ὁ ἓνας δείχνει τὸ μαζικὸ ἀριθμὸ (δηλαδὴ τὸ ἄθροισμα p καὶ n) καὶ ὁ ἄλλος τὸ φορτίο (δηλαδὴ τὸ πλῆθος τῶν πρωτονίων, μιὰ ποὺ μόνο αὐτὰ φέρουν φορτίο). Ἐτσι ὁ πυρήνας τοῦ C (καὶ κατὰ ταύτιση καὶ τὸ ἄτομο τοῦ C) θὰ γραφῆ ${}_6\text{C}^{12}$. Ὁ ἀριθμὸς 6 δηλώνει 6 θετικὰ φορτία (δηλαδὴ 6 πρωτόνια), ὁ ἀριθμὸς 12 δηλώνει 12 μονάδες μάζας καὶ (μιὰ ποὺ πρακτικὰ τὰ νουκλεόνια ἔχουν ὅλα τὴν ἴδια μάζα) κατὰ συνέπεια 12 νουκλεόνια. Γίνεται λοιπὸν φανερὸ πῶς τὸ σύμβολο ${}_6\text{C}^{12}$ μᾶς δείχνει πυρήνα μὲ 12 νουκλεόνια (p καὶ n) ἀπ' τὰ ὁποῖα τὰ 6 εἶναι πρωτόνια.

Ὁμοια τὸ ἄζωτο (N) θὰ συμβολίζεται ${}_7\text{N}^{14}$, τὸ νάτριο (Na) μὲ 11 p καὶ 12 νετρόνια θὰ συμβολίζεται ${}_{11}\text{Na}^{23}$ κ.ο.κ.

Ἐτσι τὸ γενικὸ σύμβολο ${}_Z\text{X}^A$ δηλώνει πυρήνα ἀτόμου ποὺ περιέχει συνολικὰ A νουκλεόνια, ἀπ' τὰ ὁποῖα τὰ Z μόνο εἶναι πρωτόνια καὶ τὰ ὑπόλοιπα ($A - Z$) νετρόνια.

1.15 Ἡ παρατήρηση ἔδειξε πῶς ἡ κυριώτερη διαφορὰ ἀνάμεσα σὲ δυὸ εἶδη πυρήνων δὲν βρῖσκεται στὸ πλῆθος τῶν νουκλεονίων (A), ἀλλὰ εἰδικώτερα μόνο στὸ πλῆθος τῶν πρωτονίων (Z).

Μ' ἄλλα λόγια βρέθηκε — καὶ αὐτὸ ὀφείλεται κατὰ πρῶτο λόγο στὸν ἄγγλο F. Soddy (1910) — πῶς οἱ πυρήνες ἑνὸς καὶ τοῦ αὐτοῦ στοιχείου δὲν εἶναι ὅλοι ἀπόλυτα ὅμοιοι μεταξὺ τους, γιὰτι μποροῦν νὰ διαφέρουν στὸ πλῆθος τῶν n . Πάντως ὅλοι

θά περιέχουν τὸν ἴδιο ἀριθμὸ πρωτονίων. Ἔτσι βρέθηκαν πυρῆνες ἄνθρακα μὲ 6 νετρόνια (${}_6\text{C}^{12}$), ἀλλὰ βρέθηκαν καὶ μὲ 7 n (${}_6\text{C}^{13}$) καὶ μὲ 5 n (${}_6\text{C}^{11}$) κλπ. Οἱ πυρῆνες αὐτοί, ἐκτός ἀπὸ μικροδιαφορές, εἶναι πραχτικά ὅμοιοι ἀπὸ χημικὴ ἀποψη γι' αὐτὸ καὶ ὅλοι χαρακτηρίζονται σὰν πυρῆνες ἀτόμων ἄνθρακα (C). Ὅλα τοῦτα ὀδήγησαν στὸ συμπέρασμα πὼς πρέπει νὰ θεωροῦμε σὰν **εἰδοποιὸ διαφορά** — γιὰ τὰ στοιχεῖα μεταξὺ τους — εἰδικὰ καὶ μόνο τὸ πλήθος τῶν p πού πέρνει, γι' αὐτό, καὶ ἰδιαίτερο ὄνομα: **ἀτομικὸς ἀριθμὸς** (συμβ. Z).

1.16 Γιὰ τὴ συστηματικὴ κατάταξη τῶν πυρήνων, χαρακτηρίζουμε σὰν **ισότοπα** μεταξὺ τους ὅλα τὰ εἶδη πυρήνων ποὺ ἔχουν τὸν αὐτὸ ἀτομικὸ ἀριθμὸ (Z) — καὶ δηλώνουν τὸ αὐτὸ χημικὸ εἶδος — καὶ διαφέρουν στὸ πλήθος τῶν νετρονίων (καὶ κατὰ συνέπεια στὸν μαζικὸ ἀριθμὸ A). Ἔτσι οἱ πυρῆνες τοῦ ἄνθρακα ${}_6\text{C}^{10}$, ${}_6\text{C}^{11}$, ${}_6\text{C}^{12}$, ${}_6\text{C}^{13}$, ${}_6\text{C}^{14}$ εἶναι μεταξὺ τους ἰσότοποι καὶ ἀντιπροσωπεύουν ἰσότοπα μεταξὺ τους ἄτομα. Παράλληλα ἰσότοποι μεταξὺ τους εἶναι οἱ πυρῆνες τοῦ ἄζωτου ${}_7\text{N}^{13}$, ${}_7\text{N}^{14}$, ${}_7\text{N}^{15}$, ${}_7\text{N}^{16}$, ἰσότοποι πάλι οἱ πυρῆνες τοῦ ὕδρογόνου ${}_1\text{H}^1$, ${}_1\text{H}^2$, ${}_1\text{H}^3$ κλπ.

Κάθε στοιχεῖο, στὸ σύνολό του, εἶναι μίγμα ἰσοτόπων μὲ ποικίλη κάθε φορὰ σύνθεση. Σὰν παράδειγμα, τὸ ὀξυγόνο ποὺ βρίσκεται στὴν ἀτμόσφαιρα περιέχει τριῶν λογιῶν ἄτομα — κι' ἀντίστοιχα τριῶν λογιῶν πυρῆνες — ποὺ τ' ἀποδίνουμε μὲ τὰ σύμβολα ${}_8\text{O}^{16}$, ${}_8\text{O}^{17}$, ${}_8\text{O}^{18}$. Ἡ ποσοτικὴ ἀναλογία τους εἶναι οἱ παρακάτω: σὲ δέκα χιλιάδες πυρῆνες ὀξυγόνου οἱ 9976 εἶναι τοῦ τύπου ${}_8\text{O}^{16}$, οἱ 20 τοῦ τύπου ${}_8\text{O}^{18}$ καὶ μόνο 4 τοῦ τύπου ${}_8\text{O}^{17}$. Παράλληλα μέσα σὲ δέκα χιλιάδες πυρῆνες χλωρίου οἱ 7540 εἶναι τοῦ τύπου ${}_{17}\text{Cl}^{35}$ καὶ οἱ ὑπόλοιποι 2460 τοῦ τύπου ${}_{17}\text{Cl}^{37}$.

Τὶς ἀναλογίες αὐτές, ὅταν τὶς ἐκφράζουμε ἐπὶ τοῖς ἑκατό, τὶς ὀνομάζουμε **ισοτοπικὲς συνθέσεις** (α). Λέμε, γι' αὐτό, πὼς ἡ ἰσοτοπικὴ σύνθεση τοῦ ἀτμοσφαικοῦ ὀξυγόνου εἶναι:

$$\begin{array}{rcl} \alpha_1 & = & 99,76\% \quad \text{σὲ } {}_8\text{O}^{16} \\ \alpha_2 & = & 0,04\% \quad \text{σὲ } {}_8\text{O}^{17} \\ \alpha_3 & = & 0,20\% \quad \text{σὲ } {}_8\text{O}^{18} \end{array}$$

καί, ὅμοια, πὼς ἡ ἰσοτοπικὴ σύνθεσις τοῦ φυσικοῦ χλωρίου εἶναι :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 75,4 \% & \text{σὲ } {}_{17}\text{Cl}^{35} \\ \alpha_2 &= 24,6 \% & \text{σὲ } {}_{17}\text{Cl}^{37} \end{aligned}$$

Εἶναι ἀξιοσημεῖο ὅτι ἡ ἰσοτοπικὴ σύνθεσις καθενὸς στοιχείου εἶναι ὀρισμένη καὶ χαρακτηριστικὴ — κατὰ κανόνα — ἀνεξάρτητη ἀπ' τὸ ἂν τὸ στοιχεῖο εἶναι ἐλεύθερο ἢ ἐνωμένο σ' ὁποιαδήποτε μορφή. Μ' ἄλλα λόγια, ἡ ἰσοτοπικὴ σύνθεσις τοῦ χλωρίου εἶναι ἡ ἴδια καὶ στὸ ἀέριο χλώριο καὶ στὸ χλώριο τοῦ ὕδροχλωρικοῦ ὀξέος καὶ στὸ χλώριο τοῦ κοινοῦ ἀλατιοῦ (χλωριούχου νατρίου) καὶ στὸ ὀργανικὰ ἐνωμένο χλώριο τοῦ χλωροφορμίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ — 3

ΙΣΟΤΟΠΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

(Z : ἀτομικὸς ἀριθμὸς ἢ πλῆθος πρωτονίων, A : μαζικὸς ἀριθμὸς, N : πλῆθος νετρονίων).

Z		A	N	Ποσοστὸ στὴ γῆ (%)	
1	<i>Κοινὸ ὕδρογόνο</i>	1	0	99,9844	<i>σταθερὸ</i>
1	Βαρὺ ὕδρογόνο (δευτέριο)	2	1	0,0156	σταθερὸ
1	Υδρογόνο — β (τρίτιο)	3	2	ἴχνη	ραδιενεργὸ

Ἡ παραμικρὴ ἀπόκλιση ἀπ' τὴ συνηθισμένη, γιὰ τὸ κάθε στοιχεῖο, ἰσοτοπικὴ σύνθεσις χαρακτηρίζεται σὰ διαφορὰ στὴν πυρηνικὴ προέλευσή του καὶ παίζει σπουδαῖο ρόλο στὴ μελέτη τῶν ἐφαρμογῶν τῶν πυρηνικῶν δράσεων, ὅπως θὰ δοῦμε πιὸ πέρα.

1.17 Ἐπὶ τὴν ἰσοτοπικὴν σύνθεσιν μπορεῖ νὰ βρεθῆ καὶ ἡ λεγόμενη **μέση ἀτομικὴ μᾶζα** — τὸ μέσο ἀτομικὸ βάρος, ὅπως τὸ λέμε στὴ χημεία — δηλαδὴ τὸ κατὰ μέσο ὄρο βάρος καθενὸς πυρήνα (ἢ ἀτόμου) μέσα σ' ἓνα σύνολο ἀπὸ μίγμα ἰσοτόπων. Αὕτῃ ἡ μέση ἀτομικὴ μᾶζα (M_{μ}) προσδιορίζεται μὲ βάση τὸν τύπο

$$\longrightarrow M_{\mu} = M_1 \cdot \alpha_1 + M_2 \cdot \alpha_2 + \dots$$

ὅπου $M_1, M_2 \dots$ οἱ ἀτομικὲς μᾶζες τῶν διαφόρων ἰσοτόπων (καὶ πῶς στρογγυλεμένα οἱ μαζικοὶ ἀριθμοὶ) καὶ $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ οἱ ἀντίστοιχες ἰσοτοπικὲς συνθέσεις.

Σὰν παράδειγμα, στὸ χλώριο ἔχουμε:

$$M_1 = 35, \quad \alpha_1 = 0,754 \quad (\text{δηλαδὴ } 75,4\%)$$

$$M_2 = 37, \quad \alpha_2 = 0,246 \quad (\text{δηλαδὴ } 24,6\%)$$

καὶ σὲ συνέχεια

$$M_{\mu} = 35 \cdot 0,754 + 37 \cdot 0,246$$

δηλαδὴ

$$M_{\mu} = 35,492$$

Βρίσκουμε, μ' ἄλλα λόγια, πὼς ἡ μέση τιμὴ τῆς μᾶζας ἑνὸς ἀτόμου χλωρίου εἶναι ἴση πρὸς 35,492 μονάδες ἀτομικῆς μᾶζας (MAM).

ΠΙΝΑΚΑΣ — 4

ΙΣΟΤΟΠΑ ΤΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ

(Z : ἀτομικὸς ἀριθμὸς ἢ πλῆθος πρωτονίων, A : μαζικὸς ἀριθμὸς, N : πλῆθος νετρονίων).

Z		A	N	Ποσοστὸ στὴ γῆ (%)	
8	¹⁴ Οξυγόνο — 14	14	6	ἴχνη	ραδιενεργὸ
8	¹⁵ Οξυγόνο — 15	15	7	ἴχνη	ραδιενεργὸ
8	¹⁶Οξυγόνο — 16	16	8	99,757	σταθερὸ
8	¹⁷ Οξυγόνο — 17	17	9	0,039	σταθερὸ
8	¹⁸ Οξυγόνο — 18	18	10	0,204	σταθερὸ
8	¹⁹ Οξυγόνο — 19	19	11	ἴχνη	ραδιενεργὸ

ΠΙΝΑΚΑΣ — 5

Σ Τ Ο Ι Χ Ε Ι Α

(Z : ατομικός αριθμός, M : μέση ατομική μάζα, A : μαζικοί αριθμοί κυριωτέρων ισοτόπων).

Z	Όνομασία	Σύμβ.	M	A
1	Υδρογόνο	H	1,008	1-2
2	Ήλιο	He	4,003	4
3	Λίθιο	Li	6,94	6-7
4	Βηρύλλιο	Be	9,013	9
5	Βόριο	B	10,82	10-11
6	Ανθρακας	C	12,01	12-13
7	Αζωτο	N	14,008	14-15
8	Οξυγόνο	O	16,000	16-18
9	Φθόριο	F	19,000	19
10	Νέο	Ne	20,183	20-22
11	Νάτριο	Na	23,997	23
12	Μαγνήσιο	Mg	24,32	24-25-26
13	Αργίλλιο	Al	26,97	27
14	Πυρίτιο	Si	28,06	28-29-30
15	Φωσφόρος	P	30,98	31
16	Θειάφι	S	32,07	32-34
17	Χλώριο	Cl	35,46	35-37
18	Αργό	A	39,94	38-40
19	Κάλι	K	39,1	39-41
20	Ασβέστιο	Ca	40,08	40-44
21	Σκάνδιο	Sc	45,1	45
22	Τιτάνιο	Ti	47,9	46-47-48-49-50
23	Βανάδιο	V	50,95	51
24	Χρώμιο	Cr	52,01	50-52-53-54
25	Μαγγάνιο	Mn	54,93	55
26	Σίδηρος	Fe	55,85	55-56-57
27	Κοβάλτιο	Co	58,94	59
28	Νικέλιο	Ni	58,69	58-60-62 ←
29	Χαλκός	Cu	63,54	63-65
30	Ψευδάργυρος	Zn	65,38	64-66-67-68 ←
31	Γάλλιο	Ga	69,72	69-71
32	Γερμάνιο	Ge	72,6	70-72-74

Z	Όνομασία	Σύμβ.	M	A
33	Ἀρσενικὸ	As	74,91	75
34	Σελήνιο	Se	78,96	76 — 78 — 80 — 82
35	Βρώμιο	Br	79,916	79 — 81
36	Κρυπτό	Kr	83,7	82 — 83 — 84 — 86
37	Ρουβίδιο	Rb	85,48	85 — 87
38	Στροντίο	Sr	87,63	86 — 87 — 88
39	Ύτριο	Y	88,92	89
40	Ζιρκόνιο	Zr	91,22	90 — 91 — 92 — 94
41	Νιόβιο	Nb	92,9	93
42	Μολυβδαίνιο	Mo	95,95	92 — 95 — 96 — 98
43	Τεχνητίο	Tc	(99)	(99)
44	Ρουθήνιο	Ru	101,7	99 — 101 — 102 — 104
45	Ρόδιο	Rh	102,91	103
46	Παλλάδιο	Pd	106,7	105 — 106 — 108 — 110
47	Ἀργυρος	Ag	107,88	107 — 109
48	Κάδμιο	Cd	112,41	111 — 112 — 113 — 114
49	Ἰνδίο	In	114,76	113 — 115
50	Κασσίτερος	Sn	118,7	116 — 118 — 120
51	Ἀντιμόνιο	Sb	121,76	121 — 123
52	Τελλούριο	Te	127,61	126 — 128 — 130
53	Ἰώδιο	J	126,92	127
54	Ξένο	X	131,3	129 — 131 — 132 — 134
55	Καίσιο	Cs	132,91	133
56	Βάριο	Ba	137,36	135 — 136 — 137 — 138
57	Λανθάνιο	La	138,92	139
58	Δημήτριο	Ce	140,13	140 — 142
59	Πρασεοδύμιο	Pr	140,92	141
60	Νεοδύμιο	Nd	144,27	142 — 143 — 144 — 146
61	Προμήθιο	Pm	(147)	(147)
62	Σαμάριο	Sm	150,43	147 — 149 — 152 — 154
63	Εὐρώπιο	Eu	152,0	151 — 153
64	Γαδολύνιο	Gd	156,9	156 — 157 — 158 — 160
65	Τέρβιο	Tb	159,2	159
66	Δυσπρόσιο	Dy	162,46	161 — 162 — 163 — 164
67	Ὀλμιο	Ho	164,94	165
68	Ἐρβιο	Er	167,2	166 — 167 — 168

Z	Όνομασία	Σύμβ.	M	A
69	Θούλιο	Tm	169,4	169
70	Υπτέροβιο	Yb	173,04	171—172—173—174
71	Λουτήτιο	Lu	174,99	175
72	Αφνιο	Hf	178,6	177—178—179—180
73	Ταντάλιο	Ta	180,88	181
74	Βολφράμιο	W	183,92	182—183—184—186
75	Ρήνιο	Re	186,31	185—187
76	Όσμιο	Os	190,2	188—189—190—192
77	Ιρίδιο	Ir	193,1	191—193
78	Λευκόχρυσος	Pt	195,23	194—195—196
79	Χρυσός	Au	197,2	197
80	Υδράργυρος	Hg	200,61	199—200—201—202
81	Θάλλιο	Tl	204,39	203—205
82	Μόλυβδος	Pb	207,21	206—207—208
83	Βισμούθιο	Bi	209,00	209
84	Πολώνιο	Po	210	210
85	Άστατο	At	(210)	(210)
86	Ραδόνιο	Rn	222	222
87	Φράγκιο	Fr	(223)	(223)
88	Ράδιο	Ra	226,05	226
89	Ακτίνιο	Ac	227	227
90	Θόριο	Th	232,12	232
91	Πρωτακτίνιο	Pa	231	231
92	Ουράνιο	U	238,07	238
93	Νεπτούνιο	Np	(237)	(237)
94	Πλουτόνιο	Pu	(239)	(239)
95	Αμερίκιο	Am	(241)	(241)
96	Κιούριο	Cm	(242)	(242)
97	Μπερέκλιο	Bk	(245)	(245)
98	Καλιφόρνιο	Cf	(246)	(246)
99	Αϊνστάϊνιο	E	(253)	(253)
100	Φέρμιο	Fm	(255)	(255)
101	Μεντελέβιο	Mv	(256)	(256)
102	Νομπέλιο	No	(258)	(258)

2. ΟΙ ΔΥΟ ΜΟΡΦΕΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ : ΜΑΖΑ ΚΙ' ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ἡ ὕλη γίνεται ἀντιληπτή κάτω ἀπὸ δυὸ διαφορετικὰς μορφάς, κατὰ δυὸ — σὰν νὰ λέμε — διαφορετικούς τρόπους : σὰν ἀδρανῆς ὕλη καὶ σὰ δραστική.

Ὅταν λέμε **σὰν ἀδρανῆς ὕλη** ἐννοοῦμε πὸς ἓνα ὕλικὸ ἀντικείμενο προδίνει τὴν ὑπαρξή του μὲ τὸ ὅτι ἀπαιτεῖ κάποια δύναμη γιὰ νὰ μπορέσει νὰ κινηθῆ ἀπ' τὴ θέση του, γιὰ ν' ἀλλάξει κινητικὴ κατάσταση — ὅπως λέμε στὴν ἐπίσημη ὁρολογία. Ἔτσι μιὰ σιδερένια σφαῖρα λέμε — καὶ νοιώθωμε — πὸς ὑπάρχει ἀπ' τὸ γεγονός ὅτι πρέπει νὰ τὴ σπρώξουμε γιὰ νὰ μπορέσει νὰ φύγει ἀπὸ μιὰν ἀρχικὴ τῆς θέσης.

Σὰ μέτρο γιὰ τὸ πόσο ἀδρανῆς εἶναι ἓνα ὕλικὸ σῶμα ὀρίζουμε τὸ φυσικὸ ἐκείνο μέγεθος πὸν λέγεται **μᾶζα**, τὸ φυσικὸ δηλαδή μέγεθος πὸν ἐκφράζει καὶ τὸ ποσὸ τῆς ὕλης. Ἔτσι συγκρίνοντας δυὸ ἀντικείμενα πὸν τὸ ἓνα νᾶχει μᾶζα 500 γραμμαρίων ($m_1 = 500 \text{ gr}$) καὶ τ' ἄλλο χιλίων ($m_2 = 1000 \text{ gr}$) ἐννοοῦμε δυὸ πράγματα : πρῶτο, πὸς τὸ m_2 **περιέχει διπλάσια ὕλη** ἀπ' τὸ m_1 καί, δεύτερο, πὸς τὸ m_2 **ἀπαιτεῖ διπλάσια δύναμη** γιὰ νὰ κινηθῆ κατὰ τὸν ἴδιο τρόπο ὅπως τὸ m_1 .

Ἡ σύγκριση δηλαδή ἀνάμεσα στὶς δυὸ ἐτοῦτες μᾶζες ὀδηγεῖ στὸ συμπέρασμα πὸς τὸ m_2 εἶναι δυὸ φορές πιὸ ἀδρανῆς, δυὸ φορές πιὸ δυσκολοκίνητο ἀπ' τὸ m_1 .

2.2 Ὅμως τὰ ὕλικὰ σώματα προδίνουν τὴν ὑπαρξή τους καὶ μὲ ἀλλοιότικὸ τρόπο, ὅχι μὲ τὴν ἀδράνειά τους, ἀλλὰ μὲ τὰ φαινόμενα πὸν μποροῦν νὰ προκαλέσουν στὸ γύρω περιβάλλον τους. Δηλαδή, ἓνα ὕλικὸ ἀντικείμενο μπορεῖ νὰ γίνῃ ἀντιληπτὸ **σὰν δραστικὴ ὕλη**. Σὰν παράδειγμα, ὁ ἥλιος μᾶς ἐπιβεβαιώνει τὴν ὕλική του ὑπόσταση ὅχι ἄμεσα μὲ τὴν ἀδράνειά του, ἀλλὰ μὲ τὸ φῶς πὸν στέλνει, μὲ τὸ φῶς πὸν μετατρέπεται σὲ συνέχεια σὲ θερμότητα καὶ προκαλεῖ ἔξατμίσεις, διαστολές, χημικὰς δράσεις κλπ.

Σὰ μέτρο γιά τὸ πόσο δραστικὸ εἶναι ἓνα ὑλικὸ σῶμα ὀρίζουμε ἓνα φυσικὸ μέγεθος ποὺ λέγεται *ἐνέργεια* καὶ ποὺ ἐκφράζει — κατὰ συμβατικὸ τρόπο — τὴν ἀξία τῶν φαινομένων ποὺ προκαλεῖ.

Κάθε ὑλικὸ σῶμα μπορεῖ νὰ ἐμφανιστεῖ μόνο σὰν ἀδρανές, μόνο σὰ δραστικὸ κι' ἀκόμα σὰν ἀδρανές καὶ δραστικὸ ταυτόχρονα.

Μιά ψυχρὴ σιδερένια σφαῖρα μπορεῖ νὰ θεωρηθῆ σὰν τυπικὰ ἀδρανές ὑλικό, μιὰ φωτεινὴ ἀκτῖνα σὰν τυπικὰ δραστικὸ, μιὰ διάπυρη σιδερένια σφαῖρα σὰν ὑλικὸ ταυτόχρονα ἀδρανές καὶ δραστικὸ.

2.3 Ὅμως ἀνάμεσα στὴν ἀδρανῆ καὶ 'στὴν δραστικὴ ὕλη — στὴ μᾶζα καὶ στὴν ἐνέργεια — ὑπάρχει πάντοτε μιὰ ὀρισμένη ἀντιστοιχία. Ἄς ὑποθέσουμε ἓνα ὑλικὸ σῶμα, σὰν παράδειγμα, ποὺ νὰ παρουσιάζει μόνο ἀδρανῆ ὕλη — μιὰ σφαῖρα σιδερένια ἐνὸς χιλιογράμμου. Θὰ παρατηρήσουμε πὼς γιὰ νὰ τὴ μετατοπίσουμε κατὰ ἓνα ὀρισμένο τρόπο χρειάζομαστε μιὰ κάποια δύναμη *A*. Ἄν ὅμως γιὰ ἓναν ὀποιοδήποτε λόγο — ἄσχετο ποιόν, ἀλλὰ ὀφειλόμενο σὲ ἐσωτερικὰ αἴτια — ἡ σφαῖρα ἀρχίσει νὰ ἐκπέμπει ἐνέργεια, νὰ ἐμφανίζει δηλαδὴ δράση μὲ τὸ νὰ καθίσταται διάπυρη, θὰ διαπιστώσουμε πὼς γιὰ μιὰ ἴδια μετατόπισή της χρειάζομαστε μιὰ πὺ μικρὴ δύναμη *B*. Θὰ παρατηρήσουμε δηλαδὴ πὼς ἡ σφαῖρα ἔγινε πὺ εὐκολοκίνητη, πὺ λίγο ἀδρανῆς ἀπὸ πρῶτα, γεγονός ποὺ μᾶς ἀναγκάζει νὰ τὴ θεωρήσουμε ὄχι πιά σὰ μιὰ σφαῖρα τῶν 1000 gr, ἀλλὰ σὰν ἀντικείμενο μὲ μᾶζα κάπως μικρότερη, π. χ. 999 γραμμαρίων.

Κι' ἂν ἡ ἐκπομπὴ φωτὸς συνεχιστεῖ — ἀπ' τὴ συνέχιση τῆς διάπυρης κατάστασης — θὰ δοῦμε τὴ σφαῖρα σὰν πὺ λίγο ἀδρανῆ, σὰν νᾶχει μικρότερη ἀκόμα μᾶζα 998 gr, καὶ παραπέρα ἀκόμα πὺ μικρὴ (997 gr) κ.ο.κ.

Ἡ σφαῖρα θὰ γίνετα συνεχῶς λιγότερο ἀδρανῆς καὶ — σ' ἀντιστοιχία — περισσότερο δραστικὴ, συνεχῶς ἐλαφρότερη — μὲ τὴν ἔννοια τῆς μᾶζας — συνεχῶς πὺ εὐκολοκίνητη, ὅμως συνεχῶς πὺ πολὺ θὰ ἐπηρεάζει τὸ γύρω περιβάλλον της.

Στὸ σημεῖο αὐτὸ πρέπει νὰ προσέξουμε ὅτι, μὲ τὸ νὰ γίνεται ἡ σφαῖρα ἀπὸ 1000 gr μόνον 999 gr δὲν χάνεται ὕλη, δὲν εξαφανίζεται ὕλη. Ἀπλῶς *ἡ ὕλη ἀλλάζει μορφή*. Μ' ἄλλα λόγια, ἂν ἡ σφαῖρα περιέχει μέσα της, ἄς ποῦμε, 100 ἄτομα, θὰ περιέχει πάντοτε 100 ἄτομα, καὶ σὰ σφαῖρα τῶν 1000 gr καὶ σὰν τῶν 999 gr. Μόνον πού τὸ καθένα ἄτομο, κάθε μόριο, κάθε νουκλεόνιο ἢ ἠλεκτρόνιο θὰ παρουσιάζεται, στὴ δεύτερη περίπωση, σὰν πιὸ εὐκολοκίνητο, σὰν πιὸ λίγο ἀδρανὲς κι' ἀντίστοιχα σὰν πιὸ πολὺ δραστικὸ γιὰ τὸν γύρω χῶρο.

Ἄν ὑποθέσουμε — θεωρητικὰ βέβαια — πὸς ἡ σφαῖρα αὐτὴ γίνεται ὅσο πάει καὶ πιὸ δραστικὴ, ὡς πού νὰ καταλήξει νᾶναι μόνον φῶς — ὕλη δηλαδὴ ἀπόλυτα καὶ μόνον δραστικὴ — θὰ δοῦμε πὼς θὰ φτάσουμε στὸ σημεῖο νὰ μὴ χρειάζονται πιὰ δυνάμεις γιὰ τὴ μετατόπισή της, γεγονὸς πού θὰ προϋποθέτει ὑλικὸ μὲ μηδενικὴ μᾶζα, ὅχι ὅμως ἀνύπαρκτο. Ὑλικὸ πού *δὲν ἀντιδρᾷ* στὶς ἐξωτερικὲς ἐπιδράσεις ἀλλὰ, ἀντίθετα, μὲ τὴ σειρά του *δρᾷ* πρὸς τὸ ἐξωτερικὸ περιβάλλον του.

Ἐτσι φτάνουμε στὸ συμπέρασμα πὸς μπορεῖ νὰ ὑπάρξει ὑλικὸ ὑπαρκτὸ μὲν, ἀλλὰ ἄυλο ἀπ' τὴν ἀποψη τῆς μᾶζας, ὑλικὸ δηλαδὴ πού δὲν ἔξασκεῖ ἐμπόδια καὶ δὲ δέχεται ἐμπόδια στὶς ἐξωτερικὲς ἐπιδράσεις, ἀλλὰ προκαλεῖ τὴ γένεση φαινομένων σὰν τὸ νὰ φωτίζει ἢ νὰ θερμαίνει τὰ γύρω ἀπ' αὐτὸ ἄλλα σώματα.

2.4 Βρέθηκε, ἀνάμεσα στὰ χρόνια 1900 καὶ 1905 — κι' αὐτὸ ὀφείλεται στὴ μεγαλοφυΐα τῶν γερμανῶν M. Planck καὶ A. Einstein — πὼς ἡ διπλῆ αὐτὴ μορφή τῆς ὕλης παρουσιάζεται σὲ κάθε ὑπαρκτὸ σῶμα. Κάθε ὑλικό, πού ἔχει μᾶζα, ὅταν ἐκπέμπει φῶς (ἐνέργεια) *ἐλαφραίνει* κι' ἀντίθετα κάθε σῶμα πού προσροφᾷ ἐνέργεια *βαρύνει*, κι' αὐτὸ λόγῳ τῆς ἀλληλομετατροπῆς τῆς μιᾶς μορφῆς τῆς ὕλης στὴν ἄλλη.

Παρ' ὅλα αὐτὰ ἡ μετατροπὴ μᾶζας σ' ἐνέργεια — κι' ἀντίστροφα — δὲν γίνεται ἀντιληπτὴ μὲ συνηθισμένα πειραματικὰ μέσα. Ὁ λόγος βρίσκεται στὸ γεγονὸς ὅτι ἡ ἀριθμητικὴ σχέση ἀνάμεσα στὶς μονάδες — συνηθισμένες μονάδες — μᾶζας καὶ ἐνέργειας εἶναι τεράστια μεγάλη.

Συγκεκριμένα, ένα γραμμάριο μάζας (1 gr) αντιστοιχεί σ' ενέργεια 9 εκατομμυρίων τοννοχιλιομέτρων. Δηλαδή, αν η μάζα ενός σώματος μειωθῆ ἀπὸ 1000 gr σὲ 999 gr προκαλεῖται τέτοια δράση — ἐκλύεται δηλαδή τέτοια ἐνέργεια — ὥστε νὰ μπορεῖ ν' ἀνυψωθεῖ ἕνα βάρος 9 εκατομμυρίων τόννων σὲ ὕψος ἑνὸς χιλιομέτρου!

Κατὰ συνέπεια στὰ συνηθισμένα φυσικὰ καὶ χημικὰ φαινόμενα — ὅπου παράγεται ἢ ἀπορροφᾶται ἐνέργεια ἄπειρα πιὸ λίγη ἀπ' τὰ 9 εκατομμύρια τοννοχιλιόμετρα — ἡ διαφορὰ στὴ μάζα εἶναι τόσο πολὺ μικρὴ πὺν νὰ περνάει ἀπαρατήρητη.

Σὰν παράδειγμα, ἀν κάψουμε 12 gr ἄνθρακα — κατὰ τὸ γνωστὸ χημικὸ φαινόμενο πὺν λέγεται καύση — βλέπουμε πὺς παράγεται θερμότητα καὶ φῶς, δηλαδή ἐνέργεια. Στὰ προϊόντα πρέπει νὰ χύουμε λιγότερα ἀπὸ 12 gr ἄνθρακα, γιατί ἡ παραγωγή θερμότητας καὶ φωτὸς δὲ μπορεῖ παρὰ νὰ γίνεῖ σὲ βάρος τῆς μάζας. Ὅμως ἡ θερμικὴ αὐτὴ καὶ φωτεινὴ ἐνέργεια εἶναι τόση πὺν ν' ἀντιστοιχεῖ σὲ μιὰ μείωση τῆς μάζας τοῦ ἄνθρακα κατὰ ἕνα μόνο δισεκατομμυριοστὸ τοῦ ἑκατομμυριοστοῦ τοῦ γραμμαρίου!

Εἶναι ὅμως φανερὸ πὺς μιὰ τέτοια διαφορὰ καμμιὰ ζυγαριὰ στὸν κόσμον δὲν μπορεῖ νὰ τὴν πιάσει.

2.5 Ἡ μαθηματικὴ σχέση πὺν συνδέει ἕνα ποσὸ μάζας (m) μὲ τὸ ἀντίστοιχο ποσὸ ἐνέργειας (E) διατυπώθηκε — γύρω στὰ 1905 — ἀπ' τὸν A. Einstein μὲ τὴν ἐξίσωση

$$E = mc^2 \quad (2.5.1)$$

ὅπου ὁ συντελεστὴς c ἔχει τιμὴ ἴση πρὸς $3 \cdot 10^{10}$ γιὰ νὰ ἰσχύει ὁ τύπος μὲ τὴ μάζα σὲ γραμμάρια καὶ τὴν ἐνέργεια σὲ μονάδες erg⁽¹⁾. Ἄν αντικαταστήσουμε στὴν παραπάνω ἐξίσωση (2.5.1) τὴν τιμὴ τοῦ συντελεστῆ c βρῖσκουμε τὸν τύπο

$$E = 9 \cdot 10^{20} m \quad (2.5.2)$$

Ὅμως ἐπειδὴ ἡ μονάδα erg εἶναι πολὺ μικρὴ, γιὰ τὴ μέ-

(1) Ἡ ἐνέργεια ἑνὸς erg (ἐργίου) ἀντιπροσωπεύει τὴν ἀξία μιᾶς δράσης ἰκανῆς ν' ἀνυψώσει ἕνα χιλιοστόγραμμα (περίπου) κατὰ ἕνα ἑκατοστὸ τοῦ μέτρου.

τρηση τῆς ἐνέργειας, μπορούμε νὰ λάβουμε ὑπ' ὄψη μας ὅτι 1 τοννοχιλιόμετρο ἀντιστοιχεῖ σὲ 10^{14} erg, κι' ἔτσι τελικὰ καταλήγουμε στὴν ἐξίσωση

$$E = 9000000 m \quad (2.5.3)$$

ὅπου m σὲ gr καὶ E σὲ τοννοχιλιόμετρα (συμβ. ton*km).

2.6 Στὸ σημεῖο αὐτὸ μπαίνουν δυὸ ἐρωτήματα. Πρῶτο, κάτω ἀπὸ ποιὲς συνθῆκες καὶ πότε ἡ μάζα μετατρέπεται σὲ ἐνέργεια καί, δεύτερο, κάτω ἀπὸ ποιὲς μορφές ἐκδηλώνεται ἡ ἐνέργεια αὐτή. Σὰν ἀπάντηση στὸ πρῶτο ἐρώτημα μπορούμε νὰ ποῦμε πὼς ἡ μετατροπὴ παρουσιάζεται σὲ κάθε φυσικὸ ἢ χημικὸ φαινόμενο, σὲ κάθε δηλαδὴ — σὲ τελευταία ἀνάλυση — κίνηση τῶν συστατικῶν τῆς ὕλης (μορίων, ἀτόμων, νουκλεονίων, ἠλεκτρονίων). Στὸ δεύτερο ἐρώτημα μπορούμε ν' ἀπαντήσουμε λέγοντας πὼς ἡ ἐνέργεια ἐκδηλώνεται κάτω ἀπὸ μιὰ καὶ μόνο μορφή καὶ συγκεκριμένα **σὰν φῶς**. Κάθε ἄλλη μορφή στέκεται σὰ δευτερογενῆς, σὰ μετατρομὴ, μ' ἄλλα λόγια, τῆς φωτεινῆς ἐνέργειας σὲ κίνηση, σὲ θερμότητα, σὲ ἠλεκτρισμὸ κλπ.

