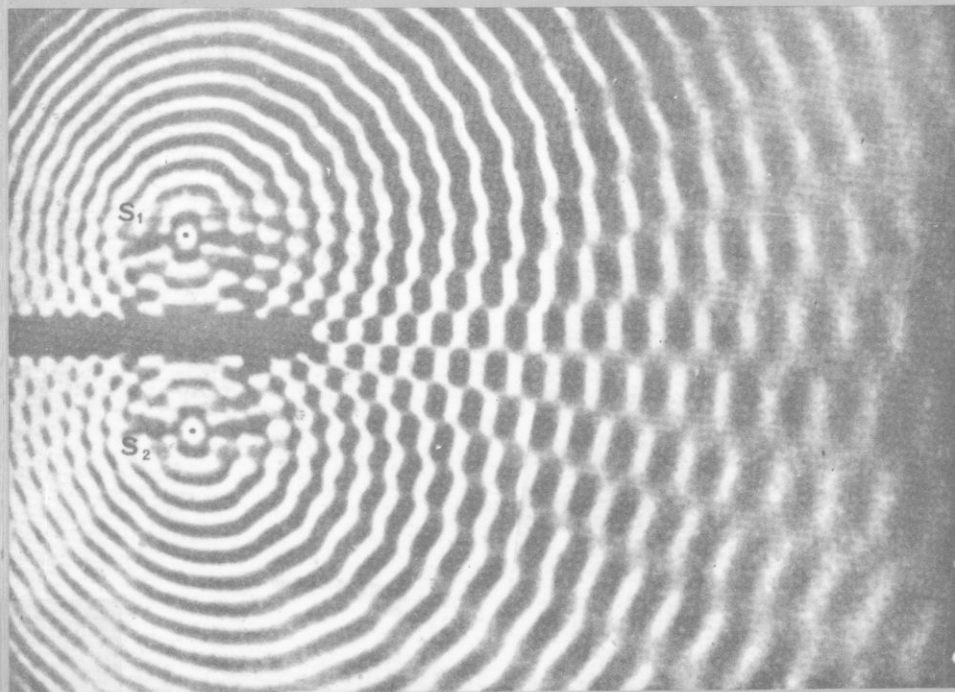


ΑΛΚΙΝΟΟΥ Ε. ΜΑΖΗ

ΦΥΣΙΚΗ

Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ ΑΘΗΝΑ 1980

Ψηφιοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής

19469

A9

ΑΛΚΙΝΟΥ Β. ΜΑΖΗ

ΦΥΣΙΚΗ

ΦΥΣΙΚΗ

α

Γ ΛΥΚΕΙΟΥ

$\frac{9500}{79000}$
 9500

 79000

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΘΗΝΑ 1980

ΑΛΚΙΝΟΟΥ Ε. ΜΑΖΗ

ΜΑΘΗΜΑΤΑ

ΕΠΙΜΟΡΦΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ

ΦΥΣΙΚΗ

Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΘΗΝΑ 1980

ALKINOY E. MASH

ΦΥΣΙΚΗ

L. YAKIROY

Τό βιβλίό μεταγλωττίστηκε από τό συγγραφέα σέ συνεργασία
μέ τόν κ. Κ. Μικρούδη, Γεν. Έπιθεωρητή Μ. Ε.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ

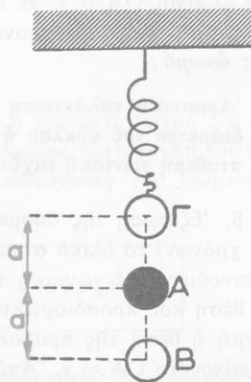
Άρμονική ταλάντωση

1. Άρμονική ταλάντωση μεταλλικής σφαίρας

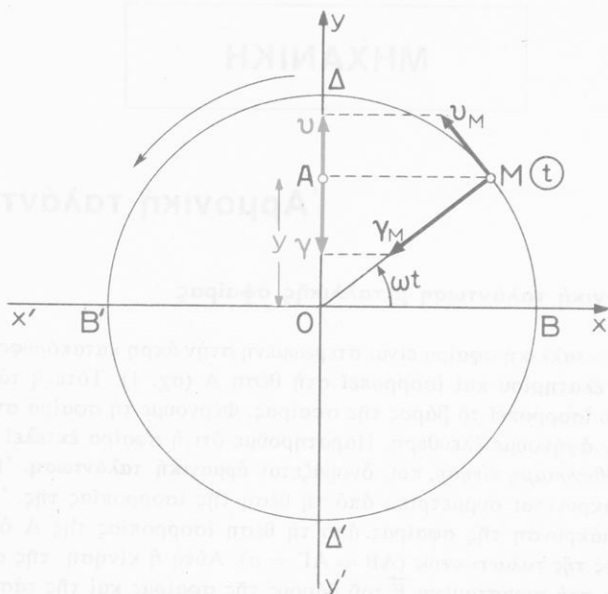
Μιά μεταλλική σφαίρα είναι στερεωμένη στην άκρη κατακόρυφου σπειροειδούς ελατηρίου και ισορροπεί στη θέση Α (σχ. 1). Τότε η τάση του ελατηρίου ισορροπεί το βάρος της σφαίρας. Φέρνουμε τη σφαίρα στη θέση Β και την αφήνουμε ελεύθερη. Παρατηρούμε ότι η σφαίρα εκτελεί μία *περιοδική εὐθύγραμμη κίνηση*, πού ονομάζεται *άρμονική ταλάντωση*. Ἡ σφαίρα ἀπομακρύνεται συμμετρικά ἀπὸ τὴ θέση τῆς ἰσορροπίας τῆς. Ἡ μέγιστη ἀπομάκρυνση τῆς σφαίρας ἀπὸ τὴ θέση ἰσορροπίας τῆς Α ονομάζεται *πλάτος τῆς ταλαντώσεως* ($AB = AG = a$). Αὐτὴ ἡ κίνηση τῆς σφαίρας ὀφείλεται στὴ συνισταμένη \vec{F} τοῦ βάρους τῆς σφαίρας καὶ τῆς τάσεως τοῦ ελατηρίου. Σὲ κάθε στιγμή ἡ δύναμη \vec{F} τείνει νὰ ἐπαναφέρει τὴ σφαίρα στὴ θέση ἰσορροπίας τῆς.

2. Μελέτη τῆς ἀρμονικῆς ταλαντώσεως

α. Ὅρισμός. Ἡ ἀρμονικὴ ταλάντωση εἶναι μιά κίνηση εἰδικῆς μορφῆς, πού προκύπτει ἀπὸ τὴν ὁμαλὴ κυκλικὴ κίνηση ὡς ἐξῆς: Ὄταν ἓνα ὑλικὸ σημεῖο Μ (σχ. 2) κινεῖται μὲ σταθερὴ γωνιακὴ ταχύτητα (ω) πάνω σὲ περιφέρεια κύκλου πού ἔχει ἀκτίνα a , τότε ἡ προβολὴ Α τοῦ κινητοῦ Μ πάνω στὴ διάμετρο Δ'Δ' ἐκτελεῖ *ἀρμονικὴ ταλάντωση*, πού ἔχει *πλάτος* a καὶ *περίοδο* T , ἴση μὲ τὴν περίοδο τῆς κινήσεως τοῦ κινητοῦ Μ. Στὴ διάρκεια μιᾶς περιόδου T τὸ κινητὸ Α διατρέχει δύο φορές τὴ διάμετρο Δ'Δ'. Ὡς ἀρχὴ τῶν διαστημάτων παίρνουμε τὸ σημεῖο Ο, δηλαδή τὴ μέση θέση ἰσορροπορίας τοῦ κινη-



Σχ. 1. Ἡ σφαίρα ἐκτελεῖ ἀρμονικὴ ταλάντωση.



Σχ. 2. Για την εύρεση των εξισώσεων της αρμονικής ταλαντώσεως

του A. Σε μία χρονική στιγμή t ή απόσταση του κινητού A από το σημείο O είναι $OA = y$. Η απόσταση αυτή (y) ονομάζεται *απομάκρυνση* του κινητού A κατά τη χρονική στιγμή t . Από τα παραπάνω έχουμε τον εξής *όρισμό*:

Αρμονική ταλάντωση ονομάζεται η κίνηση που εκτελεί πάνω στη διάμετρο του κύκλου ή προβολή ενός υλικού σημείου, που κινείται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα πάνω στην περιφέρεια του κύκλου.

β. Έξιωση της απομακρύνσεως. Στη χρονική στιγμή $t = 0$ (άρχη των χρόνων) το υλικό σημείο M βρίσκεται στη θέση B. Το υλικό σημείο M κινούμενο με γωνιακή ταχύτητα ω βρίσκεται τη χρονική στιγμή t σε μία θέση που προσδιορίζεται από τη γωνία $BOM = \omega t$. Την ίδια χρονική στιγμή ή θέση της προβολής A του κινητού M προσδιορίζεται από την *απομάκρυνση* $OA = y$. Από το ορθογώνιο τρίγωνο OMA βρίσκουμε ότι είναι:

$$OA = OM \cdot \eta\mu \omega t \quad \eta \quad y = a \cdot \eta\mu \omega t$$

Τό μέγεθος ωt ονομάζεται *φάση* της κινήσεως του κινητού A. Τό μέ-

γεθος ω ονομάζεται *κυκλική συχνότητα* του κινητού Α και είναι ίση με $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$, όπου Τ και ν είναι αντίστοιχα η περίοδος και η συχνότητα της κινήσεως του κινητού Α. Ἄρα η απόμακρυνση του κινητού Α δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{ἀπομάκρυνση } y = a \cdot \eta\mu \omega t \quad \eta \quad y = a \cdot \eta\mu \frac{2\pi t}{T} \quad (1)$$

γ. Ἐξίσωση τῆς ταχύτητας. Ἀποδεικνύεται ὅτι σέ κάθε χρονική στιγμή ἢ ταχύτητα (v) του κινητού Α είναι ίση με τήν προβολή τῆς ταχύτητας (v_M) του ὑλικού σημείου Μ πάνω στή διάμετρο Δ'Δ. Ἄρα είναι:

$$v = v_M \cdot \sigma\upsilon\nu \omega t$$

Ἐπειδή είναι $v_M = a\omega$, βρίσκουμε ὅτι ἡ ταχύτητα του κινητού Α δίνεται ἀπό τήν εξίσωση:

$$\text{ταχύτητα } v = a\omega \cdot \sigma\upsilon\nu \omega t \quad \eta \quad v = a\omega \cdot \sigma\upsilon\nu \frac{2\pi t}{T} \quad (2)$$

δ. Ἐξίσωση τῆς ἐπιταχύνσεως. Ἀποδεικνύεται ἐπίσης ὅτι σέ κάθε χρονική στιγμή ἢ ἐπιτάχυνση (γ) του κινητού Α είναι ίση με τήν προβολή τῆς ἐπιταχύνσεως (γ_M) του ὑλικού σημείου Μ πάνω στή διάμετρο Δ'Δ. Ἄρα είναι:

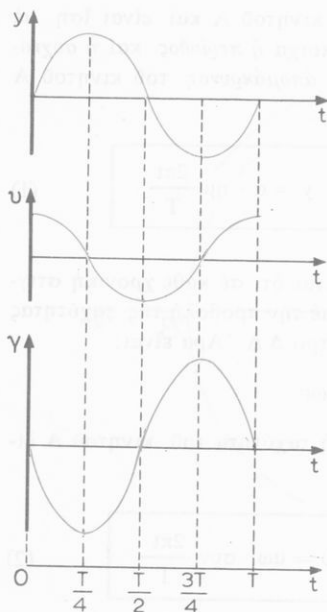
$$\gamma = -\gamma_M \cdot \eta\mu \omega t$$

Τό ἀρνητικό σημεῖο φανερώνει ὅτι κατά τή χρονική στιγμή t ἡ φορά του ἀνύσματος $\vec{\gamma}$ είναι ἀρνητική. Ἡ κεντρομόλος ἐπιτάχυνση του ὑλικού σημείου Μ είναι $\gamma_M = a\omega^2$. Ἐπομένως ἡ ἐπιτάχυνση του κινητού Α δίνεται ἀπό τήν εξίσωση:

$$\text{ἐπιτάχυνση } \gamma = -a\omega^2 \cdot \eta\mu \omega t \quad \eta \quad \gamma = -\omega^2 \cdot y \quad (3)$$

γιατί είναι $y = a \cdot \eta\mu \omega t$. Τό ἄνυσμα $\vec{\gamma}$ τῆς ἐπιταχύνσεως ἔχει πάντοτε φορά πρὸς τή μέση Ο τῆς διαδρομῆς του κινητού Α.

Ἡ μεταβολή τῆς ἀπομακρύνσεως (y), τῆς ταχύτητας (v) καί τῆς ἐπιταχύνσεως (γ) του κινητού Α σέ συνάρτηση με τό χρόνο (t) παριστάνονται



Σχ. 3. Γραφική παράσταση των μεταβολών της απομάκρυνσης (y), της ταχύτητας (v) και της επιταχύνσεως (γ) σε συνάρτηση με το χρόνο (t)

$m \cdot \omega^2$ είναι σταθερό και πάντοτε θετικό. Αν λάβουμε $f = m \cdot \omega^2$, τότε η εξίσωση (4) γράφεται και ως εξής:

$$F = -f \cdot y \quad (5)$$

Τό αρνητικό σημείο στην εξίσωση (5) φανερώνει ότι η δύναμη F και η απομάκρυνση y είναι σε κάθε στιγμή *ετερόσημες* (σχ. 4). Η σταθερή f της κινήσεως κατ' απόλυτη τιμή είναι ίση με τό πηλίκο $f = F/y$, ονομάζεται *σταθερή επαναφοράς* και εκφράζει τή δύναμη που ενεργεί στό κινητό, όταν ή απομάκρυνσή του είναι ίση με τή μονάδα (για $y = 1$ είναι $f = F$).

στ. Περίοδος τής κινήσεως. Αν στην εξίσωση $f = m\omega^2$ βάλουμε $\omega = 2\pi/T$ και λύσουμε τήν εξίσωση ως προς T , βρίσκουμε ότι ή πε-

γραφικά από τήν αντίστοιχη καμπύλη του σχήματος 3. Παρατηρούμε ότι ή μεταβολή τής απομάκρυνσεως (y) παριστάνεται από μία ήμιτονοειδή καμπύλη (σχ. 3) και γι' αυτό ή άρμονική ταλάντωση ονομάζεται και *ήμιτονοειδής κίνηση*.

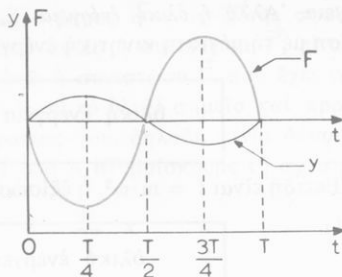
ε. Έξισωση τής δυνάμεως. Τό κινητό A έχει μάζα m και σε κάθε στιγμή έχει επιτάχυνση $\bar{\gamma}$. Άρα κάθε στιγμή στό κινητό A ενεργεί μία δύναμη \bar{F} που έχει τή διεύθυνση και τή φορά τής επιταχύνσεως $\bar{\gamma}$ και μέτρο $F = m \cdot \gamma$. Ωστε στό κινητό A συνεχώς ενεργεί ή δύναμη \bar{F} , που τό μέτρο της δίνεται από τήν εξίσωση:

$$\text{δύναμη } F = -m \cdot \omega^2 \cdot y \quad (4)$$

Τό άνυσμα \bar{F} τής δυνάμεως έχει πάντοτε φορά προς τήν μέση O τής διαδρομής του κινητού A και ονομάζεται *δύναμη επαναφοράς*, γιατί σε κάθε στιγμή προσπαθεί νά ξαναφέρει τό κινητό A στη θέση ισορροπίας O . Τό γινόμενο

ρίοδος της ἄρμονικῆς ταλάντωσης τοῦ κινήτου A δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση :

$$\text{περίοδος } T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{f}} \quad (6)$$



ζ. Διερεύνηση τῶν ἐξισώσεων τῆς ἄρμονικῆς ταλάντωσης. Ἐς θεωρήσουμε τίς χρονικές στιγμές 0, T/4, T/2, 3T/4 καί T. Ἐάν στίς ἐξισώσεις τῆς ἄρμονικῆς ταλάντωσης ἀντικαταστήσουμε τό t μέ τίς παραπάνω τιμές τοῦ χρόνου, τότε εὐκόλα σχηματίζουμε ἕναν πίνακα πού δείχνει ποιά εἶναι ἡ μέγιστη τιμή πού λαβαίνει τό κάθε μέγεθος καί μέσα σέ ποιά ὅρια μεταβάλλεται τό κάθε μέγεθος στή διάρκεια μιᾶς περιόδου. Ὁ πίνακας πού σχηματίζουμε εἶναι ὁ ἑξῆς:

Σχ. 4. Ἡμιτονοειδῆς μεταβολή τῆς δυνάμεως ἐπαναφορᾶς F σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο. Σέ κάθε στιγμή ἡ δύναμη F καί ἡ ἀπομάκρυνση y εἶναι ἑτερόσημες.

Χρόνος t	Φάση ωt	Ἀπομάκρυνση y	Ταχύτητα v	Ἐπιτάχυνση γ	Δύναμη F
0	0	0	αω	0	0
T/4	π/2	a	0	-αω ²	-μαω ²
T/2	π	0	-αω	0	0
3T/4	3π/2	-a	0	αω ²	μαω ²
T	2π	0	αω	0	0

η. Ἐνέργεια τοῦ ὑλικοῦ σημείου. Ὄταν τό ὑλικό σημεῖο A περνάει ἀπό τή θέση τῆς ἰσορροπίας του (y = 0), τότε ἡ ταχύτητά του ἔχει τή μέγιστη ἀπόλυτη τιμή v = αω (βλ. πίνακα). Ἐκείνη τή στιγμή τό ὑλικό σημεῖο A ἔχει τή μέγιστη κινητική ἐνέργεια :

$$E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad \text{ἢ} \quad E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m \cdot \alpha^2 \cdot \omega^2$$

Ὄταν τό ὑλικό σημεῖο φτάνει στίς ἀκραίες θέσεις τῆς διαδρομῆς του (y = ± a), τότε ἡ ταχύτητά του εἶναι ἴση μέ μηδέν (v = 0) καί ὅλη ἡ κινητική ἐνέργειά του ἔχει μετατραπεῖ σέ δυναμική ἐνέργεια (E_{δυν} = E_{κιν}). Σέ κάθε ἄλλη θέση τό ὑλικό σημεῖο A ἔχει κινητική καί δυναμική ἐνέρ-

για. Ἀλλά ἡ *ὀλική ἐνέργεια* ($E_{ολ}$) τοῦ ὕλικου σημείου A εἶναι πάντοτε ἴση μέ τή μέγιστη κινητική ἐνέργεια τοῦ ὕλικου σημείου. Ὡστε εἶναι:

$$\text{ὀλική ἐνέργεια} \quad E_{ολ} = \frac{1}{2} m \cdot a^2 \cdot \omega^2 \quad (7)$$

Ἐπειδή εἶναι $f = m \cdot \omega^2$, ἡ ἐξίσωση (7) γράφεται καί ὡς ἐξῆς:

$$\text{ὀλική ἐνέργεια} \quad E_{ολ} = \frac{1}{2} f \cdot a^2 \quad (8)$$

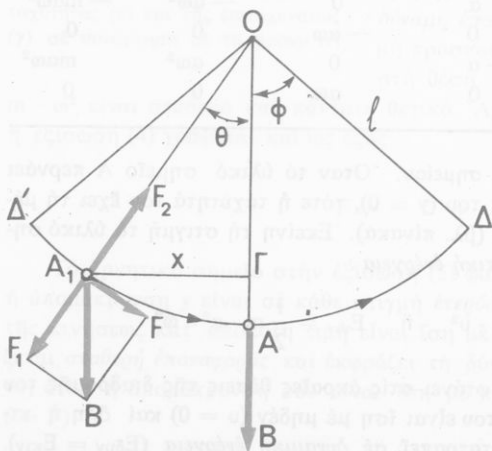
Ἀπό τά παραπάνω καταλήγουμε στό ἀκόλουθο συμπέρασμα:

Ἡ ὀλική ἐνέργεια ἑνός ὕλικου σημείου πού ἐκτελεῖ ἄρμονική ταλάντωση διατηρεῖται σταθερή σέ ὅλη τή διαδρομή τοῦ ὕλικου σημείου καί εἶναι ἀνάλογη μέ τή σταθερή ἐπιταχυντική ἀπόκριση (f) καί μέ τό τετράγωνο τοῦ πλάτους (a) τῆς ταλαντώσεως.

Ἐφαρμογή τῆς ἄρμονικῆς ταλαντώσεως ἔχουμε στό ἀπλό ἐκκρεμές.

3. Ἀπλό ἐκκρεμές

Τό ἀπλό ἐκκρεμές εἶναι μιά ἰδανική διάταξη καί ἀποτελεῖται ἀπό μιά μικρή σφαῖρα (ὕλικό σημείο) δεμένη στήν ἄκρη ἑνός νήματος. Ἡ ἄλλη



Σχ. 5. Ἀπλό ἐκκρεμές

ἄκρη τοῦ νήματος εἶναι ἔτσι στερεωμένη, ὥστε τό νήμα μπορεῖ νά στρέφεται χωρίς τριβή γύρω ἀπό ὀριζόντιο ἄξονα O (σχ. 5). Τό νήμα ἔχει ἀσήμαντη μάζα σχετικά μέ τή μάζα m τῆς σφαῖρας. Τό μήκος $OA = l$ ὀνομάζεται *μῆκος* τοῦ ἐκκρεμοῦς. Ἀπομακρύνουμε τό ἐκκρεμές ἀπό τή θέση ἰσορροπίας κατὰ γωνία ϕ καί τό ἀφήνουμε ἐλεύθερο. Τό ἐκκρεμές ἐκτελεῖ μιά σειρά *αἰωρήσεων*. Ἡ γωνία ϕ ὀνομάζεται *πλάτος* τῆς αἰωρήσεως.

Σε μία οποιαδήποτε θέση αναλύουμε το βάρος $\vec{B} = m \cdot \vec{g}$ της σφαιρας στις δύο συνιστώσες \vec{F} και \vec{F}_1 . Από αυτές η συνιστώσα \vec{F}_1 είναι αντίθετη με την τάση \vec{F}_2 του νήματος, ενώ η συνιστώσα \vec{F} , που έχει τη διεύθυνση της εφαπτομένης της τροχιάς κινεί το υλικό σημείο και προσπαθεί να το ξαναφέρει στη θέση ισορροπίας του, δηλαδή είναι δύναμη επαναφορᾶς. Από τα ὅμοια τρίγωνα $OA_1\Gamma$ και A_1BF βρίσκουμε τη σχέση:

$$\frac{B}{l} = \frac{F}{x} \quad \text{ἄρα} \quad F = \frac{B}{l} \cdot x \quad (1)$$

Ἄν ἡ γωνία θ εἶναι *πολύ μικρή* (2° ὡς 3°), τότε μπορούμε νά θεωρήσουμε ὅτι ἡ ἀπόσταση x καί τό τόξο A_1A συμπίπτουν. Σ' αὐτή τήν περίπτωση ἡ ἐξίσωση (1) δείχνει ὅτι ἡ δύναμη επαναφορᾶς F εἶναι ἀνάλογη μέ τήν ἀπομάκρυνση x τοῦ υἱκοῦ σημείου ἀπό τή θέση ισορροπίας τοῦ A . Ἔτσι καταλήγουμε στό ἀκόλουθο συμπέρασμα:

Όταν τό πλάτος τῆς αἰωρήσεως τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς εἶναι πολύ μικρό, τότε ἡ κίνηση τοῦ ἐκκρεμοῦς εἶναι κατά μεγάλη προσέγγιση ἄρμονική ταλάντωση.

Ἐπομένως ἡ δύναμη επαναφορᾶς (F) κατ' ἀπόλυτη τιμή δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

$$F = f \cdot x \quad (2)$$

Ἀπό τίς ἐξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε ὅτι εἶναι:

$$f = \frac{B}{l} \quad \text{ἢ} \quad f = \frac{m \cdot g}{l}$$

Ἡ περίοδος τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{f}}$$

Ἄν στήν τελευταία ἐξίσωση βάλουμε τήν τιμή τοῦ f , βρίσκουμε ὅτι ἡ περίοδος τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

περίοδος ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ (3)

4. Ἀμείωτη καί φθίνουσα ταλάντωση

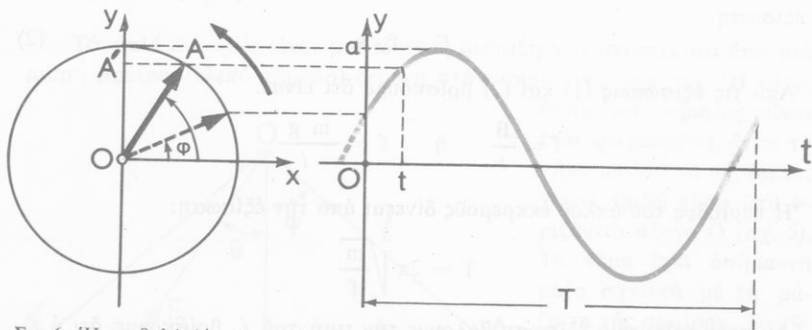
Ἄν ἕνα υἱκό σημείο ἐκτελεῖ ἄρμονική ταλάντωση πού ἔχει πλά-

τος a και περίοδο T , τότε η όλική ενέργειά του διατηρείται σταθερή και ίση με $E_{ολ} = \frac{1}{2} f \cdot a^2$. Το πλάτος a της ταλαντώσεως διατηρείται σταθερό

και γι' αυτό η ταλάντωση ονομάζεται τότε **ἀμείωτη**. Ἀλλά στην πραγματικότητα κατά την κίνηση του υλικού σημείου ενεργούν διάφορες αντιστάσεις, που στη διάρκεια μιᾶς περιόδου ἀπορροφούν ἕνα μέρος ἀπὸ τὴν ἐνέργεια τοῦ υλικοῦ σημείου. Ἔτσι ἡ ἐνέργεια τοῦ υλικοῦ σημείου *διαρκῶς ἐλαττώνεται* καὶ ἔπειτα ἀπὸ ὀρισμένο χρόνο γίνεται ἴση μὲ μηδέν ($E_{ολ} = 0$). Τότε τὸ υλικὸ σημεῖο σταματᾷ. Ἐπειδὴ ἡ ἐνέργεια τοῦ υλικοῦ σημείου *διαρκῶς ἐλαττώνεται*, γι' αὐτὸ τὸ πλάτος τῆς ταλαντώσεως γίνεται *διαρκῶς μικρότερο* καὶ τελικὰ γίνεται ἴσο μὲ μηδέν. Ἡ περίοδος ὅμως T τῆς ταλαντώσεως διατηρεῖται *σταθερή* (*). Αὐτὴ ἡ ταλάντωση, πού τὸ πλάτος τῆς *διαρκῶς ἐλαττώνεται*, ονομάζεται **φθίνουσα**.

5. Προβολὴ πάνω σὲ σταθερὸ ἄξονα ἀνύσματος στρεφόμενου ὀμαλά

Ἐνα ἄνυσμα \vec{OA} πού ἔχει μέτρο a στρέφεται γύρω ἀπὸ τὴν ἀρχὴ τοῦ O μὲ σταθερὴ *γωνιακὴ ταχύτητα* ω πάνω στὸ ἐπίπεδο xOy (σχ. 6). Στὴν ἀρχὴ



Σχ. 6. Ἡ προβολὴ A' τοῦ σημείου A πάνω στὸν ἄξονα Oy ἐκτελεῖ ἄρμονικὴ ταλάντωση.

τῶν χρόνων ($t = 0$) τὸ ἄνυσμα \vec{OA} σχηματίζει μὲ τὸν ἄξονα τῶν χρόνων Ox μιὰ γωνία φ (*ἀρχικὴ φάση*). Κατὰ τὴ χρονικὴ στιγμὴ t ἢ *φάση* τῆς κινήσεως τοῦ ἀνύσματος \vec{OA} εἶναι ἡ γωνία $\omega t + \varphi$ καὶ ἡ ἀλγεβρική τιμὴ τῆς προβολῆς OA' τοῦ ἀνύσματος \vec{OA} πάνω στὸν ἄξονα Oy εἶναι:

$$y = a \cdot \eta\mu(\omega t + \varphi)$$

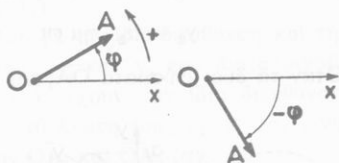
(*) Γιατί εἶναι $f = m \cdot \omega^2 = m \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} = \text{σταθ.}$

Όταν λοιπόν το άνυσμα \vec{OA} στρέφεται ομαλά, ή προβολή A' της άκρης A του άνυσματος \vec{OA} πάνω στον άξονα Oy εκτελεί άρμονική ταλάντωση, δηλαδή ήμυτονοειδή κίνηση που έχει πλάτος a , ίσο με τό μέτρο του άνυσματος \vec{OA} , και περίοδο $T = 2\pi/\omega$ ίση με τήν περίοδο τής κινήσεως του άνυσματος \vec{OA} .

Η άρχική φάση φ μπορεί νά είναι θετική ή άρνητική (σχ. 6α) και τότε ή εξίσωση τής ήμυτονοειδούς κινήσεως είναι :

για $\varphi > 0$ $y = a \cdot \eta\mu(\omega t + \varphi)$

για $\varphi < 0$ $y = a \cdot \eta\mu(\omega t - \varphi)$

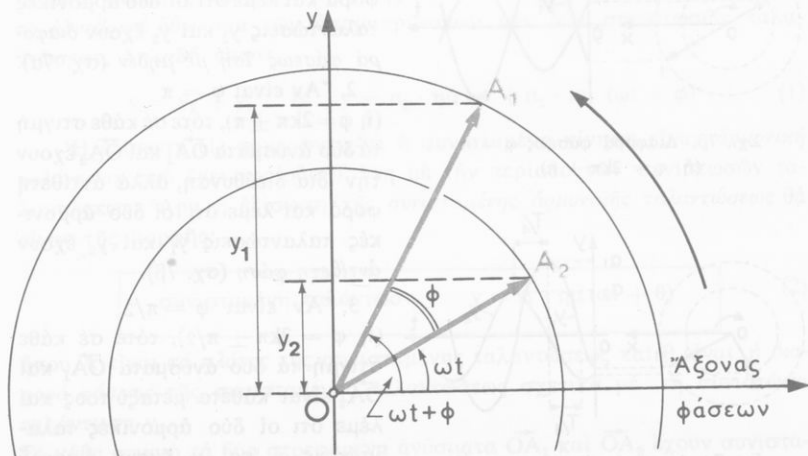


Σχ. 6α. Η άρχική φάση φ μπορεί νά είναι θετική ή άρνητική.

Όστε σε κάθε χρονική στιγμή t ή άλγεβρική τιμή τής προβολής του άνυσματος \vec{OA} πάνω στον άξονα Oy δίνει τήν τιμή τής άπομακρύνσεως y .

6. Διαφορά φάσεως και σύνθεση δύο άρμονικών ταλαντώσεων

Θεωρούμε δύο άνυσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 που αντίστοιχα έχουν μέτρο a_1 και a_2 και στρέφονται πάνω στο ίδιο επίπεδο γύρω από τήν κοινή άρχή τους O με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , επομένως έχουν και τήν ίδια περίοδο T (σχ. 7). Για άπλότητα υποθέτουμε ότι τό άνυσμα \vec{OA}_2 κατά τήν άρχή τών χρόνων ($t = 0$) περνάει από τόν άξονα τών

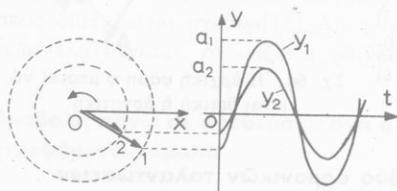


Σχ. 7. Η γωνία φ είναι ή διαφορά φάσεως.

φάσεων Ox . Το άνυσμα \vec{OA}_1 προηγείται πάντοτε από το άνυσμα \vec{OA}_2 κατά μία σταθερή γωνία φ που ονομάζεται *διαφορά φάσεως* μεταξύ των κινήσεων των δύο άνυσμάτων. Κατά μία χρονική στιγμή t ή θέση των άνυσμάτων \vec{OA}_2 και \vec{OA}_1 σχετικά με τον άξονα των φάσεων Ox προσδιορίζεται αντίστοιχα από τις γωνίες ωt και $\omega t + \varphi$. Κατά την ίδια χρονική στιγμή t οι προβολές των δύο άνυσμάτων πάνω στον άξονα Oy καθορίζονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις:

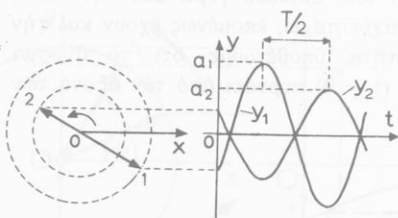
$$y_2 = a_2 \cdot \eta\mu \omega t \quad \text{καί} \quad y_1 = a_1 \cdot \eta\mu (\omega t + \varphi)$$

Όταν τά δύο άνυσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 στρέφονται όμαλά, τότε οι προβολές των άκρων τους A_1 και A_2 πάνω στον άξονα Oy εκτελούν *άρμονική ταλάντωση* με περίοδο $T = 2\pi/\omega$.



Σχ. 7α. Διαφορά φάσεως $\varphi = 0$ (ή $\varphi = 2k\pi$).

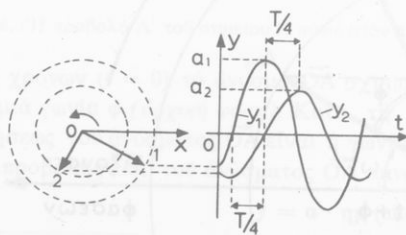
Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι οι δύο άρμονικές ταλαντώσεις έχουν μεταξύ τους *διαφορά φάσεως* φ (rad), ή όποια είναι μέγεθος *σταθερό* γι' αυτές τις δύο ταλαντώσεις.



Σχ. 7β. Διαφορά φάσεως $\varphi = \pi$
(ή $\varphi = 2k\pi \pm \pi$).

Μερικές περιπτώσεις 1. Αν είναι $\varphi = 0$ (ή $\varphi = 2k\pi$), τότε σε κάθε στιγμή τά δύο άνυσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 έχουν την ίδια διεύθυνση και φορά και λέμε ότι οι δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 έχουν *διαφορά φάσεως ίση με μηδέν* (σχ. 7α).

2. Αν είναι $\varphi = \pi$ (ή $\varphi = 2k\pi \pm \pi$), τότε σε κάθε στιγμή τά δύο άνυσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 έχουν την ίδια διεύθυνση, αλλά αντίθετη φορά και λέμε ότι οι δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 έχουν *αντίθετη φάση* (σχ. 7β).



Σχ. 7γ. Διαφορά φάσεως $\varphi = \pi/2$
(ή $\varphi = 2k\pi \pm \pi/2$).

3. Αν είναι $\varphi = \pi/2$ (ή $\varphi = 2k\pi \pm \pi/2$), τότε σε κάθε στιγμή τά δύο άνυσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 είναι κάθετα μεταξύ τους και λέμε ότι οι δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 έχουν *διαφορά φάσεως ίση με $\pi/2$* (σχ. 7γ).

Διαφορά φάσεως και χρονική καθυστέρηση. Στην παράσταση των στρεφόμενων άνυσμάτων $\vec{O\bar{A}}_1$ και $\vec{O\bar{A}}_2$ (σχ. 7) παρατηρούμε ότι στη διαφορά φάσεως φ αντιστοιχεί μία *χρονική καθυστέρηση* ίση με το χρόνο τ που χρειάζεται το στρεφόμενο άνυσμα $\vec{O\bar{A}}_2$ για να πάει από τη θέση που βρίσκεται στη θέση που είναι τώρα το άνυσμα $\vec{O\bar{A}}_1$. Άρα είναι $\tau = \varphi/\omega$. Στη γραφική παράσταση των δύο άρμονικών ταλαντώσεων y_1 και y_2 ή *χρονική καθυστέρηση* τ της μιάς ταλαντώσεως σχετικά με την άλλη μετρείται πάνω στον άξονα των χρόνων Ot (σχ. 7β, 7γ).