Στὸ σημεῖο αὐτὸ εἶναι ἀπαραίτητο νὰ δοῦμε πιὸ ἀναλυτικὰ **τί εἶναι τὸ φῶς**, γιὰ νὰ μπορέσουμε, σὲ συνέχεια, νὰ μελετήσουμε τίς συνθῆκες μετατροπῆς τῆς μάζας σὲ ἐνέργεια, συνθῆκες πού κατὰ πρῶτο λόγο παρουσιάζονται κατὰ τὴν ἀλλαγὴ θέσης τῶν νουκλεονίων μέσα στοὺς πυρῆνες τῶν ἀτόμων.

2.7 Σύμφωνα μὲ τίς σημερινές ἀντιλήψεις κάθε φωτεινὴ ἀκτῖνα εἶναι ἓνα σύνολο ἀπὸ ὕλικά βλήματα — ὕλικά ἀπ' τὴν ἀποψη τῆς δράσης — ἀπὸ βλήματα χωρὶς ἀδρανῆ μάζα, πού τοὺς δίνουμε τὴν ὀνομασίαν **φωτόνια** ⁽¹⁾ ἢ **κβάντα φωτός**, πού ἔχουν τὴν ἰδιότητα νὰ προκαλοῦν δράσεις πάνω στὸν κάθε στόχο πού συναντοῦν.

Κάθε φωτόνιο — μπορούμε ἀπλᾶ νὰ ποῦμε — ἐκτελεῖ δυὸ

(1) Τὴ θεωρία γιὰ τὴ *σωματειακὴ - ὕλικὴ* φύση τοῦ φωτός τὴ χρωστάμε στὸ γερμανὸ σοφὸ Max Planck (1900).

κινήσεις. Τη μιὰ εὐθύγραμμο, κατὰ τὴ διεύθυνση τῆς φωτεινῆς ἀκτίνας, με τεράστια σταθερὴ ταχύτητα ($c = 300000$ χιλιομέτρων ἀνὰ δευτερόλεπτο), τὴν ἄλλη παλμική, ἐσωτερικὴ κατὰ κάποιον τρόπο, με ὀρισμένη συχνότητα, με ὀρισμένους δηλαδὴ παλμούς στο δευτερόλεπτο. Ἔτσι τὸ φωτόνιο, καθὼς προχωρεῖ, πάλεται ταυτόχρονα πέρα - δῶθε γύρω ἀπ' τὸν ἄξονα τῆς πορείας του.

Σὰν εἰδοποιοὶ διαφορὰ ἀνάμεσα στὰ φωτόνια θεωροῦμε μόνο αὐτὴ τὴ συχνότητα, ποὺ χαρακτηρίζει τὴν παλμική τους κίνηση. Ἔτσι λέμε πὺς δυὸ φωτόνια διαφέρουν μεταξύ τους ὅταν τὸ ἓνα πάλεται με — ἄς ποῦμε — 100 παλμούς στο δευτερόλεπτο καὶ τὸ ἄλλο με 150⁽¹⁾. Ἡ διαφορὰ στὴ συχνότητα ἔχει θεμελιώδη σημασία, γιατί συνδέεται ἄμεσα με τὴν ἐνέργεια. Συγκεκριμένα βρέθηκε πὺς ὅσο πιὸ μεγάλη εἶναι ἡ συχνότητα τόσο καὶ πιὸ μεγάλη εἶναι ἡ μεταφερόμενη ἐνέργεια τοῦ βλήματος, γι' αὐτὸ καὶ τὸ φωτόνιο τῶν 150 παλμῶν στο δευτερόλεπτο τὸ θεωροῦμε — καὶ εἶναι — πιὸ **δραστικὸ** ἀπ' τὸ φωτόνιο τῶν 100.

Ἡ μαθηματικὴ σχέση ἀνάμεσα στὴ συχνότητα (ν) καὶ τὴν ἐνέργεια (E) γράφεται με τὴ μορφή

$$E = h\nu \quad (2.7.1)$$

ὅπου h (σταθερὰ τοῦ Planck, ὅπως λέγεται) ἓνας συντελεστῆς ἀναλογίας γιὰ τὴ μετατροπὴ τῶν μονάδων συχνότητας σὲ ἐνέργεια. Ὁ συντελεστῆς αὐτὸς ἔχει τιμὴ

$$h = 6,24 \cdot 10^{-27} \text{ ergsec} \quad (2.7.2)$$

ποὺ σημαίνει ὅτι ἓνα φωτόνιο με συχνότητα 10^{27} παλμῶν στο δευτερόλεπτο⁽²⁾ ἀντιστοιχεῖ σὲ βλήμα με ἐνέργεια 6,24 ἐργίων.

Ὅπως βλέπουμε ἡ ἐνέργεια καθενὸς φωτονίου χωριστὰ εἶναι τρομερὰ ἀπειροελάχιστη, ὅμως σὲ μιὰ φωτεινὴ δέσμη

(1) Οἱ ἀριθμοὶ αὐτοὶ (100 — 150) εἶναι συμβατικοί, γιατί στὴν πραγματικότητα οἱ συχνότερες φάνουν τὰ δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων παλμῶν στο δευτερόλεπτο.

(2) Τὸ σύμβολο 10^{27} δηλώνει τὸν τεράστιο ἀριθμὸ ποὺ γράφεται με μιὰ μονάδα με — ἀπὸ ζοντὰ — εἰκοσιεφτά μηδενικά.

— με τεράστιο πλήθος — ή ενέργεια αποτελεί στο σύνολό της ύπολογίσιμο ποσό.

Μ' αυτό το γεγονός μπορούμε να διακρίνουμε τὰ φωτόνια μεταξύ τους είτε με βάση τή συχνότητά τους είτε με βάση τήν ενέργειά τους.

Στο σημείο αυτό πρέπει να προσθέσουμε πώς συνήθως ή ενέργεια τῶν φωτονίων δὲν ἀποδίνεται σὲ eV, οὔτε σὲ τοννοχλιομέτρα, οὔτε σὲ βαττώρια, ἀλλὰ σὲ μιὰ μονάδα πὸν ὀνομάζεται *ἠλεκτρονιοβόλτ* (συμβ. eV) καὶ πὸν ἰσοδυναμεῖ πρὸς τήν ενέργεια ἑνὸς ἠλεκτρονίου ἐπιταχνομένου ἀπὸ διαφορὰ δυναμικοῦ ἑνὸς βόλτ. Ἡ ἀκριβὴς σχέση ἀνάμεσα στὸ eV καὶ τίς ἄλλες μονάδες δὲν ἔχει — ὅπως θὰ δοῦμε — πραχτική σημασία, γιατί ή σύγκριση γίνεται πάντοτε ἀνάμεσα σὲ φωτόνια πὸν ἀποδίνονται με τήν ἴδια μονάδα. Σὰν παράδειγμα, ἕνα φωτόνιο με ἐνέργεια 10 eV σημαίνει ἀπλῶς καὶ μόνο ὅτι εἶναι 5 φορές πιὸ δραστικὸ ἀπὸ ἕνα ἄλλο με ἐνέργεια 2 eV.

Μ' αὐτὸν τὸν τρόπο, ἂν πάρουμε ἕνα εἶδος φωτεινῆς ἀκτινοβολίας σὰ βάση καὶ ὀρίσουμε τήν ἐνέργεια τῶν φωτονίων της, σὲ eV, μπορούμε νὰ μελετήσουμε συγκριτικὰ ὅλα τὰ ὑπόλοιπα εἶδη.

2.8 Ἡ διαφορὰ στὴ συχνότητα — καὶ κατὰ συνέπεια στὴν ἐνέργεια — συνοδεύεται καὶ ἀπὸ διαφορὰ στὴν ὑποκειμενικὴ ἀντίληψη τοῦ χρώματος. Τὸ μάτι — σὰ δέχτης ἀκτίνων, σὰ δέχτης φωτονίων — ἐρεθίζεται κατὰ τρόπο ὑποκειμενικὰ διάφορο ἀπὸ τὰ κάθε εἶδους φωτόνια. Ἔτσι τὰ φωτόνια με ἐνέργεια 1,8 eV δίνουν τὴν ἐντύπωση τοῦ ἐρυθροῦ. Μιὰ κόκκινη, δηλαδή, φωτεινὴ ἀκτίνα εἶναι σύνολο φωτονίων με ἐνέργεια γύρω στὰ 1,8 eV γιὰ τὸ καθένα. Ἀντίθετα, τὰ φωτόνια με διπλάσια ἐνέργεια (3,6 eV) δίνουν τὴν ἐντύπωση τοῦ ἰώδους, τὰ φωτόνια με ἐνέργεια 2 eV τὴν ἐντύπωση τοῦ πορτοκαλλόχρου κ.ο.κ.

Γενικά, ὅσο ἀυξάνει ή ἐνέργεια τόσο τὸ ὑποκειμενικὸ ἐρέθισμα τοῦ χρώματος πάει ἀπ' τὸ κόκκινο στὸ ἰώδες, κατὰ τὴν κλασσικὴ σειρὰ τῶν χρωμάτων τῆς ἴριδας.

Φωτόνια ὑπάρχουν ἀπὸ πολὺ μικρῆς ἐνέργειας — πὸν φτάνει

ΕΙΔΗ ΦΩΤΕΙΝΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

	Ένεργεια φωτονίων (σε eV)		Συχνότητα (σε παλμούς / δευτ.)		Μήκος κύματος (λ) (σε Å)	
	Άπό	Μέχρι	Άπό	Μέχρι	Άπό	Μέχρι
Υπερυθρο φως	0,015	1,8	$375 \cdot 10^{10}$	$43 \cdot 10^{13}$	800000	7000
Όρατο φως	1,8	3,1	$43 \cdot 10^{13}$	$75 \cdot 10^{13}$	7000	4000
Υπεριώδες φως	3,1	83	$75 \cdot 10^{13}$	$20 \cdot 10^{15}$	4000	150
Ακτίνες Röntgen (X)	83	1240	$20 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{17}$	150	10
Ακτίνες γάμμα	1240	12400000	$3 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{21}$	10	0,001

στά δισεκατομμυριοστά του eV — μέχρι την τεράστια τιμή των δισεκατομμυρίων eV, κι' όλα αυτά δὲν προκαλοῦν πάντοτε ἐρέθισμα στὸ μάτι, σὲ τρόπο πὸν μπορούμε νὰ ποῦμε πῶς ὑπάρχει — γιὰ τὸν ἄνθρωπο — καὶ **φῶς ὄρατό** καὶ **φῶς μὴ ὄρατό**.

Ἡ τόσο μεγάλη ποικιλία φωτονίων καθιστᾷ ἀπαραίτητη τὴν κατάταξή τους σὲ ομάδες, μὲ βάση τὴν ἐνέργειά τους ἢ — πὸν εἶναι τὸ ἴδιο — τὴ συχνότητά τους, ομάδες πὸν συμβατικά ἀνέρχονται σὲ πέντε. Ἡ πρώτη ἀπ' αὐτὲς χαρακτηρίζεται τὸ **ὑπερ-υφθρο φῶς**, δηλαδή φωτόνια μὲ ἐνέργεια κάτω ἀπὸ 1,8 eV, πολὺ λίγο δραστικά καὶ ἀόρατα γιὰ τὸ ἀνθρώπινο μάτι. Ἡ δευτέρη περιλαμβάνει τὸ λεγόμενο **ὄρατό φῶς**, δηλαδή φωτόνια πὸν προκαλοῦν ἐρέθισμα στὸ μάτι καὶ πὸν ἡ ἐνέργειά τους πάει ἀπὸ 1,8 eV μέχρι 3 eV περίπου. Ἡ τρίτη ομάδα, **ὑπεριώδες φῶς**, δηλώνει φωτόνια ἀόρατα γιὰ τὸ μάτι ἀλλὰ μὲ ἐνέργεια μεγαλύτερη ἀπ' τὴν τῶν ὄρατῶν ἀκτίνων καὶ συγκεκριμένα ἀπὸ 3 eV μέχρι 100 eV. Σὲ μιὰ τέταρτη κατηγορία κατατάσσουμε τὸ — ἐπίσης ἀόρατο — **φῶς Roentgen** μὲ φωτόνια ἀπὸ 100 eV μέχρι 1200 eV. Οἱ ἀκτίνες τῆς ομάδας αὐτῆς, πὸν λέγονται καὶ ἀκτίνες X, ἔχουν, σὲ σχέση μὲ τίς ὄρατές, τεράστια ἐνέργεια στὴν ὁποία ἀκριβῶς ὀφείλεται καὶ ἡ μεγάλη διεσδυτικότητά. Σὲ μιὰ τελευταία ομάδα ἐντάσσεται τὸ **φῶς γάμμα** (ἀκτίνες γάμμα) πὸν τὰ φωτόνια του εἶναι τὰ πὸν δραστικά γιὰ τὴν ἐνέργειά τους φτάνει, ἀπὸ 1200 eV, στὰ δισεκατομμύρια eV. Ἡ κατηγορία αὐτὴ ἔχει ἰδιαίτερη σημασία γιὰ τὴν, ὅπως θὰ δοῦμε παρακάτω, τέτοιου εἴδους εἶναι τὰ φωτόνια πὸν ἐκλύονται κατὰ τίς πυρηνικὲς ἀντιδράσεις καὶ σ' αὐτὰ κυρίως ἐντοπίζεται ἡ ἐνέργεια τοῦ ἀτόμου, ἡ πυρηνικὴ ἐνέργεια.

Ἔτσι κάθε μετάδοση φωτὸς ἀπὸ ἓνα σημεῖο σὲ ἄλλο ἀντιστοιχεῖ σὲ μιὰ μεταφορὰ βλημάτων μὲ ὀρισμένη ἐνέργεια, ἀνάλογη πρὸς τὸ εἶδος τῶν φωτονίων. Σὰν παράδειγμα, ὁ ἥλιος στέλνει στὴ γῆ φῶς (ὑπερυφθρο, ὄρατό κι' ὑπεριώδες). Τὸ φῶς αὐτό, μὲ τὴ μορφή φωτονίων - βλημάτων, πέφτει στὴ γῆ, ἓνα μέρος του ἀνακλάται, διαθλάται καὶ διασκορπίζεται, ἓνα μεγάλο ὅμως μέρος του ἀπορροφᾶται ἀπ' τὴ γῆ σὲ τρόπο πὸν ἡ ἐνέρ-

γεια τῶν φωτονίων νὰ μετατρέπεται σὲ ἄλλες μορφές, δηλαδὴ σὲ χημικὴ ἐνέργεια, σὲ μηχανικὴ ἐνέργεια καὶ τελικὰ σὲ θερμότητα.

2.9 Πολλὲς φορές, γὰ νὰ διακρίνουμε τὴ μιὰ ἀκτινοβολία ἀπ' τὴν ἄλλη, χρησιμοποιοῦμε — ἀντὶ τῆς συχνότητος ἢ τῆς ἐνέργειας — ἓνα ἄλλο ποσὸ ποὺ λέγεται **μῆκος κύματος** (λ). Τὸ μέγεθος αὐτὸ ἐκφράζει τὸ διάστημα ποὺ διανύει κάθε ὀρισμένη ἀκτινοβολία — κάθε ὀρισμένο δηλαδὴ εἶδος φωτονίων — σὲ χρόνον ἑνὸς παλμοῦ. Κατὰ τὴ στοιχειώδη φυσικὴ τὸ διάστημα τοῦτο (λ) μᾶς τὸ δίνει ἡ σχέση

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.9.1)$$

ὅπου c ἡ ταχύτητα τοῦ φωτὸς καὶ ν ἡ συχνότητα. Ἐπειδὴ τὸ λ εἶναι κατὰ κανόνα πολὺ μικρὸ δὲν ἐκφράζεται σὲ ἑκατοστόμετρα (cm) ἀλλὰ σὲ πολὺ πλεονάζοντες μικρὲς μονάδες, σὲ μονάδες Ὠγκστρεμ (Ångström, Å) ὅπου 1 Å ἰσοδυναμεῖ πρὸς 1 δεκάκις ἑκατομμυριοστὸ τοῦ χιλιοστομέτρου. Ἔτσι ὅταν λέμε $\lambda = 200$ Å ἐννοοῦμε πὸς ἔχουμε φωτεινὲς ἀκτῖνες ὅπου τὸ κάθε φωτόνιό τους διανύει διάστημα 200 δεκάκις ἑκατομμυριοστών τοῦ χιλιοστομέτρου σὲ χρόνον ἑνὸς παλμοῦ του.

Ἀπ' τὸν τύπο (2.9.1) φαίνεται καθαρὰ ἡ σχέση ἀνάμεσα στὴ συχνότητα καὶ τὸ μῆκος κύματος, ποὺ δείχνει πὸς ὅσο μεγαλύτερη εἶναι ἡ συχνότητα τόσο μικρότερο τὸ μῆκος κύματος. Κατ' αὐτὸν τὸν τρόπο ἂν μιὰ ἀκτινοβολία εἶναι δραστικότερη — ἔχει δηλαδὴ μεγαλύτερη συχνότητα — ἀπὸ μιὰν ἄλλη, θᾶχει καὶ μικρότερο μῆκος κύματος.

Συνδυάζοντας τὸν τύπο τοῦτο (2.9.1) μὲ τὸν (2.7.1) βρίσκουμε τὴ σχέση ἀνάμεσα στὸ λ καὶ τὴν ἐνέργεια

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.9.2)$$

μὲ τὸ E σὲ ἔργια (erg) καὶ τὸ λ σὲ ἑκατοστόμετρα (cm). Βάζοντας στὴ θέση τῶν h καὶ c τὶς ἀριθμητικὲς τιμές τους (βλ. § 2.5 καὶ 2.7) καὶ κάνοντας τὴν κατάλληλη διόρθωση

μπορούμε να βρούμε την ίδια σχέση σε τρόπο όμως που η ενέργεια να εκφράζεται σε eV και το μήκος κύματος σε Å :

$$E = \frac{12400}{\lambda} \quad (2.9.3)$$

Έτσι, σαν παράδειγμα, μιὰ ακτινοβολία της ορατής περιοχής με μήκος κύματος $\lambda = 6200 \text{ \AA}$ αντιστοιχεί σε φωτόνια με ενέργεια

$$E = \frac{12400}{6200}$$

$$E = 2 \text{ eV}$$

2.10 Η διαφορά στην ενέργεια των φωτονίων — και κατά συνέπεια στη συχνότητα και το μήκος κύματος — οδηγεί και σ' άλλα πορίσματα.

Συγκεκριμένα, όσο πιο μεγάλη είναι η ενέργεια κι' η συχνότητα — και πιο μικρό το λ — τόσο και πιο μεγάλη είναι **διεισδυτικότητα** μιᾶς ακτινοβολίας. Έτσι εξηγείται γιατί οι υπέρυθρες ακτίνες απορροφούνται εύκολα κι' απ' τὸν ἀέρα ἀκόμα, οἱ ὄρατες διαπερνοῦν τὸν ἀέρα καὶ πολλὰ ἄλλα σώματα (σὰν τὸ γυαλί), οἱ ὑπεριώδεις — πὶὸ δραστικὲς — διαπερνοῦν καὶ πολλὰ ἀδιαφανῆ ὑλικά (σὰν τὸ χαρτί), οἱ Ραϊντγεν περνοῦν καὶ μέσα ἀπ' τοὺς ἰστούς καὶ σ' αὐτὸ ἀκριβῶς τὸ γεγονός στηρίζεται ἡ ἀκτινοσκόπηση. Ἀπ' ὅλες πὶὸ διεισδυτικὲς εἶναι τὰ γάμμα, γιὰ τὶς ὁποῖες δὲν ἀποτελοῦν ἐμπόδιο οὔτε λεπτὰ μεταλλικά στρώματα.

Ἡ αὔξηση τῆς δραστικότητας — ὅσο πᾶμε ἀπ' τὶς ὑπερύθρες στὶς γάμμα — φέρνει σὰν ἀποτέλεσμα καὶ μιὰ αὔξηση στην ἰσχὺ τῶν χημικῶν φαινομένων. Οἱ ὑπερύθρες καὶ οἱ ὄρατὲς ἀκτίνες εἶναι **χημικὰ ἀδρανεῖς** ἢ πολὺ λίγο **δραστικὲς**. Ἐτο βλέπουμε πὸς τὸ κόκκινο φῶς δὲν προσβάλλει μιὰ φωτογραφικὴ πλάκα πού, ἀντίθετα, ἀλλοιώνεται αἰσθητὰ ἀπὸ τὸ φῶς μετὰ συχνότητα ἀντίστοιχη πρὸς τὸ μπλε καὶ πέρα. Οἱ ἀκτίνες Ραϊντγεν καὶ οἱ γάμμα προσβάλλουν ἀκόμα καὶ πολλὰ ὄργανικὲς οὐσίες, ὅπως εἶναι τὰ συστατικὰ τῶν κυττάρων καὶ σ' αὐτὸ ἀκριβῶς τὸ γεγονός ἐγκτεται ἡ βιοχημικὴ δράσις τῶν ἀκτινοβολιῶν τῶν σχετικῶν μετὰ τὶς πυρηνικὲς ἀντιδράσεις

3. Η ΜΕΤΑΣΤΟΙΧΕΙΩΣΗ ΣΑΝ ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

3.1 Ἀνάμεσα στὰ φαινόμενα, ὅπου παρουσιάζεται ἐκπομπὴ ἐνέργειας σὲ μορφή φωτονίων, πρωτεύουσα θέση ἔχουν αὐτὰ ποὺ χαρακτηρίζουμε σὰν *πυρηνικὲς ἀντιδράσεις*. Κάθε τέτοιο φαινόμενο συνοδεύεται, κατὰ κανόνα, ἀπὸ μιὰ μείωση στὴ μᾶζα τῶν ὑλικῶν ποὺ συμμετέχουν στὸν ὅλο κύκλο, ἀπὸ ἓνα *ἔλλειμμα μᾶζας*, ποὺ δίνει γένεση σὲ φωτόνια.

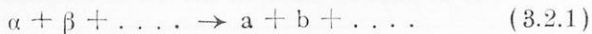
Σὰν πυρηνικὴ ἀντίδραση ὀρίζουμε κάθε *ἀλλοίωση στὸν πυρήνα* ἐνὸς ἀτόμου, ἀλλοίωση ποὺ μπορεῖ νᾶναι σύνθεση, ἀποσύνθεση ἢ πολλαπλὴ μεταβολή.

Σὰν παράδειγμα, ἂν στὸν πυρήνα τοῦ ἀνθρακα ${}_6\text{C}^{12}$ προσθέσουμε ἓνα πρωτόνιο (${}_1\text{p}^1$) πετυχαίνουμε μιὰ σύνθεση ποὺ ἔχει, σὰν ἀποτέλεσμα, τὸ σχηματισμὸ ἐνὸς καινούργιου πυρήνα καὶ συγκεκριμένα πυρήνα ἀζώτου ${}_7\text{N}^{13}$. Ἀντίθετα, ἂν ἀπ' τὸν πυρήνα ${}_6\text{C}^{12}$ ἀφαιρέσουμε ἓνα ${}_1\text{p}^1$ δημιουργοῦμε ἓναν ἄλλο καινούργιο πυρήνα — βορίου ${}_5\text{B}^{11}$ — σὰν ἀποτέλεσμα τῆς ἀποσύνθεσης τοῦ ἀρχικοῦ πυρήνα σὲ δυὸ κομμάτια.

Σὲ κάθε πυρηνικὴ ἀντίδραση⁽¹⁾ ἢ ἀλλοίωση μπορεῖ νᾶναι προσθήκη ἢ ἀφαίρεση πρωτονίων, νετρονίων, ὀλόκληρων συγκροτημάτων ἢ ἀκόμα καὶ ἠλεκτρονίων, ὅμως θὰ δοῦμε πιὸ πέρα. Ὅμως πολλὲς φορὲς εἶναι σύνθετη ἢ ἀλλοίωση, ὅπως συμβαίνει σὲ μιὰ προσθήκη πρωτονίου μὲ ταυτόχρονη ἀποβολὴ νετρονίου.

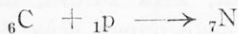
(1) Οἱ πυρηνικὲς ἀντιδράσεις λέγονται καὶ *ἐνδοατομικοὶ μετασχηματισμοί*.

3.2 Μιά πυρηνική αντίδραση τή γράφουμε σάν εξίσωση με τή γενική μορφή

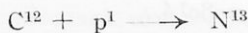


όπου τὰ σύμβολα $\alpha, \beta \dots$ δηλώνουν τ' αρχικά — πριν απ' τήν αλλοίωση — μέλη (πυρήνες ή σωματίδια) καί $a, b \dots$ τὰ τελικά — μετά τήν αλλοίωση.

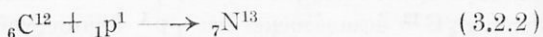
Σε κάθε πυρηνική αντίδραση ισχύει ή αρχή τῆς διατήρησης τῶν ατομικῶν ἀριθμῶν. Ἐτσι στό παράδειγμα μετατροπῆς [τοῦ ${}_6\text{C}^{12}$ σέ ἄζωτο ${}_7\text{N}^{13}$, με τήν προσθήκη ἑνός πρωτονίου ἔχουμε



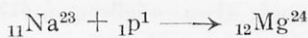
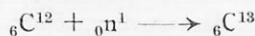
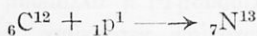
όπου $6 + 1 = 7$. Ἐπίσης ισχύει καί ή αρχή διατήρησης τῶν μαζικῶν ἀριθμῶν (τῶν στρογγυλεμένων δηλαδή μαζῶν) ἔτσι πού νά πρέπει



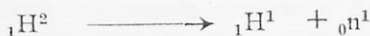
όπου $12 + 1 = 13$. Γι' αὐτό — με βάσει καί τίς δυò ἀρχές — τὸ παραπάνω παράδειγμα πέρνει — σύμφωνα με τή γενική εξίσωση (3.2.1) — τή μορφή



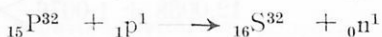
3.3 Ὅπως εἶπαμε οἱ πυρηνικές ἀντιδράσεις μπορεῖ νάνα ἀπλές συνθέσεις. Τέτοιες εἶναι οἱ παρακάτω



Ἀκόμα ἔχουμε καί ἀποσυνθέσεις, σάν τίς



Σὲ μιὰ σύνθετη ἀλλοίωση ἔχουμε καὶ σύνθεση καὶ ταυτόχρονα ἀποσύνθεση, ὅταν στίς παρακάτω περιπτώσεις



Πολλὲς φορές — κι' αὐτὸ εἶναι πρὸ συνηθισμένο — ἡ μεταβολὴ ἔγκειται ὄχι σὲ μεμονωμένα ${}_1\text{p}^1$ ἢ ${}_0\text{n}^1$ ἀλλὰ σ' ὀλόκληρα σωματίδια μὲ τὴ μορφή μικροτέρων πυρήνων. Ἐτσι ὁ πυρήνας τοῦ ραδίου ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ ἀποσυντίθεται μὲ ἀποβολὴ ἑνὸς πυρήνα ἡλίου ${}_2\text{He}^4$ καὶ δίνει γένεση σ' ἕναν πυρήνα ραδονίου ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ κατὰ τὸ σχῆμα



ὅπου βλέπουμε καὶ τὴ διατήρηση τῶν ἀτομικῶν ἀριθμῶν ($88 = 86 + 2$) καὶ τῶν μαζικῶν ($226 = 222 + 4$).

Κατὰ τρόπο ἀντίστοιχο τὸ πολώνιο μετατρέπεται σὲ μόλυβδο



Σ' ὅλες τὶς πυρηνικὲς ἀντιδράσεις τὰ διάφορα σύνθετα σύμβολα (ἐκ τῶν τῶν ἀπλῶν δηλαδή ${}_1\text{p}^1$, ${}_0\text{n}^1$, ${}_{-1}\text{e}^0$) ὑποδηλώνουν πυρήνες ἀλλὰ κι' ὀλόκληρα ἄτομα, μιὰ πού τὰ πλανητικὰ ἠλεκτρόνια δὲν παίζουν οὐσιαστικὸ ρόλο στὸ ὅλο φαινόμενο.

3.4 Ἐὰς δοῦμε τώρα τὴν πυρηνικὴ ἀντίδραση σὲ συσχέτιση μὲ τὴν ἐνέργεια πού ἐκλύεται κατὰ τὴν ἐμφάνισή της, κι' ἄς πάρουμε — γιὰ τὸ λόγο αὐτὸ — ἕνα συγκεκριμένο παράδειγμα.

Ὅταν ὁ ἄνθρακας μετατρέπεται σὲ ἄζωτο



ἔχουμε ἰσότητα ἀνάμεσα στοὺς μαζικοὺς ἀριθμοὺς ($12 + 1 = 13$).

Ὅμως ἂν ἐξετάσουμε, μὲ μεγαλύτερη ἀκρίβεια, τὸ φαινόμενο πέρνοντας τὶς ἀκριβεῖς τιμὲς — ἀντὶ τῶν στρογγυλεμένων μαζικῶν ἀριθμῶν — θὰ δοῦμε πὸς ἡ ἰσότητα αὐτὴ δὲν ἰσχύει.

Πράγματι ἡ μᾶζα τοῦ πυρήνα ${}_6\text{C}^{12}$ εἶναι (σὲ ΜΑΜ) ἴση πρὸς

12,0038, ή του ${}^1\text{p}^1$ πρὸς 1,0076 καὶ ή του ${}^{13}\text{N}^{13}$ πρὸς 13,0089. Ἔτσι τὸ ἄθροισμα τῶν μαζῶν τῶν πρώτων μελῶν εἶναι μεγαλύτερο ἀπ' τὴ μάζα τοῦ τελικοῦ προϊόντος

$$12,0038 + 1,0076 > 13,0089$$

$$13,0114 > 13,0089$$

Ἡ διαφορὰ ποὺ μένει (13,0114 — 13,0089) καὶ ποὺ φτάνει στὶς 0,0025 MAM ἀποτελεῖ τὸ **ἔλλειμμα μάζας**, τὸ ποσοδὸ δηλαδὴ ὕλης ποὺ μετατρέπεται σ' ἐνέργεια. Ἀπ' τὴν ἐξίσωση τοῦ Einstein (2.5.1) βρίσκουμε ὅτι ή σχέση ἀνάμεσα στὴν ἐνέργεια E (σὲ MeV)⁽¹⁾ καὶ τὴ μάζα m (σὲ MAM κι' ὄχι πιά σὲ γραμμάρια) μπορεῖ νὰ γραφῆ στὴ μορφή

$$E = 931 m \quad (3.4.1)$$

κι' ἔτσι — γιὰ τὸ παραπάνω παράδειγμα — ἔχουμε

$$E = 931 \cdot 0,0025$$

$$E = 2,3275$$

$$E = 2,3 \text{ MeV} \quad (\text{περίπου})$$

Μ' ἄλλα λόγια κατὰ τὴν ἐνσωμάτωση ἑνὸς πρωτονίου στὸν πυρήνα τοῦ ${}^6\text{C}^{12}$ δημιουργεῖται ἓνα φωτόνιο μὲ ἐνέργεια 2,3 ἑκατομμυρίων eV περίπου.

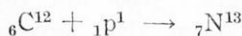
Εἶναι φανερὸ πὸς ή τόσο μεγάλη τιμὴ τῆς ἐνέργειας χαρακτηρίζει τὴν ἀκτινοβολία αὐτὴ σὰν **ἀκτινοβολία γάμμα**, δηλαδὴ σὰν ἀκτινοβολία φωτεινὴ — ἀλλὰ μὴ ὄρατὴ — μὲ μεγάλη **ἰσχύ**, μεγάλη διεισδυτικὴτητα καὶ τεράστια χημικὴ δραστηκότητα.

Σὲ ὅλα τὰ φαινόμενα — φυσικά, χημικά, πυρηνικά — ἔχουμε, κατὰ τὴν ἐκπομπὴ ἀκτινοβολίας, πάντοτε ἑλλείμματα στὴ μάζα. Ἡ μόνη διαφορὰ εἶναι ὅτι στὰ πυρηνικά φαινόμενα, στὶς πυρηνικὲς δηλαδὴ ἀντιδράσεις, τὰ ἑλλείμματα αὐτὰ εἶναι σχε-

(1) Ἐνα MeV (μεγαηλεκτρονιοβόλτ) ἰσοδυναμεῖ πρὸς ἓνα ἑκατομμύριο eV (ἡλεκτρονιοβόλτ).

τικά πολὺ μεγαλύτερα ἀπὸ ὅτι στὰ ἀπλᾶ φυσικὰ καὶ χημικὰ φαινόμενα, καὶ γι' αὐτὸν τὸ λόγο οἱ πυρηνικὲς ἀντιδράσεις χαρακτηρίζονται σήμερα σὰν ἡ ἰσχυρότερη πηγὴ ἐνέργειας.

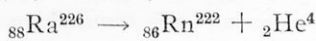
3.5 Μιὰ πυρηνικὴ ἀντίδραση μποροῦμε νὰ τὴν ὀνομάσουμε καὶ **μεταστοιχείωση**, γιὰτι κατὰ κανόνα συνοδεύεται ἀπὸ ἀλλαγὴ στὸν ἀτομικὸ ἀριθμὸ καί, κατὰ συνέπεια, ἀπὸ ἀλλαγὴ στὴ φύση τοῦ ἀρχικοῦ στοιχείου. Ἔτσι τὴν ἀντίδραση ποὺ καὶ πρὸ πάνω ἐξετάσαμε



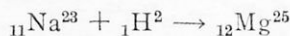
τὴ λέμε μεταστοιχείωση γιὰτι τὸ στοιχεῖο C μετατρέπεται στὸ στοιχεῖο N, μ' ἄλλα λόγια γιὰτι ὁ ἄνθρακας **μεταστοιχειώνεται** σὲ ἄζωτο, σὲ στοιχεῖο δηλαδὴ μὲ ὀλότελα διαφορετικὲς χημικὲς καὶ φυσικὲς ιδιότητες (1).

Στὴ ριζικὴ ἀλλαγὴ τῶν ιδιοτήτων ὀφείλεται καὶ ἡ ἀνακάλυψη τῶν πυρηνικῶν ἀντιδράσεων, ὡς καὶ ἡ κατανόηση τῆς ἔσωτερικῆς δομῆς τοῦ ἀτόμου, κι' αὐτὸ πρωτοδιαπιστώθηκε πρῶτον στὰ 1895 ἀπ' τὸ γάλλο H. Becquerel.

3.6 Οἱ μεταστοιχειώσεις χωρίζονται σὲ δυὸ μεγάλες κατηγορίες, σὲ φυσικὲς καὶ σὲ τεχνητές. **Φυσικὴ μεταστοιχείωση** λέμε κάθε πυρηνικὴ ἀντίδραση ποὺ παρουσιάζεται μόνη τῆς, χωρὶς τὴν ἐπίδραση εἰδικῶν συνθηκῶν. Ἀντίθετα, λέμε **τεχνητὴ μεταστοιχείωση** κάθε μιὰ ποὺ ἀπαιτεῖ εἰδικές, ὀρισμένες, χαρακτηριστικὲς συνθῆκες. Ἔτσι ἡ ἀντίδραση



χαρακτηρίζεται σὰ φυσικὴ μεταστοιχείωση, γιὰτι τὸ ράδιο μόνο του — χωρὶς καμμιά ἐξέχωρη ἐπίδραση — ἀποσυντίθεται σὲ ραδόνιο καὶ ἥλιο. Ὅμως ἡ ἀντίδραση



χαρακτηρίζεται σὰν τεχνητὴ μεταστοιχείωση, γιὰτι τὸ νάτριο

(1) Τὸν ὄρο **μεταστοιχείωση** τὸν ἐπεκτείνουμε καὶ στὶς ἀντιδράσεις ὅπου δὲν παρουσιάζεται ἀλλαγὴ στὸν ἀτομικὸ ἀριθμὸ, ὅπως στὴ μετατροπὴ τοῦ ${}_6\text{C}^{12}$ σὲ ${}_6\text{C}^{13}$.

πρέπει να δεχτεί την πρόσκρουση πυρήνων από βαρὺ ὑδρογόνο (${}^1_1\text{H}^2$) πού να κινουῦνται με ὀρισμένη ταχύτητα, ταχύτητα πού την πετυχαίνουμε με κατάλληλες ἐπιταχυντικές συσκευές. Ἔτσι εἶναι μόνο δυνατὸ νὰ προκύψει ὁ πυρήνας τοῦ μαγνησίου.