α. Σύθεση δύο άρμονικών ταλαντώσεων με την ίδια διεύθυνση και την ίδια περίοδο. Οί δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 που αντιστοιχούν στα δύο στρεφόμενα άνυσματα $\vec{O\bar{A}}_1$ και $\vec{O\bar{A}}_2$ έχουν την ίδια διεύθυνση, την ίδια περίοδο T , διαφορά φάσεως φ και τά πλάτη τους a_1 και a_2 είναι αντίστοιχα ίσα με το μέτρο των άνυσμάτων $\vec{O\bar{A}}_1$ και $\vec{O\bar{A}}_2$ (σχ. 7).

Σε πολλές περιπτώσεις ένα υλικό σημείο με την επίδραση δύο ή περισσότερων αιτίων αναγκάζεται να εκτελέσει *ταυτόχρονα* δύο ή περισσότερες άρμονικές ταλαντώσεις. Τότε το υλικό σημείο εκτελεί μία *συνισταμένη κίνηση* που προκύπτει από την αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων, αν θεωρήσουμε μικρές μετατοπίσεις του υλικού σημείου.

Έστω ότι ένα υλικό σημείο αναγκάζεται να εκτελέσει ταυτόχρονα τις δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 που αντιστοιχούν στα δύο στρεφόμενα άνυσματα $\vec{O\bar{A}}_1$ και $\vec{O\bar{A}}_2$ και εκφράζονται από τις εξισώσεις:

$$y_2 = a_2 \cdot \eta\mu \omega t \quad \text{και} \quad y_1 = a_1 \cdot \eta\mu (\omega t + \varphi)$$

Σε κάθε στιγμή ή *απομάκρυνση* y της συνισταμένης κινήσεως είναι ίση με το *άλγεβρικό άθροισμα* των απομακρύνσεων των δύο συνιστωσών ταλαντώσεων, δηλαδή είναι:

$$y = y_2 + y_1 \quad \text{ή} \quad y = a_2 \cdot \eta\mu \omega t + a_1 \cdot \eta\mu (\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) φανερώνει ότι ή συνισταμένη κίνηση είναι *άρμονική ταλάντωση* που έχει περίοδο T ίση με την περίοδο των συνιστωσών ταλαντώσεων. Άρα ή εξίσωση της *συνισταμένης άρμονικής ταλαντώσεως* θά είναι της μορφής:

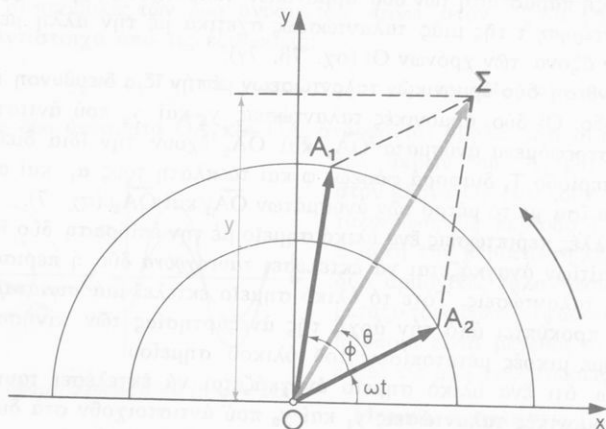
$$\text{συνισταμένη ταλάντωση} \quad y = A \cdot \eta\mu (\omega t + \theta) \quad (2)$$

όπου A είναι τό πλάτος της συνισταμένης ταλαντώσεως και θ είναι ή *διαφορά φάσεως* της συνισταμένης ταλαντώσεως σχετικά με τη συνιστώσα ταλάντωση y_2 .

Σε κάθε στιγμή τά δύο στρεφόμενα άνυσματα $\vec{O\bar{A}}_1$ και $\vec{O\bar{A}}_2$ έχουν συνισταμένη τό *γεωμετρικό άθροισμα* $\vec{O\bar{\Sigma}}$ των δύο άνυσμάτων (σχ. 8). Τό άνυσμα

$\vec{O}\Sigma$ έχει σταθερό μέτρο A ίσο με τό πλάτος της συνισταμένης ταλαντώσεως και δίνεται από τή γνωστή εξίσωση τής συνισταμένης δύο άνυσμάτων:

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cdot \sin \varphi} \quad (3)$$



Σχ. 8. Τά άνυσματα $\vec{O}\vec{A}_1$ και $\vec{O}\vec{A}_2$ έχουν συνισταμένη τό άνυσμα $\vec{O}\vec{\Sigma}$.

*Αν εξισώσουμε τά δεύτερα μέλη τών εξισώσεων (1) και (2) έχουμε:

$$A \cdot \eta\mu(\omega t + \theta) = a_2 \cdot \eta\mu \omega t + a_1 \cdot \eta\mu(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

Στήν εξίσωση (4) βάζουμε διαδοχικά $t = 0$ και $\omega t = \pi/2$.

*Έτσι παίρνουμε αντίστοιχα τίσ εξισώσεις:

$$A \cdot \eta\mu \theta = a_1 \cdot \eta\mu \varphi \quad (5)$$

$$A \cdot \sin \theta = a_2 + a_1 \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

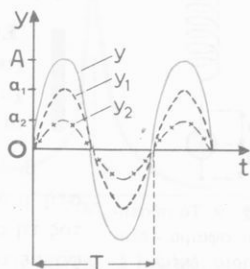
*Αν διαιρέσουμε κατά μέλη τίσ εξισώσεις (5) και (6) βρίσκουμε ότι η διαφορά φάσεως θ τής συνισταμένης άρμονικής ταλαντώσεως δίνεται από τήν εξίσωση:

$$\text{διαφορά φάσεως} \\ \text{συνισταμένης ταλαντώσεως} \quad \epsilon\varphi \theta = \frac{a_1 \cdot \eta\mu \varphi}{a_2 + a_1 \cdot \sin \varphi} \quad (7)$$

Δύο ένδιφέρουσες μερικές περιπτώσεις. *Από τήν εξίσωση (3) συνάγεται ότι:

1. αν είναι $\varphi = 0$ (ή $\varphi = 2k\pi$), τότε είναι: $A = a_1 + a_2$
2. αν είναι $\varphi = \pi$ (ή $\varphi = 2k\pi \pm \pi$), τότε είναι: $A = a_1 - a_2$

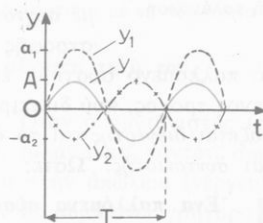
Στό σχήμα 8α δείχνεται γραφικά ή σύνθεση δύο άρμονικών ταλαντώσεων με διαφορετικό πλάτος. Αν τα πλάτη των συνιστασών ταλαντώσεων είναι ίσα ($a_1 = a_2 = a$), τότε για $\varphi = 0$ είναι $A = 2a$ και για $\varphi = \pi$ είναι $A = 0$. Στήν τελευταία περίπτωση ($\varphi = \pi$) το υλικό σημείο μένει ακίνητο.



Γενικό συμπέρασμα. Από τα παραπάνω καταλήγουμε στο ακόλουθο συμπέρασμα:

Η συνισταμένη κίνηση δύο άρμονικών ταλαντώσεων, που έχουν την ίδια διεύθυνση και την ίδια περίοδο (T), είναι άρμονική ταλάντωση με περίοδο ίση με την περίοδο που έχουν οι συνιστώσες ταλαντώσεις.

Σημείωση. Τα στρεφόμενα ανύσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 που θεωρήσαμε παραπάνω μπορεί να αντιστιχοῦν σε οποιοδήποτε φυσικό μέγεθος που μεταβάλλεται ήμυονοειδῶς σε συνάρτηση με τό χρόνο t. Σε άλλα κεφάλαια θά γνωρίσουμε τέτοια φυσικά μεγέθη.

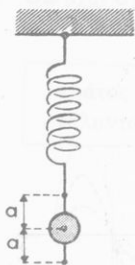


Σχ. 8α. Σύνθεση δύο άρμονικών ταλαντώσεων y_1 και y_2 και ή συνισταμένη ταλάντωση y ($\varphi = 0, \varphi = \pi$)

7. Έλεύθερη και εξαναγκασμένη ταλάντωση

α. Έλεύθερη ταλάντωση. Η μιά άκρη σπειροειδούς ελατηρίου είναι σταθερά στερεωμένη, ενώ στήν άλλη άκρη του υπάρχει μιά μεταλλική σφαίρα (σχ. 9). Απομακρύνουμε τή σφαίρα κατακόρυφα πρὸς τά κάτω από τή θέση ισορροπίας της και τήν αφήνουμε ελεύθερη. Η σφαίρα εκτελεί άρμυονική ταλάντωση. Η συχνότητα ν_0 τής ταλαντώσεως είναι σταθερή και ονομάζεται ιδιοσυχνότητα του παλλόμενου συστήματος «σφαίρα-ελατήριο».

Όταν απομακρύνουμε τή σφαίρα από τή θέση ισορροπίας της, τό παλλόμενο σύστημα αποκτῆ ένα απόθεμα δυναμικής ενέργειας. Τό σύστημα, όταν τό αφήσουμε ελεύθερο, κινείται ὡσπου νά εξαντληθεῖ τό αρχικό απόθεμα τής δυναμικής ενέργειας, εξαιτίας των αντίστάσεων



Σχ. 9. Τό σύστημα σφαίρα - ελατήριο εκτελεί ελεύθερη αρμονική ταλάντωση.

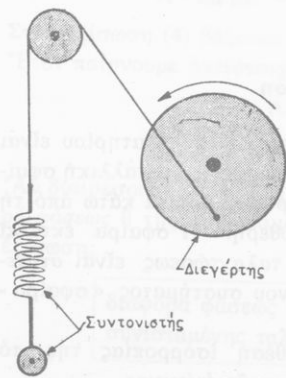
πού δημιουργεί τό εξωτερικό περιβάλλον. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι τό παλλόμενο σύστημα εκτελεί **ελεύθερη ταλάντωση**. "Ωστε:

■ "Ένα παλλόμενο σύστημα, όταν πάρει απέξω μιά αρχική ενέργεια, εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση με τή χαρακτηριστική γιά τό σύστημα αυτό ιδιοσυχνότητα (ν_0).

β. Έξαναγκασμένη ταλάντωση. Δένουμε τό ελατήριο στή μιά άκρη νήματος και τήν άλλη άκρη τοῦ νήματος τή στερεώνουμε σέ έναν τροχό (σχ. 10). "Όταν στρέφουμε τόν τροχό, τότε στό παλλόμενο σύστημα (ελατήριο - σφαίρα) περιοδικά εξασκεΐται μιά *εξωτερική δύναμη με συχνότητα ν* πού εΐναι ίση με τή συχνότητα περιστροφής τοῦ τροχοῦ. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι τό παλλόμενο σύστημα εκτελεί **εξαναγκασμένη ταλάντωση**. "Ο στρεφόμενος τροχός, πού διεγείρει τό παλλόμενο σύστημα πρὸς κίνηση, ονομάζεται *διεγέρτης* και τό σύστημα πού διεγείρεται πρὸς κίνηση ονομάζεται *συντονιστής*. "Ωστε:

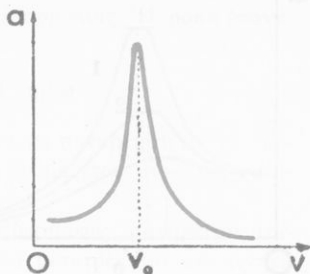
■ "Ένα παλλόμενο σύστημα (συντονιστής) πού έχει ιδιοσυχνότητα ν_0 , μπορεί νά εκτελέσει και εξαναγκασμένη ταλάντωση με συχνότητα ν ίση με τή συχνότητα πού έχει κάθε φορά ὁ διεγέρτης.

γ. Συντονισμός. "Όταν ἡ συχνότητα ν τοῦ διεγέρτη (στρεφόμενος τροχός) διαφέρει πολύ ἀπό τήν ιδιοσυχνότητα ν_0 τοῦ συντονιστή (παλλόμενο σύστημα), τό πλάτος τῆς εξαναγκασμένης ταλαντώσεως εΐναι *πολύ μικρό*. "Αν ὅμως ἡ συχνότητα ν τοῦ διεγέρτη συνεχῶς πλησιάζει πρὸς τήν ιδιοσυχνότητα ν_0 τοῦ συντονιστή, τότε τό πλάτος τῶν εξαναγκασμένων ταλαντώσεων τοῦ συντονιστή *συνεχῶς ἀξάνει* και ὅταν ἡ συχνότητα ν τοῦ διεγέρτη γίνει *ίση με τήν ιδιοσυχνότητα ν_0* τοῦ συντονιστή, τό πλάτος τῆς εξαναγκασμένης ταλαντώσεως τοῦ συντονιστή γίνεται *μέγιστο*. Τότε λέμε ότι ὁ διεγέρτης και ὁ συντονιστής βρίσκονται σέ **συντονισμό**. "Αν ἡ συχνότητα ν τοῦ διεγέρτη παίρνει τιμές συνεχῶς μεγαλύτερες ἀπό τήν ιδιοσυχνότητα



Σχ. 10. Τό σύστημα σφαίρα - ελατήριο εκτελεί εξαναγκασμένη ταλάντωση.

ν_0 του συντονιστή, τό πλάτος τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως συνεχώς ελαττώνεται. Ἡ μεταβολή τοῦ πλάτους a τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως σέ συνάρτηση μέ τή συχνότητα ν τοῦ διεγέρτη δείχεται ἀπό τήν καμπύλη συντονισμοῦ (σχ. 11). Παρατηροῦμε ὅτι ἡ καμπύλη συντονισμοῦ παρουσιάζει αἰχμή, ὅταν ὑπάρχει συντονισμός ($\nu = \nu_0$). Ὡστε:



Σχ. 11. Μεταβολή τοῦ πλάτους a τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως σέ συνάρτηση μέ τή συχνότητα ν .

Μεταξύ τοῦ διεγέρτη καί τοῦ συντονιστή ὑπάρχει συντονισμός, ὅταν ἡ συχνότητα ν τοῦ διεγέρτη εἶναι ἴση μέ τήν ἰδιοσυχνότητα ν_0 τοῦ συντονιστή· τότε τό πλάτος τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως τοῦ συντονιστή παίρνει τή μέγιστη τιμή του.

Ἐπίδραση τής ἀπόσβεσεως τοῦ συντονιστή. Ὄταν ὁ συντονιστής (τό παλλόμενο σύστημα) ἐκτελεῖ τήν εξαναγκασμένη ταλάντωση, πάντοτε συμβαίνει ἀπόσβεση τής ταλαντώσεως, πού ὀφείλεται στήν ἀπώλεια ἐνέργειας ἐξαιτίας τῶν ἀντιστάσεων. Ἡ ἀπόσβεση μπορεῖ νά συμβαίνει γρήγορα ἢ ἄργά, ἀνάλογα μέ τίς ἀντιστάσεις πού παρουσιάζει τό ἐξωτερικό περιβάλλον. Πειραματικά ἀποδεικνύονται τά ἀκόλουθα:

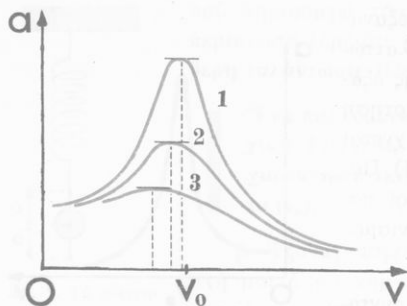
I. Ὄταν ἡ ἀπόσβεση τοῦ συντονιστή εἶναι πολύ μικρή, ὁ συντονιστής διεγείρεται μόνο ἀπό μιά πολύ μικρή περιοχή συχνοτήτων καί τό πλάτος τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως εἶναι πολύ μεγάλο (ὀξὺς συντονισμός).

II. Ὄταν ἡ ἀπόσβεση τοῦ συντονιστή εἶναι πολύ μεγάλη, ὁ συντονιστής διεγείρεται καί ἐκτελεῖ εξαναγκασμένες ταλαντώσεις μικροῦ πλάτους, ὅποιαδήποτε κι' ἂν εἶναι ἡ συχνότητα ν τοῦ διεγέρτη (σχ. 12).

Ἐφαρμογές τοῦ συντονισμοῦ. Ἀναφέρουμε μερικά παραδείγματα συντονισμοῦ:

1) Στή ναυπηγική φροντίζουμε ἡ ἰδιοσυχνότητα τοῦ σκάφους νά εἶναι πολύ μεγαλύτερη ἀπό τή συχνότητα τοῦ κυματισμοῦ τής θάλασσας, γιά νά ἀποφεύγεται ὁ μέγας κλυδωνισμός τοῦ σκάφους.

2) Στή βιομηχανία γιά τή μέτρηση συχνοτήτων χρησιμοποιοῦμε τά *συχνόμετρα*, πού ἡ λειτουργία τους στηρίζεται στό φαινόμενο τοῦ συντονισμοῦ.



Σχ. 12. Η καμπύλη συντονισμού, όταν η απόσβεση του συντονιστή είναι μικρή (1), μέτρια (2) ή μεγάλη (3).

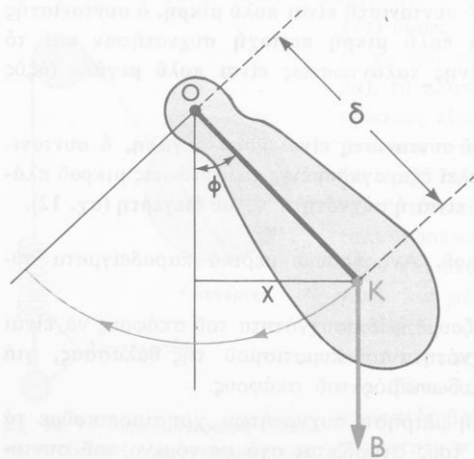
3) Συντονιστές με πολύ μεγάλη απόσβεση είναι τό τύμπανο του αυτιού μας και η μεμβράνη του ακουστικού του τηλεφώνου, του μικροφώνου και του μεγαφώνου.