3.7 Οἱ φυσικὲς μεταστοιχειώσεις ἀκολουθοῦν μερικoὺς ἀπλοὺς κανόνες, ὅπως βρέθηκε ὕστερα ἀπ' τὶς κοσμοϊστορικὲς μελέτες κι' ἔρευνες τοῦ ζεύγους Κιουρί (Pierre Curie καὶ Mariya Sklodowska - Curie) γύρω στὰ 1900. Πρῶτα ἀπ' ὅλα κάθε φυσικὴ μεταστοιχείωση εἶναι πάντοτε καὶ μόνο ἀποσύνθεση, ποτὲ σύνθεση. Ἀκόμα, ἀπὸ ἓναν ἀρχικὸ πυρήνα (Π_1) γεννιέται ἓνας μόνο καινούργιος πυρήνας (Π_2) με ἀποβολὴ ἑνὸς καὶ μόνο σωματιδίου (σ) κατὰ τὸ σχῆμα

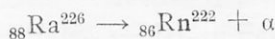


Τὰ σωματίδια αὐτά, πού γεννιοῦνται κατὰ τὶς φυσικὲς μεταστοιχειώσεις, δὲν εἶναι παρὰ δυὸ λογίων μόνο, κι' ὀνομάστηκαν στὴν ἀρχὴ — ὅταν δὲν ἦταν ἀκόμα γνωστὴ ἡ φύση του — σωματίδια **ἄλφα** καὶ **βῆτα** ἀντίστοιχα.

Σήμερα ξέρουμε πὸς τὰ **σωματίδια ἄλφα** εἶναι **πυρήνες τοῦ στοιχείου ἡλίου** (${}^2_2\text{He}^4$), πυρήνες δηλαδὴ φτιαγμένοι ἀπὸ δυὸ ${}^1_1\text{p}^1$ καὶ δυὸ ${}^1_0\text{n}^1$. Ἔτσι βγαίνει σὰν πόρισμα πὸς κάθε ἐκπομπὴ σωματιδίου ἄλφα δημιουργεῖ πυρήνα με ἀτομικὸ ἀριθμὸ μικρότερο κατὰ 2 μονάδες καὶ μαζικὸ ἀριθμὸ μικρότερο κατὰ 4. Πολλὲς φορὲς — γιὰ ἀπλούστευση — θεωροῦνται γνωστοὶ οἱ ἀριθμοὶ οἱ χαρακτηριστικοὶ τοῦ σωματιδίου αὐτοῦ κι' ἔτσι ἡ ἀντίδραση

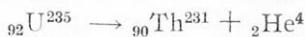
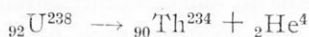


γράφεται καὶ



Ὅσα εἶδη πυρήνων ἔχουν τὴν ιδιότητα ν' ἀποβάλλουν — μόνα τους — σωματίδια ἄλφα χαρακτηρίζονται σὰν **φυσικῶς α - ραδιενεργά** ἢ, πιὸ ἀπλᾶ, σὰν α - ραδιενεργά. Στὴ φύση ἔχουν βρεθῆ 29 διάφορα τέτοια εἶδη πυρήνων κι' ἀνήκουν ὅλα σὲ στοιχεῖα με μεγάλους ἀτομικοὺς ἀριθμούς. Ἀνάμεσα σ' αὐτὰ

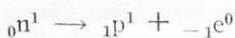
ἀξιοσημείωτα εἶναι τὸ κλασσικὸ ράδιο (${}_{88}\text{Ra}^{226}$) πὸν ἀναλύ-
φτηκε ἀπ' τὸ ζευγὸς Κιουρί, δυὸ ἰσότοπα τοῦ οὐρανίου καὶ τὸ
πολώνιο πὸν δίνουν, ἀντίστοιχα, ραδόνιο, θόριο καὶ μόλυβδο
σύμφωνα μὲ τὶς παρακάτω ἐξισώσεις



3.8 Σ' ἀντίθεση μὲ τὰ σωματίδια ἄλφα, τὰ βῆτα δὲν
εἶναι πυρῆνες, ἀλλὰ ἠλεκτρόνια ($-{}_1e^0$) σὰν κι' αὐτὰ πὸν περι-
φέρουνται πλανητικὰ γύρω ἀπ' τοὺς πυρῆνες τῶν ἀτόμων.

Στὸ σημεῖο αὐτὸ πρέπει ὅμως νὰ προσέξουμε πὼς τὰ ἠλε-
κτρόνια πὸν θεωροῦμε σὰ **σωματίδια βῆτα** εἶναι **πυρηνικὰ** κι'
ὄχι πλανητικὰ, προέρχονται δηλαδὴ ἀπ' τὸ ἐσωτερικὸ τοῦ πυ-
ρήνα τῶν ἀτόμων. Ὅμως ἡ ἄποψη αὐτὴ φαίνεται ἀσυμβίβαστη
μὲ ὅσα εἶπαμε πιὸ πάνω (§ 1.12), ὅταν θεωρήσαμε ὅτι ὁ πυ-
ρήνας δὲν περιέχει ἠλεκτρόνια παρὰ μόνο πρωτόνια καὶ νετρό-
νια. Ἀλλὰ βρέθηκε καὶ γιὰ τὸ θέμα αὐτὸ μιὰ λύση συμβιβαστὴ
μὲ τὴ δομὴ τοῦ ἀτόμου, μιὰ λύση πὸν στάθηκε ἱκανὴ νὰ δώσει
μιὰν ἐρμηνεῖα ἱκανοποιητικὴ γιὰ τὴν προέλευση τῶν σωματιδίων
αὐτῶν.

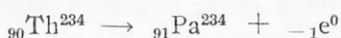
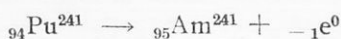
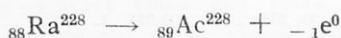
Θεωρήθηκε πὼς τὸ νετρόνιο (${}_0n^1$) δὲν εἶναι ἀπλὸ ἀλλὰ
σύνθετο σωματίδιο καὶ σὰν τέτοιο διασπᾶται κατὰ τὸ σχῆμα



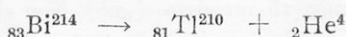
Ἡ ἄποψη αὐτή, πὸν ὑποστηρίχθηκε γιὰ πρώτη φορὰ ἀπ'
τὸν ἄγγλο J. J. Thomson (1900), ἐγκείται στὸ νὰ θεωρήσουμε
τὴν ἐκπομπὴ ἑνὸς σωματιδίου βῆτα σὰν μιὰν ἀρχικὴ ἀποσύνθεση
νετρονίου, πὸν ἀφίνει στὴ θέση του ἕνα πρωτόνιο καὶ διώχνει
ἕνα ἠλεκτρόνιο. Ἐτσι ἡ β-μεταστοιχείωση ἀφίνει ἀναλλοίωτο
τὸ μαζικὸ ἀριθμὸ καὶ προκαλεῖ αὔξηση τοῦ φορτίου — δηλαδὴ
τοῦ ἀτομικοῦ ἀριθμοῦ — κατὰ μιὰ μονάδα.

Ὅσα εἶδη πυρηνῶν ἔχουν τὴν ἰδιότητα ν' ἀποβάλλουν —

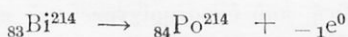
μόνα τους — σωματίδια βήτα χαρακτηρίζονται σάν φυσικῶς **β - ραδιενεργά**. Στὴ φύση ἔχουν βρεθῆ γύρω στὰ 20 διάφορα τέτοια εἶδη πυρήνων κι' ἀνήκουν — ὅπως καὶ τὰ α - ραδιενεργὰ — σὲ βαρεῖς πυρήνες. Ἀνάμεσα σ' αὐτὰ ἀξιοσημεῖοτο εἶναι τὸ ράδιο ${}_{88}\text{Ra}^{228}$ (ἰσότοπο πρὸς τὸ ${}_{88}\text{Ra}^{226}$) ποὺ μεταστοιχειώνεται σὲ ἀκτίνιο, τὸ πλουτόνιο ποὺ μεταστοιχειώνεται σὲ ἀμερίκιο, τὸ θόριο ${}_{90}\text{Th}^{234}$ ποὺ δίνει πρωτακτίνιο κι' ὁ μόλυβδος ${}_{82}\text{Pb}^{214}$ ποὺ δίνει βισμούθιο, κατὰ τὶς ἑξισώσεις



3.9 Σχεδὸν ὅλα τὰ φυσικῶς ραδιενεργὰ εἶδη πυρήνων ἐκπέμπουν ἢ μόνον ἄλφα ἢ μόνον βήτα σωματίδια, ὅμως ὑπάρχουν καὶ μερικὰ ποὺ χαρακτηρίζονται σάν **α - β - ραδιενεργά**. Σ' αὐτὰ τὰ εἶδη ἓνα μέρος ἀπ' τὸ ὅλικο πλῆθος τῶν πυρήνων μεταστοιχειώνεται κατὰ τὸν ἄλφα τρόπο κι' ἓνα μέρος κατὰ τὸ βήτα, σὲ ἀναλογίαις — ἐπὶ τοῖς ἑκατὸ — αὐστηρὰ καθορισμένες. Τέτοιο εἶναι τὸ λεγόμενον βισμούθιο — 214 (δηλαδὴ ${}_{83}\text{Bi}^{214}$) ποὺ δίνει κατὰ ἓνα μέρος σωματίδια ἄλφα καὶ μεταστοιχειώνεται σὲ θάλλιο σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



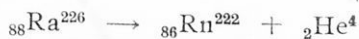
καὶ κατὰ ἓνα ἄλλο μέρος σωματίδια βήτα, ὅποτε μεταστοιχειώνεται σὲ πολώνιο σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



Ἡ μεταστοιχείωση γίνεται κατὰ τὰ 0,04 % σὲ θάλλιο καὶ κατὰ 99,96 % σὲ πολώνιο, δηλαδὴ μέσα σὲ 10000 πυρήνες βισμούθιου — 214 οἱ 9996 δροῦν σάν β - ραδιενεργοὶ κι' οἱ ὑπόλοιποι 4 σάν α - ραδιενεργοί. Ὅχιτῶ εἶδη τέτοιων πυρήνων εἶναι γνωστὰ σήμερα. Ἀπ' αὐτὰ ἓνα ἀνήκει στὸ ἀκτίνιο (τὸ ${}_{89}\text{Ac}^{227}$), δυὸ στὸ πολώνιο (τὰ ${}_{84}\text{Po}^{215}$, ${}_{84}\text{Po}^{218}$) καὶ πέντε στὸ βισμούθιο

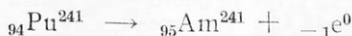
(τὰ $_{83}\text{Bi}^{210}$, $_{83}\text{Bi}^{211}$, $_{83}\text{Bi}^{212}$, $_{83}\text{Bi}^{213}$, $_{83}\text{Bi}^{214}$). Ἐνῶ ὁμως γιὰ τὸ ἀκτίνιο καὶ τὸ πολόνιο δὲν ὑπάρχουν σταθερὰ ἰσότοπα, ἀντίθετα στὸ βισμούθιο εἶναι σταθερὸ — δηλαδὴ μὴ ραδιενεργὸ — τὸ $_{83}\text{Bi}^{209}$.

3.10 Στὸ σημεῖο αὐτὸ πρέπει νὰ λάβουμε ὑπ' ὄψη μας πὼς κάθε μεταστοιχείωση δὲ γίνεται ἀκαριαῖα, ἀλλὰ μὲ ταχύτητα πεπερασμένη, γιὰτὶ ἀλλοιῶς δὲν θάταν νοητὴ ἢ ὑπαρξὴ τῶν φυσικῶς ραδιενεργῶν στὸν κόσμο. Ἔτσι ἂν πάρουμε μιὰ ποσότητα ραδίου — 226 πού μεταστοιχειώνεται σὲ ραδόνιο σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



θὰ δοῦμε πὼς δὲν ἀποσυντίθενται ταυτόχρονα κι' ἀκαριαῖα ὅλοι οἱ πυρῆνες πού περιέχονται στὴν ποσότητα αὐτὴ, ἀλλὰ λίγοι - λίγοι μὲ τὴν πάροδο τοῦ χρόνου, μ' ἓνα συνεχῶς ἐπιβραδυνόμενο ρυθμὸ, σὲ τρόπο πού ἂν μέσα σ' ἓνα ὀρισμένο χρονικὸ διάστημα μεταστοιχειώνονται 1000 πυρῆνες, στὸ ἐπόμενο ἴδιο χρονικὸ διάστημα νὰ μεταστοιχειώνονται μόνο 500 ἀπ' τοὺς ὑπόλοιπους, στὸ ἀμέσως ἐπόμενο ἄλλοι 250 κ.ο.κ.

Βρέθηκε πὼς ὁ ρυθμὸς αὐτὸς καθορίζεται μὲ βάση ἓναν πολὺ σπουδαῖο παράγοντα πού λέγεται **χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ** (συμβ. T). Ὁ παράγοντας αὐτὸς δηλώνει πόσος χρόνος χρειάζεται γιὰ νὰ μεταστοιχειωθεῖ μιὰ ὀρισμένη ποσότητα ραδιενεργοῦ κατὰ τὸ μισὸ τῆς ἐκάστοτε ἀρχικῆς ποσότητάς του. Σὰν παράδειγμα ἄς πάρουμε τὸ πλουτώνιο — 241 πού δίνει σωματίδια βῆτα κατὰ τὴν ἀντίδραση

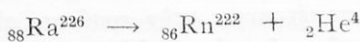


μὲ χρόνο ὑποδιπλασιασμοῦ $T = 10$ ἔτη. Ἡ τιμὴ αὐτὴ τοῦ T γιὰ τὸ ραδιενεργὸ τοῦτο εἶδος σημαίνει πὼς ἂν πάρουμε σήμερα (1-12-1961) 1000 γραμμάρια πλουτωνίου θὰ δοῦμε πὼς θ' ἀρχίσουν νὰ μεταστοιχειώνονται, μὲ τέτοιο ρυθμὸ ὥστε μετὰ ἀπὸ 10 ἔτη (τὴν 1-12-1971) νὰ μείνουν μόνο 500 gr, μετὰ ἀπὸ ἄλλα 10 ἔτη (τὴν 1-12-1981) 250 gr, μετὰ ἀπὸ ἄλλα 10

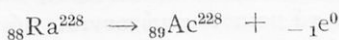
έτη (τὴν 1 - 12 - 1991) 125 gr κ.ο.κ. Ἐπ' αὐτὸ βγαίνει τὸ συμπέρασμα ὅτι ἡ ταχύτητα, στὴν ἀντίδραση, ἐλαττώνεται συνεχῶς γιατί ἐνῶ στὴν πρώτη δεκαετία (1961 - 1971) μεταστοιχειώνονται 500 γραμμάρια ἀνὰ δεκαετία, στὴ δεύτερη μεταστοιχειώνονται μόνο 250 καὶ στὴν τρίτη μόνο 125.

Ὁ χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ ἀποτελεῖ χαρακτηριστικὸ γνώρισμα γιὰ τὸ κάθε ραδιενεργὸ εἶδος πυρήνων καὶ γι' αὐτὸ θεωρεῖται σὰν **εἰδοποιὸς διαφορὰ**, ἀνάμεσα σ' ἓνα εἶδος καὶ σ' ἄλλο. Μιὰ ποὺ δὲν ὑπάρχουν δυὸ εἶδη μὲ τὸν ἴδιο T συμπεραίνουμε πὼς τὸ χρόνο αὐτὸ μπορούμε νὰ τὸν χρησιμοποιήσουμε γιὰ νὰ ξεχωρίσουμε μεταξὺ τους κυρίως τὰ ἰσότοπα εἶδη τοῦ ἴδιου στοιχείου.

Ἔτσι τὸ ράδιο — 226 μεταστοιχειώνεται κατὰ τὴν ἀντίδραση

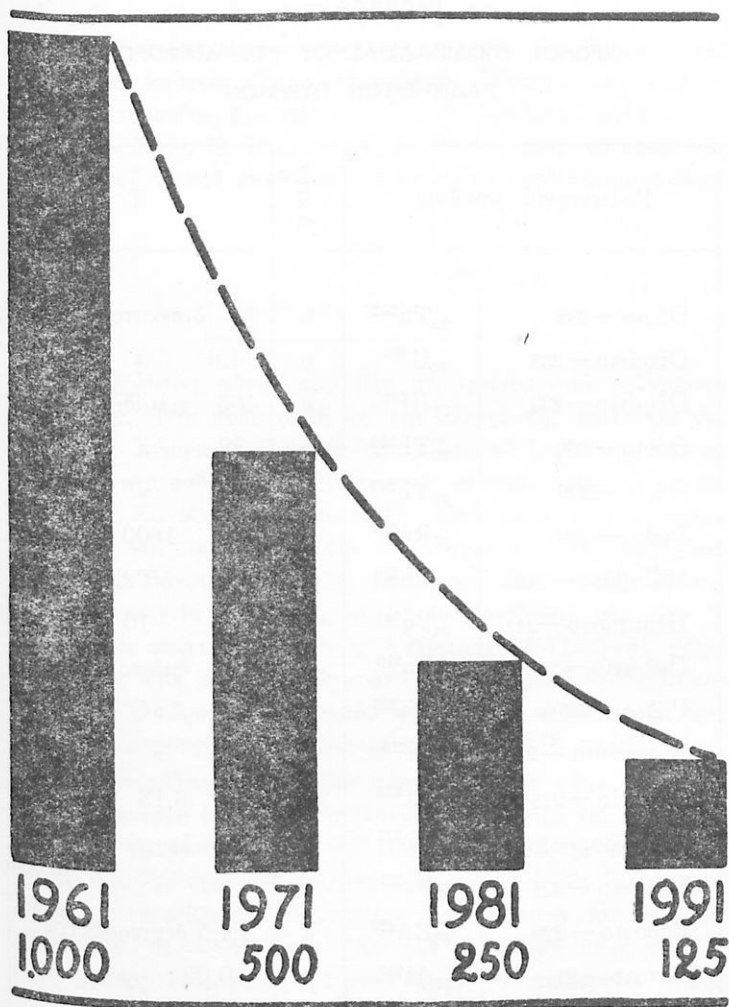


μὲ $T = 1620$ ἔτη. Ἀντίθετα ὅμως τὸ ἰσότοπὸ τοῦ ράδιο — 228 μεταστοιχειώνεται κατὰ τὴν ἀντίδραση



μὲ $T = 11,2$ ἡμέρες. Γι' αὐτὸ τὸ ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ τὸ λέμε καὶ **ράδιο 1620 ἐτῶν**, ἐνῶ τὸ ${}_{88}\text{Ra}^{228}$ τὸ λέμε καὶ **ράδιο 11,2 ἡμερῶν**. Μὲ βάση τὸν T τὰ διάφορα εἶδη χωρίζονται μὲ **μακροβία** καὶ **βραχύβια**. Μακρόβια εἶναι τὸ θόριο — 232 (${}_{90}\text{Th}^{232}$) μὲ $T = 14$ δισεκατομμύρια ἔτη ($T = 14 \cdot 10^9$ ἔτη), τὸ οὐράνιο — 238 (${}_{92}\text{U}^{238}$) μὲ $T = 4,5 \cdot 10^9$ ἔτη, τὸ οὐράνιο — 235 μὲ $T = 713$ ἑκατομμύρια ἔτη ($T = 713 \cdot 10^6$ ἔτη) καὶ ἄλλα (1). Ἀντίθετα βραχύβια εἶναι τὸ ράδιο — 228 (${}_{88}\text{Ra}^{228}$) μὲ $T = 11$ ἡμέρες, τὸ θάλλιο — 206 (${}_{81}\text{Tl}^{206}$) μὲ $T = 4,2$ πρῶτα λεπτά, τὸ πολώνιο — 212 (${}_{84}\text{Po}^{212}$) μὲ $T = 3$ δεκάκις ἑκατομμυριοστὸ τοῦ δευτερολέπτου ($T = 0,4 \cdot 10^{-6}$ sec) καὶ ἄλλα.

(1) Ὅσα ἔχουν T μεγαλύτερο ἀπ' τὴν ἡλικία τῆς γῆς — πρῶτα φτάνει τὰ 4,5 δισεκατομμύρια ἔτη — μποροῦν ἀπὸ πρακτικὴ ἄποψη νὰ θεωρηθοῦν σὰ σταθερὰ καὶ ὄχι ραδιενεργὰ εἶδη.



Σχ. 2. Από 1000 gr πλουτονίου θα μείνουν — μέσα σε 30 έτη — μόνο 125 gr (με $T = 10$ έτη).

ΠΙΝΑΚΑΣ — 7

ΧΡΟΝΟΙ ΥΠΟΔΙΠΛΑΣΙΑΣΜΟΥ (T) ΔΙΑΦΟΡΩΝ
ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΠΥΡΗΝΩΝ

Ραδιενεργοί πυρήνες		Άκτιν.	T
Θόριο — 232	${}_{90}\text{Th}^{232}$	α	14 δισεκατομμ. έτη
Ουράνιο — 238	${}_{92}\text{U}^{238}$	α	4,6 » »
Ουράνιο — 233	${}_{92}\text{U}^{233}$	α	163 χιλιάδες έτη
Θόριο — 230	${}_{90}\text{Th}^{230}$	α	82 » »
Θόριο — 229	${}_{90}\text{Th}^{229}$	α	7 » »
Ράδιο — 226	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	α	1600 έτη
Μόλυβδος — 210	${}_{82}\text{Pb}^{210}$	β	22,2 »
Πλουτόνιο — 241	${}_{94}\text{Pu}^{241}$	β	10 »
Πολόνιο — 210	${}_{84}\text{Po}^{210}$	α	139 ημέρες
Ράδιο — 225	${}_{88}\text{Ra}^{225}$	β	14 »
Βισμούθιο — 210	${}_{83}\text{Bi}^{210}$	β	5 »
Άκτινιο — 228	${}_{89}\text{Ac}^{228}$	β	6,13 ώρες
Μόλυβδος — 211	${}_{82}\text{Pb}^{211}$	β	36 λεπτά
Φράγκιο — 221	${}_{87}\text{Fr}^{221}$	α	5 »
Ραδόνιο — 220	${}_{86}\text{Rn}^{220}$	α	54,5 δευτερόλεπτα
Άστατο — 217	${}_{85}\text{At}^{217}$	α	0,02 »
Πολόνιο — 212	${}_{84}\text{Po}^{212}$	α	0,3 εκατομμυριο- στά του δευτ.

3.11 Είναι αξιοσημείωτο ότι ο T μπορεί να προσδιοριστεί, για το κάθε είδος, κατά τρόπο όχι δύσκολο θεωρητικά και πρακτικά, με αποτέλεσμα να είναι δυνατός ο καθορισμός της ταυτότητας καθενός είδους ραδιενεργού. Ύστερα από καθαρά μαθηματική σκέψη βρέθηκε — κι αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στον Άγγλο E. Rutherford (1904) — πώς το ποσό ενός ραδιενεργού υλικού συνδέεται με το χρόνο υποδιπλασιασμού με τη σχέση

$$m = m_0 \cdot e^{-\frac{0,693 t}{T}} \quad (3.11.1)$$

Η εξίσωση αυτή, παρ' όλη τη φαινομενικά πολύπλοκη μορφή της, είναι πολύ απλή απ' την πλευρά της ποιοτικής της ερμηνείας. Σύμφωνα μ' αυτήν, μπορούμε να ζυγίσουμε σήμερα μια ποσότητα ραδιενεργού υλικού και να σημειώσουμε τη μάζα του (m_0). Ξαναζυγίζουμε το υλικό αυτό μετά από ορισμένο χρόνο (t) και σημειώνουμε την καινούργια τιμή της μάζας του (m), που θά'ναι, προφανώς, μικρότερη απ' την αρχική m_0 . Απ' τα στοιχεία αυτά (m_0 , m , t) υπολογίζουμε τον όρο T γιατί, όπως φαίνεται πιο πάνω, η εξίσωση (3.11.1) δέ θά'χει τότε παρά ένα και μόνο άγνωστο — το χρόνο υποδιπλασιασμού T . Ο όρος e έχει τιμή, σ' όλες τις περιπτώσεις, ορισμένη και σταθερή και συγκεκριμένα $e = 2,718$ περίπου⁽¹⁾.

Σαν παράδειγμα, ας πούμε πώς εξετάζουμε σήμερα ένα καθαρό ραδιενεργό υλικό και βρίσκουμε ότι η μάζα του είναι ίση με 1000 γραμμάρια ($m_0 = 1000$ gr). Το ξαναζυγίζουμε ύστερα από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και ας πούμε πώς βρίσκουμε τη μάζα του ελαττωμένη και μάλιστα ίση με 998 γραμμάρια ($m = 998$ gr). Αν για τη μείωση αυτή μεσολάβησε χρόνος ενός έτους ($t = 1$ έτος), ο παραπάνω τύπος

(1) Ακριβέστερα ο όρος e αντιπροσωπεύει τη βάση των λογαρίθμων.

(3.11.1) παίρνει τὴ συγκεκριμένη ἀριθμητικὴ μορφή

$$998 = 1000 \cdot 2,718 \frac{0,693}{T}$$

Βέβαια γιὰ τὴν παραπέρα λύση τοῦ ἀπαιτεῖται μιὰ κάποια γνώση στοιχειωδῶν μαθηματικῶν, αὐτὸ ὅμως ποὺ ἐνδιαφέρει εἶναι τὸ γεγονός ὅτι ὑπάρχει ἡ δυνατότητα, μὲ ἀπλοῦς σχετικὰ ὑπολογισμούς, νὰ βρεθῇ ἡ τιμὴ τοῦ T πού, γιὰ τὸ παραπάνω παράδειγμα, βρίσκεται

$$T = 344,8 \text{ ἔτη}$$

Ἔτσι περιμένοντας μόνο ἐπὶ ἓνα ἔτος βρίσκουμε ἓνα χρόνο ὑποδιπλασιαμοῦ ποὺ ξεπερνάει τοὺς τρεῖς αἰῶνες.

4. Η ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΣΤΟΙΧΕΙΩΣΗ

4.1 Ἐξετάζοντας τὰ διάφορα εἶδη πυρήνων πὸν μεταστοιχειώνονται χωρὶς ἑξωτερικὴ ἐπίδραση, βρίσκουμε πὸς εἶναι δυνατὸ νὰ τὰ κατατάξουμε σὲ ὀρισμένες ομάδες μὲ βίαση τὴ σχετικὴ προέλευσὴ τους. Τὶς ομάδες αὐτὲς τὶς λέμε *οἰκογένειες* φυσικῶς ραδιενεργῶν. Κάθε οἰκογένεια περιλαμβάνει εἶδη πυρήνων ὅπου τὸ καθένα προέρχεται ἀπὸ ἄλλο καὶ μεταστοιχειώνεται σὲ ἄλλο, μὲ ἓνα ἀρχικὸ — σὰν πρῶτο — κι' ἓνα τελικὸ μὴ ραδιενεργό. Ἔτσι, ἀν ἀπὸ ἓνα εἶδος πυρήνων (Π_1) γεννιέται ἓνα δευτέρου εἶδος (Π_2) κι' ἀπ' αὐτὸ — πὸν εἶναι πάλι ραδιενεργό — ἓνα τρίτο (Π_3) κ.ο.κ. ὡς πὸν νὰ προκύψει ἓνας πυρήνας σταθερὸς (Π_N), πὸν νὰ μὴν ἀλλοιώνεται παραπέρα, τότε ἔχουμε μὴν οἰκογένεια πὸν — συμβολικὰ — μπορούμε νὰ τὴν ἀποδώσουμε μὲ τὸ σύνολο τῶν ἐξισώσεων

$$\Pi_1 \rightarrow \Pi_2 + \sigma$$

$$\Pi_2 \rightarrow \Pi_3 + \sigma$$

$$\Pi_3 \rightarrow \Pi_4 + \sigma$$

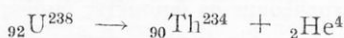
.....

$$\Pi_{N-1} \rightarrow \Pi_N + \sigma$$

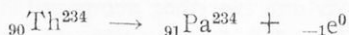
ὅπου σ σωματίδια πὸν — γιὰ ὅλες γενικὰ τὶς περιπτώσεις — εἶναι σωματίδια ἄλφα (${}_2\text{He}^4$) ἢ βῆτα (${}_{-1}\text{e}^0$).

4.2 Τὰ φυσικῶς ραδιενεργὰ πὸν βρίσκονται στὴ γῆ ὑπάρχουν σὲ τρεῖς κυρίως οἰκογένειες — οὐρανίου, ἀκτινίου, θορίου. Σ' αὐτὲς μπορούμε νὰ προσθέσουμε καὶ μιὰ τέταρτη — τοῦ νεπτουνίου — πὸν περιλαμβάνει στοιχεῖα σὲ πάρα πολὺ μικρὰ ποσὰ, σὲ ἴχνη δηλαδή πὸν δὲν εἶναι δυνατὸ νὰ προσδιοριστοῦν μὲ στοιχειώδεις μεθόδους.

4.3 Στην *οικογένεια του ουρανίου* πρώτο μέλος είναι το ουράνιο — 238, ένα ισότοπο δηλαδή του ουρανίου με ατομικό αριθμό 92 και μαζικό αριθμό 238 (${}_{92}\text{U}^{238}$). Το ουράνιο αυτό — που από τα τέλη του 19ου αιώνα ήταν γνωστό πώς βρίσκεται στον θρυκτό πισσουρανίτη — μεταστοιχειώνεται πολύ αργά (με $T = 4,6$ δισεκατομμύρια έτη) σε θόριο — 234 δίνοντας σωματίδια άλφα κατά την αντίδραση

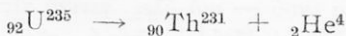


Το θόριο — 238 μεταστοιχειώνεται κι' αυτό με τη σειρά του δίνοντας σωματίδια βήτα πολύ γρήγορα ($T = 24,1$ ημέρες) σε πρωτακτίνο — 234



Η μεταστοιχειώση συνεχίζεται, ως που τελικά καταλήγει σ' ένα μη ραδιενεργό ισότοπο του μόλυβδου — το ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ — περνώντας από ένα σύνολο 16 κυρίων πυρηνικών μεταστοιχειώσεων.

4.4 Σε μιὰ δεύτερη ομάδα — στην *οικογένεια του άκτινίου* — περιλαμβάνονται 13 κύρια μέλη με πρώτο πάλι ένα ισότοπο του ουρανίου, όχι το ουράνιο — 238 αλλά το ουράνιο — 235 (${}_{92}\text{U}^{235}$), που βρίσκεται στη φύση σε πολύ μικρά ποσά σε μίγμα με το ουράνιο. Το ουράνιο — 235 αυτό μεταστοιχειώνεται σε θόριο πολύ αργά (με $T = 713$ εκατομμύρια έτη) κατά την αντίδραση



Επειδή και το ισότοπο αυτό του θορίου είναι ραδιενεργό, η μεταστοιχειώση συνεχίζεται, ως που να καταλήξει — περνώντας από ένα σύνολο 13 αντιδράσεων — σε μη ραδιενεργό — σταθερό δηλαδή — μόλυβδο (${}_{82}\text{Pb}^{207}$), μόλυβδο όμως διάφορο, σε μαζικό αριθμό, απ' τον της προηγούμενης σειράς. Η ονομασία της οικογένειας αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι αρχικά είχε νομιστεί για πρώτο μέλος το άκτίνο — 227 (${}_{89}\text{Ac}^{227}$), που

ΠΙΝΑΚΑΣ — 8

ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ($A = 4x + 2$)

(Z : άτομ αριθμός, A : μαζικός αριθμός, T : χρόνος υποδιπλασιασμού)

Z	A			T	Ακτιν.
92	238	Ουράνιο (Ουράνιο - I)	${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,6 \cdot 10^9$ έτη	α
90	234	Θόριο (Ουράνιο - XI)	${}_{90}\text{Th}^{234}$ /	24,1 ημέρες	β
91	234	Πρωτακτίριο (Ουράνιο - X2)	${}_{91}\text{Ra}^{234}$	1,14 λεπτά	β
92	234	Ουράνιο (Ουράνιο - II)	${}_{92}\text{U}^{234}$	$270 \cdot 10^3$ έτη	α
90	230	Θόριο (Ίόνιο)	${}_{90}\text{Th}^{230}$	$82 \cdot 10^3$ έτη	α
88	226	Ράδιο	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1600 έτη	α
86	222	Ραδόνιο (Ραδιοεκπομπή)	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,8 ημέρες	α
84	218	Πολώνιο (Ράδιο - A)	${}_{84}\text{Po}^{218}$	3 λεπτά	α
82	214	Μόλυβδος (Ράδιο - B)	${}_{82}\text{Pb}^{214}$	27 λεπτά	β
83	214	Βισμούθιο (Ράδιο - C)	${}_{83}\text{Bi}^{214}$	19,7 λεπτά	α, β
81	210	Θάλλιο (Ράδιο - C'')	${}_{81}\text{Tl}^{210}$	1,32 λεπτά	β
84	214	Πολώνιο (Ράδιο - C')	${}_{84}\text{Po}^{214}$	0,00015 δευτ.	α
82	210	Μόλυβδος (Ράδιο - D)	${}_{82}\text{Pb}^{210}$	22,2 έτη	β
83	210	Βισμούθιο (Ράδιο - E)	${}_{83}\text{Bi}^{210}$	5 ημέρες	β
84	210	Πολώνιο (Ράδιο - F)	${}_{84}\text{Po}^{210}$	139 ημέρες	α
82	206	Μόλυβδος (Ράδιο - G)	${}_{82}\text{Pb}^{206}$	σταθερό	—

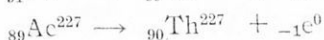
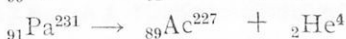
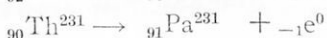
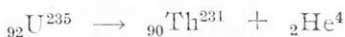
ΠΙΝΑΚΑΣ — 9

ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΑΚΤΙΝΙΟΥ ($A = 4x + 3$)

(Z: ατομ. αριθμός, A: μαζικός αριθμός, T: χρόνος
 υποδιπλασιασμοῦ)

Z	A			T	Ἀκτιν.
92	235	Οὐράνιο (Ἀκτινουράνιο)	${}_{92}\text{U}^{235}$	$0,7 \cdot 10^9$ ἔτη	α
90	231	Θόριο (Ἀκτίσιο - Y)	${}_{90}\text{Th}^{231}$	25 ὥρες	β
91	231	Πρωτακτίσιο	${}_{91}\text{Pa}^{231}$	32000 ἔτη	α
89	227	Ἀκτίσιο	${}_{89}\text{Ac}^{227}$	13,5 ἔτη	β
90	227	Θόριο (Ραδιοακτίσιο)	${}_{90}\text{Th}^{227}$	19 ἡμέρες	α
88	223	Ράδιο (Ἀκτίσιο - X)	${}_{88}\text{Ra}^{223}$	11,2 ἡμέρες	α
86	219	Ραδόνιο (Ἀκτινόσιο)	${}_{86}\text{Rn}^{219}$	4 δευτερ.	α
84	215	Πολώνιο (Ἀκτίσιο - A)	${}_{84}\text{Po}^{215}$	0,002 δευτ.	α
82	211	Μόλυβδος (Ἀκτίσιο - B)	${}_{82}\text{Pb}^{211}$	36 λεπτά	β
83	211	Βισμούθιο (Ἀκτίσιο - C)	${}_{83}\text{Bi}^{211}$	2,16 λεπτά	α,β
81	207	Θάλλιο (Ἀκτίσιο - C'')	${}_{81}\text{Tl}^{207}$	4,76 λεπτά	β
84	211	Πολώνιο (Ἀκτίσιο - C')	${}_{84}\text{Po}^{211}$	0,005 δευτ.	α
82	207	Μόλυβδος (Ἀκτίσιο - D)	${}_{82}\text{Pb}^{207}$	σταθερὸ	—

πραγματικά ἔρχεται τέταρτο, γὰν προῖον τῆς σειρᾶς



4.5 Τρίτη ἔρχεται ἡ *οἰκογένεια τοῦ θορίου* μὲ μόνο 12 μέλη, μὲ πρῶτο τὸ θόριο — 232 (${}_{90}\text{Th}^{232}$) καὶ τελικὸ μὴ ραδιενεργὸ προῖον καὶ πάλι μόλυβδο (${}_{82}\text{Pb}^{208}$), διαφοροτικὸ ἀπ' τὰ δυὸ προηγουμένα ἰσότοπα τῶν ἄλλων οἰκογενειῶν.

4.6 Ἀξιοσημεῖωτη εἶναι ἡ *οἰκογένεια τοῦ νεπτονίου* ⁽¹⁾ μὲ πρῶτο μέλος τὸ πλουτόνιο — 241 (${}_{94}\text{Pu}^{241}$) ποὺ μεταστοιχειώνεται γρήγορα σχετικὰ (μὲ $T = 10$ ἔτη), δίνοντας σωματίδια βῆτα, σὲ ἀμερίκιο



Τὸ ἀμερίκιο αὐτὸ μεταστοιχειώνεται, σὲ συνέχεια, σὲ ποσειδώνιο, πού, ὄντας τὸ μακροβιώτερο τῆς σειρᾶς (μὲ $T = 2,2$ ἑκατομμύρια ἔτη), ἔδωσε καὶ τὴν ὀνομασία στὴν ὅλη οἰκογένεια. Ὁ χρόνος αὐτὸς εἶναι πολὺ μικρὸς, σὲ σχέση μὲ τὸν χρόνο ὑποδιπλασιασμοῦ τῶν πρὸ μακροβίων στοιχείων τῶν ἄλλων τριῶν σειρῶν — ποὺ φτάνει στὰ δισεκατομμύρια ἔτη — κι' ἔτσι δικαιολογεῖται ἡ πρακτικὴ ἔξαφάνιση τῆς σειρᾶς ἐτούτης ἀπ' τὸ γῆινο φλοιό. Καὶ πρὸ συγκεκριμένα, ἔχοντας ὑπ' ὄψιν πὼς ὁ φλοιὸς τῆς γῆς ἔχει ἡλικία 4,5 δισεκατομμύρια ἔτη, συμπεραίνουμε πὼς κι' ἂν ἀκόμα ἡ ποσότητα τοῦ Np ἦταν αἰσθητὴ κατὰ τὸ σχηματισμὸ του, ὅση τοῦλάχιστο καὶ γιὰ τὰλλα ραδιενεργά, θὰ ἔχει πρὸ πολλοῦ φτάσει κάτω ἀπ' τὰ ὅρια τοῦ ὑπολογισμοῦ.

Μπαίνει ὁμως τὸ ἐρώτημα πὼς ἀνακαλύφθηκε τότε ἡ σειρὰ αὐτή, μιά ποὺ τὰ μέλη της δὲν εἶναι δυνατὸ νὰ ὑπάρχουν σὲ ποσὰ ἀνιχνεύσιμα.

(1) Τὸ στοιχεῖο νεπτόνιο (${}_{94}\text{Np}$) λέγεται καὶ ποσειδώνιο.

ΠΙΝΑΚΑΣ — 10

ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΘΟΡΙΟΥ ($A = 4x$)

(Z : άτομ. αριθμός, A : μαζικός αριθμός, T : χρόνος
 υποδιπλασιασμοῦ)

Z	A			T	Ακτιν.
90	232	Θόριο	${}_{90}\text{Th}^{232}$	14.10 ⁹ ἔτη	α
88	228	Ράδιο (Μεσοθόριο - 1)	${}_{88}\text{Ra}^{228}$	6,7 ἔτη	β
89	228	Ἀκτίνιο (Μεσοθόριο - 2)	${}_{89}\text{Ac}^{228}$	6,13 ὥρες	β
90	228	Θόριο (Ραδιοθόριο)	${}_{90}\text{Th}^{228}$	1,9 ἔτη	α
88	224	Ράδιο (Θόριο - X)	${}_{88}\text{Ra}^{224}$	3,6 ἡμέρες	α
86	220	Ραδόνιο (Θορόνιο)	${}_{86}\text{Rn}^{220}$	54,5 δευτ.	α
84	216	Πολώνιο (Θόριο - A)	${}_{84}\text{Po}^{216}$	0,16 δευτ.	α
82	212	Μόλυβδος (Θόριο - B)	${}_{82}\text{Pb}^{212}$	10,6 ὥρες	β
83	212	Βισμούθιο (Θόριο - C)	${}_{83}\text{Bi}^{212}$	1 ὥρα	α,β
81	208	Θάλλιο (Θόριο - C'')	${}_{81}\text{Tl}^{208}$	3,1 λεπτά	β
84	212	Πολώνιο (Θόριο - C')	${}_{84}\text{Po}^{212}$	3.10 ⁻⁷ δευτ.	α
82	208	Μόλυβδος (Θόριο - D)	${}_{82}\text{Pb}^{208}$	σταθερὸ	—

ΠΙΝΑΚΑΣ — 11

ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΝΕΠΤΟΥΝΙΟΥ ($A = 4x + 1$)

(Z: άτομ. αριθμός, A: μαζικός αριθμός, T: χρόνος
υποδιπλασιασμού)

Z	A			T	*Ακτιν.
94	241	Πλουτώνιο	${}_{94}\text{Pu}^{241}$	10 έτη	β
95	241	Άμερίσιο	${}_{95}\text{Am}^{241}$	490 έτη	α
93	237	Νεπτούνιο	${}_{93}\text{Np}^{237}$	$2,2 \cdot 10^6$ έτη	α
91	233	Πρωτακτίσιο	${}_{91}\text{Pa}^{233}$	27,4 ημέρες	β
92	233	Ουράνιο	${}_{92}\text{U}^{233}$	163000 έτη	α
90	229	Θόριο	${}_{90}\text{Th}^{229}$	7000 έτη	α
88	225	Ράδιο	${}_{88}\text{Ra}^{225}$	14 ημέρες	β
89	225	Άκτινιο	${}_{89}\text{Ac}^{225}$	10 ημέρες	α
87	221	Φράγκιο	${}_{87}\text{Fr}^{221}$	5 λεπτά	α
85	217	Άστατο	${}_{85}\text{At}^{217}$	0,02 δευτ.	α
83	213	Βισμούθιο	${}_{83}\text{Bi}^{213}$	46 λεπτά	α,β
81	209	Θάλλιο	${}_{81}\text{Tl}^{209}$	2,2 λεπτά	β
84	213	Πολώνιο	${}_{84}\text{Po}^{213}$	$3 \cdot 10^{-6}$ δευτ.	α
82	209	Βισμούθιο	${}_{82}\text{Bi}^{209}$	σταθερό	—

Ἡ ἀπάντηση βρίσκεται στὸ γεγονός ὅτι μερικὰ ἀπ' αὐτὰ κατασκευάστηκαν τεχνητὰ, ὅπως θὰ δοῦμε πιὸ κάτω στὸ θέμα τὸ σχετικὸ μὲ τὴν τεχνητὴ μεταστοιχείωση. Σὰν τελικὸ προϊόν, σταθερὸ, ἔχουμε στὴν οἰκογένεια τούτη ὄχι μόλυβδο, ἀλλὰ βισμούθιο ($_{83}\text{Bi}^{209}$).

4.7 Συγκρίνοντας τὶς τέσσερις ραδιενεργές οἰκογένειες, βρίσκουμε μερικὰ χαρακτηριστικὰ σημεῖα ποὺ ὀδηγοῦν σὲ σπουδαῖα πορίσματα.

Πρῶτα ἀπ' ὅλα παρατηροῦμε πὼς ὅλα τὰ μέλη τῆς οἰκογένειας τοῦ **οὐρανίου** ἔχουν μαζικοὺς ἀριθμοὺς πολλαπλασίους τοῦ 4 σὺν 2, ἀριθμοὺς δηλαδὴ ποὺ ἀντιστοιχοῦν στὸν τύπο

$$A = 4x + 2 \quad (4.7.1)$$

Πράγματι, ὁ μαζικὸς ἀριθμὸς 238 ποὺ ἀντιστοιχεῖ στὸ πρῶτο μέλος τῆς ($_{92}\text{U}^{238}$) μπορεῖ νὰ γραφῆ

$$A = 59 \times 4 + 2$$

Ὅμοια τὸ θόριο—234 ($_{90}\text{Th}^{234}$) καὶ τὸ ράδιο—226 ($_{88}\text{Ra}^{226}$) ἔχουν μαζικοὺς ἀριθμοὺς ποὺ γράφονται ἀντίστοιχα

$$A' = 58 \times 4 + 2$$

$$A'' = 56 \times 4 + 2$$

Στὴ σειρά τοῦ **ἀκτινίου** ἡ σχέση εἶναι

$$A = 4x + 3 \quad (4.7.2)$$

στὴ σειρά τοῦ **θορίου** ἀπλῶς

$$A = 4x \quad (4.7.3)$$

καὶ τέλος στὴν τέταρτη, τοῦ **νεπτονίου**, εἶναι

$$A = 4x + 1 \quad (4.7.4)$$

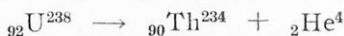
Ἡ μαθηματικὴς αὐτὴς συναρτήσεις ὁδηγοῦν στὸν καθορισμὸ τῆς οἰκογένειας ὅπου ἀνήκει τὸ κάθε εἶδος. Ἔτσι ἂν βροῦμε κάπου — ἔστω μέσα σ' ἓνα ὄρυκτό — ἓνα στοιχεῖο μὲ μαζικὸ ἀριθμὸ 215 μποροῦμε νὰ κάνουμε τὸν παρακάτω λογαριασμό. Διαιροῦμε τὸ 215 μὲ τὸ 4 καὶ βρίσκουμε πηλίκιο 53 καὶ ὑπόλοιπο 3. Ἄπ' αὐτὸ βλέπουμε πὼς ὁ ἀριθμὸς 215 γράφεται

$$A = 53 \times 4 + 3$$

γράφεται δηλαδὴ σύμφωνα μὲ τὸν τύπο (4.7.2) ποὺ ἀντιστοιχεῖ στὴν οἰκογένεια τοῦ ἀκτινίου. Ἡ διαπίστωση αὐτὴ μᾶς ὁδηγεῖ στὸ συμπέρασμα ὅτι τὸ στοιχεῖο αὐτὸ φᾶναι ἢ πολώνιο (${}_{84}\text{Po}^{215}$) ἢ ἄστατο (${}_{85}\text{At}^{215}$), μιὰ ποὺ ἡ οἰκογένεια τοῦ ἀκτινίου περιέχει μόνο αὐτὰ τὰ δυὸ εἶδη πυρήνων μὲ μαζικὸ ἀριθμὸ 215.

Ἀκόμα, οἱ παραπάνω σχέσεις ὁδηγοῦν καὶ σὲ θεωρητικὰ συμπεράσματα. Ἰσὺν παράδειγμα ἀναφέρουμε πὼς ἡ οἰκογένεια τοῦ νεπτουνίου βρέθηκε ἀκριβῶς μὲ βάση τὴ σκέψη ὅτι, μιὰ ποὺ ὑπάρχουν οἰκογένειες μὲ μαζικοὺς ἀριθμοὺς $4x + 0$, $4x + 2$, $4x + 3$ δὲν μπορεῖ παρὰ νὰ ὑπάρχει καὶ μιὰ ἐνδιάμεση μὲ $4x + 1$.

Στὴν ἴδια ἀρχὴ στηρίχτηκε καὶ ἡ ταύτιση δυὸ ομάδων ποῦ, στὴν ἀρχή, τὶς νομίζανε γιὰ δυὸ οἰκογένειες διαφορετικῆς. Συγκεκριμένα, θεωροῦσαν ἄλλη τὴν οἰκογένεια τοῦ οὐρανίου, μὲ πρῶτο μέλος τὸ οὐράνιο — 238



καὶ ἄλλη τὴν οἰκογένεια τοῦ ραδίου, μὲ πρῶτο μέλος τὸ ράδιο — 226, ποὺ ἀνακαλύφτηκε ἀπ' τὴν Μαρία Κιουρί,



Ἡ ὑπαρξη μαζικῶν ἀριθμῶν, ποὺ ἐπαληθεύουν καὶ στὶς δυὸ περιπτώσεις τὸν τύπο $4x + 2$, ὁδήγησε στὸ συμπέρασμα πὼς τὸ ράδιο προέρχεται ἔμμεσα ἀπὸ τὸ οὐράνιο.

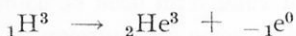
4.8 Ἄλλη μιὰ παρατήρηση πὸν πρέπει νὰ κάνουμε εἶναι πὼς τὸ ἴδιο στοιχεῖο μπορεῖ νὰ βρῖσκεται σὲ περισσότερες οἰκογένειες, πάντοτε θᾶχει ὅμως διάφορο μαζικὸ ἀριθμὸ. Ἔτσι τὸ θόριο περιέχεται καὶ στὶς τέσσερις οἰκογένειες, ἀλλὰ στὴν οἰκογένεια τοῦ οὐρανίου σὰν ${}_{90}\text{Th}^{234}$ καὶ ${}_{90}\text{Th}^{230}$, στὴν οἰκογένεια τοῦ θορίου σὰν ${}_{90}\text{Th}^{232}$ καὶ ${}_{90}\text{Th}^{228}$, στὴν οἰκογένεια τοῦ ἀκτινίου σὰν ${}_{90}\text{Th}^{231}$ καὶ ${}_{90}\text{Th}^{227}$ καὶ τέλος στὴν οἰκογένεια τοῦ νεπτουνίου μόνο σὰν ${}_{90}\text{Th}^{229}$.

4.9 Εἶναι τέλος ἀξιοσημείωτο πὼς ἐνῶ οἱ τρεῖς πρῶτες οἰκογένειες δίνουν, σὰν τελικὸ σταθερὸ προϊόν, μόλυβδο (${}_{82}\text{Pb}^{206}$, ${}_{82}\text{Pb}^{207}$, ${}_{82}\text{Pb}^{208}$) ἢ τέταρτη — τοῦ νεπτουνίου — δίνει βισμούθιο (${}_{83}\text{Bi}^{209}$).

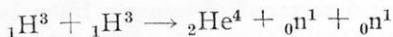
5. Η ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΕΤΑΣΤΟΙΧΕΙΩΣΗ

5.1 Κάθε πυρηνική αντίδραση που δέ γίνεται μόνη της, άλλ' απαιτεί ιδιαίτερες συνθήκες — με την ανθρώπινη ή και όχι επέμβαση — χαρακτηρίζεται σαν τεχνητή μεταστοιχείωση. Τέτοια μεταστοιχείωση μπορεί να παρουσιασθή είτε σε πυρήνες μη ραδιενεργούς, είτε σε πυρήνες ραδιενεργούς, αλλά κατά τρόπο διαφορετικό απ' τον συνηθισμένο.

Σαν παράδειγμα ας πάρουμε δυο απ' τα ισότοπα του υδρογόνου, το κοινό υδρογόνο (${}_1\text{H}^1$) — υδρογόνο δηλαδή που ο πυρήνας του ταυτίζεται με το πρωτόνιο — και το υπερβαρύν (⁴) υδρογόνο (${}_1\text{H}^3$). Το υδρογόνο —1 δεν είναι ραδιενεργό, αντίθετα όμως το υδρογόνο —3 μεταστοιχείωνεται, σαν φυσικώς ραδιενεργό, με χρόνο υποδιπλασιασμού 31 έτη δίνοντας σωματίδια βήτα και ένα ισότοπο του ήλιου



Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να χαρακτηρίσουμε σαν τεχνητή κάθε μεταστοιχείωση του ${}_1\text{H}^1$, που δεν είναι φυσικώς ραδιενεργό. Όμως χαρακτηρίζουμε σαν τεχνητή και κάθε μεταστοιχείωση του ραδιενεργού ${}_1\text{H}^3$, αρκεί νάναι αλλοιώτικη απ' τη μετατροπή του σε ${}_2\text{He}^3$ και ${}_{-1}\text{e}^0$, σαν την παρακάτω

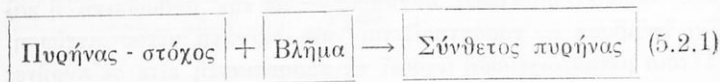


όπου από δυο πυρήνες υδρογόνου —3 σχηματίζονται ένας πυρήνας κοινού ήλιου και δυο νετρόνια.

Τις τεχνητές μεταστοιχειώσεις μπορούμε να τις πετύχουμε κατά τρεις τρόπους — με βομβαρδισμό, με σύντηξη, με ενεργοποίηση.

(4) Το ${}_1\text{H}^1$ το λέμε — σπάνια — και πρώτιο, αντίθετα το ${}_1\text{H}^3$ το λέμε — πολύ συχνά — τρίτιο, μάλιστα για να παραλείψουμε τους δείκτες το συμβολίζουμε με T.

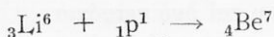
5.2 Ὁ **βομβαρδισμὸς** στηρίζεται στὸ παρακάτω στοιχειῶδες μηχανικὸ φαινόμενο. Ἐὰν ἕνα σωματίδιο — νετρόνιο, πρωτόνιο, πυρήνας κλπ. — πέσει σὰν **βλήμα** πάνω σὲ κάποιον πυρήνα — πυρήνα **στόχο** — εἶναι δυνατὸ νὰ εἰσχωρήσει στὸν πυρήνα αὐτό, νὰ ἐνσωματωθῇ μαζί του καὶ νὰ δημιουργήσῃ ἕναν καινούργιο πυρήνα πιὸ σύνθετο, σύμφωνα μὲ τὸ σχῆμα



Γιὰ νὰ μπορέσῃ ὁμοίως νὰ γίνῃ μιὰ τέτοια ἐνσωμάτωση πρέπει τὸ βλήμα ν᾿ἔχει μιὰν **ὀρισμένη ἐνέργεια**, σὲ τρόπο πού ν' ἀποκλειστῇ ἡ ἀνάκλαση καὶ ἡ διέλευση. Πράγματι, καὶ κατὰ τὴν κλασσικὴ μηχανικὴ, ἂν τὸ βλήμα ἔχει πολὺ μικρὴ ἐνέργεια δὲν θὰ εἰσχωρήσει στὸ στόχο, ἀλλὰ θ' ἀνακλαστῇ ἐξωστρακιζόμενο. Ἀντίθετα, ἂν ἡ ἐνέργειά του εἶναι πολὺ μεγάλη, τότε μπορεῖ νὰ τρυπήσῃ τὸ στόχο πέρα - πέρα καὶ νὰ μὴ συγκρατηθῇ ἀπ' αὐτὸν (βλ. σχ. 3). Στέκεται λοιπὸν φανερὸ πὼς ἡ ἐνέργειά του πρέπει νὰ κυμαίνεται μέσα σὲ ὀρισμένα στενὰ ὅρια, γιὰ νὰ μπορέσῃ νὰ λάβῃ χώρα ἐνσωμάτωση μὲ δημιουργία συνθέτου σώματος.

Αὐτὸς εἶναι ὁ λόγος πού γιὰ κάθε εἶδος πυρήνων ἀπαιτοῦνται ὀρισμένου εἴδους σωματίδια σὰν βλήματα.

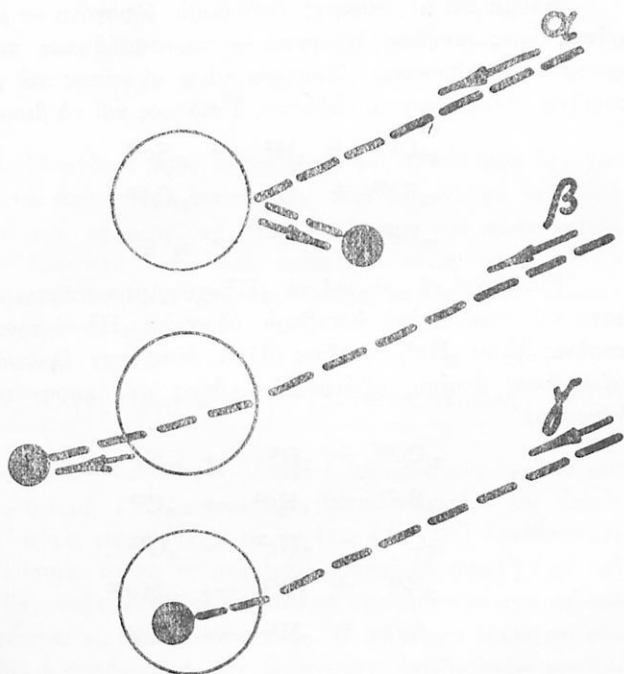
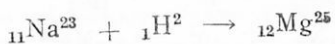
Σὰν παράδειγμα, στὸν πυρήνα τοῦ λιθίου (${}_3\text{Li}^6$) μποροῦν νὰ ἐνσωματωθοῦν πρωτόνια — σὰ βλήματα — μόνον ἐφ' ὅσον ἡ ταχύτητά τους ἀντιστοιχεῖ σ' ἐνέργεια 150 χιλιάδων ἡλεκτρονιοβόλτ (150 KeV) (1). Μόνο τότε σχηματίζεται βηρύλλιο σὰν προϊόν τῆς ἀντίδρασης



Ἀντίθετα, στὸν πυρήνα τοῦ νατρίου (${}_{11}\text{Na}^{23}$) μποροῦν νὰ ἐνσωματωθοῦν πυρήνες ἀπὸ βαρὺ ὕδρογόνο (${}_1\text{H}^2$) — σὰ

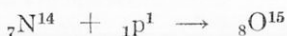
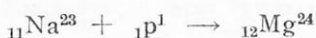
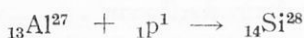
(1) Γιὰ τὶς **χιλιάδες** χρησιμοποιοῦμε τὸ σύμβολο K (ἀπ' τὸ Kilo -), γιὰ τὰ **ἐκατομμύρια** τὸ σύμβολο M (ἀπ' τὸ Μεγα -). Ἐστὶν τὸ 150.000 eV γράφεται 150 KeV, τὸ 2.800.000 eV γράφεται 2,8 MeV

βλήματα — μόνον ἐφ' ὅσον ἡ ἐνέργειά τους φτάνει γύρω στὰ 2 ἑκατομμύρια eV (δηλαδή 2 MeV). Ἔχουμε τότε σχηματισμὸ μαγνησίου σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση

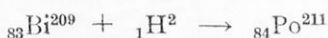
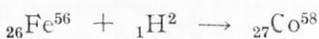
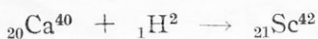


Σχ. 3. Ἀνάκλαση (α), διέλευση (β) καὶ ἐνσωμάτωση (γ) βλήματος σὲ στόχο.

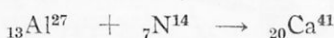
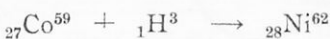
5.3 Με πρωτόνια — σὰν βλήματα — ἔχουν παρατηρηθῆ πολλὲς περιπτώσεις ἐνσωματώσεων, ὅπως εἶναι οἱ παρακάτω



Ἄκόμα καὶ με πυρῆνες ἀπὸ βαρὺ ὕδρογόνο — με δευτερόνια, ὅπως συνήθως λέγονται — παρατηρήθηκαν πολλὲς περιπτώσεις ἀντιδράσεων, ἰδιαίτερα πάνω σὲ κάπως πιὸ μεγάλους πυρῆνες, ὅπως εἶναι τὸ ἀσβέστιο, ὁ σίδηρος καὶ τὸ βισμούθιο



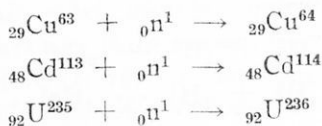
Ἐκτὸς ἀπ' τὰ ${}_1\text{P}^1$ καὶ τὰ ${}_1\text{H}^2$ χρησιμοποιοῦνται σὰ βλήματα καὶ πυρῆνες ἀπὸ ὑπερβαρὺ ὕδρογόνο ${}_1\text{H}^3$ — τριτόνια — πυρῆνες ἡλίου ${}_2\text{He}^4$, πυρῆνες ἄλλων διαφόρων ἐλαφρῶν στοιχείων ὅπως βορίου, ἀζώτου κλπ., ὅπως στὰ παρακάτω παραδείγματα,



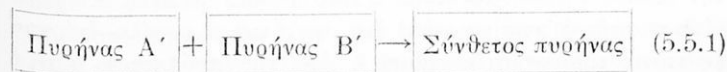
5.4 Σ' ὅλες τὶς περιπτώσεις πὸν ἀναφέραμε ὡς ἐδῶ ἔχουμε, σὰ βλήματα, σωματίδια **θετικὰ φορτισμένα** δηλαδὴ ${}_1\text{P}^1$ ἢ πυρῆνες ἀτόμων, με ὀρισμένη — γιὰ κάθε ἀντίδραση — ἐνέργεια.

Ἰδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν, σὰ βλήματα, τὰ **νετρόνια** πὸν — ἐπειδὴ δὲν εἶναι φορτισμένα — εἶναι δυνατὸ νὰ ἐνσωματωθοῦν πιὸ εὐκόλα στοὺς πυρῆνες μιὰ πὸν δὲν ἀπωθοῦν-

ται απ' αυτούς. Βέβαια η ένσωμάτωση νετρονίων δημιουργεί απλώς ισότοπα του ίδιου στοιχείου, όμως η ένσωμάτωση αυτή μπορεί — όπως θα δούμε παραπέρα — να δημιουργήσει ισότοπα άσταθῆ που να δώσουν γένεση σ' ὀλόκληρη σειρά μεταστοιχειώσεων. Ίδιαίτερα η ένσωμάτωση νετρονίων παρουσιάζει ένδιαφέρον στους βαρείς πυρήνες, όπως



5.5 Αντίθετα προς τὸ βομβαρδισμό, ἡ **σύντηξη** δὲν χαρακτηρίζεται ἀπὸ στόχο καὶ βλήμα. Καὶ δὴ ἔχουμε πάλι δυὸ σωματίδια πὸν σχηματίζουν ἕναν πυρήνα — σὰν ἄμεσο τελικὸ προϊόν — ὅμως τὰ δυὸ αὐτὰ σωματίδια εἶναι κατὰ κάποιον τρόπο ἰσότιμα. Στὴν τεχνητὴ αὐτὴ μεταστοιχειώση, πὸν μπορεῖ ν' ἀποδοθῆ μὲ τὸ σχῆμα

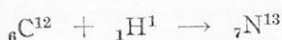


οἱ δυὸ πυρήνες ἐνώνονται, ὅταν ἡ θερμοκρασία φτάσει μιὰ πολὺ ὑψηλὴ τιμὴ (10 ἑκατομμύρια βαθμῶν κελσίου καὶ ἄνω). Κάτω ἀπ' αὐτὲς τὶς συνθῆκες οἱ πυρήνες (A' , B') **διαλύονται** — κατὰ κάποιον τρόπο — στὰ ἀπλᾶ συστατικά τους⁽¹⁾ (${}_1\text{p}^1$ καὶ ${}_0\text{n}^1$), πὸν ξαναενώνονται σὲ καινούργιο σταθερότερο σχηματισμὸ δημιουργώντας τὸ σύνθετο πυρήνα. Ἡ ὀνομασία ὀφείλεται στὸ γεγονός ὅτι ἡ μορφή αὐτὴ τῶν πυρηνικῶν ἀντιδράσεων μοιάζει μὲ τὴ σύντηξη δυὸ μετάλλων πὸν — σὲ ὑψηλὴ θερμοκρασία — λυώνουν μαζί καὶ σχηματίζουν ἕνα καινούργιο σύνθετο μέταλλο — τὸ χρᾶμα.

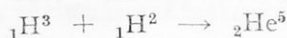
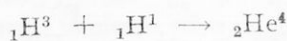
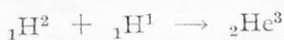
Συντήξεις παρουσιάζονται, κατὰ κανόνα, ἀνάμεσα σὲ ἑλα-

(1) Οἱ συντήξεις ὀνομάζονται καὶ **θερμοπυρηνικὲς ἀντιδράσεις**, ἀκριβῶς γιὰ τὸ λόγο πὸν χρειάζονται μιὰ πολὺ ὑψηλὴ θερμοκρασία.

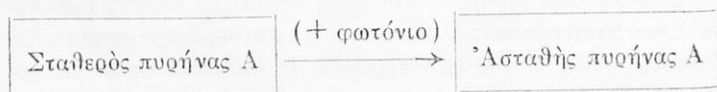
φρούς πυρήνες όπως είναι το υδρογόνο, το ήλιο, το άζωτο κι' ο άνθρακας. Έτσι, μπορεί από ${}_6\text{C}^{12}$ και ${}_1\text{H}^1$ (δηλαδή ${}_1\text{P}^1$) να σχηματιστή άζωτο σύμφωνα με την αντίδραση



ή ήλιο — σε διάφορα ισότοπα — από αλληλεπίδραση διαφόρων ισότοπων του υδρογόνου



5.6 Όμως, ενώ τόσο στο βομβαρδισμό όσο και στη σύντηξη έχουμε σχηματισμό ενός καινούργιου πυρήνα, από δυο πιο απλά κομμάτια, αντίθετα στην *ένεργοποίηση* δεν έχουμε φαινομενικά αλλοίωση. Ειδικότερα, στην ενεργοποίηση μετατρέπουμε έναν σταθερό πυρήνα σε άσταθῆ, χωρίς ν' αλλάξουμε την έσωτερική του σύνθεση. Τοῦτο μπορεί να γίνει αν πάνω σ' ένα σταθερό πυρήνα πέσει ένα φωτόνιο με μεγάλη ενέργεια (φωτόνιο τῆς περιοχῆς γάμμα). Με την πρόσπτωση αὐτῆ ὁ πυρήνας ἐμπλουτίζεται σ' ἐνέργεια καὶ ἀποχτᾶ τὴν ἱκανότητα τῆς μεταστοιχείωσης, ἐνῶ προηγούμενα ἦταν σταθερός. Ἡ μορφή αὐτῆ σχηματικᾶ εἶναι δυνατόν νὰ παρασταθῆ με τὸ σχῆμα



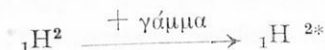
ἢ πιο απλᾶ



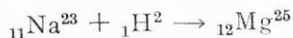
ὅπου ὁ ἀστερίσκος δηλώνει πυρήνα ραδιενεργό.

Ένα τέτοιο φαινόμενο παρατηροῦμε στὸ βαρὺ υδρογόνο (${}_1\text{H}^2$) στὸ υδρογόνο, δηλαδή, πὺ ὁ πυρήνας του περιέχει ἕνα ${}_1\text{P}^1$ κι' ἕνα ${}_0\text{n}^1$. Ἐνῶ τὸ ισότοπο αὐτὸ εἶναι σταθερό, εἶναι

δυνατό νά γίνει ραδιενεργό ἂν δεχτῆ μιάν ἰσχυρή δέσμη ἀπό φωτόνια γάμμα, κατὰ τὴν ἐξίσωση



5.7 Οἱ πυρῆνες πού προέρχονται ἀπὸ ἐνσωμάτωση — μὲ βομβαρδισμό — ἀπὸ σύντηξη, ἢ ἀπὸ ἐνεργοποίηση εἶναι κατὰ κανόνα ἀσταθεῖς. Πολὺ σπάνια τὸ ἄμεσο προϊὼν εἶναι σταθερὸ — καὶ τερματίζει τὴν ὅλη μεταστοιχείωση — ὅπως συμβαίνει στὴν περίπτωση τοῦ ${}_{11}\text{Na}^{23}$ πού, ἂν βομβαρδιστῆ μὲ δευτερόνια, δίνει γένεση στὸ σταθερὸ ἰσότοπο τοῦ μαγνησίου, σύμφωνα μὲ τὴν ἐξίσωση



Τὶς πρὸ πολλῆς φορῆς οἱ ἄμεσα σχηματιζόμενοι πυρῆνες εἶναι ἀσταθεῖς καὶ δίνουν συνέχεια σὲ παραπέρα μεταστοιχειώσεις πού, πολὺ συχνά, ἀποτελοῦν ὀλόκληρες οἰκογένειες σὰν στὴν περίπτωση τῶν φυσικῶν μεταστοιχειώσεων. Αὐτὸ ὀφείλεται στὸ γεγονός ὅτι λίγα μόνο ἰσότοπα, ἀπ' τὸ κάθε στοιχεῖο, εἶναι σταθερά καὶ μάλιστα ἡ ἀναλογία τῶν ἀσταθῶν γίνεται τόσο πρὸ μεγάλη ὅσο πρὸ μεγάλος εἶναι ὁ ἀτομικὸς ἀριθμὸς. Ἔτσι μέσα στὰ τρία ἰσότοπα τοῦ ὕδρογόνου (μὲ μαζικοὺς ἀριθμοὺς 1, 2, 3) εἶναι ἀσταθὲς τὸ ἕνα (τὸ ${}_1\text{H}^3$), μέσα σὲ πέντε ἰσότοπα τοῦ ἀζώτου εἶναι ἀσταθῆ τὰ τρία, μέσα σὲ δέκα ἰσότοπα τοῦ χαλκοῦ εἶναι σταθερὰ μόνο δύο καὶ μέσα σὲ ἑφτά ἰσότοπα τοῦ θορίου εἶναι ἀσταθῆ καὶ τὰ ἑφτά.

5.8 Ἡ παραπέρα μεταστοιχείωση τῶν ἀσταθῶν πυρῆνων μπορεῖ νά γίνει κατὰ τρεῖς τρόπους — μὲ ἀπλὴ μεταστοιχείωση, μὲ σχάση, μὲ τεμαχισμό.

Στὴν **ἀπλῆ μεταστοιχείωση** ὁ ἀσταθῆς πυρῆνας (A) μετατρέπεται σ' ἕναν καινούργιο πυρῆνα (B) μὲ ἀποβολὴ ἑνὸς σωματιδίου (σ) σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



ΠΙΝΑΚΑΣ — 12

ΣΤΑΘΕΡΟΙ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΠΥΡΗΝΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

(A : μαζικοί ἀριθμοὶ σταθερῶν πυρήνων, A* : μαζικοί ἀριθμοὶ ἀσταθῶν πυρήνων, Z : ἀτομικοὶ ἀριθμοὶ)

Z			A	A *
1	Υδρογόνο	${}_1\text{H}$	1, 2	3
7	Ἀζωτο	${}_7\text{N}$	14, 15	13, 16, 17
20	Ἀσβέστιο	${}_{20}\text{Ca}$	40, 42, 43, 44, 46, 48	39, 45, 47, 49
29	Χαλκός	${}_{29}\text{Cu}$	63, 65	58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 67
79	Χρυσός	${}_{79}\text{Au}$	197	190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 198, 199, 200, 202

Σ' ἀντίθεση μὲ τὴ φυσικὴ μεταστοιχείωση, τὰ σωματίδια αὐτὰ (σ) δὲν εἶναι ὑποχρεωτικά καὶ μόνο ἄλφα ἢ βῆτα (${}_2\text{He}^4$ ἢ ${}_{-1}\text{e}^0$), ἀλλὰ μπορεῖ νὰναι καὶ ${}_{1}\text{p}^1$ καὶ ${}_{0}\text{n}^1$ ἀκόμα καὶ **θετικὰ ἠλεκτρόνια** (${}_{1}\text{e}^0$) ⁽¹⁾.

Στὸ σημεῖο αὐτὸ πρέπει νὰ ποῦμε πὸς ὃ σχηματισμὸς τῶν περιέργων αὐτῶν σωματιδίων (${}_{1}\text{e}^0$) ὀφείλεται σ' ἓνα φαινόμενο πὸ εἶναι ἀντίστροφο τῆς μετατροπῆς τῆς μά-

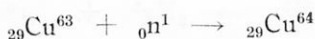
(1) Τὰ θετικὰ ἠλεκτρόνια (${}_{1}\text{e}^0$) ὀνομάζονται καὶ **ποζιτρόνια**.

ζας σ' ενέργεια. Γύρω στα 1934 ο γιουγκοσλαβός S. Μοχογονίσις διατύπωσε την αρχή — πού σήμερα ονομάζουμε *ύλοποίηση της ενέργειας* — σύμφωνα με την οποία η ενέργεια δυο φωτονίων (${}_0\gamma^0$) δίνει γένεση σε μάζα ίση προς τη μάζα δυο ηλεκτρονίων. Η ανυπαρξία όμως φορτίου στα φωτόνια απαιτεί και ανυπαρξία φορτίου στο τελικό προϊόν, οα σύνολο. Μια όμως πού τὸ ἔνο συστατικό, σὰν ηλεκτρόνιο, ἔχει ἀρνητικό φορτίο στέκεται ἀπαραίτητο τὸ ἄλλο νὰ ἔχει φορτίο θετικό και ἴσο σ' ἀπόλυτη τιμή. Ἔτσι ἐξηγεῖται ὁ σχηματισμός ἑνὸς ζεύγους ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου κατὰ τὸ σχῆμα

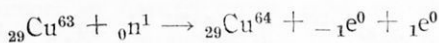


Στις ἐνδιάμεσες ἀντιδράσεις ἔχουμε πάντοτε σχηματισμὸ φωτονίων — ἀπ' τὸ ἔλλειμμα μάζας — κι' ἔχουμε πάντοτε τὴ δυνατότητα νὰ δημιουργηθεῖ ἕνα τέτοιο ζεῦγος, τοῦ ὁποῖου τὸ ἕνα μέλος ($-{}_1e^0$) νὰ μένει στὸν πυρήνα — ἐλαττώνοντας τὸν ἀτομικὸ ἀριθμὸ — και τὸ ἄλλο (${}_1e^0$) νὰ ἐκλύεται σὰν σωματίδιο.