Αυτοί οι συντονιστές έχουν πολύ μεγάλη ιδιοσυχνότητα για να διεγείρονται από μεγάλη κλίμακα συχνοτήτων. Το πλάτος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης είναι μικρό, αλλά είναι σχεδόν ανεξάρτητο από τη συχνότητα του διεγέρτη (σχ. 12).

Παρατήρηση. Τά φαινόμενα των εξαναγκασμένων ταλαντώσεων και του συντονισμού είναι ειδικά φαινόμενα των ταλαντώσεων, που εμφανίζονται σε όρισμένα παλλόμενα μηχανικά συστήματα (μηχανικές ταλαντώσεις) και σε όρισμένα ηλεκτρικά κυκλώματα (ηλεκτρικές ταλαντώσεις).

8. Φυσικό έκκρεμές

Όνομάζουμε *φυσικό έκκρεμές* ένα στερεό σώμα που μπορεί να στρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα O που δέν περνάει από τό κέντρο βάρους K του σώματος (σχ. 13). Απομακρύνουμε τό σώμα από τή θέση ισορροπίας του



Σχ. 13. Φυσικό έκκρεμές.

κατά μία γωνία ϕ και έπειτα τό αφήνουμε ελεύθερο. Παρατηρούμε ότι τό σώμα εκτελεί *αιωρήσεις*. Υποθέτουμε ότι τό κέντρο βάρους K του σώματος κινείται πάντοτε πάνω στό ίδιο κατακόρυφο επίπεδο, που περνάει από τό φορέα του βάρους \vec{B} του σώματος και από τό σημείο O . Η απόσταση του κέντρου βάρους K από τόν άξονα περιστροφής O είναι $OK = \delta$.

Όταν τό σώμα έχει απομακρυνθεί από τή θέση

ἰσορροπίας του κατὰ γωνία φ , τότε τὸ βάρος \vec{B} τοῦ σώματος δημιουργεῖ μιὰ ροπή ἐπαναφορᾶς τοῦ σώματος στὴ θέση ἰσορροπίας. Ἡ ροπή ἐπαναφορᾶς ἔχει μέτρο:

$$M = B \cdot x \quad \eta \quad M = B \cdot \delta \cdot \eta \mu \varphi$$

Ἡ ροπή ἐπαναφορᾶς M μεταβάλλεται περιοδικὰ σὲ συνάρτηση μὲ τὸ χρόνο t . Αὐτὴ ἡ κίνηση τοῦ φυσικοῦ ἐκκρεμοῦς ὀνομάζεται *στροφικὴ ταλάντωση*.

Ὅταν δὲν ὑπάρχουν τριβές τὸ πλάτος τῆς αἰωρήσεως διατηρεῖται σταθερό, γιατί διαδοχικὰ ὅλη ἡ δυναμικὴ ἐνέργεια μετατρέπεται σὲ κινητικὴ ἐνέργεια καὶ ἀντίστροφα.

Τὸ σῶμα ἔχει μάζα m , ροπή ἀδράνειας Θ ὡς πρὸς τὸν ἄξονα περιστροφῆς. Ἀποδεικνύεται ὅτι ἡ περίοδος T τοῦ φυσικοῦ ἐκκρεμοῦς δίνεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

$$\text{περίοδος φυσικοῦ ἐκκρεμοῦς} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{\Theta}{m \cdot \delta \cdot g}} \quad (1)$$

α. Ἰσόχρονο ἀπλό ἐκκρεμές. Τὰ ἐκκρεμῆ πού χρησιμοποιοῦμε εἶναι φυσικὰ ἐκκρεμῆ, πού εὐκόλα ὁμως ἀνάγονται σὲ ἀπλά ἐκκρεμῆ. Ἐνα φυσικὸ ἐκκρεμές ἔχει περίοδο T , πού ὀρίζεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση (1). Ἐνα ἀπλό ἐκκρεμές πού ἔχει *τὴν ἴδια περίοδο* T μὲ τὸ φυσικὸ ἐκκρεμές ἔχει μῆκος l καὶ ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\text{περίοδος ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2)$$

Ἀπὸ τίς ἐξισώσεις (1) καὶ (2) βρίσκουμε ὅτι τὸ μῆκος l τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς πού εἶναι ἰσόχρονο μὲ τὸ φυσικὸ ἐκκρεμές εἶναι:

$$\text{μῆκος ἰσόχρονου ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς} \quad l = \frac{\Theta}{m \cdot \delta}$$

β. Ἐφαρμογές τοῦ ἐκκρεμοῦς. Ἐπειδὴ οἱ αἰωρήσεις μικροῦ πλάτους εἶναι ἰσόχρονες, γι' αὐτὸ χρησιμοποιοῦμε τὸ ἐκκρεμές γιὰ *τὴν μέτρηση τοῦ χρόνου* (ρολόγια μὲ ἐκκρεμῆ). Ἐξαιτίας τῶν ἀντιστάσεων τὸ πλάτος τῆς αἰωρήσεως διαρκῶς ἐλαττώνεται (*φθίνουσα ταλάντωση*) καὶ ἔπειτα ἀπὸ λίγο χρόνο τὸ ἐκκρεμές σταματᾷ. Γιὰ νὰ διατηρήσουμε σταθερὸ τὸ πλάτος τῆς αἰωρήσεως, φροντίζουμε μὲ ἕναν κατάλληλο μηχανισμό (συνήθως μὲ

ελατήριο) να δίνουμε στο έκκρεμές την ενέργεια που χάνει μέσα σε κάθε περίοδο εξαιτίας των αντίστασεων.

Τό έκκρεμές τό χρησιμοποιούμε καί γιά τή μέτρηση τής τιμής του g σε έναν τόπο. Αν ξέρουμε τό μήκος l του ισόχρονου άπλου έκκρεμους, τότε από τήν εξίσωση (2) βρίσκουμε ότι ή επιτάχυνση τής βαρύτητας σ' έναν τόπο έχει μέτρο:

$$g = \frac{4\pi^2 \cdot l}{T^2}$$



Σχ. 14. Ο αιώτης του ρολογιού εκτελεί στροφική ταλάντωση.

Παρατήρηση. Στα συνηθισμένα χρονόμετρα (ρολόγια) υπάρχει ειδικό σύστημα που ονομάζεται *αιωρητής* και εκτελεί στροφική ταλάντωση (σχ. 14). Σε ένα ισχυρό σπειροειδές ελατήριο αποταμιεύεται μέ τό κούρδισμα δυναμική ενέργεια, που προσφέρεται ρυθμικά στον αιώρητή, για να διατηρεί σταθερό τό πλάτος τής ταλάντωσης του.

Μόνο μέ αυτή τή μέθοδο βρίσκουμε τήν άκριβή τιμή του g στους διάφορους τόπους. Έτσι βρήκαμε ότι στην επιφάνεια τής θάλασσας είναι:

στόν ισημερινό	$g = 9,78 \text{ m/sec}^2$
σε γεωγραφικό πλάτος 45°	$g = 9,81 \text{ m/sec}^2$
στόν πόλο	$g = 9,83 \text{ m/sec}^2$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

α. Άρμονική ταλάντωση

1. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει πλάτος 20 cm και περίοδο 2 sec. Να βρεθούν: 1) ή μέγιστη ταχύτητα που άποκτά τό ύλικό σημείο· 2) ή άπομάκρυνσή του κατά τή χρονική στιγμή $t = 0,25 \text{ sec}$ και ή ταχύτητα και ή επιτάχυνσή του αυτή τή στιγμή.

2. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει πλάτος 10 cm. Η μέγιστη τιμή τής ταχύτητάς του είναι 1 m/sec. Πόση είναι ή περίοδος τής κινήσεως και πόση είναι ή άπομάκρυνση του ύλικού σημείου κατά τή χρονική στιγμή $t = 4 \text{ sec}$;

3. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση και σε μία στιγμή ή άπομάκρυνσή του είναι 1 m και ή επιτάχυνση είναι 4 cm/sec^2 . Πόση είναι ή περίοδος;

4. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει πλάτος 10 cm και περίοδο 0,6 sec. Πόση είναι ή ταχύτητά του κατά τή στιγμή $t = 0,525 \text{ sec}$;

5. Νά βρεθεί η περίοδος της άρμονικής ταλαντώσεως ενός ύλικου σημείου που έχει επιτάχυνση 64 cm/sec^2 , όταν η απομάκρυνσή του είναι 16 cm .

6. Νά αποδειχτεί ότι στην άρμονική ταλάντωση ισχύει η εξίσωση :

$$v = \omega \sqrt{a^2 - y^2}$$

7. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει πλάτος 5 cm και περίοδο 2 sec . Νά γραφούν οι εξισώσεις της απομακρύνσεως, της ταχύτητας και της επιτάχυνσεως.

8. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει εξίσωση $y = 5 \cdot \eta\mu 10t$. Νά βρεθεί η περίοδος και η συχνότητα της ταλαντώσεως.

9. Ένα ύλικό σημείο έχει μάζα $0,1 \text{ kg}$ και εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει πλάτος $0,05 \text{ m}$ και περίοδο 2 sec . Νά βρεθεί η δύναμη που ενεργεί στο ύλικό σημείο, όταν η απομάκρυνση είναι $0,02 \text{ m}$.

10. Ένα ύλικό σημείο έχει μάζα $0,002 \text{ kg}$ και εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει πλάτος $0,05 \text{ m}$ και συχνότητα 10 Hz . Νά βρεθεί η μέγιστη τιμή που έχει η δύναμη επαναφοράς και πόση είναι κατ' απόλυτη τιμή η δύναμη αυτή, όταν η απομάκρυνση είναι $0,01 \text{ m}$.

11. Ένα ύλικό σημείο έχει μάζα $2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ και εκτελεί άρμονική ταλάντωση που έχει πλάτος $0,05 \text{ m}$ και συχνότητα 10 Hz . 1) Πόση είναι η μέγιστη κινητική ενέργεια που αποκτά το ύλικό σημείο; 2) Η ταχύτητα σε συνάρτηση με την απομάκρυνση δίνεται από την εξίσωση $v = \omega \sqrt{a^2 - y^2}$. Πόση είναι η κινητική και η δυναμική ενέργεια του ύλικού σημείου, όταν η απομάκρυνσή του είναι $0,03 \text{ m}$;

β. Άπλό έκκρεμές

12. Ένα άπλο έκκρεμές έχει μήκος 6 m και εκτελεί αιωρήσεις σε τόπο, όπου είναι $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$. Πόσες αιωρήσεις εκτελεί κατά λεπτό;

13. Ένα άπλο έκκρεμές εκτελεί 60 αιωρήσεις κατά λεπτό. Κατά πόσα εκατοστόμετρα πρέπει να ελαττωθεί το μήκος του, για να εκτελεί 90 αιωρήσεις κατά λεπτό;

14. Ένα άπλο έκκρεμές έχει μήκος 98 cm και περίοδο 2 sec . Πόση είναι η τιμή του g στον τόπο που βρίσκεται το έκκρεμές;

15. Σε έναν τόπο, όπου είναι $g = 9,80 \text{ m/sec}^2$, πόσο μήκος πρέπει να έχει ένα έκκρεμές που η περιόδός του είναι 1 min ;

16. Ένα άπλο έκκρεμές έχει μήκος l και περίοδο 2 sec σε έναν τόπο Α, όπου είναι $g = 980 \text{ cm/sec}^2$. Πόση είναι η περίοδος αυτού του έκκρεμου σε έναν ισημερινό ($g_{\text{ισ}} = 978 \text{ cm/sec}^2$) και στον πόλο ($g_{\text{πολ}} = 983 \text{ cm/sec}^2$);

17. Το έκκρεμές ενός ρολογιού θεωρείται άπλο έκκρεμές που έχει περίοδο 2 sec , όταν το έκκρεμές βρίσκεται σε έναν τόπο Α, όπου είναι $g_A = 980 \text{ cm/sec}^2$. Πόσο θα καθυστερεί το ρολόγι μέσα σε 24 ώρες, αν μεταφερθεί σε έναν τόπο Β, όπου είναι $g_B = 974 \text{ cm/sec}^2$;

18. Ένα άπλο έκκρεμές μήκους 150 cm εκτελεί 100 αιωρήσεις μέσα σε 246 sec . Πόση είναι η τιμή του g σ' αυτό τον τόπο;

γ. Σύνθεση ταλαντώσεων

19. Ένα υλικό σημείο εκτελεί ταυτόχρονα δύο αρμονικές ταλαντώσεις, που έχουν το ίδιο πλάτος $a = 10 \text{ cm}$, την ίδια περίοδο και διαφορά φάσεως φ . Το πλάτος A της συνισταμένης ταλαντώσεως δίνεται από την εξίσωση $A = 2a \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$. 1) Νά βρεθούν οι τιμές που παίρνει το πλάτος A της συνισταμένης ταλαντώσεως, όταν η διαφορά φάσεως φ παίρνει τις τιμές $0, \pi/2, 2\pi/3$ και π . 2) Για ποιά τιμή του φ το πλάτος A της συνισταμένης ταλαντώσεως είναι ίσο με $a/\sqrt{3}$;

20. Δύο αρμονικές ταλαντώσεις έχουν την ίδια περίοδο και αντίστοιχο πλάτος $a = 2 \text{ cm}$ και $\beta = 3 \text{ cm}$. Η διαφορά φάσεως είναι $\varphi = 60^\circ$. Πόσο είναι το πλάτος της συνισταμένης ταλαντώσεως;

21. Δύο αρμονικές ταλαντώσεις έχουν την ίδια περίοδο και αντίστοιχο πλάτος $a = 3 \text{ cm}$ και $\beta = 5 \text{ cm}$. Η συνισταμένη ταλάντωση έχει πλάτος $A = 6 \text{ cm}$. Πόση είναι η διαφορά φάσεως μεταξύ των δύο συνιστωσών κινήσεων;

22. Ένα άπλο έκκρεμές έχει μήκος $l = 60 \text{ cm}$ και βρίσκεται σε έναν τόπο, όπου είναι $g = 980 \text{ cm/sec}^2$. Πόση είναι η συχνότητα που διεγείρει το έκκρεμές, ώστε να υπάρχει συντονισμός;

δ. Φυσικό έκκρεμές

23. Μιά ομογενής μεταλλική ράβδος έχει μήκος $L = 90 \text{ cm}$ και αιωρείται ως φυσικό έκκρεμές γύρω από τον οριζόντιο άξονα που απέχει 15 cm από την ανώτερη άκρη της ράβδου. Η ροπή αδράνειας Θ της ράβδου ως προς τον άξονα περιστροφής δίνεται από την εξίσωση: $\Theta = \frac{1}{12} mL^2 + m\delta^2$, όπου m είναι η μάζα της ράβδου και δ η απόσταση του κέντρου βάρους της από τον άξονα περιστροφής. 1) Πόση είναι η περίοδος αυτού του φυσικού έκκρεμου; 2) Πόσο είναι το μήκος του άπλου ισόχρονου έκκρεμου; $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$.

24. Ένα φυσικό έκκρεμές αποτελείται από ισόπλευρο τρίγωνο $AB\Gamma$, που έχει άσημαντη μάζα και πλευρά 10 cm . Το έκκρεμές αιωρείται γύρω από οριζόντιο άξονα που περνάει από την κορυφή A και είναι κάθετος στο επίπεδο του τριγώνου. Σε καθεμία από τις άλλες δύο κορυφές του τριγώνου είναι στερεωμένη μία μάζα m . Πόση είναι η περίοδος; Πόσο είναι το μήκος του ισόχρονου άπλου έκκρεμου;

25. Μιά σφαίρα έχει μάζα m , ακτίνα R και αιωρείται γύρω από οριζόντιο άξονα, που είναι εφαπτόμενος της σφαίρας. Η ροπή αδράνειας Θ της σφαίρας ως προς τον άξονα περιστροφής είναι $\Theta = \frac{7}{5} mR^2$. Πόση είναι η περίοδος και πόσο είναι το μήκος του ισόχρονου άπλου έκκρεμου;

Κύματα

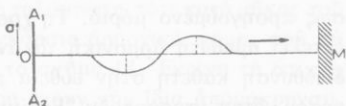
9. Διάδοση ενέργειας με κύματα

Σέ ένα στερεό ελαστικό σῶμα ὅλα τὰ ὑλικά σημεῖα του, δηλαδή τὰ μόρια του, εἶναι ὅμοια μεταξύ τους καί καθένα ἀπό αὐτά συνδέεται μέ ὅλα τὰ γύρω του μόρια μέ δυνάμεις ελαστικότητας (*μοριακές δυνάμεις*). Ἄν ἕνα μόριο Α τοῦ σώματος ἐκτελεῖ *ἀρμονική ταλάντωση* μέ συχνότητα ν , τότε ἐξαιτίας τῶν συνδέσμων πού ὑπάρχουν, ὅλα τὰ μόρια γύρω ἀπό τό μόριο Α ἀναγκάζονται νά ἐκτελέσουν τήν ἴδια *ἀρμονική ταλάντωση* πού ἐκτελεῖ καί τό μόριο Α. Καθένα ἀπό αὐτά τὰ μόρια ἀναγκάζει τὰ γειτονικά του μόρια νά κινηθοῦν καί ἔτσι μέσα στό ελαστικό σῶμα συμβαίνει *διάδοση μιᾶς ταλαντώσεως* ἀπό τό ἕνα μόριο στό ἄλλο. Ἀλλά κατά τή διάδοση αὐτή *μεταφέρεται ἐνέργεια* ἀπό τό ἕνα στό ἄλλο μόριο τοῦ σώματος. Ὅταν μέσα στό ελαστικό μέσο συμβαίνει μετάδοση ἐνέργειας ἀπό τό ἕνα στό ἄλλο μόριο μέ τέτοιο τρόπο, τότε λέμε ὅτι μέσα στό ελαστικό σῶμα διαδίδεται ἕνα *κύμα ελαστικότητας* ἢ *μηχανικό κύμα*. Ἡ πιό σημαντική κατηγορία κυμάτων εἶναι τὰ *ἀρμονικά* ἢ *ἡμιτονοειδή κύματα* στά ὁποῖα ὅλα τὰ σημεῖα τοῦ ελαστικοῦ μέσου ἐκτελοῦν ἀρμονική ταλάντωση συχνότητας ν . Ἀπό τὰ παραπάνω καταλήγουμε στό ἐξῆς συμπέρασμα:

Κύμα ὀνομάζουμε τό μηχανισμό διαδόσεως μιᾶς ταλαντώσεως μέσα σέ ἕνα ελαστικό μέσο καί μέ αὐτό τόν τρόπο γίνεται μεταφορά ἐνέργειας ἀπό τό ἕνα στό ἄλλο σημεῖο τοῦ ελαστικοῦ μέσου (κύμα ελαστικότητας).