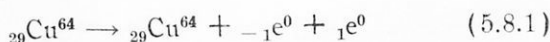
Σὰν παράδειγμα, ὅταν βομβαρδίζουμε τὸν ${}_{29}\text{Cu}^{63}$ με νετρόνια σχηματίζεται τὸ ἀσταθὲς ἰσότοπό του με μαζικὸ ἀριθμὸ 64



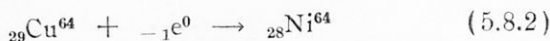
με ταυτόχρονα ἔκλυση ἐνέργειας ὑπὸ μορφή φωτονίων γάμμα. Δυὸ ἀπ' τὰ φωτόνια αὐτὰ σχηματίζουν ἕνα ζεῦγος ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου κι' ἔτσι ἡ παραπάνω ἀντίδραση θὰ μπορούσε νὰ γραφεῖ



ἢ — ἀπ' τὸν ${}_{29}\text{Cu}^{64}$ και πέρα — με τὴν ἐξίσωση

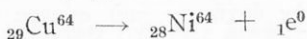


Τὸ $-{}_1e^0$ πού γεννιέται ἕνα δυνατὸ νὰ τὸ θεωρήσουμε ὅτι ξαναπαίρνει στὸν πυρήνα μετατρέποντας τὸ χαλκὸ σε νικέλιο



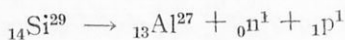
Φαίνεται ἀπ' αὐτὰ καθαρὰ πὼς — προσθέτοντας κατὰ μέλη

τις (5.8.1) και (5.8.2) βρίσκουμε τελικά

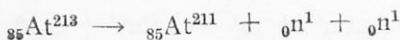
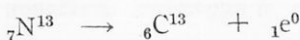
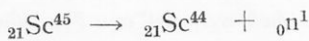
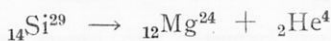
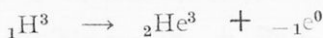


μιάν αντίδραση, δηλαδή, που χαρακτηρίζεται σαν άπλη αποσύνθεση με αποβολή ποζιτρονίου.

5.9 Η άπλη μεταστοιχείωση των άσταθών τεχνητών πυρήνων διαφέρει, απ' τις φυσικές μεταστοιχειώσεις, και στο σημείο ότι δεν παράγεται απαραίτητα *ένα* μόνο τελικό σωματίδιο από *έναν* πυρήνα. Έχει παρατηρηθή πολύ συχνά ο σχηματισμός *πολλών* σωματιδίων από *ένα* μόνο πυρήνα, όπως κατά τη μετατροπή του πυριτίου — 29 σε άργίλλο όπου δημιουργούνται δυο σωματίδια (${}_1\text{p}^1$ και ${}_0\text{n}^1$) σύμφωνα με την εξίσωση



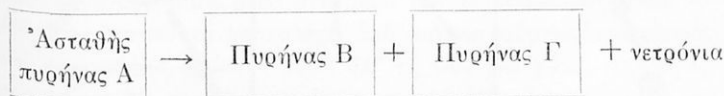
Στις άπλες μεταστοιχειώσεις μπορούν να καταταχτούν τα παρακάτω παραδείγματα όπου βλέπουμε να εκλύονται σωματίδια βήτα, άλφα, νετρόνια κλπ.



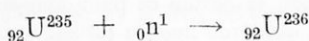
6. Η ΣΧΑΣΗ ΚΑΙ Η ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ

6.1 Ουσιαστικά και τυπικά διαφορετική απ' την απλή μεταστοιχείωση είναι η *σχάση*. Σ' αυτήν από *έναν* δεδομένο, αρχικό, άσταθῆ πυρήνα (A) — που προέρχεται πάντοτε από ένσωμάτωση ενός νετρονίου — δημιουργοῦνται *δυὸ* καινούργιοι πυρήνες (B, Γ) με την ἴδια, πάνω-κάτω, μάζα με σύγχρονη ἀποβολὴ ἑνὸς πλήθους ἀπὸ νετρόνια (γύρω στὰ 5 με 15), ὅμως *μόνο νετρόνια*, κι' ὄχι πρωτόνια, ἢ σωματίδια ἄλλα κλπ. (βλ. σχ. 4).

Ἡ σχάση παρατηρήθηκε σὲ ὁρισμένους ἀποκλειστικά βαρεῖς πυρήνες⁽¹⁾, πυρήνες δηλαδή με πολὺ μεγάλο μαζικὸ κι' ἀτομικὸ ἀριθμὸ καί, συμβολικά, μπορεῖ ν' ἀποδοθεῖ με τὸ σχῆμα



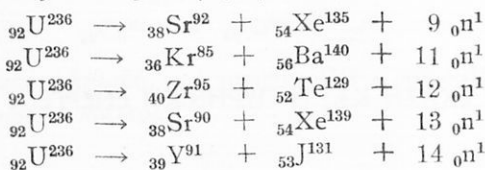
Ἄξιοσημείωτο εἶναι ἀκόμα τὸ γεγονός πὸς ἕνας καὶ ὁ αὐτὸς πυρήνας μπορεῖ νὰ ὑποστεῖ σχάση κατὰ πολλοὺς διαφορετικούς τρόπους. Ἔτσι, σὰν παράδειγμα, τὸ οὐράνιο — 236, πὸν σχηματίζεται κατὰ τὴν ένσωμάτωση ἑνὸς ${}_0^1\text{n}^1$ στὸ οὐράνιο — 235



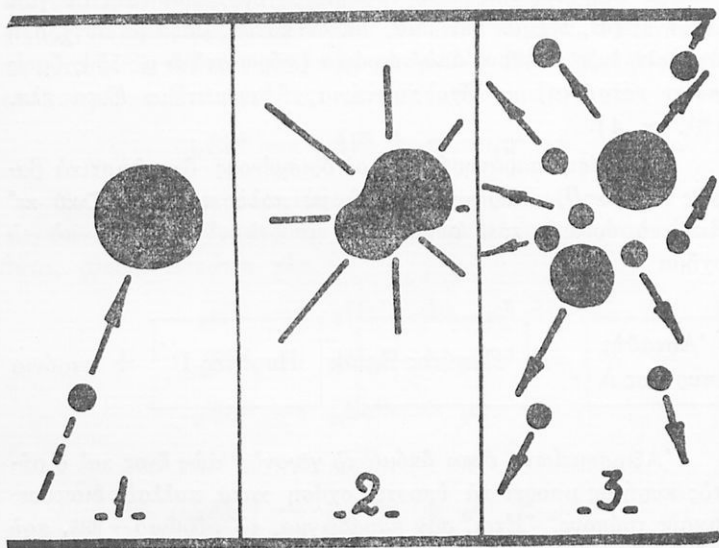
ὑπόκειται σὲ σχάση κατὰ πάνω ἀπὸ εἴκοσι διάφορους τρόπους,

(1) Πρακτικά ἡ σχάση περιορίζεται στὰ ἰσότοπα ${}_{92}\text{U}^{234}$, ${}_{92}\text{U}^{236}$, στὸ θόριο ${}_{90}\text{Th}^{233}$ καὶ τὸ πλουτώνιο ${}_{94}\text{Pu}^{240}$.

ανάμεσα στους οποίους αναφέρουμε τους παρακάτω πέντε

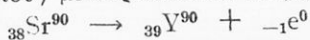


“Όπως και στις άπλές μεταστοιχειώσεις, έτσι και στη σχέση πολλά άπ’ τὰ προϊόντα είναι κι’ αὐτὰ άσταθῆ και δίνουν γένεση σὲ καινούργιες μεταστοιχειώσεις.

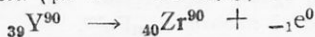


Σχ. 4. Ένσωμάτωση νετρονίου σὲ βαρὺ πυρήνα (1), σχηματισμὸς άσταθῆ συνθέτου πυρήνα (2) και σχάση (3).

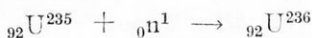
Τέτοιο είναι, μέσα στ’ άλλα, και τὸ στρόντιο — 90 πὸν (μὲ $T = 27$ ἔτη περίπου) μετατρέπεται σὲ ἕντιριο



κι’ αὐτὸ σὲ συνέχεια (μὲ $T = 60$ ὥρες) σὲ σταθερὸ ζιρκόνιο



6.2 Για την πρακτική αξιοποίηση τῶν τεχνητῶν πυρηνικῶν μεταστοιχειώσεων ἔχει ιδιαίτερη σημασία ἕνα φαινόμενο πού ὀνομάζεται **άλυσωτή αντίδραση**. Γιὰ νὰ δοῦμε τὸ φαινόμενο αὐτὸ στὸ βάθος του καὶ νὰ κατανοήσουμε τὴ φυσικὴ σημασία του ἄς ξεκινήσουμε ἀπὸ ἕνα παράδειγμα. Ἐὰν ὑποθέσουμε ὅτι ἀναγκάζουμε ἕνα νετρόνιο — ἕνα καὶ μόνο νετρόνιο — νὰ πέσει πάνω σ' ἕνα κομμάτι μεταλλικοῦ οὐρανίου, σὲ τρόπο πού τὸ ἕνα αὐτὸ νετρόνιο νὰ ἐνσωματωθῇ σ' ἕναν πυρήνα οὐρανίου (${}_{92}\text{U}^{235}$), ἀνάμεσα στοὺς ἄπειρα πολλοὺς πού συνιστοῦν τὸ μεταλλικὸ κομμάτι. Ὁ ἕνας αὐτὸς πυρήνας θὰ μετατραπῇ προφανῶς στὸν ἰσότοπό του (${}_{92}\text{U}^{236}$) κατὰ τὴν αντίδραση



Ὁ πυρήνας αὐτὸς — σὰν σχάσιμος πού εἶναι — θ' ἀποσυντεθεῖ κατὰ ἕνα ἀπ' τοὺς δυνατοὺς τρόπους, δίνοντας — ἄς ποῦμε — ἔννια νετρόνια



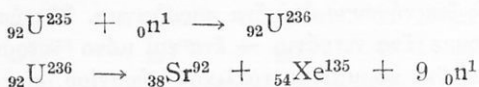
Τὸ καθένα ὅμως ἀπ' τὰ ἔννια αὐτὰ καινούργια νετρόνια — καθὼς θὰ βρῖσκεται μέσα στὴ μᾶζα τοῦ μεταλλικοῦ οὐρανίου — θὰ εἶναι δυνατό νὰ προκαλέσει ἀπὸ μιὰ καινούργια ἐνσωμάτωση καὶ σὲ συνέχεια σχάση. Ἐτσι ἀπ' τὴ μία καὶ μόνη ἀρχικὴ ἐνσωμάτωση θὰ προκύψουν ἔννια καινούργιες ἐνσωματώσεις καὶ ἰσάριθμες καινούργιες σχάσεις.

Μ' αὐτὸν τὸν τρόπο ἀπὸ μιὰν ἀντίδραση πάνω σ' ἕνα μόνο πυρήνα ${}_{92}\text{U}^{235}$ θὰ γεννηθοῦν 9 καινούργιες, σὲ συνέχεια 81 (δηλαδὴ 9×9), σὲ συνέχεια 729 (δηλ. 81×9), 6561, 59049, 531441 κλπ.

Βλέπουμε δηλαδὴ πὼς ἂν σ' ἕνα πρῶτο στάδιο ἔχουμε **μιὰ μόνο** ἀντίδραση, στὸ ἕβδομο κιόλας στάδιο ξεπερνᾶμε τὸ **μισὸ ἑκατομμύριο!**

Κάθε τέτοιο φαινόμενο, ὅπου ἀπὸ μιὰν ἀντίδραση μποροῦν νὰ γεννηθοῦν περισσότερες — πού ν' αὐξάνει συνεχῶς τὸ πλῆθος τους — τὸ λέμε **άλυσωτή ἀντίδραση**.

6.3 Κατὰ κανόνα οἱ ἄλυσωτὲς ἀντιδράσεις παρουσιάζονται στὶς ἐνσωματώσεις νετρονίων πάνω σὲ βαρεῖς πυρῆνες, πού δίνουν προϊόντα ὑποκείμενα σὲ σχάση, ὅπως στὸ βομβαρδισμό τοῦ οὐρανίου — 235



Ὅμως, στὴν πράξη, ἂν ἀπὸ ἓνα νετρόνιο προκύψουν ἐννιά — ὅπως στὸ παραπάνω παράδειγμα — δὲν προκαλοῦνται καὶ ἰσάριθμες καινούργιες ἀντιδράσεις. Ἄπ' τὰ 9 καινούργια νετρόνια μερικὰ διαφεύγουν, ἄλλα ἀπορροφοῦνται σχηματίζοντας σταθεροὺς πυρῆνες, ἄλλα δίνουν γένεση σὲ ραδιενεργοὺς πυρῆνες μὴ ὑποκειμένους σὲ σχάση κλπ. Ἔτσι μόνο ἓνα μέρος ἀπ' αὐτὰ τὰ 9 μπορεῖ νὰ θεωρηθεῖ σὰν **ἐνεργὸ** καὶ νὰ συνεχίσει τὴν ἄλυσωτὴ ἀντίδραση. Αὐτὸ βέβαια θὰ ἐπαναληφθεῖ καὶ στὸ δεύτερο καὶ στὸ τρίτο καὶ στὸ νουστὸ στάδιο.

Τὸ πλήθος τῶν καινούργιων ἀντιδράσεων πού γεννιοῦνται ἀπ' τὴν κάθε μιὰ προηγούμενη τὸ χαρακτηρίζουμε σὰν **συντελεστὴ σχάσης** (k). Ἔτσι, σὰν παράδειγμα, ἂν σὲ μιὰν ἄλυσωτὴ ἀντίδραση ἔχουμε $k = 2$, αὐτὸ σημαίνει πὼς — ἀνεξάρτητα ἀπ' τὸ πλήθος τῶν νετρονίων πού βγαίνει ἀπ' τὴν κάθε σχάση — ἀπ' τὴν πρώτη ἀντίδραση θὰ γεννηθοῦν 2 καινούργιες, ἀπ' αὐτὲς 4 (δηλαδὴ ἀνὰ 2 ἀκόμα), ἀπ' αὐτὲς 8 κ.ο.κ. Ὁ ρυθμὸς αὐτὸς μπορεῖ νὰ παρασταθεῖ μὲ τὸν τύπο

$$y = kx \quad (6.3.1)$$

ὅπου y τὸ πλήθος τῶν σχάσεων καὶ x τὸ ἀντίστοιχο στάδιο τῆς ἄλυσωτῆς ἀντίδρασης. Ἄπ' αὐτὸ φαίνεται καθαρὰ πὼς — μὲ $k = 2$ — ἔχουμε στὸ δέκατο στάδιο ($x = 10$) συνολικὰ 1024 σχάσεις (δηλαδὴ $y = 2^{10} = 1024$).

Εἶναι ἀξιοσημεῖο τὸ γεγονός ὅτι, ὅσοδήποτε μικρὸς κι' ἂν εἶναι ὁ συντελεστὴς k (πάντοτε ὅμως μεγαλύτερος ἀπὸ 1), ἡ αὔξηση γίνεται μὲ καταπληχτικὸ ρυθμὸ. Γιὰ νὰ δοῦμε καθα-

ρώτερα την ταχύτητα στο ρυθμό του συνεχούς αυτού πολλαπλασιασμού, ἄς πάρουμε τὸ παρακάτω παράδειγμα. Ἐάν κάθε ἐνσωμάτωση καὶ σχάση κρατάει ἓνα ἑκατοστὸ τοῦ δευτερολέπτου, ἔπεται πὸς μέσα σ' ἓνα δευτερόλεπτο θᾶχουμε 2^{100} σχάσεις μὲ συντελεστὴ $k = 2$. Ὁ ἀριθμὸς ὅμως αὐτός⁽¹⁾, ἂν ἀφορᾷ τὸ οὐράνιο, ἀντιστοιχεῖ σὲ μιὰ τεράστια ποσότητα οὐρανόου πὸν ὑπερβαίνει κατὰ πολὺ ὅλο τὸ οὐράνιο πὸν ὑπάρχει στὴ γῆ. Μ' ἄλλα λόγια, μὲ $k = 2$, εἶναι δυνατὸ νὰ μεταστοιχειωθεῖ **ὅλο τὸ ὑπαρκτὸ οὐράνιο** σὲ χρόνον μικρότερο ἀπὸ ἓνα δευτερόλεπτο, κι' αὐτὸ μὲ **ἓνα μόνο ἀρχικὸ νετρόνιο**.

Στὴν πράξι ὁ συντελεστὴς k δὲ φτάνει ποτὲ τὸ δύο, ἀλλὰ ἔχει τιμὲς λίγο πὸ πάνω ἀπ' τὴ μονάδα, σὰν $k = 1,2$. Τὸ δεκαδικὸ ψηφίον, παρ' ὅλο πὸν φαίνεται περίεργο, σημαίνει ἀπλῶς ὅτι σὲ κάθε σχάση ἀντιστοιχοῦν 1,2 καινούργιες, δηλαδὴ σὲ κάθε 10 σχάσεις 12 καινούργιες. Μ' αὐτὸ, ἂν σ' ἓνα πρῶτο στάδιο ἔχουμε 1000 σχάσεις, στὸ δεύτερο θᾶχουμε 1200 ($1,2 \times 1000$), στὸ τρίτο 1440 ($1,2 \times 1,2 \times 1000$) στὸ τέταρτο 1728 κ. ο. κ.

6.4 Οἱ ἀλυσωτὲς ἀντιδράσεις χωρίζονται σὲ μὴ ἐλεγχόμενες, ἐλεγχόμενες καὶ κρίσιμες, ἀνάλογα μὲ τὴν τιμὴ πὸν ἔχει ὁ συντελεστὴς σχάσης k .

Ἐάν ὁ συντελεστὴς εἶναι μεγαλύτερος τῆς μονάδας ($k > 1$) οἱ ἀντιδράσεις λέγονται **μὴ ἐλεγχόμενες** γιατί ταχύτατα ὀδηγοῦν στὴ μεταστοιχειώση μιᾶς πολὺ μεγάλης ποσότητας ὕλικου.

Ἐάν πάλι ὁ συντελεστὴς εἶναι μικρότερος τῆς μονάδας ($k < 1$) οἱ ἀντιδράσεις χαρακτηρίζονται σὰν **ἐλεγχόμενες**, γιατί γρήγορα σταματοῦν. Ἐτσι, μὲ $k = 0,5$, ἀπὸ 1000 ἀρχικὲς σχάσεις θᾶχουμε, στὸ δεύτερο στάδιο, μόνο 500, στὸ τρίτο μόνο 250, στὸ τέταρτο 125 καὶ ταχύτατα ἡ ὅλη ἀντίδραση θὰ σταματήσῃ.

⁽¹⁾ Ὁ ἀριθμὸς 2^{100} σημαίνει $2 \times 2 \times 2 \times \dots$ ἑκατὸ φορές, καὶ εἶναι ἀριθμὸς μὲ 30 ψηφία.

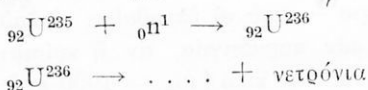
Ἐάν ὁμοῦς ὁ συντελεστὴς εἶναι ἴσος ἀκριβῶς μὲ τὴ μονάδα ($k = 1$) ἡ ἀντίδραση λέγεται **κρίσιμη** κι' ἔχουμε τότες ἀπὸ κάθε μιὰ σχάση μιὰ μόνο καινούργια, μὲ ρυθμὸ δηλαδὴ σταθερῶς ταχύτητας. Σὰν κρίσιμη χαρακτηρίζεται ἡ περίπτωση αὐτὴ γιατί κάθε αὔξηση τοῦ k — ἔστω κι' ἐλάχιστη — ὀδηγεῖ τὴν ἀντίδραση σὲ μὴ ἐλεγχόμενη, ἐνῶ κάθε ἐλάττωση τὴν καθιστᾷ ἐλεγχόμενη.

6.5 Στὸ σημεῖο αὐτὸ εἶναι σημαντικό νὰ προσέξουμε πὼς γιὰ κάθε ὕλικό, ποὺ ὑπόκειται σ' ἐνσωμάτωση νετρονίων καὶ σὲ συνέχεια σὲ σχάση, ὑπάρχει μιὰ ὀρισμένη ἐλάχιστη ποσότητα πάνω ἀπ' τὴν ὁποία ὁ συντελεστὴς σχάσης γίνεται μεγαλύτερος τῆς μονάδας καὶ κάτω ἀπ' τὴν ὁποία μικρότερος. Ἡ ποσότητα αὐτὴ χαρακτηρίζεται σὰν **κρίσιμη μᾶζα** καὶ εἶναι φανερὸ πὼς ἀντιπροσωπεύει τὴν περίπτωση ὅπου $k = 1$. Ἐτσι ὅταν λέμε ὅτι ἡ κρίσιμη μᾶζα τοῦ οὐρανίου εἶναι 1000 gr ὑπονοοῦμε πὼς, ἂν πέσει ἓνα νετρόνιο — ἔστω ἓνα καὶ μόνο — πάνω σ' ἓνα ποσὸ οὐρανίου κατὰ τι μεγαλύτερο ἀπὸ 1000 gr (π.χ. 1002 gr) θὰ προκαλέσει ταχύτατα μιὰ ἀλυσωτὴ μεταστοιχείωση, μὲ μορφὴ μὴ ἐλεγχόμενης ἀντίδρασης. Ἀντίθετα ἂν πέσει ἓνα νετρόνιο — ἢ καὶ πιὸ πολλὰ — πάνω σὲ οὐράνιο κατὰ τι λιγότερο ἀπὸ 1000 gr (π.χ. 998 gr) θὰ προκαλέσει μιὰν ἀντίδραση οὔτε κἄν αἰσθητὴ, δηλαδὴ μιὰν ἀντίδραση μὲ ρυθμὸ συνεχῶς βραδύτερο σὰν ἐλεγχόμενη σχάση.

Ἡ κρίσιμη μᾶζα (m_k) εἶναι ὀρισμένη γιὰ κάθε ὕλικό κι' ἐξαρτᾶται ἀπ' τὴν καθαρότητά του, τὴ φυσικὴ του κατάσταση καὶ τὸ σχῆμα. Γενικὰ εἶναι πιὸ μικρὴ γιὰ ὕλικά σὲ στερεὰ κατάσταση καὶ τόσο πιὸ μικρὴ ὅσο τὸ ὕλικό εἶναι πιὸ καθαρό, πιὸ συμπαγὲς καὶ πιὸ πολὺ νὰ τείνει πρὸς τὸ σφαιρικὸ σχῆμα. Σὰν παράδειγμα, στὸ καθαρό, στερεὸ οὐράνιο σὲ σχῆμα σφαίρας εἶναι $m_k = 1$ kgr. Ἀντίθετα σὲ μὴ καθαρό, στερεὸ οὐράνιο σφαιρικοῦ καὶ πάλι σχήματος εἶναι $m_k = 2$ kgr, σὲ πρισματικὸ σχῆμα φτάνει $m_k = 10$ kgr, σὲ κατάσταση διαλύματος ἔχουμε ἀκόμα μεγαλύτερη τιμὴ ($m_k = 50$ kgr).

Ἡ καθαρότητα, ἡ κατάσταση καὶ τὸ σχῆμα ἐπηρεάζουν τὴν κρίσιμη μᾶζα γιὰ τὸ λόγο ὅτι οἱ συνθῆκες αὐτὲς ἀλλοιώνουν τὸ ποσοστὸ τῶν δραστικῶν νετρονίων καὶ — κατὰ συνέπεια — τὴν τιμὴ τοῦ συντελεστοῦ σχάσης.

6.6 Σὰν ἄμεση ἐφαρμογὴ τῆς ἄλυσωτῆς ἀντίδρασης στὴ σχάση μπορεῖ νὰ θεωρηθῇ ἡ πυρηνικὴ βόμβα οὐρανίου, ἡ βόμβα ποὺ συνήθως ὀνομάζεται **ἀτομικὴ βόμβα**. Ἡ λειτουργία της στηρίζεται στὴ σχάση τοῦ οὐρανίου — 235, τοῦ καθαροῦ δηλαδὴ ἰσοτόπου ${}_{92}\text{U}^{235}$ ποὺ ὑπόκειται σ' ἐνσωμάτωση νετρονίων καὶ σὲ συνέχεια σὲ σχάση κατὰ τὸ σχῆμα



σύμφωνα μὲ τὶς μεταστοιχειώσεις ποὺ εἴπαμε πιὸ πάνω (§ 6.1). Τὸ φυσικὸ οὐράνιο — σὰν μέταλλο ὀρυκτῶν — εἶναι μίγμα τριῶν ἰσοτόπων μὲ μαζικοὺς ἀριθμοὺς 233, 235, 238. Ἀπ' αὐτὰ τὸ οὐράνιο — 238 ἀποτελεῖ τὰ 99,28 %, τὸ οὐράνιο — 235 τὰ 0,71 % καὶ τὸ οὐράνιο — 233 τὰ ὑπόλοιπα 0,01 %.

Μόνο τὸ οὐράνιο — 235 χρησιμοποιεῖται σὰν ὑλικὸ ὑποκείμενο σ' ἐνσωμάτωση καὶ σχάση, γι' αὐτὸ καὶ ἀπαιτεῖται μιὰ πολυπλοκώτατη μέθοδος ἐπεξεργασίας γιὰ νὰ παραληφθῇ καθαρὸ τὸ κατάλληλο ἰσότοπο. Ἡ μέθοδος αὐτὴ βασικὰ στηρίζεται σὲ ἀλλεπάλληλα στάδια φυσικοχημικοῦ διαχωρισμοῦ, ποὺ ὀδηγοῦν τελικὰ στὴ λήψη καθαροῦ ${}_{92}\text{U}^{235}$ ἀπὸ τὸν λαγμένον τῶν ἄλλων δυὸ ἰσοτόπων. Ὁ τέτοιος διαχωρισμὸς ἀποτελεῖ καὶ τὸ σπουδαιότερο στάδιο στὴν ὅλη κατασκευὴ τῆς ἀτομικῆς βόμβας, ὅπου καὶ βρίσκονται τὰ διάφορα ἀτομικὰ μυστικά, ποὺ ἄλλο δὲν εἶναι παρὰ λεπτομέρειες στὴν πορεία τοῦ διαχωρισμοῦ, λεπτομέρειες ὅμως ποὺ παίζουν σπουδαῖο ρόλο στὴν τελικὴ παραλαβὴ τοῦ καθαροῦ ${}_{92}\text{U}^{235}$.

6.7 Γιὰ τὴν μὴ ἐλεγχόμενη σχάση τοῦ οὐρανίου — 235 χρησιμοποιοῦνται σὰν βλήματα ἀτμοσφαιρικὰ νετρόνια. Ἡ

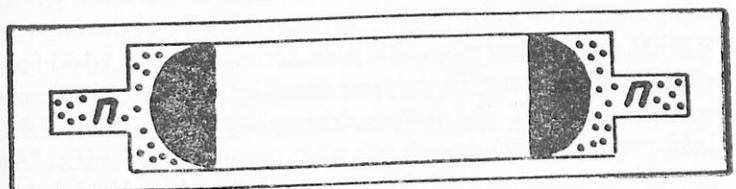
γήϊνη ἀτμόσφαιρα δὲν περιέχει μόνο ὀξυγόνο, ἄζωτο καὶ εὐγενῆ ἀέρια⁽¹⁾ ἀλλὰ καὶ ἄλλα σώματα καὶ ἀνάμεσα σ' αὐτὰ νετρόνια ποὺ κινουῦνται — ὅπως καὶ τὰ λοιπὰ συστατικά — μὲ ποικίλες ταχύτητες καὶ πρὸς διάφορες κατευθύνσεις.

Ἐνα νετρόνιο — ἀπ' αὐτὰ τὰ ἀτμοσφαιρικά — εἶναι ἀρκετὸ γιὰ νὰ προκαλέσει μιὰν ἐνσωμάτωση, καὶ σὲ συνέχεια μιὰ σχάση, σὲ τρόπο ποὺ ν' ἀρχίσει ἡ ἀλυσωτὴ ἀντίδραση ἐφ' ὅσον ἡ ποσότητα τοῦ οὐρανίου — 235 εἶναι σὲ μᾶζα μεγαλύτερη ἀπ' τὴν κρίσιμη. Ἡ ποσότητα αὐτὴ χρησιμοποιεῖται σὲ μορφή δυὸ ἡμισφαιρικῶν τεμαχίων (βλ. σχ. 5), ποὺ τὸ καθένα ἔχει μᾶζα μικρότερη ἀπ' τὴν κρίσιμη ($m < m_k$), μὲ σύνολο ὁμως — γιὰ τὰ δυὸ τεμάχια — ποὺ νὰ ὑπερβαίνει τὸ κρίσιμο ($2m > m_k$).

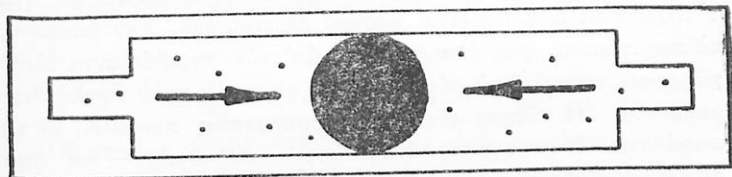
Ἔτσι, σὰν παράδειγμα, ἂν ἡ κρίσιμη μᾶζα τοῦ οὐρανίου — 235 εἶναι ἓνα κιλὸ ($m_k = 1000 \text{ gr}$) μποροῦμε νὰ χρησιμοποιήσουμε μιὰ σφαῖρα ἀπὸ οὐράνιο μὲ μᾶζα 1200 gr, χωρισμένη στὰ δυὸ, σὲ τρόπο ποὺ τὸ καθένα νᾶχει μᾶζα μόνο 600 gr.

6.8 Τὰ δυὸ αὐτὰ τεμάχια — χωρισμένα τὸ ἓνα ἀπ' τὸ ἄλλο — τοποθετοῦνται μέσα σ' ἓναν κύλινδρο, ποὺ παίζει τὸ ρόλο ὀδηγοῦ. Τὴν κατάλληλη στιγμή μπαίνει σὲ λειτουργία ἓνα σύστημα πυροδότησης — ἀπὸ κοινὸ ἐκρηκτικὸ μίγμα — ποὺ ὠθεῖ μὲ δύναμη τὰ δυὸ κομμάτια σὲ τρόπο ποὺ νὰ σχηματίσουν μιὰν ἐνιαῖα σφαῖρα, μὲ συνολικὴ μᾶζα προφανῶς μεγαλύτερη ἀπ' τὴν κρίσιμη. Τὴν ἴδια στιγμή σπᾶνε καὶ τὰ τοιχώματα τοῦ κυλίνδρου ἔτσι ὥστε τὸ σφαιρικὸ πιά τεμάχιο τοῦ οὐρανίου νὰ βρεθεῖ, ἐλεύθερο σχεδόν, μέσα στὴν ἀτμόσφαιρα. Ἡ πιθανότητα νὰ προσβληθεῖ ἡ μᾶζα αὐτὴ ἀπὸ ἓνα ἀτμοσφαιρικὸ νετρόνιο εἶναι ἄπειρα μεγάλη καὶ ἀποτελεῖ, πραχτικά, βεβαιότητα. Ἔτσι μ' ἓνα μόνο νετρόνιο ἀρχίζει ἡ ἀλυσωτὴ ἀντίδραση ποὺ καταλήγει, ταχύτατα, σὲ σχάση ὀλόκληρης — πραχτικά — τῆς ποσότητας τοῦ ${}_{92}\text{U}^{235}$ μέσα σὲ χρόνον ἀπειροελάχιστο.

(1) Δηλαδή κρυπτό (Kr), νέο (Ne) καὶ ξένο (X) ποὺ σὲ πολὺ μικρὰ ποσὰ βρίσκονται στὸν ἀτμοσφαιρικὸ ἀέρα.



$$m < m_k$$



$$2m > m_k$$

Σχ. 5. Ἀτομικὴ βόμβα οὐρανίου (Π: πυροδοτικὸ σύστημα).

6.9 Ἀνάμεσα στὴ μάζα τῶν ἀρχικῶν μελῶν τῆς ἀντίδρασης (${}_{92}\text{U}^{235} + {}_0\text{n}^1$) καὶ τῶν τελικῶν προϊόντων τῆς σχάσης ἔχουμε ἓνα σχετικὰ μικρὸ **ἔλλειμμα μάζας**, ποὺ δίνει γένεση στὴν ἐκλυόμενη ἐνέργεια σὲ μορφή φωτεινῆς — μὲ τὴν εὐθεῖα ἔννοια — ἀκτινοβολίας. Αὐτὴ ἀκριβῶς ἡ ἀκτινοβολία — κυρίως τοῦ τύπου γάμμα — εἶναι ἡ λεγόμενη ἀτομικὴ ἢ, ὀρθότερα, **πυρηνικὴ ἐνέργεια**.

Τὸ ἔλλειμμα μάζας φτάνει σχεδὸν στὸ ἓνα δεκάκις χιλιοστὸ ($1/10000$) τῆς ὅλης ἀρχικῆς μάζας, ὥστε ἀπὸ ἓνα κιλὸ οὐράνιο νᾶχουμε ἓνα ἔλλειμμα ποῦ φτάνει μόλις στὸ ἓνα δέκατο τοῦ γραμμαρίου ($0,1 \text{ gr}$). Ἡ μάζα ὅμως αὐτὴ ἂν καὶ πολὺ μικρὴ — σὰ μάζα — ἰσοδυναμεῖ πρὸς ἓνα τεράστιο ποσὸ ἐνέργειας, σύμφωνα μὲ τὸν τύπο (2.5.3) καὶ συγκεκριμένα σὲ μιὰ ἐνέργεια 900000 τοννοχιλιόμετρων. Μ' ἄλλα λόγια, ἀπὸ ἓνα κιλὸ οὐράνιου μπορεῖ νὰ παραχθεῖ ἐνέργεια ἱκανὴ νὰ πετάξει 900000 τόνους βάρους ψηλὰ σ' ἓνα ὕψος ἑνὸς χιλιομέτρου, ἐνέργεια δηλαδή παραπάνω ἀπὸ ἀρκετὴ γιὰ νὰ καταστρέψει μιὰ πόλη. Ἄν μετατρέψουμε τὰ τοννοχιλιόμετρα σὲ κιλοβαττωρία (kwh) βρίσκουμε μιὰ τιμὴ ἴση μὲ 2500000 kwh, ἐνέργεια δηλαδή ἰσοδύναμη πρὸς τὴν ἠλεκτρικὴ ἐνέργεια ποῦ ξοδεύει ὁλόκληρη ἡ Ἑλλάδα σὲ δυὸ ὄρες.

6.10 Πρέπει πάλι νὰ τονίσουμε πὼς ἡ πυρηνικὴ αὐτὴ ἐνέργεια ἐκδηλώνεται ἀποκλειστικὰ καὶ μόνο σὰν φωτεινὴ. Ὅλα τ' ἄλλα ἀποτελέσματα εἶναι καθαρὰ δευτερογενῆ. Συγκεκριμένα, τὸ παραγόμενο φῶς ἀπορροφᾶται ἀπ' τὸν περιβάλλοντα ὕλικὸ χῶρο καὶ προκαλεῖ τὴ θέρμανσή του σὲ πάρα πολὺ ὑψηλὴ θερμοκρασία. Ἡ αὔξηση αὐτὴ τῆς θερμοκρασίας προκαλεῖ, μὲ τὴ σειρά της, δευτερογενεῖς ἀναφλέξεις — πυρκαγιές — καὶ διαστολές, ποῦ δημιουργοῦν μετατοπίσεις ἀερίων κι' ἀναπτύσσουν πιέσεις, ποῦ καταλήγουν σὲ καθαρὰ μηχανικὰ φαινόμενα ὅπως εἶναι ἡ ἔκρηξη. Ἔτσι βλέπουμε πὼς ἡ ἀτομικὴ ἐνέργεια δὲν παρουσιάζει τίποτε τὸ εἰδικὸ ἢ μυστηριώδες στὴν ἔκλυση καὶ τὴ διάδοσή της, εἶναι ὅμοια κι' ἀπαράλλαχτη — ποιοτικὰ — μὲ τὴ φωτεινὴ ἐνέργεια τῆς ὁποιασδήποτε ἠλεκτρικῆς λάμπας, διαφέροντος μόνο στὴ συνολικὴ ἰσχύ της.

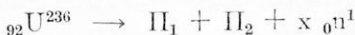
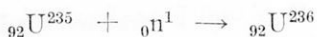
Ἀκόμα πρέπει νὰ προσθέσουμε πὼς ἡ ἀτομικὴ αὐτὴ ἐνέργεια εἶναι πολὺ ἰσχυρὴ — σὰν φωτεινὴ — ὄχι μόνο γιὰ ἀντιστοιχεῖ σὲ τεράστιο πλῆθος φωτονίων, ἀλλὰ ἀκόμα καὶ γιὰ τὸ καθένα φωτόνιο εἶναι, μὲ τὴ σειρά του, πολὺ πιὸ δραστικὸ ἀπ' τὰ συνηθισμένα φωτόνια τοῦ ὁρατοῦ φωτός.

Μ' ἄλλα λόγια, ἡ φωτεινὴ δέσμη ποῦ χαρακτηρίζει τὴν

ατομική — πυρηνική — ενέργεια είναι δέσμη με **πολλά** και, ταυτόχρονα, **δραστικά** φωτόνια, ἐνῶ μιὰ δέσμη κοινού ὄρατοῦ φωτός ἔχει λίγα και ἀσθενῆ φωτόνια. Στὴν πυρηνική δέσμη ἡ ἀκτινοβολία ἀνήκει, κατὰ τὸ πῶς πολὺ, στὴν **περιοχὴ γάμμα** (βλ. § 2.8).