10. Ἐγκάρσια καί διαμήκη κύματα

α. Ἐγκάρσια κύματα. Τή μιᾶ ἄκρη μακριᾶς χορδῆς ἀπό καουτσούκ τή στερεώνουμε σταθερά καί τήν ἄλλη ἄκρη τήν κρατᾶμε μέ τό χέρι μας (σχ. 15). Τεντώνουμε ἐλαφρά τή χορδή καί γρήγορα ἀναγκάζουμε τήν ἄκρη Ο τῆς χορδῆς νά ἐκτελέσει γιά μιᾶ φορά τή διαδρομή OA_1A_2O . Παρατηροῦμε ὅτι κατά μήκος τῆς χορδῆς διαδίδεται μιᾶ κυματοειδῆς ελαστική παραμόρφωση. Αὐτό συμβαίνει γιατί τὰ μόρια τῆς χορδῆς, ἐξαιτίας τῶν ελαστικῶν συνδέσμων πού ὑπάρχουν, ἀναγκάζονται νά ἐκτελέσουν *διαδοχικά* τήν ἴδια κίνηση πού ἔκαμε τό σημεῖο Ο. Ὡστε κατά μήκος τῆς χορδῆς διαδίδεται ἕνα *κύμα*. Ἡ διατάραξη προχωρεῖ



Σχ. 15. Διάδοση ἐγκάρσιου κύματος

κατά μήκος της χορδής με *ορισμένη ταχύτητα* (c). Κάθε μόριο της χορδής κινείται *κάθετα* στη διεύθυνση διαδόσεως του κύματος. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι κατά μήκος της χορδής διαδίδεται *εγκάρσιο κύμα*. "Ωστε:

Στά εγκάρσια κύματα *τά μόρια του ελαστικού μέσου κινούνται κάθετα στη διεύθυνση διαδόσεως του κύματος.*

β. Διαμήκη κύματα. Τή μιá άκρη σπειροειδούς ελατηρίου τή στερεώνουμε σταθερά και τήν άλλη άκρη τήν κρατάμε με τό χέρι μας (σχ. 16). "Όταν διατηρούμε τό ελατήριο ελαφρά τεντωμένο, προκαλούμε άπότομα συμπίεση και έπειτα άραίωση τών πρώτων σπειρών. Παρατηρούμε ότι ή διατάραξη πού προκαλέσαμε στίς πρώτες σπείρες διαδίδεται κατά μήκος του ελατηρίου με *ορισμένη ταχύτητα* (c). Καθεμιá σπείρα



Σχ. 16. Στο τεντωμένο ελατήριο διαδίδονται διαμήκη κύματα.

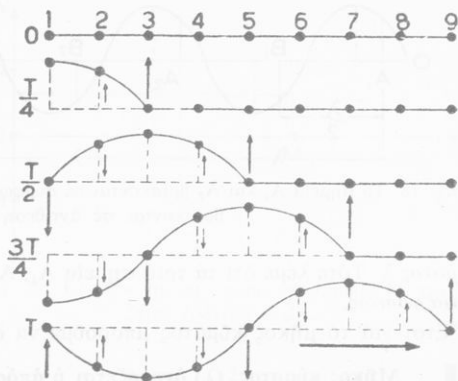
διαδοχικά πάλλεται παράλληλα με τή διεύθυνση διαδόσεως του κύματος. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι κατά μήκος του ελατηρίου διαδίδονται *διαμήκη κύματα*.

Στά διαμήκη κύματα *τά μόρια του ελαστικού μέσου κινούνται παράλληλα με τή διεύθυνση διαδόσεως του κύματος.*

II. Μήκος κύματος και εξίσωση τών κυμάτων

Θεωρούμε μιá σειρά μορίων του γραμμικού ελαστικού μέσου, πού άρχικά ισορροπούν πάνω σέ μιá ευθεία γραμμή (σχ. 17). "Επειδή τά μόρια κάθε σώματος έχουν άδράνεια, γι' αυτό πάντοτε μεσολαβεί ένας ελάχιστος χρόνος, ώσπου νά άρχίσει τήν κίνησή του τό έπόμενο γειτονικό μόριο. "Ας υποθέσουμε ότι στό ελαστικό μέσο πού πήραμε κάθε μόριο άρχίζει νά κινείται άφού περάσει χρόνος $T/8$ από τή στιγμή πού ξεκίνησε τό άμέσως προηγούμενο μόριο. Τή χρονική στιγμή $t = 0$ τό μόριο 1 άρχίζει νά εκτελεί άμείωτη άρμονική ταλάντωση πού έχει περιοδο T , πλάτος a και διεύθυνση κάθετη στήν ευθεία πού βρίσκονται τά σημεία του ελαστικού μέσου, όταν ισορροπούν. "Εκείνη τή στιγμή (δηλαδή όταν είναι $t = 0$) άρχίζει ή διάδοση τής άρμονικής ταλαντώσεως από τό ένα μόριο στό άλλο κατά μήκος του ελαστικού μέσου. Στή διάρκεια μιáς περιόδου T , δηλαδή τή χρονική στιγμή $t = T$ ή διάδοση τής άρμονικής ταλαντώσεως έχει φτάσει στό μόριο 9 πού αυτή τή στιγμή άρχίζει νά εκτελεί *τήν πρώτη ταλάντωσή του*, ενώ τό μόριο 1 άρχίζει νά εκτελεί *τή δεύτερη ταλάντωσή του*. "Ωστε

τή χρονική στιγμή $t = T$ όλα τα μόρια από το 1 έως το 9 κινούνται. Εκείνη τη στιγμή το μόριο 3 έχει εκτελέσει τρία τέταρτα της ταλάντωσης, το μόριο 5 έχει εκτελέσει τη μισή ταλάντωση και το μόριο 7 έχει εκτελέσει το ένα τέταρτο της ταλάντωσης. Στο σχήμα 17 τα βέλη δείχνουν τη φορά της κινήσεως των μορίων και κατά προσέγγιση το μέγεθος της ταχύτητάς τους. Παρατηρούμε ότι στη διάρκεια μίας περιόδου (T) ή αρμονική ταλάντωση διαδίδεται με σταθερή ταχύτητα (c) σε όρισμαμένη απόσταση που ονομάζεται *μήκος κύματος* (λ). Έτσι έχουμε τον εξής ορισμό :



Σχ. 17. Διάδοση του εγκάρσιου κύματος στη διάρκεια μίας περιόδου.

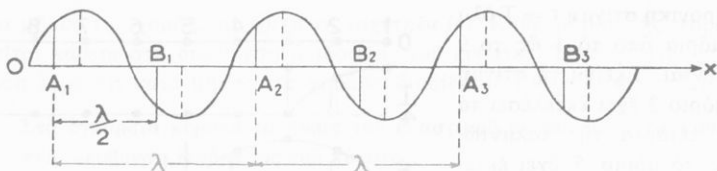
Μήκος κύματος (λ) ονομάζεται ή σταθερή απόσταση στην οποία διαδίδεται ή ταλάντωση μέσα σε μία περίοδο.

$$\text{μήκος κύματος} \quad \lambda = c \cdot T$$

Επειδή είναι $T = 1/\nu$, από την προηγούμενη σχέση βρίσκουμε τη θεμελιώδη εξίσωση των κυμάτων :

$$\text{θεμελιώδης εξίσωση των κυμάτων} \quad c = \nu \cdot \lambda$$

β. Διαφορά φάσεως μεταξύ δύο σημείων του ελαστικού μέσου. Όταν η πηγή του κύματος εκτελεί άμειωτη αρμονική ταλάντωση, τότε κατά μήκος του ελαστικού μέσου διαδίδεται συνεχώς ένα εγκάρσιο αρμονικό κύμα, που τη στιγμή $t = 3T$ έχει τη μορφή που δείχνει το σχήμα 18. Εκείνη τη στιγμή τα σημεία A_1 , A_2 , A_3 του ελαστικού μέσου έχουν την ίδια απομάκρυνση. Έπειτα από όρισμένο χρόνο τα τρία αυτά σημεία θα έχουν άλλη απομάκρυνση, που θα είναι όμως ή ίδια και για τα τρία σημεία. Σ' αυτή την περίπτωση ή κίνηση των σημείων A_2 και A_3 σχετικά με την κίνηση του σημείου A_1 παρουσιάζει *διαφορά φάσεως* αντίστοιχα ίση με $\varphi = 2\pi$ και $\varphi = 2(2\pi)$. Καθεμιά από τις δύο αποστάσεις A_1A_2 και A_2A_3 είναι ίση με ένα *μήκος κύ-*



Σχ. 18. Τά σημεία A_1 και A_2 βρίσκονται σε συμφωνία φάσεως, ενώ τά σημεία A_1 και B_1 βρίσκονται σε αντίθεση φάσεως.

ματος λ . Τότε λέμε ότι τά τρία σημεία A_1 , A_2 και A_3 βρίσκονται *σε συμφωνία φάσεως*.

Έτσι για τό μήκος κύματος μπορούμε νά δώσουμε τόν έξής όρισμό:

Μήκος κύματος (λ) ονομάζεται ή απόσταση μεταξύ τών δύο πλησιέστερων σημείων πού βρίσκονται *σε συμφωνία φάσεως*.

Τήν ίδια χρονική στιγμή (δηλαδή $t = 3T$) τό σημείο B_1 , πού απέχει $\lambda/2$ από τό σημείο A_1 , καθυστερεί πάντοτε σχετικά μέ τό A_1 κατά μισή περίοδο ($T/2$). Άρα, κάθε στιγμή οί άπομακρύνσεις τών σημείων A_1 και B_1 είναι ίσες, αλλά έχουν αντίθετη φορά. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι τά δύο αυτά σημεία βρίσκονται *σε αντίθεση φάσεως*. Τό ίδιο συμβαίνει και μέ τά σημεία A_2 και B_2 .

Γενικότερα μπορούμε νά διατυπώσουμε τό έξής συμπέρασμα:

“Όταν ή απόσταση (d) μεταξύ δύο σημείων τοῦ ελαστικού μέσου είναι ίση μέ άκέραιο άριθμό κυμάτων, τότε τά δύο σημεία βρίσκονται *σε συμφωνία φάσεως*.”

“Όταν ή απόσταση (d) μεταξύ δύο σημείων τοῦ ελαστικού μέσου είναι ίση μέ περιττό άριθμό ήμικυμάτων, τότε τά δύο σημεία βρίσκονται *σε αντίθεση φάσεως*.”

$$\begin{array}{ll} \text{σε συμφωνία φάσεως} & d = \kappa \cdot \lambda \\ \varphi = 2\kappa\pi & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{σε αντίθεση φάσεως} & d = (2\kappa + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \varphi = (2\kappa + 1)\pi & \end{array}$$

όπου κ είναι άκέραιος άριθμός ($\kappa = 0, 1, 2, 3, \dots$).

γ. Έξίσωση τής κινήσεως ενός ύλικού σημείου τοῦ ελαστικού μέσου. Σέ ένα γραμμικό ελαστικό μέσο τό σημείο O είναι ή πηγή τών άρμονικῶν

κυμάτων που διαδίδονται κατά μήκος του ελαστικού μέσου με σταθερή ταχύτητα c (σχ. 19). Η πηγή O των κυμάτων αρχίζει να κινείται τη χρονική στιγμή $t = 0$ και έπομένως τη χρονική στιγμή t ή απομάκρυνση (y_0) της πηγής δίνεται από την εξίσωση :

$$y_0 = a \cdot \eta\mu \omega t \quad \text{ή} \quad y_0 = a \cdot \eta\mu \frac{2\pi}{T} t \quad (1)$$

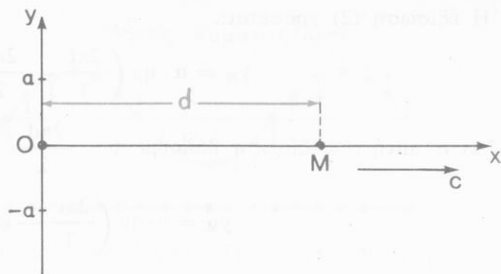
όπου a είναι τό πλάτος της ταλαντώσεως και T ή περίοδος της. Ένα υλικό σημείο M του ελαστικού μέσου βρίσκεται σε απόσταση d από την πηγή O . Για να φτάσει τό κύμα από την πηγή O των κυμάτων στό σημείο M , χρειάζεται χρόνο $\tau = d/c$. Τή χρονική στιγμή t ή κίνηση τό σημείο M είναι ίδια μέ την κίνηση που είχε ή πηγή O των κυμάτων τή χρονική στιγμή $t - \tau$. Ωστε τή χρονική στιγμή t ή απομάκρυνση (y_M) του σημείου M βρίσκεται, αν στην εξίσωση (1) αντί του t βάλουμε $t - \tau$. Έτσι έχουμε:

$$y_M = a \cdot \eta\mu \frac{2\pi}{T} (t - \tau) \quad \text{ή} \quad y_M = a \cdot \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{cT} \right)$$

Έπειδή είναι $\lambda = cT$, βρίσκουμε ότι ή εξίσωση της κινήσεως του υλικού σημείου M είναι:

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{εξίσωση της κινήσεως} \\ \text{ένός υλικού σημείου } M \end{array} \quad y_M = a \cdot \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)} \quad (2)$$

Η εξίσωση (2) φανεράνει ότι κατά μήκος του γραμμικού ελαστικού μέσου Ox παρατηρείται μιά χρονική και τοπική περιοδικότητα. Για ένα δοσμένο υλικό σημείο M , δηλαδή για $d = \text{σταθ.}$, ή απομάκρυνση y του υλικού σημείου είναι ήμιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου t (χρονική περιοδικότητα). Για μιά ορισμένη χρονική στιγμή t , δηλαδή για $t = \text{σταθ.}$, ή απομάκρυνση y του υλικού σημείου είναι ήμιτονοειδής συνάρτηση της θέσεως του υλικού σημείου, έπομένως της απόστασεως d από την πηγή O (τοπική περιοδικότητα). Αυτή την ήμιτονοειδή συνάρτηση παριστάνει ή ήμιτονοειδής καμπύλη του σχήματος 18.



Σχ. 19. Το κύμα για να φτάσει στό σημείο M , χρειάζεται χρόνο $\tau = d/c$.

Ἡ ἐξίσωση (2) γράφεται:

$$y_M = a \cdot \eta\mu \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi d}{\lambda} \right)$$

Ἄν σ' αὐτή τήν ἐξίσωση βάλουμε $\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda}$, ἔχουμε:

$$y_M = a \cdot \eta\mu \left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi \right)$$

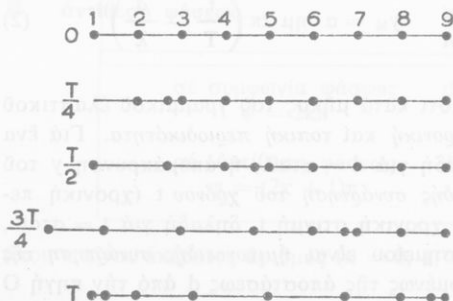
Ὡστε ἡ κίνηση τοῦ ὕλικου σημείου M σχετικά μέ τήν κίνηση τῆς πηγῆς O τῶν κυμάτων ἔχει μιά *διαφορά φάσεως* φ ἴση μέ:

διαφορά φάσεως σχετικά μέ τήν πηγή	$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{ (rad)}$
---------------------------------------	--

Ἄν εἶναι $\frac{2\pi d}{\lambda} = 2\pi k$, τότε εἶναι $d = k \cdot \lambda$ (συμφωνία φάσεως).

Ἄν εἶναι $\frac{2\pi d}{\lambda} = (2k + 1)\pi$, τότε εἶναι $d = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ (ἀντίθεση φάσεως).

δ. Διαμήκη κύματα. Ἄς θεωρήσουμε πάλι μιά σειρά μορίων τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου (σχ. 20) πού ἰσορροποῦν πάνω σέ μιά εὐθεῖα καί συνδέονται μεταξύ τους ὄπως καί στήν περίπτωση τοῦ σχήματος 17. Τή χρονική στιγμή $t = 0$ τό μόριο 1 ἀρχίζει νά ἐκτελεῖ ἄρμονική ταλάντωση κατά τή διεύθυνση τῆς εὐθείας στήν ὁποία ἰσορροποῦν τά μόρια. Τότε ὅλα



Σχ. 20. Διάδοση τοῦ διαμήκους κύματος στή διάρκεια μιάς περιόδου.

τά μόρια θά ἐκτελέσουν διαδοχικά τήν ἴδια ἀκριβῶς ἄρμονική ταλάντωση πού ἔκαμε τό μόριο 1. Παρατηροῦμε ὅτι κάθε μόριο τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου διαδοχικά πλησιάζει καί ἀπομακρύνεται ἀπό τά δύο γειτονικά του μόρια. Ἔτσι δημιουργοῦνται *πυκνώματα* καί *ἀραιώματα* τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου πού διαδίδονται κατά μήκος τοῦ γραμμικοῦ ἐλαστικοῦ μέσου. Σ' αὐτή τήν περί-



Σχ. 21. Ἡ διάδοση τῶν ἐγκάρσιων καὶ τῶν διαμήκων κυμάτων. Στὰ διαμήκη κύματα σχηματίζονται διαδοχικὰ πυκνώματα καὶ ἀραιώματα.

Στό μέσο δείχνονται τὰ ὕλικά σημεῖα τοῦ γραμμικοῦ ἐλαστικοῦ μέσου, ὅταν ἰσορροποῦν.

πτωση ὡς *μῆκος κύματος* λ θεωροῦμε τὴν ἀπόσταση μεταξὺ δύο διαδοχικῶν πυκνωμάτων (ἢ ἀραιωμάτων). Τό σχῆμα 21 δείχνει τὴ θέση τῶν μορίων τοῦ γραμμικοῦ ἐλαστικοῦ μέσου τὴ χρονικὴ στιγμή $t = 2T$. Τὰ βέλη δείχνουν τὴ φορά τῆς κινήσεως τῶν μορίων κατὰ τὴν ἀντίστοιχη χρονικὴ στιγμή. Γιά τὴ διαφορά φάσεως μεταξὺ δύο σημείων καὶ γιά τὴν κίνηση ἑνός σημείου τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου ἰσχύουν οἱ σχέσεις πού βρήκαμε στὰ ἐγκάρσια κύματα. Ἀπὸ τὰ παραπάνω καταλήγουμε στὸ ἀκόλουθο συμπέρασμα:

Στὰ διαμήκη κύματα περιοδικὰ σχηματίζονται πυκνώματα καὶ ἀραιώματα τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου καὶ ἐπομένως συμβαίνουν περιοδικές μεταβολές τῆς πυκνότητος τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου.

Τὰ ἐγκάρσια καὶ διαμήκη κύματα πού ἐξετάσαμε παραπάνω ὀνομάζονται *τρέχοντα κύματα*.

12. Διάδοση τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας μέσα στὴν ὕλη

Τὰ ἐγκάρσια καὶ τὰ διαμήκη κύματα πού ἐξετάσαμε ὀφείλονται στὶς ἐλαστικὲς ιδιότητες τῆς ὕλης καὶ γι' αὐτὸ τὰ κύματα αὐτὰ ὀνομάζονται *κύματα ἐλαστικότητας* (ἢ καὶ *μηχανικὰ κύματα*). Στὰ διαμήκη κύματα διαδίδονται πυκνώματα καὶ ἀραιώματα τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου καὶ ἐπομένως περιοδικὰ μεταβάλλεται ὁ ὄγκος τοῦ ἐλαστικοῦ σώματος. Ἄρα τὰ διαμήκη κύματα μποροῦν νὰ διαδίδονται μέσα σὲ σώματα πού ἔχουν *ἐλαστικότητα ὄγκου*.

Αυτή τήν ιδιότητα τήν ἔχουν ὅλα τὰ σώματα, στερεά ὑγρά καί ἀέρια. Στά ἐγκάρσια κύματα περιοδικά μεταβάλλεται τό σχῆμα τοῦ ἐλαστικοῦ σώματος καί ἐπομένως τὰ ἐγκάρσια κύματα μποροῦν νά διαδίδονται μόνο μέσα σέ σώματα πού ἔχουν ἐλαστικότητα σχήματος. Τέτοια σώματα εἶναι μόνο τά στερεά, γιατί μόνο αὐτά ἔχουν ὀρισμένο σχῆμα. Ὡστε:

Διαμήκη κύματα ἐλαστικότητας διαδίδονται μέσα σέ ὅλα τὰ σώματα, στερεά, ὑγρά καί ἀέρια. Ἐγκάρσια κύματα ἐλαστικότητας διαδίδονται μόνο μέσα στά στερεά σώματα.

α. Ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας. Ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας ἐξαρτᾶται ἀπό τό εἶδος τῶν κυμάτων (ἐγκάρσια ἢ διαμήκη) καί ἀπό τή φύση τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου στό ὁποῖο διαδίδονται τὰ κύματα.

Στά στερεά ὑλικά τὰ διαμήκη κύματα ἔχουν μεγαλύτερη ταχύτητα διαδόσεως ἀπό τὰ ἐγκάρσια κύματα. Τό συμπέρασμα αὐτό ἔχει ἰδιαίτερη σημασία στή Σεισμολογία. Ὄταν σέ ἓνα σημεῖο τοῦ στερεοῦ φλοιοῦ τῆς Γῆς συμβεῖ μιά διατάραξη τῆς ἰσορροπίας τῶν στρωμάτων, τότε ἀπό αὐτό τό σημεῖο τοῦ φλοιοῦ τῆς Γῆς (ἐστία τοῦ σεισμοῦ) φεύγουν διαμήκη καί ἐγκάρσια σεισμικά κύματα πού διαδίδονται μέ διαφορετικές ταχύτητες καί ἐπομένως φτάνουν σέ ἓναν τόπο σέ δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ἀπό αὐτή τή χρονική διαφορά συνάγονται πολύτιμα συμπεράσματα.

13. Κύματα στό χῶρο καί στήν ἐπιφάνεια ὑγροῦ

α. Κύματα στό χῶρο. Ἐνα ὑλικό σημεῖο Α ἐκτελεῖ ἀμείωτη ἄρμονικὴ ταλάντωση καί περιβάλλεται ἀπό ἓνα ἀπεριόριστο ὁμογενές καί ἰσότροπο ἐλαστικό μέσο. Τότε τό σημεῖο Α εἶναι πηγή ἄρμονικῶν κυμάτων πού διαδίδονται πρὸς ὅλες τίς διευθύνσεις μέ σταθερὴ ταχύτητα c . Στή διάρκεια ὀρισμένου χρόνου t ἡ διάδοση τῆς ταλαντώσεως (δηλαδή τό κύμα) φτάνει σέ ὅλα τὰ σημεῖα τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου πού βρίσκονται σέ ἀπόσταση $R = c \cdot t$. Ὅλα αὐτά τὰ σημεῖα ἔχουν τήν ἴδια φάση καί βρίσκονται πάνω σέ μιά σφαιρική ἐπιφάνεια, πού ὀνομάζεται ἐπιφάνεια κύματος*. Ἡ ἐξωτερικὴ ἐπιφάνεια κύματος ἀποτελεῖ τό μέτωπο κύματος. Ἐτσι στό ἐλαστικό μέσο σχηματίζονται ὁμόκεντρες σφαιρικές ἐπιφάνειες καί ὅλα τὰ σημεῖα μιάς τέτοιας ἐπιφάνειας κινοῦνται μέ τήν ἴδια φάση. Σ' αὐτή τήν περίπτωση λέμε ὅτι στό ἐλαστικό μέσο σχηματίζονται σφαιρικά κύματα. Κάθε εὐθεῖα κάθετη στήν ἐπιφάνεια κύματος ὀνομάζεται ἀκτίνα. Σέ μεγάλη ἀπόσταση

(*) Ἡ ἐπιφάνεια κύματος λέγεται καί ἰσοφασικὴ ἐπιφάνεια.

από την πηγή των κυμάτων ένα μικρό μέρος της σφαιρικής επιφάνειας κύματος μπορούμε να το θεωρήσουμε ως επίπεδο και τότε λέμε ότι σ' αυτή την απόσταση έχουμε ένα *επίπεδο κύμα*. Στά σφαιρικά και στά επίπεδα κύματα ή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών επιφανειών κύματος, που τα σημεία τους έχουν συμφωνία φάσεως, είναι ίση με ένα μήκος κύματος (λ).

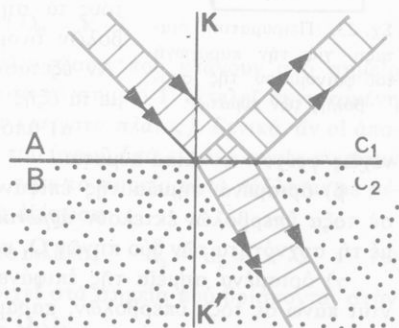
β. Κύματα στην επιφάνεια ενός υγρού. "Όταν στην επιφάνεια νερού που ήρεμει πέσει μία πέτρα, τότε στο σημείο της επιφάνειας που έπεσε η πέτρα προκαλείται μία διατάραξη της επιφανειακής μάζας του νερού και στην επιφάνεια του νερού σχηματίζονται όμοκεντρα υψώματα και κοιλώματα που διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις. Τα κύματα, που σχηματίζονται στην επιφάνεια υγρών που ήρεμουν, αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία κυμάτων. "Όπως ξέρουμε η ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού που ήρεμει, έχει ιδιότητες ανάλογες με τις ιδιότητες μίας τεντωμένης ελαστικής μεμβράνης. "Έτσι ορισμένα από τα κύματα που σχηματίζονται στην επιφάνεια υγρών οφείλονται στην επιφανειακή τάση (*κύματα επιφανειακής τάσεως*), ενώ άλλα κύματα οφείλονται στη βαρύτητα (*κύματα βαρύτητας*). Γενικά ο σχηματισμός των κυμάτων στην επιφάνεια των υγρών είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα.

14. 'Ανάκλαση και διάθλαση των κυμάτων ελαστικότητας

Δύο όμογενή και ισότροπα ελαστικά μέσα A και B χωρίζονται το ένα από το άλλο με μία επιφάνεια επίπεδη ή και καμπύλη (σχ. 22). 'Η ταχύτητα διαδόσεως των κυμάτων ελαστικότητας στα δύο μέσα A και B είναι αντίστοιχα c_1 και c_2 . Τα κύματα διαδίδονται στο ελαστικό μέσο A και όταν φτάσουν στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο διαφορετικών ελαστικών μέσων, τότε συμβαίνουν τα εξής:

— ένα μέρος των κυμάτων *ανακλάται* και αυτά τα κύματα εξακολουθούν να διαδίδονται στο ελαστικό μέσο A κατά μία νέα διεύθυνση·

— ένα άλλο μέρος των κυμάτων που έπεσαν πάνω στη διαχωριστική επιφάνεια *διαθλάται* και αυτά τα κύματα διαδίδονται στο ελαστικό μέσο B, αλλά κατά μία νέα διεύθυνση.

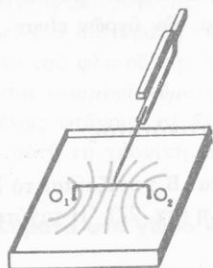


Σχ. 22. 'Ανάκλαση και διάθλαση επίπεδου κύματος ελαστικότητας.

Ἡ θεωρητική καὶ πειραματική ἔρευνα ἀποδεικνύουν ὅτι γιὰ τὴν ἀνάκλαση καὶ τὴν διάθλαση τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας ἰσχύουν οἱ νόμοι ποὺ ἰσχύουν καὶ γιὰ τὴν ἀνάκλαση καὶ τὴν διάθλαση τοῦ φωτός.

15. Συμβολή τῶν κυμάτων

Στὸ ἴδιο ἐλαστικό μέσο μπορεῖ νὰ διαδίδονται δύο κύματα. Ὄταν τὰ κύματα φτάσουν σὲ ἓνα ὑλικό σημεῖο τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου, τότε τὸ σημεῖο αὐτὸ ἐκτελεῖ μιά συνισταμένη κίνηση καὶ λέμε ὅτι στὸ σημεῖο αὐτὸ τὰ δύο κύματα *συμβάλλουν*. Μὲ τὸ ἀκόλουθο πείραμα μποροῦμε νὰ παρατηρήσουμε τὸ φαινόμενο τῆς *συμβολῆς* δύο κυμάτων ποὺ διαδίδονται στὴν ἐπιφάνεια ὑγροῦ. Στὸ ἓνα σκέλος διαπασῶν εἶναι στερεωμένο ἓνα στέλεχος ἔτσι, ὥστε οἱ δύο ἄκρες τοῦ O_1 καὶ O_2 νὰ μποροῦν νὰ πάλλονται κατακόρυφα (σχ. 23). Ὄταν τὸ διαπασῶν ἡρεμεῖ, τὰ σημεῖα O_1 καὶ O_2 βρίσκονται σὲ ἐπαφή μὲ τὴν ἐλεύθερη ἐπιφάνεια ὑδραργύρου (ἢ νεροῦ) ποὺ ἡρεμεῖ.



Σχ. 23. Πειραματική διάταξη γιὰ τὴν παραγωγή τοῦ φαινομένου τῆς *συμβολῆς* τῶν κυμάτων.

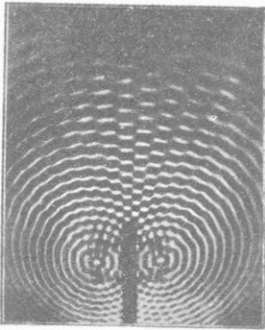
Μὲ ἓναν ἠλεκτρομαγνήτη ἀναγκάζουμε τὸ διαπασῶν νὰ πάλλεται. Τότε τὰ σημεῖα O_1 καὶ O_2 ἐκτελοῦν ἀμειώτες *ἀρμονικὲς ταλαντώσεις*, ποὺ ἔχουν τὴν ἴδια συχνότητα, τὸ ἴδιο πλάτος καὶ τὴν ἴδια φάση. Ἐτσι τὰ σημεῖα O_1 καὶ O_2 εἶναι δύο *σύγχρονες* πηγὲς παραγωγῆς κυκλικῶν κυμάτων ποὺ διαδίδονται στὴν ἐπιφάνεια ὑγροῦ. Παρατηροῦμε ὅτι στὴν ἐπιφάνεια τοῦ ὑγροῦ σχηματίζονται *τόξα ὑπερβολῶν*, ποὺ ἔχουν ὡς ἐστίες τους τὰ σημεῖα O_1 καὶ O_2 . Αὐτὰ τὰ τόξα ὑπερβολῶν ὀνομάζονται *κροσσοὶ* *συμβολῆς* (σχ. 24). Ἄν ἐξετάσουμε αὐτὸ τὸ φαινόμενο διαπιστώνουμε τὰ ἑξῆς:

α) ἀπὸ τὶς δύο πηγὲς κυμάτων O_1 καὶ O_2 *συνεχῶς φεύγουν* κυκλικά κύματα:

β) ὀρισμένα σημεῖα τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ ποὺ βρίσκονται πάνω σὲ τόξα ὑπερβολῶν ἐκτελοῦν *ἀρμονικὴ ταλάντωση*, ποὺ ἔχει συχνότητα ἴση μὲ τὴν συχνότητα τῶν δύο πηγῶν O_1 καὶ O_2 :

γ) ὀρισμένα σημεῖα τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ ποὺ καὶ αὐτὰ βρίσκονται πάνω σὲ τόξα ὑπερβολῶν, παραμένουν *τελείως ἀκίνητα*.

Ἐξήγηση τοῦ φαινομένου τῆς *συμβολῆς* τῶν κυμάτων. Κάθε σύστημα κυκλικῶν κυμάτων διαδίδεται ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὸ ἄλλο, δηλαδὴ διαδίδεται σάν νὰ ἦταν μόνο του. Ἐτσι κάθε ὑλικό σημεῖο τῆς ἐλεύθερης ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ ἐκτελεῖ ταυτόχρονα δύο *κατακόρυφες ἀρμονικὲς ταλαντώ-*



Σχ. 24. Οί κροσσοί συμβολής.

σεις πού έχουν τήν ίδια διεύθυνση, τήν ίδια συχνότητα (ν) καί τό ίδιο πλάτος a . Όπως ξέρουμε, τό πλάτος (A) τής συνισταμένης ταλαντώσεως εξαρτάται

ἀπό τή διαφορά φάσεως (ϕ) πού έχουν οί δύο συνιστώσες ταλαντώσεις. Άς πάρουμε ένα σημείο Γ τής επιφάνειας τοῦ ὑγροῦ (σχ. 25), πού οί ἀποστάσεις του ἀπό τά σημεία O_1 καί O_2 έχουν διαφορά ἴση μέ ἀκέραιο ἀριθμό κυμάτων, δηλαδή εἶναι :

$$\Gamma O_1 - \Gamma O_2 = \kappa \cdot \lambda$$

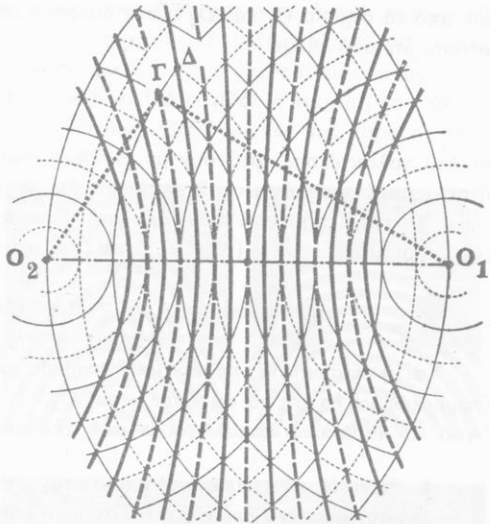
Ἐπομένως οί δύο ἀρμονικές ταλαντώσεις πού φτάνουν στό σημείο Γ ἔχουν συμφωνία φάσεως καί γι' αὐτό τό σημείο Γ ἐκτελεῖ συνισταμένη ταλάντωση, πού ἔχει πλάτος $A = 2a$ (μέγιστο πλάτος). Γενικά, ἂν οί ἀποστάσεις ἑνός σημείου τής επιφάνειας τοῦ ὑγροῦ ἀπό τίς δύο πηγές κυμάτων O_1 καί O_2 εἶναι ἀντίστοιχα d_1 καί d_2 , τότε τό σημείο αὐτό πάλλεται μέ μέγιστο πλάτος ($A = 2a$), ὅταν ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\text{σημεῖα παλλόμενα μέ μέγιστο πλάτος} \quad d_1 - d_2 = \kappa \cdot \lambda \quad (1)$$

Γιά $\kappa = 0$ ἡ ἐξίσωση (1) ἀντιστοιχεῖ στά σημεία πού βρίσκονται στήν εὐθεία πού εἶναι κάθετη στό μέσο τής $O_1 O_2$.