6.11 Ἄς δοῦμε τώρα, πῶς συγκεκριμένα, ποιὰ εἶναι και ποιὰ μπορεῖ νᾶναι τ' ἀποτελέσματα τῆς ἐκρηξης μιᾶς ἀτομικῆς βόμβας. Πρῶτα ἀπ' ὅλα πρέπει νὰ τὰ χωρίσουμε σὲ δυὸ ὁμάδες, σὲ ἄμεσα και σὲ ἔμμεσα. **Ἄμεσα ἀποτελέσματα** λέμε ἐκεῖνα ποὺ προέρχονται ἀπ' τὴν ἀπ' εὐθείας ἀπορρόφηση τῆς φωτεινῆς ἀκτινοβολίας — γάμμα — ἀπ' τὸν περιβάλλοντα ὑλικὸ χῶρο, δηλαδὴ τὴ θέρμανση — με τὰ ἐπακόλουθά της — και τὴν καθαρὰ μηχανικὴ ἐκρηξη. **Ἐμμεσα ἀποτελέσματα** λέμε ἐκεῖνα ποὺ ὀφείλονται στὰ πυρηνικὰ ὑπόλοιπα τῶν σχάσεων.

Ἄπ' τὴν κάθε μιὰ ἐνσωμάτωση και σχάση δημιουργοῦνται τελικὰ διάφοροι πυρῆνες (Π_1 , Π_2) κατὰ τὴ γενικὴ μορφή



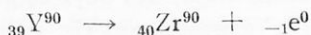
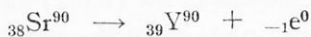
Οἱ πυρῆνες αὐτοὶ (Π_1 , Π_2) δὲν εἶναι σταθεροὶ ἀλλὰ — κατὰ κανόνα — ραδιενεργοὶ και ἀποτελοῦν, στὸ σύνολό τους, μιὰ σκόνη ἀπὸ μέταλλα σὲ λεπτὸ διαμερισμὸ (τὸν **ἀτομικὸ κομιορτό**). Οἱ ραδιενεργοὶ αὐτοὶ πυρῆνες — ἀσβεστίου, στροντίου κλπ. — διαχέονται στὸν ἀέρα, εἰσέρχονται στὸ χῶμα, παρασύρονται ἀπ' τὰ νερὰ και ἔτσι **ποτίζουν** κατὰ κάποιον τρόπο μιὰ μικρὴ ἢ μεγάλη, ἀνάλογα, περιοχὴ.

Ὅσοι ἀπ' τοὺς πυρῆνες εἶναι βραχύβιοι (βλ. § 3.10) γρήγορα μεταστοιχειώνονται σὲ σταθερὰ προϊόντα, ὅσοι πάλι εἶναι πολὺ μακρόβιοι μεταστοιχειώνονται τόσο ἀργὰ πού, πρακτικὰ, μποροῦν νὰ θεωρηθοῦν σὰν σταθεροὶ και, κατὰ συνέπεια, σὰν ἀβλαβεῖς.

Μερικὰ ὅμως εἶδη πυρήνων μεταστοιχειώνονται με χρόνους ὑποδιπλασιασμοῦ ποὺ κυμαίνονται ἀπὸ μερικὲς ὥρες μέχρι

λίγα ἔτη καὶ δίνουν — σὰ ραδιενεργὰ ὑλικά — μιὰν ἀκτινοβολία μὲ αἰσθητὴ ἔνταση.

Ἐὰς πάρουμε, σὰν παράδειγμα, τὸ ραδιενεργὸ στρόντιο — 90 (${}_{38}\text{Sr}^{90}$) ποὺ μεταστοιχειώνεται — μὲ χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ $T = 27$ ἔτη — σὲ ὑψίτιο καὶ τελικὰ σὲ ζιρκόνιο



Ὁ χρόνος αὐτὸς ($T = 27$ ἔτη) μᾶς δείχνει πὼς πρὶν ἔξαφανιστῆ πραχτικά μιὰ ποσότητα στρόντιου — 90, ποὺ θὰ σχηματίστηκε κατὰ μιὰν ἀτομικὴ ἔκρηξη, πρέπει νὰ περάσουν μερικὲς δεκαετίες. Στὸ χρόνο αὐτὸ τὸ στρόντιο — 90 παραμένοντας στὴ γῆ θὰ παραληφτεῖ ἀπ' τὰ φυτὰ⁽¹⁾ καί, σὰν τροφή, θὰ μπεῖ στὸν ἀνθρώπινο ὄργανισμό ἐντοπιζόμενον στὰ ὄστιά.

Ἐτσι ὁ ἄνθρωπος ἀποκτᾷ, μέσα στὸ ἴδιον του τὸ σῶμα, μιὰ μόνιμη πηγὴ ἀκτινοβολίας. Αὐτὸ πραχτικά θὰ συνεχιστεῖ σ' ὅλη τὴ διάρκεια τῆς ζωῆς τοῦ ἀνθρώπου, ποὺ δέχτηκε τὸ ραδιενεργὸ τοῦτο ὑλικό, καὶ ἴσως — ἴσως καὶ τῶν ἀπογόνων του, ἀν βέβαια ἀποκτήσει ἀπογόνους ὕστερα ἀπὸ μιὰ τέτοια ραδιενεργὸ μόλυνση.

Μ' αὐτὰ φαίνεται καθαρὰ πὼς, ὕστερα ἀπὸ μιὰ ραδιενεργὸ ἔκρηξη, τὸ χῶμα, τὸ νερό, τὰ φυτὰ καὶ τὰ ζῶα, ἐμπλουτιζόμενα σὲ ραδιενεργὰ στοιχεῖα, ἀποτελοῦν θανατηφόρες — ἢ τοῦλάχιστο πολὺ ἐπικίνδυνες — πηγὲς γιὰ τὸν ἄνθρωπο.

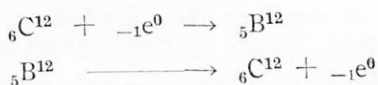
6.12 Λέγοντας πὼς οἱ διάφορες ἀκτινοβολίες — ἰδίως οἱ γάμμα — εἶναι ἐπικίνδυνες, πρέπει νὰ δοῦμε σὲ τί συνίσταται ἡ **βλαβερὴ ἐπίδρασή τους** πάνω στὰ ἔμβια ὄντα. Ἀρχίζοντας ἀπ' τὴς **ἀκτίνες γάμμα**, μποροῦμε νὰ ποῦμε πὼς διαπιστώθηκε ὅτι προκαλοῦν ζημικὲς δράσεις πάνω στὰ πολυσύνθετα μόρια ποὺ ἀποσυντίθενται σὲ μόρια πιδ ἁπλά. Ἐτσι ἡ προσβολὴ μιᾶς πρωτεΐνης — λευκόματος — ἀπὸ ἀκτινοβολία γάμμα συνοδεύε-

(1) Τὸ στρόντιο μοιάζει πολὺ μὲ τὸ ἀσβέστιο κα' ἀκολουθεῖ τὴς ἴδιες σχεδὸν φυσικοχημικὲς καὶ βιοχημικὲς ἀντιδράσεις.

ται ἀπὸ ἀποσύνθεση τῆς πρωτεΐνης σὲ ἀπλούστερα συστατικά, ἀποσύνθεση κατὰ κάποιον τρόπο παρόμοια πρὸς τὸ φαινόμενο τοῦ θανάτου. Ἰδιαίτερη εὐπάθεια παρουσιάζουν τὰ πολυσύνθετα ὀργανικὰ μόρια τῶν λεγομένων φυραμάτων. Τὰ φυράματα — ἢ ἔνζυμα — εἶναι πολυσύνθετες ἐνώσεις πού, μέσα στοὺς ζωντανούς φυτικούς καὶ ζωϊκοὺς ὀργανισμούς, παίζουν ρόλο καθαρὰ λειτουργικὸν — καταλυτικὸν — εὐνοοῦν δηλαδή ὀρισμένες χημικὲς δράσεις καὶ ἐμποδίζουν ἄλλες. Ἔτσι τὸ λεγόμενο κίτρινο φύραμα τῆς ἀναπνοῆς συντελεῖ στὴν πρόσληψη τοῦ ὀξυγόνου ἀπ' τὸ αἷμα, στὴ μετατροπὴ δηλαδή τοῦ φλεβικοῦ αἵματος σὲ ἀρτηριακόν. Ἀντίστοιχα τὰ φυράματα, πὸν λέγονται βιταμίνες καὶ ὁρμόνες συντελοῦν στὴν κανονικὴ ἀνάπτυξη τῶν ὀργανισμῶν κ.λ.π.

Ἡ ἀκτινοβολία γάμμα καταστρέφει, πολὺ ἢ λίγο, ὅλα αὐτὰ τὰ φυράματα καὶ ἔτσι, ἔμμεσα, ἐμποδίζει τὴν κανονικὴν λειτουργία καὶ ἀνάπτυξη, συντελώντας στὴν ἐμφάνιση διαταραχῶν μεσοβαρῶν ἀποτελέσματα στὴ ζωὴ.

Τὰ φορτισμένα σωματίδια (${}_1\text{p}^1$ καὶ ${}_{-1}\text{e}^0$) ὡς καὶ τὰ νετρόνια εἶναι καὶ αὐτὰ βλαβερά γιὰτὶ δημιουργοῦν, μέσα στοὺς ὀργανισμούς, σοβαρὰς ἀλλοιώσεις, καὶ ἀπ' τὴν πλευρὰ ὅτι ἀλλοιώνουν τὴ σύνθεση πὸν ὑπάρχει καὶ ἀκόμα γιὰτὶ δίδουν γένεση σὲ παραπέρα καινούργια ραδιενεργὰ στοιχεῖα. Σὰν παράδειγμα, ἡ πρόσπτωση σωματιδίου βῆτα πάνω στὸν ἀνθρακα μπορεῖ νὰ ὀδηγήσει σὲ σχηματισμὸ ραδιενεργοῦ βορίου.

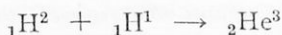


πού, σὰν δευτερογενὴς πηγὴ ἀκτινοβολίας, προκαλεῖ καὶ ἄλλες παραπέρα ἀλλοιώσεις.

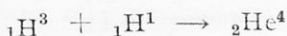
7. Η ΥΔΡΟΓΟΝΙΚΗ ΒΟΜΒΑ ΚΑΙ Η ΘΕΡΜΟΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

7.1 Αντίθετα πρὸς τὴν ἀτομικὴ βόμβα, ἡ *ὕδρογονικὴ βόμβα* — ἢ θερμοπυρηνικὴ βόμβα — δὲν στηρίζεται στὴν ἐνσωμάτωση νετρονίων καὶ στήν, σὲ συνέχεια, σχάση μὲ ἀλυσωτὸ τρόπο, ἀλλὰ στὴ *σύντηξη* (βλ. § 5.5).

Τὸ βαρὺ ὕδρογόνο μπορεῖ νὰ ἐνωθεῖ μὲ τὸ συνηθισμένο ἑλαφρὸ ὕδρογόνο καὶ νὰ δώσει ἥλιο — 3, σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



ὅμοια καὶ τὸ ὑπερβαρὸ ὕδρογόνο μπορεῖ νὰ δώσει ἥλιο — 4, σύμφωνα μὲ τὶς ἀντιδράσεις



Στὶς περιπτώσεις αὐτὲς ἔχουμε ἓνα μεγάλο σχετικὰ ἔλλειμμα μάζας, πὸν ὀδηγεῖ στὴν ἔκλυση ἀντίστοιχου ποσοῦ ἐνέργειας στὴ μορφή ἀκτίνων γάμμα.

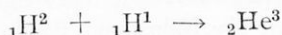
7.2 Οἱ πυρηνικὲς αὐτὲς ἀντιδράσεις, ὅπου παρουσιάζεται συνένωση ἑλαφροτέρων πυρηνῶν σὲ πιὸ σύνθετους, ἀπαιτοῦν μιὰ πολὺ ὑψηλὴ θερμοκρασία — στὴν τάξη τῶν ἑκατομμυρίων βαθμῶν κελσίου — σὲ τρόπο πὸν νὰ μπορέσει νὰ γίνῃ διάλυση τῶν πυρηνῶν στὰ συστατικὰ τους καὶ ἀνασύνταξή τους σὲ βαρύτερους πυρῆνες.

Ἡ ἀπαιτούμενη ὑψηλὴ θερμοκρασία δημιουργεῖται μὲ τὴν ἔκρηξη μιᾶς κοινῆς — ἀτομικῆς — βόμβας οὐρανίου πού, στὸ σημεῖο τῆς ἔκρηξίς της, συντελεῖ στὸ νὰ ἐπιτευχθοῦν οἱ κατάλληλες συνθῆκες γιὰ τὴ σύντηξη.

Ἔτσι ἡ ὑδρογονική βόμβα δὲν εἶναι παρὰ μιὰ βόμβα οὐρανίου πού περιέχει, στὸ ἐσωτερικό της, καὶ μιὰ συμπυκνωμένη ποσότητα ὑδρογόνου (${}_1\text{H}^1$ καὶ ${}_1\text{H}^2$). Ἡ σχάση τοῦ οὐρανίου (βλ. § 6.6) ἀνεβάζει τὴ θερμοκρασία σὲ τρόπο πού τὸ ὑδρογόνο νὰ βρεθεῖ στὶς κατάλληλες συνθῆκες γιὰ τὴν παραπέρα πυρηνική του μεταστοιχείωση σὲ ἥλιο.

7.3 Ὅπως εἶπαμε πὺ πάνω, ἡ ἐνέργεια μιᾶς πυρηνικῆς σύντηξης εἶναι πολὺ μεγάλη. Ἄς δοῦμε, μ' ἕναν ἀπλὸ ὑπολογισμό, σὲ ποιά ἀναλογία μπορεῖ νὰ φτάσει, σὲ σύγκριση μὲ τὴ χρησιμοποιούμενη μάζα.

Στὴν ἀντίδραση



πρέπει νὰ λάβουμε ὑπ' ὄψη μας πὺς ἡ ἀκριβὴς μάζα τοῦ ${}_1\text{H}^1$ (σὲ MAM) εἶναι 1,008145, τοῦ ${}_1\text{H}^2$ εἶναι 2,014741 καὶ τοῦ ${}_2\text{He}^3$ εἶναι 3,016977. Ἀπ' αὐτὰ ὑπολογίζουμε τὸ ἔλλειμμα μάζας (m) σὲ MAM γιὰ κάθε ἀντίδραση



$$2,014741 + 1,008145 > 3,016977$$

δηλαδή

$$m = 2,014741 + 1,008145 - 3,016977$$

$$m = 0,006 \text{ MAM περίπου.}$$

Μ' ἄλλα λόγια σὲ ἀρχικὸ ὑλικὸ μὲ 3 MAM ἔχουμε ἕνα ἔλλειμμα 0,006 MAM, ἥτοι ποσοστὸ τρία στὰ χίλια ($\frac{3}{1000}$). Τὸ ποσοστὸ αὐτὸ εἶναι πολὺ πὺ μεγάλο ἀπὸ ὅτι στὴ σχάση τοῦ οὐρανίου (βλ. § 6.9) καὶ εἶναι ἕνας ἀπ' τοὺς λόγους τῆς μεγαλύτερης ἐκρηκτικῆς δύνამης πού παρουσιάζει ἡ ὑδρογονική βόμβα σὲ σχέση μὲ τὴν ἀτομική βόμβα οὐρανίου.

Ἀκόμα, στὴν ὑδρογονική βόμβα δὲν ὑπάρχει θέμα κρίσιμης μάζας, γεγονός πού ἐπιτρέπει τὴ χρησιμοποίηση ὅσοδῆποτε μεγάλης ποσότητας ὑδρογόνου.

Σὰν παράδειγμα, ἂν θεωρήσουμε στὸ οὐράνιο τὴν κρίσιμη μᾶζα τοῦ ἴση μ' ἓνα κιλὸ μπορούμε νὰ φτιάξουμε μιὰ βόμβα μὲ οὐράνιο βάρους τὸ πολὺ δυὸ κιλῶν παρὰ κάτι. Στὸ οὐράνιο αὐτὸ θάχουμε ἓνα ἔλλειμμα μᾶζας ἴσο μὲ 0,2 gr. Ἀντίθετα, στὴν ὑδρογονική βόμβα μπορούμε νὰ χρησιμοποιήσουμε καὶ ἑκατὸ κιλὰ ὑδρογόνο μ' ἓνα ἔλλειμμα ποῦ θὰ φτάνει τὰ 100 gr. Συγκρίνοντας τὰ δυὸ αὐτὰ ποσὰ (0,2 gr καὶ 100 gr) βλέπουμε καθαρὰ πὼς ἡ ὑδρογονική βόμβα θάναί 500 φορές ἰσχυρότερη.

7.4 Εἶναι ἀξιοσημεῖωτο τὸ γεγονός ὅτι στὴν ὑδρογονική βόμβα δὲν ἔχουμε αἰσθητὰ ραδιενεργὰ προϊόντα ἀπ' τὴ σύντηξη, τοῦλάχιστο πρωτογενῆ (1). Ἔτσι τὰ ἄμεσα ἀποτελέσματά της — σὰν ἔκρηξη — δὲν συνοδεύονται ἀπὸ δευτερογενεῖς ραδιενεργές μολύνσεις, γι' αὐτὸ καὶ τὴν ὑδρογονική βόμβα τὴ λέμε καὶ **καθαρή βόμβα**.

Ἡ δυνατότητα ἀπεριόριστης μᾶζας στὴν ὑδρογονική ἔκρηξη, ὅπως καὶ ἡ πρακτικὴ ἀπουσία ραδιενεργῶν προϊόντων, θέτουν σήμερα ἓνα σπουδαῖο πρόβλημα — τὴ χρησιμοποίησι τῆς θερμοπυρηνικῆς ἀντίδρασης γιὰ εἰρηνικοὺς σκοποὺς, στὴ μορφὴ ἑλεγχόμενης ἀντίδρασης. Πρὸς τὸ παρὸν ὅμως αὐτὸ δὲν ἔχει ἐπιτευχθῆ, γιὰτὶ ἡ ἀνάγκη πολὺ μεγάλης θερμοκρασίας — ποῦ προϋποθέτει βόμβα οὐρανόου — δὲν ἐπιτρέπει τὴ σύντηξη τοῦ ὑδρογόνου μὲ μικρὴ ἰσχύ καὶ σὲ παρατεταμένο χρόνον.

7.5 Μιὰ σημαντικὴ περίπτωσι ἀτομικῆς ἐνέργειας σὲ μορφὴ θερμοπυρηνικῆς ἀντίδρασης — σὰν τὴν ὑδρογονική βόμβα — εἶναι ἡ **ἀστρική ἐνέργεια**.

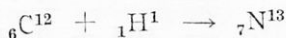
Τὰ διάφορα οὐράνια σώματα ποῦ ἀποτελοῦν αὐτόφωτες πηγές — οἱ ἀπλανεῖς ἀστέρες — στέλλουν στὸν περιβάλλοντα χῶρον φωτεινὴ ἐνέργεια σὲ μιὰ περιοχὴ συχνότητων ἀρκετὰ μεγάλη —

(1) Βέβαια σχηματίζονται ραδιενεργὰ προϊόντα, κυρίως ἀπ' τὴν ἀπαραίτητη ἀτομικὴ ἔκρηξι οὐρανόου, ὅμως τὸ ποσὸ τους εἶναι σχετικὰ πολὺ μικρὸ.

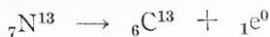
ἀπ' τὸ ὑπέρυθρο μέχρι τὸ γάμμα — περιοχὴ πὺν εἶναι διαφο-
ρετικὴ καὶ χαρακτηριστικὴ γιὰ τὸν κάθε ἀστέρρα.

Οἱ ἀστρικές θερμοπυρηνικές ἀντιδράσεις, πὺν θεωροῦνται
σὰν ἡ αἰτία τῆς παραγωγῆς κ' ἐκπομπῆς ἀκτινοβολίας, δὲν
εἶναι ἀπλές, ὅμως μποροῦν νὰ χωριστοῦν σὲ δυὸ ὁμάδες — στὸν
κύκλο τοῦ ἀνθρακα καὶ τὴν ἄλυσσὸ πρωτονίων.

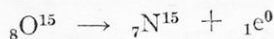
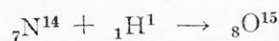
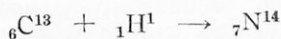
7.6 Ὁ κύκλος τοῦ ἀνθρακα δὲν εἶναι παρὰ μιὰ σειρά
ἀπὸ ἐπαναλαμβανόμενες πυρηνικές ἀντιδράσεις ὅπου ὁ ἀνθρα-
κας — 12 (${}_6\text{C}^{12}$) παίζει ρόλο συνδετικοῦ κρίκου. Συγκεκριμένα,
σὰν πρῶτο στάδιο, ἕνας πυρῆνας ὕδρογόνου — 1 (ἕνα πρωτόνιο)
ἐνσωματώνεται στὸν ἀνθρακα — 12 δίνοντας ἄζωτο



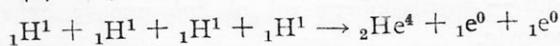
Τὸ ἄζωτο, σὰν πολὺ πλούσιο σ' ἐνέργεια, εἶναι ἀσταθὲς καὶ
ὑπόκειται σ' ἀπώλεια ἐνὸς ποζιτρονίου



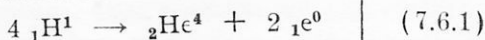
Ἡ μεταστοιχείωση συνεχίζεται σὲ τέσσερα ἀκόμη στάδια
ὡς πὺν ξανασχηματίζεται ὁ ἀνθρακας — 12



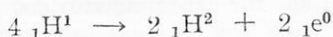
Ἔτσι σὲ ἔξη συνολικά στάδια ξανασχηματίζονται τὰ πιὸ
πολλὰ ἀπ' τὰ ἐνδιάμεσα ὑλικά, σὲ τρόπο πὺν ὁ ὅλος κύκλος —
σὲ ἄθροισμα — νὰ μπορεῖ νὰ θεωρηθεῖ σὰν μιὰ μετατροπὴ —
σύντηξη — τοῦ ὕδρογόνου σὲ ἥλιο, μὲ ἀποβολὴ δυὸ ποζιτρο-
νίων, σύμφωνα μὲ τὴν τελικὰ ἀπλοποιημένη μορφή



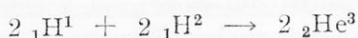
δηλαδὴ



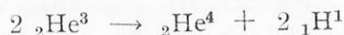
7.7 Ἡ ἄλυσος πρωτονίων ὀδηγεῖ βασικά στὴν ἴδια ἀντίδραση, μὲ διαφορετικὴ ὅμως ἐνδιάμεση πορεία, χωρὶς τὴ συμμετοχὴ τοῦ ἀνθρακα — 12. Συγκεκριμένα στὴν ἀρχὴ ἐνώνονται τέσσερα ἄτομα ὑδρογόνου — 1 (πρωτόνια) ἀνὰ δύο καὶ δίνουν βαρὺ ὑδρογόνο σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



Τὸ βαρὺ ὑδρογόνο, σὲ συνέχεια, ἐνώνεται μὲ τὸ ὑδρογόνο — 1 δίνοντας ἥλιο — 3

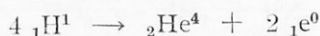


ποὺ μεταστοιχειώνεται σὲ ἥλιο — 4 καὶ ὑδρογόνο — 1



Ἔτσι βλέπουμε πὼς καὶ δῶ ἔχουμε τελικὰ τὴν ἴδια μετατροπὴ ὑδρογόνου σὲ ἥλιο σύμφωνα μὲ τὴν ἐξίσωση (7.6.1).

7.8 Βγαίνει ἀπ' αὐτὰ τὸ συμπέρασμα πὼς — τόσο στὸν κύκλο τοῦ ἀνθρακα, ὅσο καὶ στὴν ἄλυσος πρωτονίων — ἡ ἀστρική ἐνέργεια εἶναι θερμοπυρηνικῆς μορφῆς κι' ἀνάγεται στὴ σύντηξη ὑδρογόνου πρὸς ἥλιο μὲ ἀποβολὴ δυὸ ποζιτρονίων



Στὴ σύντηξη αὐτὴ τὸ ἔλλειμμα μάζας εἶναι πολὺ μεγάλο, φτάνει στὰ πέντε τοῖς χιλίοις (5/1000), καὶ ἡ ἀντίστοιχη ἀκτινοβολία πολὺ ἰσχυρή.

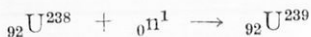
Στοὺς ἀστέρες μὲ χαμηλὴ σχετικὰ θερμοκρασία — στοὺς λεγόμενους ψυχροὺς ἀστέρες — ἐπικρατεῖ ἡ ἄλυσος πρωτονίων, ἀντίθετα στοὺς πολὺ θερμοὺς ἀστέρες ἐπικρατεῖ ὁ κύκλος τοῦ ἀνθρακα. Στὸν δικό μας ἥλιο — ποὺ ἔχει μὴ κάπως ἐνδιάμεση θερμοκρασία — παρατηροῦνται καὶ οἱ δυὸ μορφές στὴν ἴδια σχεδὸν ἀναλογία.



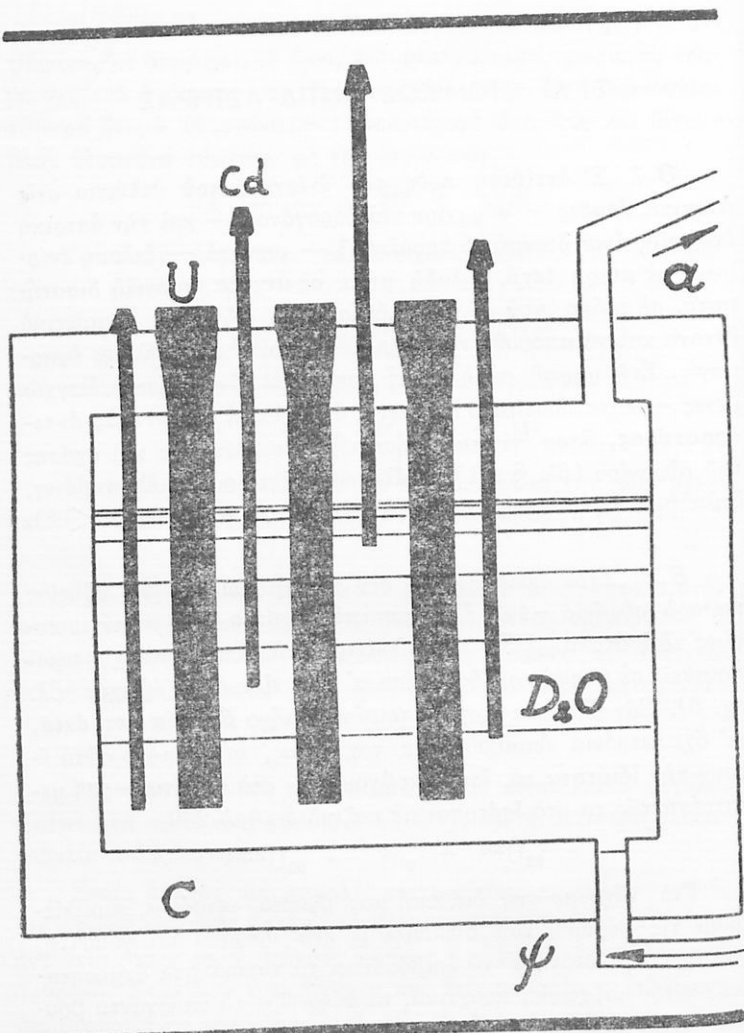
8. Ο ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ

8.1 Σ' αντίθεση προς την ενέργεια που εκλύεται στις ατομικές βόμβες — ουρανίου και υδρογόνου — και την αστρική ενέργεια, είναι δυνατό να προκληθεί — τεχνητά — έκλυση ενέργειας με μικρή ισχύ, δηλαδή μέσα σε μεγάλα χρονικά διαστήματα, σε τρόπο που τ' αποτελέσματα να μὴν είναι εξαιρετικά έντονα και να μπορούν να χρησιμοποιηθοῦν σε ωφέλιμες εφαρμογές. Στη μορφή αυτή — με πυρηνικές αντιδράσεις ελεγχόμενες — κατατάσσεται ο λεγόμενος ατομικός ἢ *πυρηνικός αντιδραστήρας*, όπου γίνεται χρήση τῆς ἐνσωμάτωσης και σχάσης τοῦ ουρανίου (βλ. § 6.1) με ἄλυσωτὲς αντιδράσεις ελεγχόμενες, δηλαδή με συντελεστὴ σχάσης μικρότερο τῆς μονάδας ($k < 1$).

8.2 Στὸν αντιδραστήρα δὲν χρησιμοποιεῖται ἀπ' εὐθείας καθαρὸ οὐράνιο — 235, ἀλλὰ *φυσικὸ οὐράνιο* πὸν περιέχει κυρίως τὸ ἰσότοπο ${}_{92}\text{U}^{238}$. Τὸ οὐράνιο αὐτὸ μπορεῖ νὰ χρησιμοποιηθεῖ σὲ μορφή ράβδων μέσα σ' ἓνα εἰδικὸ περίβλημα (βλ. σχ. 6). Σὰν βλήματα χρησιμοποιοῦνται μόνο *βραδέα νετρόνια*, κι' ὄχι νετρόνια ὁποιασδήποτε ταχύτητας, γιατί μόνο αὐτὰ ἔχουν τὴν ιδιότητα νὰ ἐνσωματώνονται στὸ οὐράνιο — 238 μετατρέποντάς το στὸ ἰσότοπο με μαζικὸ ἀριθμὸ 239

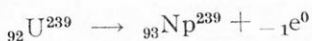


Γιὰ νὰ ἔχουμε στὴ διάθεσή μας βραδέα νετρόνια, περιβάλλουμε τὶς ράβδους τοῦ οὐρανίου μ' ἓνα θώρακα ἀπὸ γραφίτη, πὸν ἔχει τὴν ιδιότητα νὰ ἐπιβραδύνει τὰ ταχυκίνητα ἀτμοσφαιρικά νετρόνια, χωρὶς, πρακτικά, νὰ ἐπηρεάζει τὰ ὑπάρχοντα βραδέα. Ἔτσι κάθε ράβδος οὐρανίου βρίσκεται κάτω ἀπὸ μιὰ συνεχῆ ἐπίδραση βραδυκινήτων νετρονίων, πὸν ἔχουν σὰν προέλευσή τους τὴν ἀτμόσφαιρα, ὅπως συμβαίνει και στὴν περίπτωση τῆς βόμβας οὐρανίου. Ὅμως *τὸ οὐράνιο — 239*, πὸν σχημα-

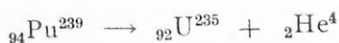
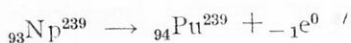


Σχ. 6. Ατομικός αντιδραστήρας. U: ράβδοι ουρανίου, D₂O: βαρύ νερό, α: έξοδος ατμού προς στρόβιλο, ψ: έπιστροφή ψυχρού νερού, C: περίβλημα από γραφίτη, Cd: ρυθμιστικές ράβδοι από κάδμιο.

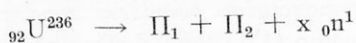
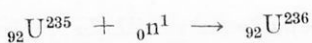
τίζεται ἀπ' τὴν ἐνσωμάτωση, δὲν ὑπόκειται σὲ σχάση, σ' ἀντίθεση μὲ τὸ οὐράνιο — 236 τῆς ἀτομικῆς βόμβας, ἀλλὰ σὲ ἀπλῆ μεταστοιχείωση μὲ ἀποβολὴ σωματιδίων βῆτα, σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



Τὸ παραγόμενο νεπτούνιο μετατρέπεται, κατὰ τὸν ἴδιον τρόπο, σὲ πλουτώνιο κι' αὐτὸ σὲ οὐράνιο — 235 ἀποβάλλοντας σωματίδια ἄλφα



Ἔτσι τὸ οὐράνιο — 238, μὲ τὴν ἐπίδραση βραδέων νετρονίων, ἀποτελεῖ μιὰ συνεχῆ πηγὴ⁽¹⁾ μικρῶν ποσοτήτων οὐρανίου — 235, οὐρανίου δηλαδή πὸν μπορεῖ παραπέρα νὰ ὑποστῇ ἐνσωμάτωση καὶ σχάση. Τὸ οὐράνιο αὐτὸ (${}_{92}\text{U}^{235}$) καθὼς σχηματίζεται λίγο-λίγο δέχεται σὲ συνέχεια τὴν ἐπίδραση νετρονίων καὶ — ὅπως καὶ στὴν ἀτομικὴ βόμβα — ὑπόκειται τελικὰ σὲ σχάση (βλ. § 6.11) σύμφωνα μὲ τὶς ἀντιδράσεις



Ἔτσι τὸ οὐράνιο — 235 — καθὼς παράγεται λίγο-λίγο σὲ μικρὰ ποσὰ — δὲν προλαβαίνει νὰ φτάσει στὴν κρίσιμη κατάσταση καὶ μεταστοιχειώνεται μὲ βραδὸν ρυθμὸ, μὲ ἀντιδράσεις ἀποσβεννύμενες ἀλλὰ συνεχῶς ἀναπληρούμενες.

8.3 Ἡ ἀκτινοβολία γάμμα πὸν ἐκλύεται στὸν ἀντιδραστήρα εἶναι ἱκανὴ — καθὼς ἀπορροφᾶται ἀπ' τὸ περιβάλλον — νὰ προκαλέσει μιὰ θέρμανση κατὰ μερικὰς δεκάδες μόνο ἢ κι' ἑκατοντάδες βαθμοὺς κελσίου. Γιὰ νὰ γίνει αὐτὸ οἱ ράβδοι τοῦ οὐρανίου βρῖσκονται βυθισμένες μέσα σὲ νερὸ πού, ἀπορρο-

(1) Γιὰ τὸ λόγο αὐτὸ τὸ οὐράνιο — 238 ὀνομάζεται *γόνιμο* ὑλικό.

φρόντας τὴν ἀκτινοβολία, θερμαίνεται καὶ ἀτμοποιεῖται. Ἔτσι — σὰν ἀτμός — μπορεῖ νὰ θέσει σὲ κίνηση μιὰ ὁποιαδήποτε ἀτμομηχανή, συνήθως τοῦ τύπου τῶν ἀτμοστροβίλων. Κατὰ κανόνα ἀντὶ γιὰ κοινὸ νερὸ χρησιμοποιεῖται **βαρὺ νερό**, νερὸ δηλαδὴ (H_2O) ὅπου τὸ ὕδρογόνο του εἶναι ${}_1H^2$ (δευτέριο). Ὁ λόγος τῆς προτίμησης αὐτῆς ἔγκειται στὸ γεγονός ὅτι τὸ ${}_1H^2$ δὲν ἀπορροφᾷ νετρόνια, σ' ἀντίθεση μὲ τὸ ${}_1H^1$ ποὺ ἀπορροφᾷ νετρόνια καὶ — κατὰ συνέπεια — ἔξασθενεῖ τὴ νετρονικὴ δέσμη τὴν ἀπαραίτητη γιὰ τὴ γονιμοποίηση (τὴ μετατροπὴ) τοῦ ${}_{92}U^{238}$ σὲ ${}_{92}U^{235}$) καὶ γιὰ τὴν παραπέρα ἐνσωμάτωση καὶ σχάση τοῦ ${}_{92}U^{235}$.

8.4 Στὸ σημεῖο αὐτὸ πρέπει νὰ ποῦμε πὼς μιὰ ἀπ' τὶς κυριώτερες δυσκολίες, στὴν κατασκευὴ τοῦ ἀντιδραστήρα, εἶναι ἀκριβῶς τὸ νὰ παρασκευαστεῖ καὶ νὰ συγκεντρωθεῖ τὸ βαρὺ νερό, γιὰτὶ ἢ ὅλη του ἐπεξεργασία στηρίζεται σὲ μιὰ πολὺπλοκὴ καὶ πολὺ δαπανηρὴ ἠλεκτρολυτικὴ μέθοδο, ποὺ — σὲ πολλὰς ἀπ' τὶς λεπτομέρειές της — ἀποτελεῖ ἀπόρρητο μυστικόν.

8.5 Γιὰ νὰ ρυθμίζουμε κατάλληλα τὴ λειτουργία τοῦ ἀντιδραστήρα χρησιμοποιοῦμε ὀρισμένες προστατευτικὰς ράβδους ἀπὸ μέταλλο κάδμιο (Cd), ποὺ εἰσάγονται ἀνάμεσα ἀπ' τὶς ράβδους τοῦ οὐρανίου. Τὸ κάδμιο ἔχει τὴν ἰδιότητα ν' ἀπορροφᾷ νετρόνια, ἔτσι ποὺ νὰ προκαλεῖ ρύθμιση τῆς νετρονικῆς δέσμης. Συγκεκριμένα, βγάζοντας τὸ κάδμιο ἔχουμε μιὰ ἰσχυρὴ πτώση νετρονίων πάνω στὸ οὐράνιο καὶ — κατὰ συνέπεια — μιὰν ἀντίδραση μὲ ἔντονο ρυθμό. Ἀντίθετα, εἰσάγοντας τὸ κάδμιο μέσα στὸ σῶμα τοῦ ἀντιδραστήρα μειώνουμε τὸ πλῆθος τῶν νετρονίων, σὲ τρόπο ποὺ νὰ πετυχαίνουμε μιὰ πιὸ ἥπια ἀντίδραση ἀκόμα καὶ ἓνα πραχτικὸ σταμάτημα τῶν σχάσεων. Ἔτσι τὸ κάδμιο παίξει, στὸν ἀντιδραστήρα, τὸν ἴδιο ρόλο ποὺ παίξει ἢ στρόφιγγα ἢ ρυθμίζουσα τὴν παροχὴ τοῦ πετρελαίου σὲ μιὰ συνηθισμένη πετρελαιομηχανή.

8.6 Τὴν πραχτικὴ σημασία τοῦ ἀντιδραστήρα μποροῦμε νὰ τὴ δοῦμε σὲ τρία σημεία — στὴν παραγωγή κινητήριας δύνναμης, στὴν παρασκευὴ ραδιενεργῶν καὶ μὴ ἰσοτόπων καὶ στὴν ἐπιστημονικὴ ἔρευνα.

Ἀπ' τὴν ἀποψη τῆς *κινητήριας δύνναμης* ὁ ἀντιδραστήρας ἀποτελεῖ μιὰ πολὺ καλὴ πηγὴ ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. Γιὰ τὸ σκοπὸ αὐτό, ὁ παραγόμενος ἀτμὸς (βλ. § 8.3) θέτει σὲ κίνηση ἕναν ἀμοστρόβιλο καὶ αὐτὸς — μὲ τὴ σειρὰ του — μιὰν ἠλεκτρικὴ γεννήτρια.

Ἀκόμα, τὰ ζεύγη ἀντιδραστήρων καὶ στροβίλων ἀποτελοῦν πολὺ καλὲς μηχανὲς γιὰ τὴν κίνηση πλοίων ἐπιφανείας καὶ ὑποβρυχίων. Ὅμως πρέπει νάχουμε ὑπ' ὄψη μας πὼς τὰ ζεύγη αὐτά, τόσο γιὰ τὴν παραγωγή ἠλεκτρικοῦ ρεύματος ὅσο καὶ γιὰ τὴν κίνηση πλοίων, παρουσιάζουν ἀκόμα τὸ μειονέκτημα τοῦ μεγάλου κόστους. Naὶ μὲν γίνεται κατανάλωση ἐλάχιστου ποσοῦ σχασίμων ὑλικῶν, ἀλλὰ τὰ ὑλικά αὐτὰ εἶναι πανάκριβα, καὶ γιὰτὶ βρίσκονται στὴ φύση σὲ πολὺ μικρὰ ποσὰ καὶ γιὰτὶ εἶναι δύσκολη καὶ πολὺπλοκὴ ἡ ἐξαγωγή τους καὶ ἡ παρασκευὴ τους σὲ καθαρὴ κατάσταση. Ἔτσι, πραχτικὰ συμφέρει ἡ παραγωγή ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας — μὲ βάση τὸν ἀντιδραστήρα — μόνο σὲ περιοχὲς ὅπου ἡ δὲν ὑπάρχουν ὕδατοπτώσεις ἢ δὲν εἶναι εὐκόλη ἡ μεταφορὰ κάρβουνου καὶ πετρελαίου. Ἐνα ἀτομικὸ ζεῦγος (ἀντιδραστήρα - στροβίλου) ἀναπληρώνει τὶς συμβατικὲς ἠλεκτροπαραγωγὲς διατάξεις σὲ μιὰ μεμονωμένη πολιτικὴ περιοχὴ, σ' ἕναν ἀπομακρυσμένο σταθμὸ στρατηγικῆς σημασίας, σὲ μιὰ περιοχὴ ποὺ καταστράφηκε ἀπὸ θεομηνία κλπ. Μ' ἄλλα λόγια ὁ ἀντιδραστήρας, γιὰ τὴν περίπτωσιν ἠλεκτρικοῦ ρεύματος, μπορεῖ νὰ θεωρηθεῖ μόνο σὰ σταθμὸς πρώτης ἀνάγκης.

Γιὰ τὴν κίνηση πλοίων ἡ ἐνέργεια τοῦ ἀντιδραστήρα συμφέρει στὴν περίπτωσιν μόνο πλοίων μὲ μεγάλη ἀκτίνα δράσης, ὅπως εἶναι τὰ ὑπερωκεάνεια ὑποβρυχία, τὰ βαριά πολεμικὰ πλοία καὶ τὰ ἐξερευνητικὰ παγοθραυστικά.

8.7 Ἀπ' τὴν ἀποψη τῆς *παρασκευῆς ἰσοτόπων* ὁ ἀντιδραστήρας παρουσιάζει μιὰν ἰδιαίτερη σημασία. Κατὰ τὴ σχέση

τοῦ οὐρανίου, ἐκτὸς ἀπ' τὰ ἄμεσα προϊόντα, σχηματίζεται κι' ἓνα ὁλόκληρο πλῆθος ἀπὸ ὑλικά, ἐξ αἰτίας τῶν πολλῶν δευτερογενῶν ἀντιδράσεων ποὺ συνοδεύουν τὴ σχάση. Τὰ ὑλικά αὐτὰ — ἰσότοπα κοινῶν στοιχείων, ἰσότοπα ὅμως ποὺ δὲν ὑπάρχουν συνήθως στὴ φύση — συσσωρεύονται, μὲ τὴν πάροδο τοῦ χρόνου, στὸ ἐσωτερικὸ τοῦ ἀντιδραστήρα καὶ στὸ ἄμεσο ἐξωτερικὸ περιβάλλον του καὶ παραλαμβάνονται — μὲ κατάλληλο τρόπο — γιὰ τὴ χρησιμοποίησή τους σὲ πολλοὺς τομεῖς, ὅπως θὰ δοῦμε πρὸ κάτω. Σὰν παράδειγμα ἀναφέρουμε πῶς ἀπ' τὸν ἀντιδραστήρα μποροῦμε νὰ πάρουμε ραδιενεργὸ σίδηρο ($_{26}\text{Fe}^{59}$), πολῦτιμο γιὰ τὴ μελέτη τῶν προβλημάτων τοῦ αἵματος, ραδιενεργὸ ἰώδιο ($_{53}\text{I}^{131}$), χρήσιμο γιὰ τὴ διαγνωστικὴ καὶ τὴ θεραπευτικὴ τῶν ὄγκων, ραδιενεργὸ κοβάλτιο ($_{27}\text{Co}^{60}$) κλπ. Ὁ ἀντιδραστήρας εἶναι, μ' ἄλλα λόγια, μιὰ πηγὴ ὑλικῶν ποὺ εἶναι πολῦτιμα γιὰ πολλοὺς κλάδους τῆς ἐπιστήμης, σὰν γιὰ τὴ βιολογία, τὴ διαγνωστικὴ, τὴ θεραπευτικὴ, τὴ χημεία καὶ τὴν τεχνικὴ γενικά.

8.8 Κλείνοντας τὸ θέμα τοῦτο μποροῦμε ἀκόμα νὰ ποῦμε πῶς ὁ ἀντιδραστήρας ἀποτελεῖ μιὰ συσκευὴ κατάλληλη γιὰ ὁλόκληρο πλῆθος *πειραμάτων κι' ἐρευνῶν*. Σήμερα μάλιστα ὁ ἀντιδραστήρας ἐξυπηρετεῖ, κατὰ κανόνα, ἐρευνητικοὺς σκοπούς, καὶ μόνο κατὰ δεύτερο λόγο μπορεῖ νὰ θεωρηθεῖ σὰν πηγὴ ἐνέργειας ἢ πρῶτων ὑλικῶν.

Ἡ ὁλόκληρη ἡ θεωρία τῶν ἰσοτόπων καὶ τῆς τεχνητῆς μεταστοιχείωσης βασίστηκε — καὶ βασίζεται — πάνω στὶς πυρηνικὲς ἀντιδράσεις ποὺ γίνονται μέσα σ' ἓναν ἀντιδραστήρα.

Πολλὰ νέα στοιχεῖα κατασκευάστηκαν ἀπ' τὶς ἀλλεπάλληλες μεταστοιχειώσεις τῶν προϊόντων τῆς σχάσης. Ἐτσι, σὰν παράδειγμα, στάθηκε δυνατὴ ἡ κατασκευὴ καινούργιων στοιχείων μὲ ἀτομικὸ ἀριθμὸ πάνω ἀπὸ 92, ὅπως εἶναι τὸ νεπτούνιο ($_{93}\text{Np}$), τὸ πλουτώνιο ($_{94}\text{Pu}$) κλπ.

Ἀκόμα στὸν ἀντιδραστήρα ὀφείλεται ἡ ἐξαγωγή πορισμάτων πάνω στὴ συμπεριφορὰ κινουμένων σωματιδίων, ὅπως εἶναι τὰ νετρόνια καὶ τὰ σωματίδια ἄλφα καὶ βῆτα.

9. Η ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΙ' Ο ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

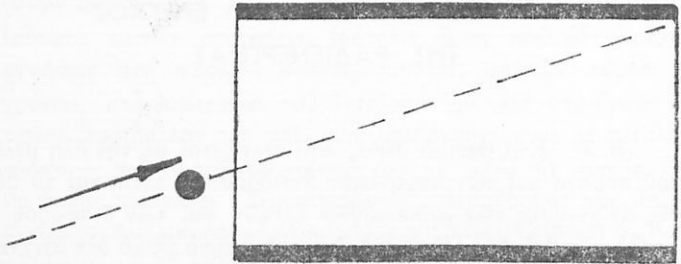
9.1 Ένα βασικό θέμα, πού σχετίζεται με την ὄλη μελέτη τοῦ πυρήνα καὶ τῶν πυρηνικῶν ἀντιδράσεων, εἶναι καὶ τὸ θέμα τῆς ἀνίχνευσης τῶν ραδιενεργῶν ὑλικῶν καὶ τῶν διαφόρου τύπου ἀκτινοβολιῶν. Πραγματικὰ ἓνα ραδιενεργὸ ὑλικὸ δὲν ἀνιχνεύεται ἄμεσα, ἀνιχνεύεται ὅμως ἡ ἀκτινοβολία του, τόσο ἡ καθαρὰ φωτεινὴ — γάμμα — ὅσο καὶ ἡ καθαρὰ ὑλικὴ — ἄλφα καὶ βῆτα. Ἔτσι, σὰν παράδειγμα, ἡ ὑπαρξὴ τοῦ οὐρανίου προσδιορίζεται ἀπ' τὴς ιδιότητες καὶ τὸ εἶδος τῆς ἀκτινοβολίας πού ἐκπέμπει.

Οἱ ἀνιχνεύσεις αὐτὲς στηρίζονται κατὰ κανόνα στὴ χρησιμοποίηση φωτογραφικῶν πλακῶν, στὸ θάλαμο τοῦ Wilson καὶ στὸν ἀπαριθμητὴ τῶν Geiger - Mueller.

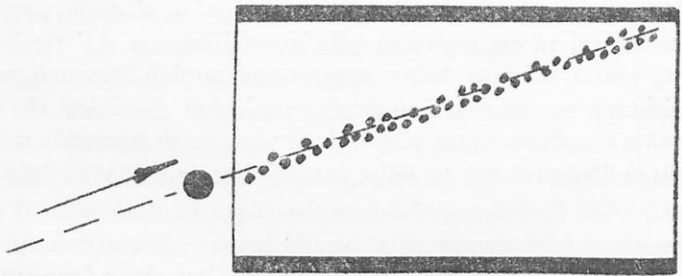
9.2 Ἡ *φωτογραφικὴ μέθοδος* γιὰ τὴν ἀνίχνευση τῆς ἀκτινοβολίας βασίζεται πάνω στὸ γεγονός ὅτι οἱ φωτογραφικὲς πλάκες καὶ τὰ φωτογραφικὰ φιλμ προσβάλλονται ἀπ' τὴς ἀκτίνες γάμμα, κι' ὅταν ἀκόμα προστατεύονται ἀπὸ ἀδιαφανῆ περιβλήματα — σὰν τὸ μαῦρο χαρτί — κι' αὐτὸ ἐξ αἰτίας τῆς μεγάλης διεσδυτικότητος τῶν ἀκτίνων γάμμα, πού διαπεροῦν πολλὰ ὑλικά ἀδιαφανῆ γιὰ τὴς ἄλλες ἀκτινοβολίες — τὴς ὁρατὲς δηλαδή.

Ἔτσι ἂν ἀφίσουμε ἓνα ὀρυκτὸ ραδιενεργὸ ὑλικὸ πάνω σὲ μιὰ σκεπασμένη φωτογραφικὴ πλάκα, θὰ δοῦμε — ὕστερα ἀπὸ τὴν ἐμφάνιση — τὸ σχηματισμὸ ἰχνῶν, σὰν τὸ ὀρυκτὸ νὰ ἦταν φωτοβόλο. Ὅμοια, μποροῦμε νὰ παρακολουθήσουμε τὴν πορεία ραδιενεργῶν ὑλικῶν, μέσα στοὺς ἴστους φυτῶν καὶ ζώων κáνοντας μιὰ παρεμφερῆ *ἀόρατη* φωτογράφιση.

Μὲ κατάλληλες διατάξεις ἔχει κατορθωθῆ καὶ ἡ φωτογράφιση ἰχνῶν πού ἀφίνουν τὰ σωματίδια ἄλφα καὶ βῆτα. Αὐτὸ



α



β

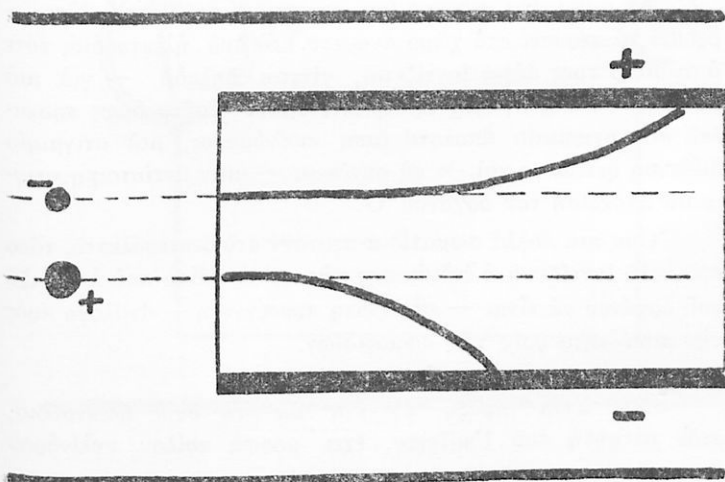
Σχ. 7. Θάλαμος του Wilson. α: άορατη διέλευση σωματιδίου, β: όρατη διέλευση σε μορφή νέφους από σταγονίδια.

ὅμως κατορθώθηκε με ἔμμεσο τρόπο γιατί τὰ σωματίδια αὐτά, μιά πού δὲν εἶναι φωτόνια, δὲν προσβάλλουν ἀπ' εὐθείας τὰ φωτογραφικὰ γαλακτώματα.

9.3 Ὁ θάλαμος τοῦ Wilson δὲν εἶναι παρὰ ἓνας ἀπλὸς κύλινδρος πού περιέχει ὑδρατμούς, ἢ ἀτμούς ἀπὸ ἄλλο ὑγρὸ σὲ ἀέρια κατάσταση.

Ἄν ἓνα φορτισμένο σωματίδιο — ἄλφα ἢ βῆτα — περάσει μέσα ἀπ' τὸ θάλαμο, χωρὶς νὰ ἔχει ληφθῆ καμμιὰ ἰδιαίτερη πρόνοια γιὰ τὴν πίεση καὶ τὴ θερμοκρασία τοῦ ἀτμοῦ, δὲν προκαλεῖ κανένα φαινόμενο πού νὰ τὸ καθιστᾷ ἀντιληπτὸ (βλ. σχ. 7, α). Ὑπὸ κατάλληλες ὅμως κί' ὀρισμένες συνθῆκες γιὰ τὴν πίεση καὶ τὴ θερμοκρασία, τὸ πέρασμα ἑνὸς φορτισμένου σωματιδίου προκαλεῖ μιὰν ὑγροποίηση σὲ μορφὴ μικροσκοπικῶν σταγονιδίων.

Ἔτσι κάτω ἀπὸ τίς πρέπουσες προϋποθέσεις ἡ τροχιά ἑνὸς φορτισμένου σωματιδίου (βλ. σχ. 7, β) προδίνεται σὰν μιὰ λε-



Σχ. 8. Ἐκτροπὴ φορτισμένων σωματιδίων σὲ θάλαμο, κάτω ἀπ' τὴν ἐπίδραση ἡλεκτρικῆς τάσης.

πή γραμμὴ ἀπὸ σταγονίδια — σὰν ἓνα λεπτὸ νέφος — σὰν κι' αὐτὴν ποὺ ἀφίνουν τὰ ἀεροπλᾶνα ὅταν πετοῦν σὲ μεγάλο ὕψος.

Φορτίζοντας ἠλεκτρικὰ — κι' ἑτερόνυμα — τὶς δυὸ βάσεις τοῦ θαλάμου, μποροῦμε νὰ βροῦμε — ἀπ' τὴ διεύθυνση τῆς ἔκτροπῆς — τὸ εἶδος τοῦ φορτίου τοῦ σωματιδίου, γιατί εἶναι φανερὸ πὺς ἓνα θετικὸ σωματίδιο — σὰν τὸ ἄλφα — θὰ ἐκτραπεῖ τελείως ἀντίθετα ἀπὸ ἓνα ἀρνητικὸ — σὰν τὸ βῆτα (βλ. σχ. 8).

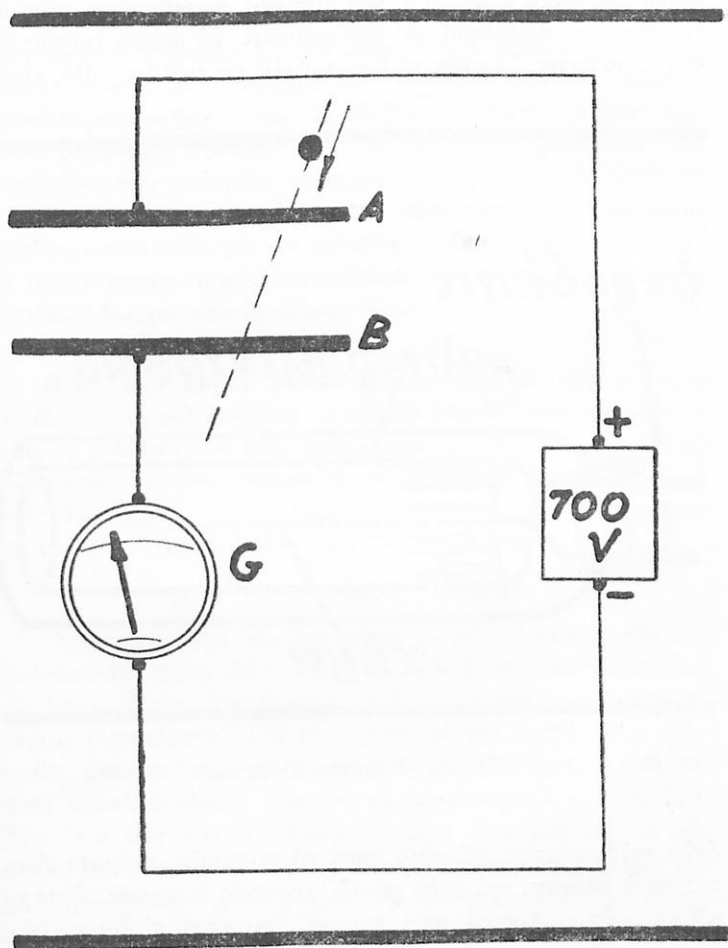
9.4 Ὁ ἀπαριθμητὴς τῶν Geiger - Mueller ⁽¹⁾ εἶναι, στὶς βασικὰς γραμμὰς τους, μιὰ πολὺ ἀπλῆ συσκευή. Ἀποτελεῖται ἀπὸ δυὸ ἠλεκτρόδια Α καὶ Β (βλ. σχ. 9) ποὺ φορτίζονται ἀπὸ μιὰ πηγὴ συνεχοῦς ρεύματος μὲ ὑψηλὴ σχετικὰ τάση (γύρω στὰ 700 βόλτ) μ' ἐνδιάμεσο — σὲ σειρὰ — ἓνα γαλβανόμετρο (G). Τὰ ἠλεκτρόδια, μιὰ καὶ δὲν βρίσκονται σ' ἐπαφή, ἀποτελοῦν διακόπτη γιὰ τὸ κύκλωμα κι' ἔτσι τὸ γαλβανόμετρο δὲν δείχνει καμμιά ἀπόκλιση.

Ἄν ὅμως ἓνα φορτισμένο σωματίδιο — ἄλφα ἢ βῆτα — βρεθεῖ νὰ περάσει στὸ χῶρο ἀνάμεσα στὰ δυὸ ἠλεκτρόδια, τότε ὁ ἀνάμεσά τους ἀέρας ἰοντίζεται, γίνεται δηλαδὴ — γιὰ μιὰ στιγμή — καλὸς ἀγωγὸς τοῦ ἠλεκτρισμοῦ. Τοῦτο ὅμως προκαλεῖ μιὰ στιγμιαία ἀποκατάσταση κυκλώματος, μιὰ στιγμιαία διέλευση ρεύματος καὶ — σὰ συνέπεια — μιὰν ἀντίστοιχη στιγμιαία ἀπόκλιση τοῦ ὄργάνου G.

Ὅσο πιὸ πολλὰ σωματίδια περνοῦν στὸ δευτερόλεπτο, τόσο πιὸ πολὺ ἰοντίζεται ὁ ἐνδιάμεσος χῶρος, σὲ τρόπο ποὺ ἡ ἔνδειξη τοῦ ὄργάνου νὰ εἶναι — σὲ πρώτη προσέγγιση — ἀνάλογη πρὸς τὴν πυκνότητα ροῆς τῶν σωματιδίων.

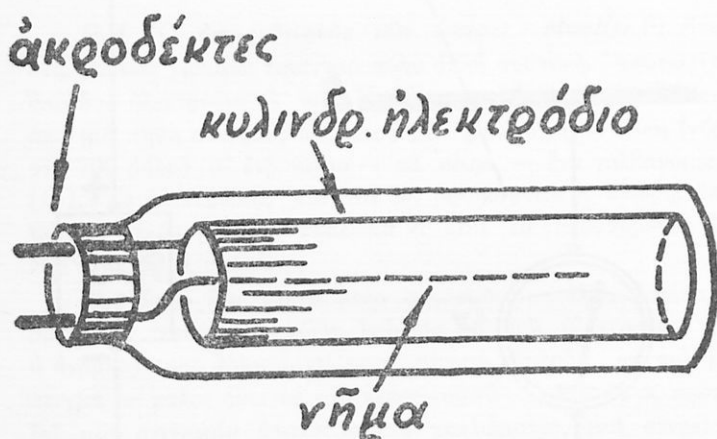
9.5 Στὴν πράξη τὸ ἓνα ἀπ' τὰ δυὸ ἠλεκτρόδια, στὸν μετρητὴ τοῦ Γκάιγκερ, ἔχει μορφὴ κοίλου κυλίνδρου

(1) Πιὸ ἀπλᾶ λέγεται καὶ μετρητὴς τοῦ Γκάιγκερ, ἢ μετρητὴς G. M.



Σχ. 9. Σχηματική παράσταση άπαριθμητή Geiger - Mueller.

(βλ. σχ. 10) καὶ περιβάλλει τὸ ἄλλο πὺν δὲν εἶναι παρὰ ἓνα λεπτὸ μεταλλικὸ νῆμα. Τὸ ὅλο σύστημα τοποθετεῖται μέσα σ' ἓνα γυάλινο περίβλημα κα' ἔτσι παίρνει τὴ μορφή λυχνίας μὲ δυὸ ἀκροδέκτες. Ἀκόμα τὸ ὄργανο γιὰ τὶς ἐνδείξεις δὲν εἶναι



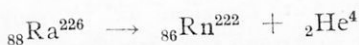
Σχ. 10. Σολήνας Γκαίγκερ.

ἄπλο γαλβανόμετρο, κα' αὐτὸ γιὰ τὴν ἀπὸ τὴν στιγμιαία ρεύματα εἶναι καὶ πολὺ ἀδύνατα καὶ πολὺ μικρῆς χρονικῆς διάρκειας, ὥστε νὰ μὴ μποροῦν νὰ προκαλέσουν καμμιά διαταραχὴ σ' ἓνα — ὅσο-δήποτε τέλειο — κοινὸ γαλβανόμετρο. Γι' αὐτὸ στὴ θέση του μπαίνει μιὰ πολυσύνθετη συσκευὴ πὺν ἐνισχύει καὶ μετατρέπει τὰ στιγμιαία ρεύματα, σὲ τρόπο πὺν νὰ μποροῦν, σὲ συνέχεια, νὰ διαβιβαστοῦν σ' ἓνα γαλβανόμετρο, ἢ σ' ἓναν αὐτόματο μετρητή, ἢ σὲ ἀκουστικὸ ἢ ἀκόμα καὶ σὲ κοινὴ λυχνία φωτισμοῦ.

9.6 Με τὴ φωτογραφικὴ μέθοδο, μὲ συσκευὲς σὰν τὸ θάλαμο τοῦ Wilson καὶ τὸν μετρητὴ τοῦ Γκάιγκερ καὶ μὲ πολ-
λὲς ἄλλες παρεμφερεῖς διατάξεις εἶναι δυνατόν ν' ἀνιχνευτεῖ ἡ
ραδιενέργεια, ἡ ὑπαρξὴ δηλαδὴ ραδιενεργῶν ὑλικῶν καὶ ἀκτινο-
βολιῶν — τόσο ποιοτικὰ ὅσο καὶ ποσοτικὰ. Γιὰ τὸν ποσοτικὸ
προσδιορισμὸ ρυθμίζονται τὰ διάφορα ὄργανα μὲ βάση ὀρι-
σμένα ραδιενεργὰ πρότυπα καί, σὲ συνέχεια βαθμολογοῦνται
οἱ ἐνδείξεις τῶν μετρητῶν ἐμπειρικὰ.

Ὁ καθορισμὸς ἐνὸς ὀρισμένου προτύπου — ποὺ χρησιμο-
ποιεῖται σὰν μονάδα γιὰ τὴ μέτρηση — ἔχει, σκολὸ νὰ μπορεῖ
νὰ γίνεται σύγκριση τῶν ἀκτινοβολιῶν, σὲ τρόπο ποὺ νὰ εἶναι
εὐκόλος ὁ ἔλεγχος τῶν διαφορῶν ὑλικῶν.

9.7 Ἀπὸ πολλὰ χρόνια χρησιμοποιεῖται σὰν πρότυπη
μονάδα γιὰ τὴ ραδιενέργεια τὸ **κιουρί** (curie) ποὺ ἀντιπροσω-
πεύει τὴ ραδιενέργεια ἐνὸς γραμμαρίου ραδίου. Ἐνα curie, μ'
ἄλλα λόγια, δηλώνει παραγωγὴ τόσων σωματιδίων ἄλφα — ἢ
ἰσοδυνάμων βῆτα — ὅσα παράγει ἓνα γραμμάριο ραδίου — 226
ποὺ συνεχῶς ἀποσυντίθεται κατὰ τὴν ἀντίδραση



Ἔτσι ὅταν λέμε ὅτι ἓνα δεδομένο σῶμα παρουσιάζει ρα-
διενέργεια 15 curie, αὐτὸ σημαίνει πῶς δίνει τόσα σωματίδια
στὸ δευτερόλεπτο ὅσα δίνουν τὰ 15 γραμμάρια ραδίου — 226
συνεχῶς διασπώμενα. Γιὰ τὴν πράξη τὸ ἓνα curie εἶναι πολὺ
μεγάλῃ μονάδα, γι' αὐτὸ χρησιμοποιεῖται τὸ κατὰ 1.000.000
φορὲς ὑποπολλαπλασίό της — τὸ **μικροκιουρί** (mcurie) (1).
Ἔτσι ὅταν λέμε ὅτι ἓνα δεδομένο σῶμα ἔχει ραδιενέργεια 500
mcurie, αὐτὸ σημαίνει πῶς ἔχει τόση ραδιενέργεια ὅση ἔχει μιὰ
ποσότητά ραδίου — 226 ἴση πρὸς 500 ἑκατομμυριοστὰ τοῦ γραμ-
μαρίου.

(1) Πολλὲς φορὲς χρησιμοποιεῖται κι' ἓνα πιο μικρὸ ὑποπολλα-
πλάσιο — τὸ **μικρομικροκιουρί** (μμcurie) — ἴσο πρὸς τὸ ἓνα ἑκατομ-
μυριοστὸ τοῦ ἐνὸς ἑκατομμυριοστοῦ τοῦ κιουρί.

9.8 Ἡ μονάδα curie καὶ τὰ ὑποπολλαπλάσιά της μποροῦν νὰ χρησιμοποιηθοῦν γιὰ συγκεκριμένες ποσότητες ὑλικῶν. Γιὰ ἐκτεταμένα ὅμως ὑλικά οἱ μονάδες αὐτὲς δὲν δηλώνουν πρακτικὰ τίποτα. Σὰν παράδειγμα, λέγοντες ὅτι τὸ ἔδαφος ἔχει ραδιενέργεια 20μcurie δὲν καθορίζουμε τὴν ἔκτασή της γιατί δὲν δηλώνουμε σὲ πόσο ἔδαφος ἀντιστοιχεῖ ἡ ραδιενέργεια αὐτή. Σὲ τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιοῦμε τὸ ποσὸ πού λέγεται **εἰδικὴ ραδιενέργεια** καὶ πὸν ἐκφράζεται σὲ μcurie **ἀνὰ γραμμάριο** (μcurie/gr) ἢ μcurie **ἀνὰ κυβικὸ μέτρο** (μcurie/m³). Ἔτσι, λέγοντας ὅτι ἡ ραδιενέργεια ἑνὸς ἔδαφους ἀνέρχεται σὲ 50 μcurie/gr δίνουμε σαφῆ εἰκόνα, ἐννοώντας ὅτι τὸ κάθε γραμμάριο τοῦ ἔδαφους ἔχει ραδιενέργεια ἴση μὲ 50 μcurie. Γιὰ τὰ ἀέρια προτιμᾶται ἡ ἔκφραση μcurie/m³, κι' ἔτσι λέγοντας πὸς ὁ ἀέρας ἔχει μιὰ ραδιενέργεια 2 μcurie/m³ ἐννοοῦμε πὸς τὸ κάθε κυβικὸ μέτρο ἀέρα ἔχει ραδιενέργεια 2 μcurie.

9.9 Γιὰ τὸν καθορισμὸ τῆς βλάβης πὸν μπορῆ νὰ προκαλέσει μιὰ ραδιενέργεια στὸν ὄργανισμὸ δὲν μπορούμε νὰ στηριχτοῦμε στὴν ποσότητά της — σὲ μcurie — παρὰ μόνο κατὰ πρώτη προσέγγιση. Αὐτὸ ἐξηγεῖται ἀπ' τὸ γεγονὸς ὅτι μιὰ ἐπίδραση πάνω στὸν ὄργανισμὸ ἐξαρτᾶται ὄχι μόνο ἀπ' τὸ πλῆθος τῶν σωματιδίων ἀλλὰ κι' ἀπ' τὸ εἶδος τους καὶ τὴν ἐνέργειά τους, ἀκόμα κι' ἀπ' τὴ χημικὴ φύση τῶν ραδιενεργῶν στοιχείων. Ἔτσι μιὰ ποσότητα στροντίου — 90 μὲ ραδιενέργεια 1 μcurie εἶναι πολὺ πῖο ἐπικίνδυνη ἀπὸ μιὰ ποσότητα ραδιενεργοῦ ἀνθρακα — 14 μὲ ραδιενέργεια 3 μcurie, γιατί τὸ στρόντιο ἀφ' ἑνὸς ἐκπέμπει πῖο διεισδυτικὰ σωματίδια, ἀφ' ἑτέρου ἐντοπίζεται εὐκολώτερα — σὰ στοιχεῖο — στὰ ὀστᾶ τοῦ σκελετοῦ.

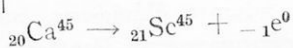
9.10 Εἶδαμε πῖο πάνω (βλ. § 6.12) πὸς τὰ ραδιενεργὰ ὑλικά καὶ οἱ ἀκτινοβολίες τους εἶναι ἐπιβλαβῆ κι' ἐπικίνδυνα γιὰ τοὺς ζωντανοὺς ὄργανισμούς, γιατί ἐπηρεάζουν τὰ βιοχημικὰ καὶ βιοφυσικὰ φαινόμενα τῆς ζωντανῆς ὕλης. Σήμερα πιστεύεται πὸς ἡ ὅλη αὐτὴ ἐπίδραση βασίζεται κατὰ κανόνα ἀφ' ἑνὸς στὴ δράση τῶν ὑλικῶν βλημάτων — νετρονίων, ἄλφα,

βήτα κλπ. — απ' ἑτέρου στή δράση τῶν φωτονίων — ἀκτίνων γάμμα — πού κατὰ δευτερογενῆ τρόπο δημιουργοῦνται.

Γιὰ τὰ φωτόνια — πλούσια σ' ἐνέργεια — θεωρεῖται μᾶλλον βέβαιον πὸς ἡ ἀπορρόφησή τους ἀπ' τοὺς ἰστούς προκαλεῖ γενικά φαινόμενα καταστροφῆς, ὅπως εἶναι ἡ καύση καὶ ἡ γενικότερη χημικὴ ἀλλοίωση. Σ' αὐτὸ οἱ ἀκτίνες γάμμα δὲν διαφέρουν ἀπ' τὶς κοινές φωτεινές — ὁρατές — ἀκτίνες, πού μποροῦν νὰ προκαλέσουν ἐγκαύματα κα' ἄλλες χημικὲς ἀλλοιώσεις, σὲ πῶς μικρὴ ὅμως ἔνταση.

Τὰ καθαρὰ ὑλικά βλήματα — νετρόνια κλπ. — προκαλοῦν κα' αὐτὰ θερμικὲς καὶ χημικὲς ἀλλοιώσεις ἐξ αἰτίας τῆς ἐνέργειας πού φέρουν. Ἐκτὸς ὅμως ἀπ' αὐτὸ πιστεύεται πὸς τὰ ὑλικά βλήματα παίζουν καὶ κάποιον ρόλο καταλυτικό, εὐνοῶντας ὁρισμένα χημικὰ καὶ βιοχημικὰ φαινόμενα καὶ παρεμποδίζοντας ἄλλα.

9.11 Στὸν ἔλεγχο τῶν ραδιενεργῶν ὑλικῶν ἔχει βασικὴ σημασία ἡ γνώση τῆς χημικῆς συμπεριφορᾶς τῶν ραδιενεργῶν πυρήνων, κα' αὐτὸ γιατί ὅλα τὰ ἰσότοπα ἑνὸς καὶ τοῦ αὐτοῦ στοιχείου ἔχουν τὶς ἴδιες χημικὲς ιδιότητες σὲ γενικὲς γραμμές. Σὰν παράδειγμα, ὅποιες χημικὲς ἀντιδράσεις δίνει τὸ κανονικὸ μὴ ραδιενεργὸ ἀσβέστιο (${}_{20}\text{Ca}^{40}$), τὶς ἴδιες δίνει καὶ τὸ ραδιενεργὸ ἰσότοπό του ${}_{20}\text{Ca}^{45}$. Μ' αὐτὸ βγαίνει τὸ συμπέρασμα πὸς ἂν σ' ἓναν ἀνθρώπινο ὄργανισμό χορηγηθεῖ ραδιενεργὸ ἀσβέστιο, τοῦτο θὰ ἐντοπιστεῖ στὰ ὅστᾱ καὶ θὰ συμμετάσχει στὸ σχηματισμὸ φωσφορικῶν ἀλάτων, ὅπως ἀκριβῶς κάνει καὶ τὸ συνηθισμένο μὴ ραδιενεργὸ ἀσβέστιο. Στὰ ὅστᾱ ὅμως θὰ δημιουργήσῃ μιὰ μόνιμη ἐστία ραδιενέργειας καὶ μάλιστα σωματοειδῶν βήτα πολὺ δραστηκῶν (τῶν 0,25 MeV), σύμφωνα μὲ τὴ μεταστοιχείωση



πού προχωρεῖ σχετικῶς ἀργά, μὲ χρόγον ὑποδιπλασιασμοῦ 6 περὶ οἴκου μηνῶν.

Φαίνεται ἀπ' αὐτὸ καθαρὰ πὸς μιὰ μικρὴ δόση — σὲ curie — ραδιενεργοῦ ${}_{20}\text{Ca}^{45}$ εἶναι πολὺ πῶς ἐπικίνδυνη ἀπὸ

μιὰ μεγαλύτερη δόση ἐνὸς ἄλλου ὑλικοῦ πὺν δὲν ἀπορροφᾶται ἀπ' τὸν ὄργανισμό.