Γιά $\kappa = 1, 2, 3, \dots$ ἡ ἐξίσωση (1) ἀντιστοιχεῖ σέ σημεία πού βρίσκονται πάνω σέ τόξα ὑπερβολῶν, πού ἔχουν ὡς ἑστίες τίς δύο σύγχρονες πηγές O_1 καί O_2 .

Σέ ἕνα ἄλλο σημείο Δ τής επιφάνειας τοῦ ὑγροῦ, πού οί ἀποστάσεις



Σχ. 25. Γιά τήν ἐξήγηση τής συμβολής δύο κυμάτων.

του από τὰ σημεία O_1 καὶ O_2 ἔχουν διαφορά ἴση μὲ περιττό ἀριθμὸ ἡμικυμάτων, δηλαδή εἶναι:

$$\Delta O_1 - \Delta O_2 = (2\kappa + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

οἱ δύο ταλαντώσεις φτάνουν μὲ ἀντίθετη φάση ($\varphi = 180^\circ$) καὶ ἐπομένως ἡ συνισταμένη ταλάντωση ἔχει πλάτος ἴσο μὲ μηδέν, $A = 0$ (ἐλάχιστο πλάτος). Ἔτσι τὸ σημεῖο Δ εἶναι ἀκίνητο. Γενικά, ἕνα σημεῖο τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ μένει ἀκίνητο ($A = 0$), ὅταν ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\text{σημεῖα ἀκίνητα} \quad d_1 - d_2 = (2\kappa + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Καὶ ἡ ἐξίσωση (2) προσδιορίζει σημεῖα πού βρίσκονται πάνω σέ τόξα ὑπερβολῶν μὲ ἐστίαι τὰ σημεῖα O_1 καὶ O_2 .

Ἄπό τὰ παραπάνω καταλήγουμε στά ἀκόλουθα συμπεράσματα:

I. Ἐνα ὑλικὸ σημεῖο, στὸ ὁποῖο φτάνουν δύο ἄρμονικὰ κύματα, ἐκτελεῖ συνισταμένη ἄρμονικὴ ταλάντωση πού ἔχει τὴν ἴδια διεύθυνση καὶ τὴν ἴδια συχνότητα μὲ τὶς δύο σύγχρονες πηγές τῶν κυμάτων, τὸ πλάτος ὅμως τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴ διαφορά τῶν ἀποστάσεων τοῦ θεωρούμενου σημείου ἀπὸ τὶς δύο πηγές τῶν κυμάτων.

II. Τὸ πλάτος τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως :

— εἶναι μέγιστο στὰ σημεῖα πού ἡ διαφορά τῶν ἀποστάσεων τους ἀπὸ τὶς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι ἴση μὲ μηδέν ἢ εἶναι ἴση μὲ ἀκέραιον ἀριθμὸ μηκῶν κύματος·

— εἶναι ἴσο μὲ μηδέν στὰ σημεῖα πού ἡ διαφορά τῶν ἀποστάσεων τους ἀπὸ τὶς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι ἴση μὲ περιττὸ ἀριθμὸ ἡμικυμάτων.

III. Τὰ σημεῖα πού πάλλονται μὲ μέγιστο πλάτος ἢ μένουν ἀκίνητα διατάσσονται πάνω σέ ἀντίστοιχα τόξα ὑπερβολῶν (κροσσοὶ συμβολῆς).

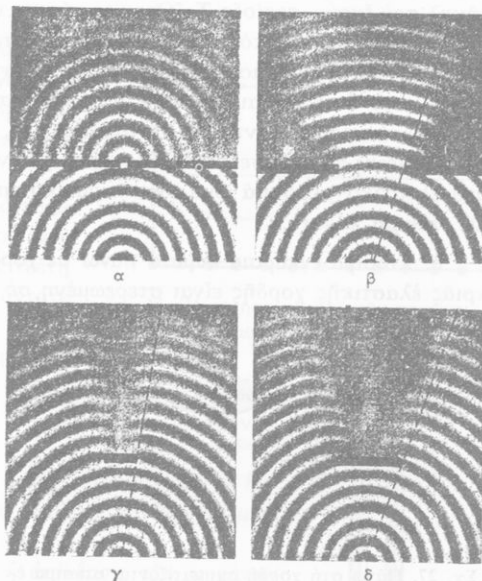
Ἄπο τὰ ἄλλα σημεῖα, ἐκτός ὑπὸ ἐκεῖνα πού πάλλονται μὲ μέγιστο πλάτος ἢ μένουν ἀκίνητα, ἐκτελοῦν ταλαντώσεις μὲ διάφορα μικρότερα πλάτη.

16. Περίθλαση τῶν κυμάτων

Στὴν ἐπιφάνεια ὕδραργύρου δημιουργοῦμε κυκλικὰ κύματα μὲ διαπασῶν πού πάλλεται μὲ τὴ βοήθεια ἑνὸς ἠλεκτρομαγνήτη. Κάθετα στὴν ἐπιφάνεια

του ύδραργύρου υπάρχει διάφραγμα πού έχει μιά πολύ λεπτή σχισμή (ή πολύ μικρή τρύπα). Οί διαστάσεις τής σχισμής είναι τής τάξεως του μήκους κύματος (λ) των κυμάτων. Παρατηρούμε ότι πίσω από τό διάφραγμα σχηματίζονται νέα κυκλικά κύματα πού πηγή τους είναι ή σχισμή (σχ. 26α). Τό φαινόμενο αυτό ονομάζεται *περίθλαση* των κυμάτων και παρατηρείται και όταν τά κύματα πέφτουν πάνω σε πολύ μικρά αντικείμενα πού οί διαστάσεις τους είναι τής τάξεως του μήκους κύματος (λ) των κυμάτων. Τότε τά κύματα διαδίδονται και πίσω από τό αντικείμενο (σχ. 29γ).

Αν οί διαστάσεις τής σχισμής ή του αντικείμενου είναι πολύ μεγαλύτερες από τό μήκος κύματος (λ) των κυμάτων, τότε τό φαινόμενο τής περιθλάσεως των κυμάτων είναι άσήμαντο. Σ' αυτή τήν περίπτωση ή διάδοση των κυμάτων γίνεται *εϋθύγραμμα* και πίσω από τό διάφραγμα σχηματίζεται *σκιά* (σχ. 26β). Στά σημεία του χώρου πού σχηματίζεται



Σχ. 26. Περίθλαση κυκλικών κυμάτων πού πέφτουν πάνω σε λεπτή σχισμή ή πολύ μικρό αντικείμενο.

σκιά φτάνουν κύματα μέ όλες τές δυνατές διαφορές φάσεως και από τή συμβολή αυτών των κυμάτων προκύπτει κατάργησή τους. Από τά παραπάνω συνάγεται ό ακόλουθος νόμος τής περιθλάσεως των κυμάτων :

“Όταν τά κύματα πέφτουν πάνω σε σχισμή ή αντικείμενο πού οί διαστάσεις τους είναι πολύ μεγαλύτερες από τό μήκος κύματος (λ) των κυμάτων, τότε πίσω από τή σχισμή ή τό αντικείμενο τά κύματα διαδίδονται *εϋθύγραμμα*.

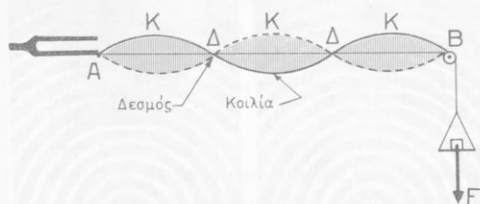
Αντίθετα, όταν οί διαστάσεις τής σχισμής ή του αντικείμενου είναι τής τάξεως του μήκους κύματος (λ), τότε συμβαίνει *περίθλαση* των κυμάτων και πίσω από τή σχισμή ή τό αντικείμενο παρατηρούνται *άποκλίσεις* από τήν *εϋθύγραμμη* διάδοση των κυμάτων.

Παρατήρηση. Το φαινόμενο της περιθλάσεως των κυμάτων έχει ιδιαίτερη σημασία στην Όπτική και την Άκουστική.

17. Στάσιμα κύματα

Σε ένα ελαστικό μέσο διαδίδονται τρέχοντα κύματα (έγκάρσια ή διαμήκη) που έχουν περίοδο T . Όταν τα κύματα φτάνουν στο έθριο αυτού του ελαστικού μέσου, τότε τα κύματα ανακλώνται και εξακολουθούν να διαδίδονται στο ίδιο ελαστικό μέσο, αλλά με αντίθεση φορά. Έτσι στο ελαστικό μέσο διαδίδονται κατά την ίδια διεύθυνση, αλλά με αντίθετη φορά δύο κύματα, τα προσπίπτοντα και τα ανακλώμενα, που έχουν την ίδια περίοδο. Σε όρισμένες περιπτώσεις από τη συμβολή των δύο κυμάτων δημιουργείται στο ελαστικό μέσο μία ιδιαίζουσα κυματική κατάσταση που την ονομάζουμε *στάσιμα κύματα*.

α. Στάσιμα εγκάρσια κύματα πάνω σε χορδή. Η μιά άκρη A μιάς μακριάς ελαστικής χορδής είναι στερεωμένη σε διαπασών που εκτελεί αμεί-



Σχ. 27. Πάνω στη χορδή σχηματίζονται στάσιμα εγκάρσια κύματα (ανάκλαση σε ανένδοτο εμπόδιο).

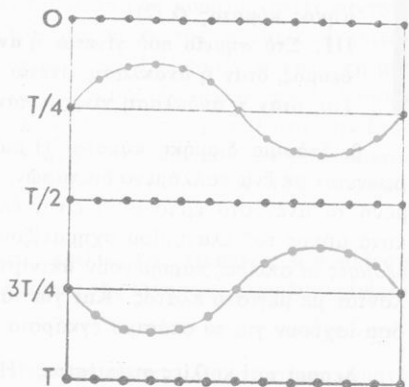
ωτες αρμονικές ταλαντώσεις (σχ. 27). Η χορδή περνάει από μιά τροχαλία και στην άκρη της χορδής κρέμεται μικρός δίσκος που πάνω του μπορούμε να τοποθετούμε βάρη, ώστε να μεταβάλλουμε την τάση της χορδής. Τότε πάνω στη χορδή διαδίδονται εγκάρσια κύματα που προ-

χωρούν από την άκρη A προς την άκρη B της χορδής. Η τροχαλία απο-
τελεί ένα *ανένδοτο εμπόδιο* στη διάδοση των κυμάτων. Εκεί τα κύματα
ανακλώνται και διαδίδονται από την άκρη B προς την άκρη A της χορ-
δής. Έτσι σε κάθε σημείο της χορδής φτάνουν συνεχώς τα *προσπίπτοντα*
και τα *ανακλώμενα* κύματα, τα οποία *συμβάλλουν*. Για μιά όρισμένη τάση
της χορδής παρατηρούμε ότι πάνω στη χορδή σχηματίζεται όρισμένος
αριθμός *ατράκτων* που έχουν τό ίδιο μήκος. Η εμφάνιση των ατράκτων
οφείλεται στο μεταίσθημα.

Αν πάρουμε φωτογραφίες της παλλόμενης χορδής κατά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, παρατηρούμε τά εξής:

1. Οί δύο άκρες της χορδής (A και B) καθώς και οί άκρες κάθε ατράκτου παραμένουν *τελείως ακίνητες*. Τά σημεία αυτά ονομάζονται *δεσμοί*.

- Τό μέσο κάθε άτράκτου πάλλεται με μέγιστο πλάτος. Τά σημεία αυτά όνομάζονται *κοιλίες*.
- Όλα τά σημεία τής χορδής, έκτός από τούς δεσμούς, πάλλονται με *τήν ίδια συχνότητα* ίση με τή συχνότητα τής πηγής τών κυμάτων.
- Τά σημεία πού είναι μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών κινούνται με τήν ίδια φορά καί βρίσκονται πάντοτε *σέ συμφωνία φάσεως*.
- Τά σημεία πού είναι από τό ένα καί από τό άλλο μέρος ενός δεσμού κινούνται με αντίθετη φορά καί βρίσκονται πάντοτε *σέ αντίθεση φάσεως*.
- Όλα τά κινούμενα σημεία *περνούν ταυτόχρονα* από τή θέση τής ισορροπίας τους καί *άποκοτύν ταυτόχρονα* τή μέγιστη άπομάκρυνσή τους (σχ. 28).
- Η άπόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών ή δύο διαδοχικών κοιλιών είναι σταθερή καί ίση με *μισό μήκος κύματος* ($\lambda/2$).
- Στό σημείο πού γίνεται ή *ανάκλαση* τών κυμάτων σχηματίζεται *δεσμός*.



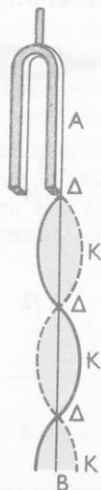
Σχ. 28. Η κίνηση τών ύλικών σημείων στά στάσιμα εγκάρσια κύματα.

Τό φαινόμενο πού παρατηρούμε πάνω στη χορδή όνομάζεται *στάσιμα εγκάρσια κύματα*.

Στάσιμα εγκάρσια κύματα σχηματίζονται καί όταν ή ανάκλαση γίνεται πάνω *σέ κινητό εμπόδιο* π.χ. στόν άέρα (σχ. 29). Άλλά τότε στό σημείο πού γίνεται ή *ανάκλαση* τών κυμάτων σχηματίζεται *κοιλία*.

Άπό τά παραπάνω συνάγονται τά ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όταν κατά τήν ίδια διεύθυνση, αλλά με αντίθετη φορά, διαδίδονται δύο εγκάρσια κύματα, πού έχουν τό ίδιο μήκος κύματος (λ) καί τό ίδιο πλάτος ταλαντώσεως (a), τότε από τή συμβολή τών δύο κυμάτων σχηματίζονται *στάσιμα κύματα*.



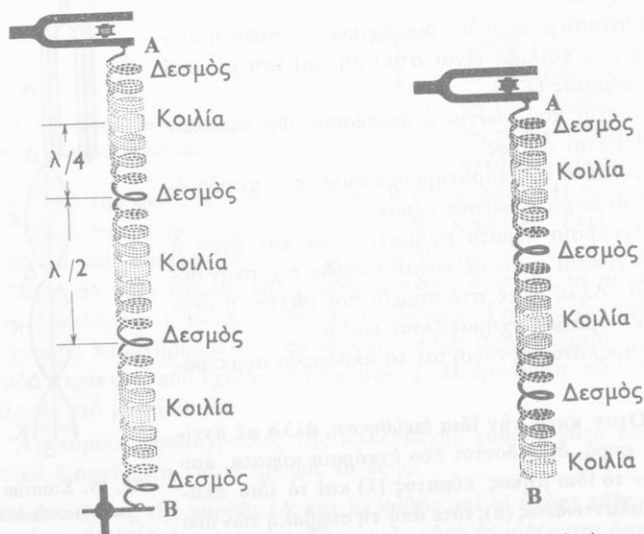
Σχ. 29. Στάσιμα εγκάρσια κύματα (ανάκλαση πάνω *σέ κινητό εμπόδιο*).

II. Ἡ ἀπόσταση μεταξύ δύο διαδοχικῶν δεσμῶν ἢ δύο διαδοχικῶν κοιλιῶν εἶναι σταθερή (μῆκος τοῦ στάσιμου κύματος) καί ἴση μέ μισό μῆκος κύματος ($\lambda/2$).

III. Στό σημεῖο πού γίνεται ἡ ἀνάκλαση τῶν κυμάτων σχηματίζεται δεσμός, ὅταν ἡ ἀνάκλαση γίνεται πάνω σέ ἀνένδοτο ἐμπόδιο, καί κοιλία, ὅταν ἡ ἀνάκλαση γίνεται πάνω σέ κινητό ἐμπόδιο.

β. Στάσιμα διαμήκη κύματα. Ἡ μιά ἄκρη σπειροειδοῦς ἐλατηρίου στερεώνεται σέ ἓνα παλλόμενο διαπασῶν, ἐνῶ ἡ ἄλλη ἄκρη του εἶναι στερεωμένη σέ ἀνένδοτο ἐμπόδιο ἢ εἶναι ἐλεύθερη (σχ. 30). Παρατηροῦμε ὅτι κατά μῆκος τοῦ ἐλατηρίου σχηματίζονται *στάσιμα διαμήκη κύματα*. Στούς δεσμούς οἱ σπείρες παραμένουν ἀκίνητες, ἐνῶ στίς κοιλίες οἱ σπείρες ἀλλοιώνται μέ μέγιστο πλάτος. Καί γιά τά στάσιμα διαμήκη κύματα ἰσχύουν ὅσα ἰσχύουν γιά τά στάσιμα ἐγκάρσια κύματα.

Δεσμοί καί κοιλίες συμπίεσεως. Ἡ σπείρα πού ἀποτελεῖ τήν *κοιλία* τοῦ στάσιμου κύματος ἐκτελεῖ ταλάντωση πού ἔχει μέγιστο πλάτος. Ἀπό τό ἓνα καί ἀπό τό ἄλλο μέρος αὐτῆς τῆς σπείρας οἱ γειτονικές σπείρες κινούνται πάντοτε μέ *τήν ἴδια φορά* καί ἐκτελοῦν ταλαντώσεις πού τό πλάτος τους πρακτικά εἶναι ἴσο μέ τό πλάτος ταλαντώσεως τῆς κοιλιακῆς σπείρας. Ἔτσι στήν περιοχή τῆς κοιλίας ἡ ἀπόσταση τῆς μιάς σπείρας ἀπό τήν



Σχ. 30. Στάσιμα διαμήκη κύματα (ἀνάκλαση πάνω σέ ἀνένδοτο καί σέ κινητό ἐμπόδιο).

άλλη διατηρείται σταθερή και επομένως δεν παρατηρείται ούτε πύκνωση, ούτε αραιώση των σπειρών.