9.12 Μιὰ πὺν εἶδαμε σὲ γενικὲς γραμμὲς τὴ δράση τῆς ραδιενέργειας πάνω στοὺς ζωντανούς ὄργανισμούς, εἶναι ἀπαραιτήτο νὰ ποῦμε καὶ λίγα λόγια γιὰ τὴν *ἀτομικὴ νόσο*, τὴν ἀσθένεια δηλαδὴ πὺν προκαλοῦν στὸ σύνολό τους οἱ ραδιενέργειες, ἰδιαίτερα ὕστερα ἀπὸ μιὰν ἀτομικὴ ἔκρηξη.

Κατὰ ἓνα πρῶτο στάδιο — πὺν διαρκεῖ ἀπὸ 5 μέχρι 10 ἡμέρες — ἐμφανίζεται μιὰ γενικὴ κακουχία, πὺν συνοδεύεται ἀπὸ ναυτία καὶ ἑλαφρὸ πυρετὸ κατὰ διαστήματα. Τὸ στάδιο τοῦτο ἀκολουθεῖται ἀπὸ ἓνα δεύτερο — μὲ διάρκειαν 10 ἡμερῶν μέχρι 5 ἑβδομάδων — ὅπου ὁ ὄργανισμὸς συνέρχεται, φαινομενικά, μὲ μιὰ βαθμιαία ὑποχώρηση τῶν συμπτωμάτων. Τὸ τρίτο στάδιο, πὺν εἶναι καὶ τὸ πιὸ κρίσιμο, μπορεῖ νὰ κρατήσῃ ἀπὸ 10 μέρες μέχρι καὶ 2 ἑβδομάδες καὶ χαρακτηρίζεται ἀπὸ ἐξάντληση, πὺν συνεχῶς αὐξάνει, ἀνορεξία, ἀπώλεια βάρους, πυρετὸ σχετικὰ ὑψηλὸ καὶ ταχυκαρδία. Ἀκόμα παρατηροῦνται πολλὰς φορὲς καὶ αἱμορραγίαι, τριχοπτώσεις καὶ δερματοπάθειαι.

Ἄν ἡ ἀρχικὴ προσβολὴ εἶναι ἰσχυρὴ τὸ τρίτο αὐτὸ στάδιο εἶναι καὶ τὸ τελευταῖο, γιὰτὶ συνοδεύεται ἀπ' τὸ θάνατο, ἂν ὅμως ἡ προσβολὴ εἶναι κάπως πιὸ ἀδύνατη ἢ ὁ ὄργανισμὸς πιὸ γερός, τότε τὸ στάδιο αὐτὸ ἀκολουθεῖται ἀπὸ ἓνα τέταρτο — τὸ στάδιο τῆς ἀνάρρωσης.

Στὴν ἀνάρρωση — πὺν κρατᾶει ἀπὸ ἓνα μέχρι 6 μῆνες — ὑποχωροῦν σιγὰ-σιγὰ τὰ συμπτώματα καὶ ὁ ὄργανισμὸς ἐπανέρχεται βαθμιαία στὸν ἀρχικὸ του ρυθμὸ. Πρέπει ὅμως νὰ ποῦμε πὺς ἡ ἀνάρρωση αὐτὴ χαρακτηρίζεται σὰν τέτοια κατὰ ἰατρικὸ εὐφημισμὸ, γιὰτὶ πραγματικά ὁ ὄργανισμὸς δὲν γιαιτρεύεται, τοῦλάχιστο ἀπ' ὅσα μέχρι σήμερα ξέρουμε. Μιὰ ραδιενεργὸς προσβολὴ θ' ἀφίσει πάντοτε ἀλλοιώσεις, πὺν θὰ ἐκδηλωθοῦν ἀργὰ ἢ γρήγορα στὸν ὄργανισμό τὸν ἴδιο ἢ στοὺς ἀπογόνους του.

Ἡ λευχαιμία, ἡ στείρωση, οἱ γενετικὲς ἀλλοιώσεις καὶ οἱ κληρονομικὲς μεταλλαγές — σὰν τὴν ἐξαδαχτυλία ἢ τὴν ὑδροκεφαλία — ἀποτελοῦν κατὰ κανόνα τὴ συνέχεια μιᾶς πυρηνικῆς προσβολῆς.

10. ΤΑ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ Η ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ

10.1 Μια απ' τις σημαντικότερες εφαρμογές των ραδιενεργών κυρίως Ισοτόπων — που κατά κανόνα παράγονται στους αντιδραστήρες — είναι η *ιχνηθέτηση*.

Με τόν όρο *ιχνηθέτηση* έννοούμε τὸ νά καταστήσουμε ἕνα ὀρισμένο στοιχείο ἱκανὸ νά προδίνει συνεχῶς τὴν ὑπαρξή του, σὲ τρόπο πὸν νά γίνεται δυνατὴ ἡ παρακολούθησις τῆς πορείας του μέσα σ' ἕνα σύνολο ἀπὸ ἀλλεπάλληλα φαινόμενα, φυσικὰ καὶ χημικὰ. Ἄς πάρουμε — γιὰ τὴν καλύτερη κατανόησι τοῦ φαινομένου — ἕνα ἀπλὸ παράδειγμα. Ἐστω ὅτι σ' ἕνα δοχεῖο μὲ νερὸ ρίχνουμε μιὰ πρόσθετη σταγόνα νεροῦ καὶ θέλουμε νά παρακολουθήσουμε τὴν πορεία τῆς. Εἶναι φανερὸ πὸς ἡ πρόσθετη αὐτὴ σταγόνα — πὸν ἀποτελεῖται ἀπὸ μόρια νεροῦ — μόλις πέσει στὸ δοχεῖο δὲν θὰ μπορεῖ πιά νά ξεχωριστεῖ ἀπὸ τὰ ἄλλα ὅμοια μόρια. Ἄν ὅμως ἡ σταγόνα περιέχει νερὸ μὲ ραδιενεργὸ ὕδρογόνο — μὲ τρίτιο ${}^3_1\text{H}$ — τότε θὰναι δυνατὸ νά προσδοθεῖ ἡ πορεία τῆς, μιὰ πὸν τὸ ραδιενεργὸ ὕδρογόνο — μὲ τὶς ραδιενεργές του ιδιότητες, ὅπως εἶναι ἡ προσβολὴ ἑνὸς φωτογραφικοῦ φιλμ — θὰ καθιστᾶ πάντοτε φανερὴ τὴν παρουσίαν του, σ' ὅλη τὴ διάρκειαν τῆς διασπορᾶς.

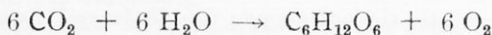
Λέμε τότε πὸς τὸ νερὸ πὸν προσθέτουμε εἶναι *ιχνηθετημένο*, σ' ἀντίθεσιν μὲ τὸ νερὸ πὸν ἀρχικὰ περιεῖχε τὸ δοχεῖο καὶ πὸν δὲν παρουσιάζει ραδιενεργές ιδιότητες.

10.2 Ἐνα ἀπὸ τὰ πῶ σπουδαῖα βιοχημικὰ φαινόμενα πὸν μελετήθηκαν μὲ τὴν *ιχνηθέτηση* εἶναι ἡ ἔρευνα τῆς *πορείας τοῦ σιδήρου* μέσα στὸ αἷμα. Γιὰ τὸ σκοπὸ αὐτὸ χρησιμοποιήθηκε, σὲ πειραματόζωα, τροφὴ πλούσια σὲ ἀφομοιώσιμο σίδηρο, ὅχι ὅμως σὲ συνηθισμένο σίδηρο (${}^{56}_{27}\text{Fe}$) ἀλλὰ σὲ σίδηρο ραδι-

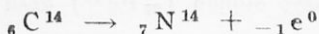
ενεργό (${}_{27}\text{Fe}^{59}$) καὶ ἐξετάστηκε, σὲ συνέχεια, τὸ αἷμα τῶν πειραματοζώων σὲ διάφορα χρονικὰ διαστήματα καὶ σὲ διάφορα σημεία τοῦ σώματός τους. Βρέθηκε ἔτσι μὲ πῶς ρυθμὸς ὁ ὄργανισμός τους παραλαμβάνει σίδηρο καὶ κατὰ ποιὸν τρόπο τὸν χρησιμοποιεῖ. Χωρὶς τὸν ἰχνηθετημένο σίδηρο ἡ ἔρευνα θάταν πολὺ δύσκολη, ἂν ὄχι ἀδύνατη, γιὰ τὸ αἷμα περιέχει κίβλας σίδηρο — σὰν αἰμοσφαιρίνη — γεγονός πού δὲν θὰ μᾶς ἐπέτρεπε νὰ ξεχωρίσουμε τὸν σίδηρο πού χορηγοῦμε ἀπ' αὐτὸν πού προϋπάρχει. Ὁ ${}_{27}\text{Fe}^{59}$ εἶναι ἐλαφρὰ ραδιενεργὸς — δίνει σωματίδια βῆτα — μὲ χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ 47 περίπου ἡμερῶν γι' αὐτὸ καὶ εἶναι πρακτικὰ ἀκίνδυνη ἢ χορήγησή του.

10.3 Κατὰ ὅμοιο σχεδὸν τρόπο μελετήθηκε τὸ φαινόμενο τῆς **φωτοσύνθεσης**, τῆς μετατροπῆς, δηλαδή, τοῦ διοξειδίου τοῦ ἀνθρακα (CO_2) σὲ ὀργανικὴ ὕλη.

Ἀπ' τὰ πῶς παλιὰ χρόνια ἦταν γνωστὸ πὸς τὰ φυτὰ παραλαμβάνουν CO_2 ἀπὸ τὴν ἀτμόσφαιρα, ἐλευθερώνουν ὀξυγόνο καὶ — μέσω τῆς χλωροφύλλης — συνθέτουν τὸν ἀνθρακα πρὸς ὀργανικὲς οὐσίες, μ' ἓνα πρῶτο στάδιο — πού διευκολύνεται ἀπ' τὸ φῶς — πού ὀδηγεῖ στὸ σχηματισμὸ ἀπλῶν ζαχάρων σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



Δὲν ἦταν ὅμως γνωστὴ ἡ ὅλη πορεία πού ἀκολουθεῖ τὸ CO_2 ὡς πού νὰ καταλήξει σὲ ζάχαρο. Ἡ χρησιμοποίησις διοξειδίου μὲ ραδιενεργὸν ἀνθρακα (${}_6\text{C}^{14}$) ἔδωσε τὴ δυνατότητα νὰ παρακολουθηθεῖ ὅλη ἡ ἐνδιάμεση πορεία τοῦ μηχανισμοῦ καὶ νὰ βρεθοῦν πολλὰ ἀπ' τὰ ἐνδιάμεσα προϊόντα. Ἀκόμα βρέθηκε σὲ ποιά σημεία τοῦ φυτοῦ καὶ κάτω ἀπὸ ποιὲς συνθῆκες γίνεται ἡ κάθε μιὰ χημικὴ ἀντίδραση. Ὁ ραδιενεργὸς ἀνθρακας — 14 μεταστοιχειώνεται σὲ ἄζωτο, δίνοντας σωματίδια βῆτα, μὲ χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ 5600 ἐτῶν περίπου, σύμφωνα μὲ τὴν ἀντίδραση



10.4 Ἡ ἰχνηθέτηση παρουσιάζει ιδιαίτερο ἐνδιαφέρον σὲ πολλὰ θέματα *λατρικῆς διαγνωστικῆς*. Ἐτσι μὲ χλωριούχο νάτριο (NaCl), στὸ ὁποῖο ἰχνηθετήθηκε τὸ νάτριο σὰν ραδιενεργό ($_{11}\text{Na}^{24}$) μελετήθηκαν πολλὰ θέματα κυκλοφορίας τοῦ αἵματος. Κάνοντας μιὰ ἐνδοφλέβια ἔνεση, μὲ ἰχνηθετημένο ἄλατι, εἶναι δυνατὸ νὰ βρεθῆι σὲ πόση ὥρα τὸ περιεχόμενο τῆς ἔνεσης φτάνει ἀπὸ ἕνα ὀρισμένο σημεῖο τοῦ σώματος σὲ ἄλλο, κι' αὐτὸ προσδιορίζεται μ' ἕνα ἀπλὸ μετρητὴ τοῦ Γκαίγκερ.

Ἀκόμα, τὸ ραδιενεργὸ ἰώδιο ($_{53}\text{J}^{131}$), μὲ χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ 8 περίπου ἡμερῶν, χρησιμοποιεῖται γιὰ τὴ μελέτη τῆς λειτουργίας τοῦ θυροειδοῦς, ὡς καὶ γιὰ τὴν ἐντόπιση τῶν ἐγκεφαλικῶν ὄγκων. Ἡ τελευταία αὐτὴ περίπτωση στηρίζεται στὸ γεγονός ὅτι τὸ ἰώδιο ἐντοπίζεται ἐκλεκτικὰ στὰ σημεῖα ὅπου ὑπάρχουν κακοήθεις ὄγκοι.

Ἀνάμεσα στὶς πολλὰς ἄλλες περιπτώσεις διαγνωστικῆς μὲ ἰχνηθέτηση ἀξιοσημείωτη εἶναι καὶ ἡ τῆς ἀνταλλαγῆς τῆς χοληστερίνης, ὅπου χρησιμοποιοῦνται παρασκευάσματα μὲ ραδιενεργὸ ἄνθρακα ($_{6}\text{C}^{14}$).

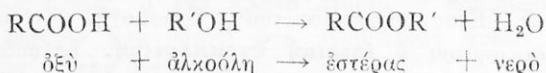
10.5 Ἐνας σημαντικὸς τομέας ἐφαρμογῆς τῶν ραδιενεργῶν εἶναι σήμερα ἡ *λατρικὴ θεραπευτικὴ*. Τὰ ραδιενεργὰ ὑλικά μποροῦν, ἀπὸ μιὰν ἄποψη, νὰ παίξουν τὸν ἴδιον ρόλο ποὺ παίξουν καὶ οἱ ἀκτῖνες Roentgen (ἀκτῖνες X) στὴν καταστροφή κυττάρων καὶ ἰσθῶν, ἐπειδὴ ἐκπέμπουν ἀκτινοβολίες — γάμμα — παρεμφερεῖς πρὸς τὶς X. Τὰ ραδιενεργὰ αὐτὰ πλεονεκτοῦν πρῶτα ἀπ' ὅλα γιατί δὲν ἀπαιτοῦν πολὺπλοκες καὶ δύσχρηστες συσκευές, καὶ κατὰ δεύτερον λόγον γιατί μποροῦν νὰ ἐντοπισθοῦν, σὰν πηγὲς ἀκτινοβολίας, σὲ ὀρισμένα σημεῖα τοῦ σώματος.

Ἐτσι σήμερα χρησιμοποιεῖται τὸ ραδιενεργὸ ἰώδιο ($_{53}\text{J}^{131}$) στὶς περιπτώσεις ὑπερλειτουργίας τοῦ θυροειδοῦς, ὁ ραδιενεργὸς φωσφόρος ($_{15}\text{P}^{32}$) στὴ θεραπεία τῆς λευχαιμίας καὶ τῆς ἀληθοῦς πολυκυτταραιμίας, τὸ ραδιενεργὸ κοβάλτιο ($_{27}\text{Co}^{60}$) καὶ τὸ καίσιον ($_{56}\text{Cs}^{137}$) στὴν καταστροφή τῶν κακοήθων ὄγκων.

10.6 Στη γεωπονία ή χρήση τῶν ραδιενεργῶν φωσφόρου ($_{15}\text{P}^{32}$) καὶ ἄσβεστιοῦ ($_{20}\text{Ca}^{45}$) ἔδωσε τὴ δυνατότητα τῆς παρακολούθησης τῆς πορείας τῶν συστατικῶν τῶν διαφόρων λιπασμάτων. Ἀκόμα μὲ τὰ ραδιενεργὰ αὐτὰ διαπιστώθηκε καὶ ἡ σημασία τῶν λιπασμάτων στὴν ἀνάπτυξη τῶν φυτῶν κι' ἀνακαλύφθηκε ὁ ρόλος πολλῶν ὑλικῶν πού, πιὸ παλιά, τὰ θεωροῦσαν σὰν ἄσημαντα. Ἔτσι, σὰν παράδειγμα, μὲ τὴ χρησιμοποίηση τοῦ ραδιενεργοῦ κοβαλτίου βρέθηκε πὼς τὸ μέταλλο αὐτὸ εἶναι ἀπαραίτητο συστατικὸ τῶν θρεπτικῶν φυτικῶν ὑλικῶν, γιὰ νὰ μπορέσει ἕνας ὄργανισμὸς νὰ συνθέσῃ τὴ βιταμίνη Β—12.

10.7 Ἐκτὸς ἀπ' τὶς καθαρὰ βιολογικὲς καὶ ἰατρικὲς ἐφαρμογὲς τῶν ραδιενεργῶν, ἔχουν μεγάλη σημασία καὶ οἱ καθαρὰ *χημικὲς* καὶ *βιομηχανικὲς* ἐφαρμογὲς.

Ἡ διαλυτότητα ἀνοργάνων κι' ὀργανικῶν ὑλικῶν, ἡ προσροφητικὴ ἰκανότητά τους καὶ οἱ συνταχτικοὶ τους τύποι μελετήθηκαν μὲ βάση τὰ ραδιενεργὰ ἰσότοπα. Σὰν παράδειγμα ἀναφέρουμε πὼς, στὴν ἀντίδραση σχηματισμοῦ ἑνὸς ἐστέρα ἀπὸ δξύ καὶ ἄλκοόλη

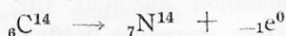


δὲν ἦταν γνωστὸ ἀν τὰ δυὸ ἄτομα δξυγόνου τοῦ ἐστέρα προέρχονται καὶ τὰ δυὸ ἀπ' τὸ δξύ, ἢ τὸ ἕνα ἀπ' τὸ δξύ καὶ τὸ ἄλλο ἀπ' τὴν ἄλκοόλη. Λύση στὸ πρόβλημα ἔδωσε ἡ χρησιμοποίηση ἄλκοόλης μὲ ραδιενεργὸ δξυγόνο ($_{8}\text{O}^{15}$). Βρέθηκε τότες ὅτι ὁ ἐστέρας παρουσιάζει ραδιενεργὲς ιδιότητες, γεγονός πὸ ὁδήγησε στὸ συμπέρασμα ὅτι τὸ ἕνα δξυγόνο προέρχεται ἀπ' τὸ δξύ καὶ τὸ ἄλλο ἀπ' τὴν ἄλκοόλη.

10.8 Σὰν τελευταία ἀξιοσημεῖωτη ἐφαρμογὴ τῶν ραδιενεργῶν εἶναι δυνατό νὰ χαρακτηριστεῖ ἡ *χρονολόγηση*, ὁ προσδιορισμὸς δηλαδὴ τῆς ἡλικίας πετρωμάτων, ἀπολιθωμάτων, ζωϊκῶν ὑλικῶν κλπ. Σὰν παράδειγμα μποροῦμε ν' ἀναφέρουμε πὼς ἀπ' τὴν ἀναλογία μεταξὺ μολύβδου καὶ οὐρανίου εἶναι δυ-

νατὸ νὰ βρεθῆῖ ἡ ἡλικία ἑνὸς πετρώματος τῆς σειρᾶς τοῦ οὐρανίου, μιὰ πού — ὅπως εἶναι γνωστὸ — τὸ οὐράνιο μεταβάλλεται τελικὰ σὲ μόλυβδο με ὀρισμένο ρυθμὸ, ἀφοῦ περάσει ἀπ' ὅλα τὰ ἐνδιάμεσα στάδια μεταστοιχειώσεων. Ἐνα σχετικὰ καινούργιο πέτρωμα θὰ περιέχει πολὺ οὐράνιο καὶ λίγο μόλυβδο, ἀντίθετα ἕνα πέτρωμα παλιὸ θὰ περιέχει λίγο οὐράνιο καὶ πολὺ μόλυβδο.

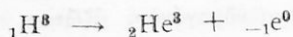
Ἡ ἡλικία ζωϊκῶν ὕλικῶν — ξύλων, ἄνθρακα κλπ. — προσδιορίστηκε με βάση τὸν παρακάτω μηχανισμό. Ὁ ἄνθρακας τῶν ζωντανῶν ὀργανισμῶν — φυτῶν καὶ ζώων — περιέχει μιὰν ὀρισμένη, μικρὴ, σταθερὴ ποσότητα ἀπὸ ραδιενεργὸ ἄνθρακα (${}_6\text{C}^{14}$) με χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ 5600 περίπου ἐτῶν. Αὐτὸ ὀφείλεται στὴ δράση τῶν κοσμικῶν ἀκτίνων (βλ. § 11.3) πού καθιστοῦν ραδιενεργὰ μερικὰ πολὺ μικρὰ ποσὰ τοῦ ζωϊκοῦ ἄνθρακα. Ἄν ὅμως ἕνα ὕλικὸ — ἄς ποῦμε ἕνα φυτὸ — ταφεῖ μέσα στὴ γῆ, τότε ἡ περιεκτικότητά του σὲ ἄνθρακα — 14 συνεχῶς ἐλαττώνεται, χωρὶς ἀναπλήρωση, μιὰ πού οἱ κοσμικὲς ἀκτίνες δὲν εἰσχωροῦν μέσα στὸ ἔδαφος. Ἔτσι με τὴν πάροδο τοῦ χρόνου ὁ ἄνθρακας — 14 ἐλαττώνεται κι' αὐξάνει, ἀντ' αὐτοῦ, τὸ ἄζωτο σύμφωνα με τὴν ἀντίδραση



Ἄπ' τὴν περιεκτικότητά σὲ ραδιενεργὸ ἄνθρακα — 14 εἶναι δυνατό νὰ βρεθῆῖ πόσα χρόνια ἔμεινε θαμμένο, μέσα στὴ γῆ, τὸ φυτὸ.

Ἡ μέθοδος αὐτὴ ἔδωσε ἱκανοποιητικὰ ἀποτελέσματα στὸν προσδιορισμὸ τῆς ἡλικίας ἀρχαιολογικῶν καὶ παλαιοντολογικῶν εὐρημάτων.

Κατὰ παρόμοιο τρόπο βρέθηκε ὁ χρόνος πού — κατὰ μέσον ὄρο — τὸ νερὸ μένει στὴν ἀτμόσφαιρα σὰ νέφος, με τὸν προσδιορισμὸ τῆς περιεκτικότητάς του σὲ ὑπερβαρὺ ὕδρογόνο — 3 (τρίτιο ${}_1\text{H}^3$). Τὸ τρίτιο σχηματίζεται ἀπ' τὴν ἐπίδραση τῶν κοσμικῶν ἀκτίνων καὶ συνεχῶς μεταστοιχειώνεται σὲ ἥλιο — 3, με χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ 12 ἐτῶν, σύμφωνα με τὴν ἀντίδραση



11. ΟΙ ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ

11.1 Ἡ πρόοδος στὰ ἐπιτεύγματα τῆς ἀτομικῆς καὶ τῆς πυρηνικῆς φυσικῆς ἔδωσε τὴ δυνατότητα νὰ γίνουν σπουδαῖες μελέτες στὸν τομέα μιᾶς ομάδας ἀκτινοβολιῶν, ποὺ λέγονται **κοσμικὲς ἀκτῖνες**. Μὲ τὴ σειρά τους, ἴσως, οἱ μελέτες αὐτὲς ἀνοιξαν καινούργιους ὁρίζοντες, ἀκόμα πιὸ πλατεῖς, ἰσὸ πεδίο τῆς ἀτομικῆς καὶ τῆς πυρηνικῆς φυσικῆς.

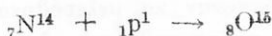
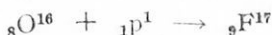
11.2 Ἄπ' τὶς ἀρχὲς τοῦ εἰκοστοῦ αἰῶνα εἶχε κίολας διαπιστωθεῖ πὼς ἓνα φορτισμένο ἠλεκτρικὰ ἠλεκτροσκόπιο, ὅταν ἀφεθεῖ στὸν ἀέρα ἐκφορτίζεται, σιγὰ-σιγὰ, μόνο του, χωρὶς καμμιά ἐμφανῆ αἰτία. Ἡ παρατήρηση αὐτὴ ὀδήγησε στὸ συμπέρασμα πὼς ὁ ἀέρας εἶναι **ιοντισμένος**, περιέχει δηλαδὴ φορτισμένα σωματίδια.

Μὲ τὴ χρησιμοποίησι θαλάμων τοῦ Wilson, μετρητῶν τοῦ Γκάϊγκερ κι' ἄλλων συσκευῶν βρέθηκε πὼς τὰ σωματίδια αὐτὰ εἶναι ἠλεκτρόνια (${}_{-1}e^0$), σωματίδια ἄλφα (${}_2\text{He}^4$), πρωτόνια (${}_1p^1$) κλπ., ποὺ ἡ ἄγνωστη, φαινομενικὰ, αἰτιολογία τους ὀδήγησε τοὺς ἐρευνητὲς νὰ τὰ χαρακτηρίσουν ὡς σωματίδια ἐξωγήϊνης προέλευσης, ὡς **κοσμικὲς ἀκτῖνες**.

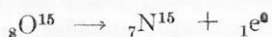
11.3 Σήμερα ξέρουμε πὼς ὁ χῶρος ἀνάμεσα στοὺς ἀστέρες καὶ στοὺς πλανῆτες — ὁ κοσμικὸς χῶρος — εἶναι γεμάτος ἀπὸ ἐλεύθερα πρωτόνια (${}_1p^1$), ποὺ κινοῦνται μὲ μεγάλες ταχύτητες, ἕξ αἰτίας ἀφ' ἑνὸς τῶν νευτῶνείων πεδίων, ἀφ' ἑτέρου τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν πεδίων. Τὰ πρωτόνια αὐτὰ τὰ λέμε **πρωτογενεῖς κοσμικὲς ἀκτῖνες**.

Μπαίνοντας στὴν ἀτμόσφαιρα τῆς γῆς οἱ πρωτογενεῖς ἀκτῖνες συναντοῦν ἄτομα ὕδρογόνου, ἄζωτου, ὀξυγόνου κι' ἄλλων

στοιχείων, με τὰ ὁποῖα δημιουργοῦν πυρηνικὲς ἀντιδράσεις ἐν-
σωμάτωσης σὰν τὶς παρακάτω



Μὲ τὴ σειρά τους ὅμως οἱ νέοι αὐτοί, ἀσταθεῖς, πυρῆνες
δίνουν γένεση σὲ καινούργιες μεταστοιχειώσεις ὅπως



Τὰ σωματίδια πὸν ἐλευθερώνονται — ποζιτρόνια, ἠλε-
κτρόνια κλπ. — εἶναι ἱκανά, σὰ βλήματα, νὰ δημιουργήσουν
κι' ἄλλες παραπέρα μεταστοιχειώσεις, κατὰ ἓνα ἀλυσωτὸ κάπως
τρόπο.

Ὅλο αὐτὸ τὸ σύνολο τῶν δευτερογενῶν βλημάτων, πὸν
γεννιέται μέσα στὴν ἀτμόσφαιρα, ἀποτελεῖ τὶς **δευτερογενεῖς**
κοσμικὲς ἀκτῖνες. Ἀπ' τὶς διάφορες αὐτὲς μεταστοιχειώσεις
δημιουργοῦνται καὶ ἰσχυρὰ φωτόνια γάμμα, πὸν ἐνεργοποιοῦν
(βλ. § 5.6) τοὺς σταθεροὺς πυρῆνας κι' ἔτσι αὐξάνουν τὸ πλῆ-
θος τῶν δευτερογενῶν προϊόντων.

11.4 Ἡ δευτερογενὴς κοσμικὴ ἀκτινοβολία, ἰσχυρὴ στὰ
ὕψηλὰ στρώματα τῆς ἀτμόσφαιρας, ἐλαττώνεται μὲ τὸ ὕψος, ἔτσι
πὸν στὴν ἐπιφάνεια τῆς γῆς εἶναι ἀρκετὰ ἀσθενής, κι' αὐτὸ γιὰ
τὰ συνεχῶς παραγόμενα σωματίδια ἔξασθενοῦν — περνώντας
μέσα ἀπ' τὸν ἀέρα — καὶ χάνουν σιγὰ - σιγὰ τὴν ἱκανότητά τους
νὰ δημιουργήσουν καινούργιες ἰδράσεις.

Κατὰ μέσο ὄρο, στὴν ἐπιφάνεια τῆς γῆς, φτάνουν γύρω στὰ
50 σωματίδια σὲ κάθε δευτερόλεπτο, σὲ κάθε ἐπιφάνεια μιᾶς
τετραγωνικῆς παλάμης.

11.5 Ἡ κοσμικὴ ἀκτινοβολία ἔδωσε τὴ δυνατότητα νὰ
μελετηθοῦν πυρηνικὲς ἀντιδράσεις πολὺ μεγάλης δραστηκότητας,
ἐξ αἰτίας τῆς πολὺ μεγάλης ἐνέργειας τῶν ἀρχικῶν πρωτογενῶν

βλημάτων, αντιδράσεις λίγες μὲν σὲ πλῆθος ἀλλὰ πολὺ πιὸ ἰσχυρὸς ἅπ' τὶς φυσικὲς ἢ τεχνητὲς μεταστοιχειώσεις, ποὺ πετυχαίνονται μὲ γῆϊνα μέσα.

Ἔτσι ἀνακαλύφθηκαν καὶ μελετήθηκαν καινούργια σωματίδια ποὺ δὲν εἶχαν παρατηρηθῆ στὶς κλασσικὲς πυρηνικὲς ἀντιδράσεις, γεγονὸς ποὺ στερέωσε τὴ βάση γιὰ νὰ οἰκοδομηθεῖ μιὰ καινούργια θεωρία, σχετικὰ μὲ τὴ συγκρότηση τῆς ὕλης.

Σήμερα πιστεύουμε, ὕστερα ἀπὸ πολλὰς θεωρητικὲς ἔρευνες καὶ πειραματικὲς παρατηρήσεις, πὼς ὁ ὕλικὸς κόσμος σύγκεται ἀπὸ πέντε βασικὲς, θεμελιώδεις **μονάδες**, ποὺ ἢ κάθε μιὰ εἶναι φορέας μιᾶς πρωταρχικῆς ιδιότητος. Ἡ μονάδες αὐτὲς εἶναι τὸ **φωτόνιο** ($0\gamma^0$), σὰν φορέας τῆς ἐνέργειας, τὸ **ἀντινεutrino** ($0\nu^0$), σὰν φορέας τῆς στροφορμῆς, τὸ **ἠλεκτρόνιο** καὶ τὸ **ποζιτρόνιο** ($-1e^0, 1e^0$), σὰν φορεῖς ἀρνητικοῦ καὶ θετικοῦ ἠλεκτρισμοῦ ἀντίστοιχα, καὶ τέλος τὸ **οὐδέτερο μ-μεσόνιο** ⁽¹⁾ (0μ), σὰν φορέας τῆς ἀδράνειας. Ἡ τελευταία ἐτούτη μονάδα (0μ) εἶναι ὕλικὸ σωματίδιο, βαρύτερο ἅπ' τὸ ἠλεκτρόνιο — κατὰ 300 περίπου φορὲς — ἀλλὰ ἐλαφρότερο ἅπ' τὸ πρωτόνιο καὶ τὸ νετρόνιο, καὶ γι' αὐτὸν ἀκριβῶς τὸ λόγο ὀνομάστηκε μεσόνιο — σὰν ἐνδιάμεσο, ἀπὸ ἀποψη μάζας, μεταξὺ ἠλεκτρονίου καὶ πρωτονίου.

11.6 Ὅλα τὰ σωματίδια ποὺ συγκροτοῦν τὴν ὕλη — τὰ πρωτόνια, οἱ πυρῆνες κλπ. — θεωροῦνται σήμερα σὰν συνδιασμοὶ τῶν πέντε παραπάνω βασικῶν μονάδων. Ἔτσι ἔχουμε φορτισμένα μ-μεσόνια σὰν συνδιασμοὺς οὐδετέρων μ-μεσονίων καὶ $1e^0$ ἢ $-1e^0$

$$\begin{aligned} 1\mu &= 0\mu + 1e^0 \\ -1\mu &= 0\mu + -1e^0 \end{aligned}$$

(1) Τὰ μεσόνια, πιὸ παλιά, τὰ λέγαν καὶ μεσοτρόνια.

Ἐπίστοιχα ἔχομε καὶ βαρύτερα μεσόνια (π· μεσόνια) σὰν συνδιασμοὺς τῶν μ· μεσονίων

$$\begin{aligned} {}_0\pi &= {}_0\mu + {}_0\nu^0 \\ {}_1\pi &= {}_0\pi + {}_1e^0 \\ -{}_1\pi &= {}_0\pi + -{}_1e^0 \end{aligned}$$

Σὰν πιὸ σύνθετα συμπλέγματα θεωροῦνται τὸ *πρωτόνιο* — σὰν σύνολο ἀπὸ π· καὶ μ· μεσόνια — καὶ τὸ *νετρόνιο*.

Ἡ θεωρία αὐτὴ δὲν ἀνατρέπει, ὅπως βλέπουμε, τὴν παλιότερη ἄποψη σχετικά μὲ τὴ συγκρότηση τῆς ὕλης ἀπὸ ${}_1p^1$, ${}_0n^1$ καὶ $-{}_1e^0$, ἀλλὰ τὴ συμπληρώνει.

Τελειώνοντας μποροῦμε νὰ ποῦμε πὺς ἡ μελέτη τῆς σύστασης τοῦ ὕλικου κόσμου — παρ' ὅλο πὺν βεῖσεται ἀκόμα στὴν ἀρχὴ — ἔδωσε στὸν ἄνθρωπο τὴ δυνατότητα νὰ γνωρίσει ἀπὸ κοντὰ τὶς ιδιότητες τοῦ αἰσθητοῦ κόσμου. Κι' ἡ γνώση αὐτὴ δημιούργησε καινούργια ἐνδιαφέροντα, ἀνοιξε καινούργιους πλατεῖς ὀρίζοντες σ' ὅλους τοὺς κλάδους τῶν ἐπιστημῶν, ἀπ' τὴν θεωρητικὴ φιλοσοφία μέχρι τὴν τεχνικὴ τῆς καθημερινῆς ζωῆς.

Ἄς εὐχόμεστε πὺς ἡ κατάκτηση τοῦ μικροκόσμου τῆς ὕλης καὶ ἡ ἀνακάλυψη κι' ἡ χρῆση τῆς τεράστιας δυνάμεις του θα ὀδηγήσουν τὴν ἀνθρωπότητα ὄχι στὴν καταστροφή, ἀλλὰ στὴν πρόοδο καὶ τὴν εὐημερία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
1. Τὸ ἄτομο καὶ ἡ ἐσωτερικὴ δομὴ του	1
2. Οἱ δυνὸ μορφῆς τῆς ὕλης : μᾶζα καὶ ἐνέργεια	18
3. Ἡ μεταστοιχείωση σὰν πυρηνικὸ φαινόμενον	29
4. Ἡ φυσικὴ μεταστοιχείωση	43
5. Ἡ τεχνητὴ μεταστοιχείωση	53
6. Ἡ σχάση καὶ ἡ πυρηνικὴ ἐνέργειά της	63
7. Ἡ ὑδρογονικὴ βόμβα καὶ ἡ θερμοπυρηνικὴ ἐνέργεια	76
8. Ὁ ἀτομικὸς ἀντιδραστήρας	81
9. Ἡ ἀνίχνευση καὶ ὁ ἔλεγχος τῆς ραδιενέργειας	87
10. Τὰ ραδιενεργὰ ὕλικά καὶ ἡ πρακτικὴ ἐφαρμογή τους	97
11. Οἱ κοσμικὲς ἀκτῖνες	102

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΟ
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ
8	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΟ
9	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΩ
10	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΑ
11	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑ
12	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝ
13	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝ
14	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑ
15	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑ
16	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑ
17	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑ
18	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑ
19	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑ
20	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑ
21	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑ
22	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑ
23	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑ
24	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝΕΚΔΑ
25	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑΕΚΔΑ
26	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑΕΚΔΑ
27	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
28	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑΕΚΔΑ
29	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑΕΚΔΑ
30	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑΕΚΔΑ
31	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑΕΚΔΑ
32	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑ
33	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑ
34	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑ
35	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑ
36	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
37	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
38	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
39	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
40	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
41	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
42	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
43	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
44	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
45	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
46	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
47	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
48	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
49	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
50	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
51	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
52	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
53	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
54	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
55	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
56	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
57	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
58	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
59	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
60	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
61	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
62	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
63	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
64	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
65	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
66	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
67	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
68	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
69	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
70	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
71	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
72	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
73	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
74	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
75	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
76	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
77	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
78	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
79	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
80	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
81	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
82	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
83	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
84	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
85	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
86	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
87	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
88	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
89	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
90	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
91	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΔΕΚΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
92	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
93	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΡΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
94	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
95	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
96	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
97	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
98	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
99	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ
100	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟΝΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑΕΚΔΑ

54



0020638016

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΒΟΥΛΗΣ

Ε
6