Ἡ σπείρα πού ἀποτελεῖ τὸ δεσμό τοῦ στάσιμου κύματος μένει πάντοτε ἀκίνητη. Ἀπὸ τὸ ἓνα καὶ ἀπὸ τὸ ἄλλο μέρος αὐτῆς τῆς σπείρας οἱ γειτονικές σπείρες κινοῦνται πάντοτε *μέ ἀντίθετη φορὰ*. Ἐπομένως κατὰ τὴ μιά ἡμιπερίοδο οἱ σπείρες τῆς περιοχῆς τοῦ δεσμοῦ *πλησιάζουν* πρὸς τὴ σπείρα τοῦ δεσμοῦ καὶ ἔτσι προκαλεῖται *πύκνωση* τῶν σπειρῶν. Κατὰ τὴν ἐπόμενη ἡμιπερίοδο οἱ σπείρες τῆς περιοχῆς τοῦ δεσμοῦ *ἀπομακρύνονται* ἀπὸ τὴ σπείρα τοῦ δεσμοῦ καὶ ἔτσι προκαλεῖται *ἀραιώση* τῶν σπειρῶν. Ὡστε :

Στά στάσιμα διαμήκη κύματα στὶς κοιλίες τῆς κινήσεως ἢ συμπίεση διατηρεῖται σταθερή, ἐνῶ στοὺς δεσμούς τῆς κινήσεως περιοδικὰ γίνεται πύκνωση καὶ ἀραιώση.

γ. Γενικές παρατηρήσεις γιὰ τὰ στάσιμα κύματα. Τὰ στάσιμα κύματα εἶναι μιά περίπτωση τοῦ φαινομένου τῆς *συμβολῆς* τῶν κυμάτων καὶ ἀποτελοῦν μιά ἐφαρμογὴ τοῦ φαινομένου τοῦ *συντονισμοῦ*. Γιατί τὸ διαπασῶν, πού χρησιμοποιήσαμε γιὰ τὴν παραγωγή τῶν στάσιμων κυμάτων πάνω στὴ χορδὴ ἢ στὸ σπειροειδές ἐλατήριο, εἶναι ἓνας *διεγέρτης* καὶ ἡ χορδὴ ἢ τὸ σπειροειδές ἐλατήριο εἶναι ἓνας *συντονιστής*. Στὴ χορδὴ ἢ στὸ σπειροειδές ἐλατήριο σχηματίζεται σταθερὸ σύστημα στάσιμων κυμάτων, ὅταν ἡ τάση τῆς χορδῆς ἢ τοῦ ἐλατηρίου εἶναι τόση, ὥστε ἡ ἰδιοσυχνοτήτά τους νά εἶναι ἴση μέ τὴ συχνότητα τοῦ διαπασῶν, δηλαδή ὅταν ὑπάρχει συντονισμός. Στὶς ἐφαρμογές στάσιμα κύματα ἐμφανίζονται, ὅταν πάλλονται οἱ ἀπὸ μετόν δοκοὶ τῶν οἰκοδομῶν, οἱ γέφυρες, τὰ βάρη πού στηρίζονται μηχανές. Ὅταν διαμορφώνουμε ἓνα λιμάνι, λαβαίνουμε ὑπόψη τὰ ἀποτελέσματα πού θά ἔχει ὁ σχηματισμός στάσιμων κυμάτων μέσα στὸ λιμάνι. Σημαντικὴ ἐφαρμογὴ ἔχουν τὰ στάσιμα κύματα στὴν Ἀκουστικὴ καὶ τὸν Ἠλεκτρισμό.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

26. Μιά ταλάντωση πού ἔχει συχνότητα 75 Hz διαδίδεται μέσα σὲ ἐλαστικὸ ὑλικό μέ ταχύτητα 300 m/sec. Πόσο εἶναι τὸ μήκος κύματος;

27. Ἡ συχνότητα μιᾶς ταλαντώσεως εἶναι 2500 Hz καὶ τὸ μήκος κύματος εἶναι 2 cm. Πόση εἶναι ἡ ταχύτητα διαδόσεως τοῦ κύματος;

28. Ἡ ταχύτητα διαδόσεως ἑνὸς κύματος εἶναι 300 000 km/sec καὶ τὸ μήκος κύματος εἶναι 400 m. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα σὲ megacycles τὸ δευτερόλεπτο;

29. 'Από την άκρη Α μιᾶς εὐθείας ΑΒ μήκους 10 m φεύγει ἓνα κύμα πού ἔχει μήκος κύματος 40 cm. Μέ πόσα μήκη κύματος εἶναι ἴση ἡ εὐθεία ΑΒ καί μέσα σέ πόσες περιόδους τό κύμα φτάνει στήν ἄκρη Β τῆς εὐθείας;

30. Μέσα σέ ἓνα ἐλαστικό ὑλικό διαδίδεται ἓνα κύμα μέ ταχύτητα 5000 m/sec καί μέ μήκος κύματος 2 m. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα ν καί ἡ κυκλική συχνότητα ω τῆς κινήσεως ἑνός μορίου τοῦ ἐλαστικοῦ ὑλικοῦ;

31. Κατά μήκος ἑνός σπειροειδοῦς ἐλατηρίου διαδίδονται διαμήκη κύματα μέ ταχύτητα 4 m/sec. Τό μήκος κύματος εἶναι 80 cm καί τό πλάτος τῆς ταλαντώσεως κάθε σπείρας εἶναι 3 mm. 1) Πόση εἶναι ἡ μέγιστη ταχύτητα πού ἀποκτᾶ κάθε σπείρα; 2) Πόση εἶναι (σέ Joule) ἡ μέγιστη κινητική ἐνέργεια πού ἀποκτᾶ μιά στοιχειώδης μάζα τοῦ ἐλατηρίου ἴση μέ 0,016 gr;

32. 'Η ἄκρη Α μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς ἐκτελεῖ ἄρμονική ταλάντωση, πού ἔχει ἐξίσωση $y = 0,04 \cdot \eta\mu 20\pi t$. Τά διάφορα μεγέθη μετριοῦνται σέ μονάδες MKS. 1) Νά βρεθοῦν τό πλάτος α, ἡ συχνότητα ν καί ἡ περίοδος Τ τῆς κινήσεως τῆς ἄκρης τῆς χορδῆς. 2) 'Η ταλάντωση διαδίδεται κατά μήκος τῆς χορδῆς μέ ταχύτητα 25 m/sec. Νά βρεθεῖ τό μήκος κύματος καί νά γραφεῖ ἡ ἐξίσωση τῆς κινήσεως ἑνός σημείου Μ τῆς χορδῆς, πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση 6,25 m ἀπό τήν ἄκρη Α τῆς χορδῆς.

33. Οἱ δύο ἄκρες μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς ΑΒ εἶναι σταθερά στερεωμένες. 'Η χορδή ἔχει μήκος 120 cm καί πάνω της διαδίδονται κύματα πού ἔχουν μήκος κύματος 40 cm καί ἀπό τή συμβολή τους σχηματίζονται στάσιμα ἐγκάρσια κύματα. 1) Πόσο εἶναι τό μήκος τοῦ στάσιμου κύματος καί πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται πάνω στή χορδή; 2) Νά σημειωθοῦν οἱ ἀποστάσεις τῶν κοιλιῶν ἀπό τήν ἄκρη Α τῆς χορδῆς.

34. 'Η ἄκρη Α μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς εἶναι σταθερά στερεωμένη, ἐνῶ ἡ ἄλλη ἄκρη τῆς Β εἶναι ἐλεύθερη. 'Η χορδή ἔχει μήκος 90 cm καί πάνω της σχηματίζονται στάσιμα ἐγκάρσια κύματα. Τό μήκος κύματος εἶναι 40 cm. 1) Πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται; 2) Νά σημειωθοῦν οἱ ἀποστάσεις τῶν κοιλιῶν ἀπό τήν ἄκρη Α τῆς χορδῆς.

35. 'Ενα διαπαθῶν ἐκτελεῖ ταλαντώσεις, πού ἔχουν συχνότητα $\nu = 120$ Hz, καί δημιουργεῖ στήν ἐπιφάνεια ἑνός ὑγροῦ δύο σύγχρονες πηγές O_1 καί O_2 ἐγκάρσιων κυμάτων, πού διαδίδονται μέ ταχύτητα $c = 48$ cm/sec. Τό πλάτος ταλαντώσεως τῶν μορίων τοῦ ὑγροῦ εἶναι $a = 5$ mm καί ὑποθέτομε ὅτι δέν ὑπάρχουν ἀπώλειες ἐνέργειας. 1) Πόσο εἶναι τό πλάτος Α τῆς ταλαντώσεως σέ ἓνα σημείο Β τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ, πού οἱ ἀποστάσεις του ἀπό τίς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι $O_1B = 8$ cm καί $O_2B = 6$ cm; 2) Πόσο εἶναι τό πλάτος Α τῆς ταλαντώσεως σέ ἓνα ἄλλο σημείο Γ, πού οἱ ἀποστάσεις του ἀπό τίς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι $O_1\Gamma = 10$ cm καί $O_2\Gamma = 7$ cm;

36. Στίς δύο ἄκρες ἑνός γραμμικοῦ ἐλαστικοῦ μέσου, πού ἔχει μήκος 6 m, δύο πηγές O_1 καί O_2 κατά τή χρονική στιγμή $t = 0$ ἀρχίζουν νά ἐκτελοῦν ταλαντώσεις μέ συχνότητα $\nu = 5$ Hz καί πλάτος $a = 3$ mm. 1) Σέ ποιές χρονικές στιγμές t_1 καί t_2 φτάνουν τά δύο ἐγκάρσια κύματα σέ ἓνα σημείο Β, πού ἡ ἀπόστασή του ἀπό τήν πηγή O_1 εἶναι $O_1B = 80$ cm; 2) Πόσο εἶναι τό πλάτος τῆς ταλαντώσεως στό σημείο Β καί πόσο σέ ἓνα ἄλλο σημείο Γ, πού ἡ ἀπόστασή του ἀπό τήν πηγή O_1 εἶναι $O_1\Gamma = 2,50$ m; 'Η ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων εἶναι $c = 2$ m/sec.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

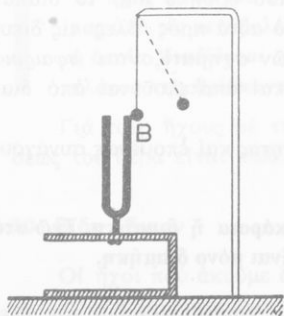
Ήχητικά κύματα

18. Παραγωγή του ήχου

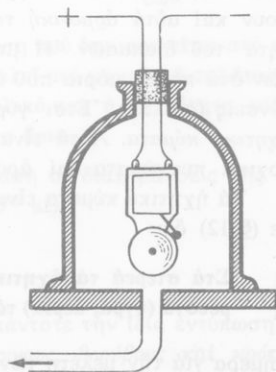
Τό φυσικό αίτιο πού διεγείρει τό αἰθητήριο ὄργανο τῆς ἀκοῆς μας τό ὀνομάζουμε γενικά ἦχο. Μιά μικρή σφαῖρα ἀπό χάλυβα κρέμεται μέ νῆμα ἀπό σταθερό σημεῖο καί βρίσκεται σέ ἐπαφή μέ διαπασῶν πού ἤρεμεῖ (σχ. 31). Ἐάν χτυπήσουμε ἐλαφρά τό διαπασῶν, τότε ἀκοῦμε ἦχο καί ταυτόχρονα βλέπουμε ὅτι ἡ σφαῖρα ἀναπηδᾷ κάθε φορά πού ἔρχεται σέ ἐπαφή μέ τό διαπασῶν. Ὡστε, ὅταν τό διαπασῶν ἐκτελεῖ ταλάντωση, τότε τό διαπασῶν παράγει ἦχο. Εὐκόλα διαπιστώνουμε ὅτι πηγές ἤχων μπορεῖ νά εἶναι διάφορα στερεά πού πάλλονται (χορδές, πλάκες, μεμβράνες) ἢ μάζες ἀερίων πού πάλλονται (ὁ ἀέρας μέσα σέ πνευστό ὄργανο). Ὡστε:

Ἦχος παράγεται ἀπό ἕνα σῶμα πού ἐκτελεῖ ταλαντώσεις.

Μιά ἠχητική πηγή παράγει ἀκουστό ἦχο, ὅταν ἡ συχνότητα καί τό



Σχ. 31. Τό παλλόμενο διαπασῶν παράγει ἦχο.



Σχ. 32. Ὁ ἦχος δέ διαδίδεται μέσα στό κενό.

πλάτος τῆς ταλαντώσεως τῆς πηγῆς βρίσκονται μέσα σέ *ορισμένα ὄρια* πού τά καθορίζει ἡ φυσιολογική λειτουργία τοῦ αὐτιοῦ μας.

19. Διάδοση τοῦ ἤχου

Ὁ ἤχος ὀφείλει τῆ γένεσή του *στήν ταλάντωση* πού ἐκτελεῖ μιά ἠχητική πηγή. Ἡ μετάδοση ὁμως ἐνέργειας ἀπό τήν ἠχητική πηγή στό αὐτί μας ὀφείλεται στή διάδοση τῆς ταλαντώσεως, διά μέσου ἑνός *ελαστικοῦ ὕλικου* πού πρέπει νά ὑπάρχει μεταξύ τῆς ἠχητικῆς πηγῆς καί τοῦ αὐτιοῦ μας. Αὐτό ἀποδεικνύεται μέ τό ἀπλό πείραμα πού δείχνει τό σχῆμα 32. Ὄταν μέσα στό δοχεῖο ὑπάρχει ἀέρα, ἀκοῦμε τόν ἤχο πού παράγει τό κουδούνι. Ἄν ὁμως μέ τήν ἀεραντλία ἀφαιρέσουμε ἀπό τό δοχεῖο τόν ἀέρα, τότε δέν ἀκοῦμε ἤχο, ἄν καί βλέπουμε ὅτι τό σφαιρίδιο τοῦ κουδουνιοῦ ἐξακολουθεῖ νά κινεῖται κανονικά καί νά χτυπάει πάνω στήν καμπάνα. Ὡστε:

■ Ὁ ἤχος διαδίδεται μόνο μέσα στά ὑλικά σώματα (στερεά, ὑγρά, ἀέρια). Στό κενό ὁ ἤχος δέ διαδίδεται.

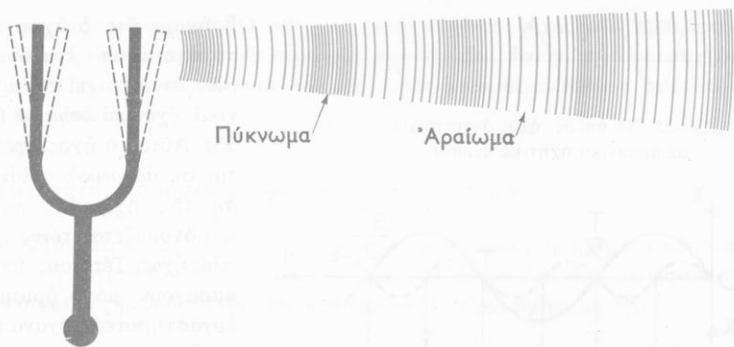
α. Ἡχητικά κύματα. Ξέρουμε (§ 9) ὅτι ἡ διάδοση μιᾶς ἀρμονικῆς ταλαντώσεως σέ ἕνα ελαστικό μέσο εἶναι *μετάδοση ἐνέργειας* ἀπό τό ἕνα μόριο στό ἄλλο. Αὐτή ἡ διάδοση ἐνέργειας διά μέσου ἑνός ελαστικοῦ ὕλικου γίνεται μέ *ἐγκάρσια* ἢ *διαμήκη κύματα*.

Ὄταν ἕνα διαπασῶν πάλλεται μέσα στόν ἀέρα, τότε τό διαπασῶν ἐξασκεῖ στά γειτονικά του μόρια μιά ὄθηση καί τά ἀναγκάζει νά ἐκτελέσουν καί αὐτά *ἀρμονική ταλάντωση* τῆς ἴδιας συχνότητας μέ τή συχνότητα τοῦ διαπασῶν. Ἡ μηχανική ἐνέργεια πού δόθηκε ἀπό τό διαπασῶν στά πρῶτα μόρια τοῦ ἀέρα διαδίδεται ἀπό αὐτά πρὸς ὄλες τίς διευθύνσεις (σχ. 33). Ἐτσι γύρω ἀπό τό διαπασῶν σχηματίζονται *σφαιρικά ἠχητικά κύματα*. Αὐτά εἶναι *διαμήκη κύματα* καί ἀποτελοῦνται ἀπό διαδοχικά πυκνώματα καί ἀραιώματα.

Τά ἠχητικά κύματα εἶναι *κύματα ἐλαστικότητας* καί ἐπομένως συνάγουμε (§ 12) ὅτι:

■ Στά στερεά τά ἠχητικά κύματα εἶναι ἐγκάρσια ἢ διαμήκη, ἐνῶ στά ρευστά (ὑγρά, ἀέρια) τά ἠχητικά κύματα εἶναι μόνο διαμήκη.

Σήμερα γιά τήν μελέτη τῶν ἠχητικῶν κυμάτων χρησιμοποιοῦμε τόν *ἠλεκτρονικό παλμογράφο* (τῆ λειτουργία του θά τῆ μάθουμε στόν Ἡλεκτρισμό). Τά ἠχητικά κύματα πού φτάνουν στό μικρόφωνο δημιουργοῦν μέσα σέ ἕνα



Σχ. 33. Τό παλλόμενο διαπασών δίνει ενέργεια στα μόρια του αέρα που βρίσκονται σε επαφή μαζί του και τότε μέσα στον αέρα διαδίδονται διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα.

ειδικό κύκλωμα ηλεκτρικές ταλαντώσεις. Αυτές προκαλούν μετακινήσεις μιᾶς φωτεινῆς κηλίδας πάνω στο διάφραγμα (δθόνη) του παλμογράφου και τότε βλέπουμε μιὰ καμπύλη γραμμῆ που ἔχει τὴν ἴδια μορφή, τὴν ἴδια περίοδο καὶ πλάτος ἀνάλογο μὲ τὴ μηχανική ταλάντωση πού δημιουργοῦν στό μικρόφωνο τὰ ἤχητικά κύματα πού φτάνουν σ' αὐτό (σχ. 34).

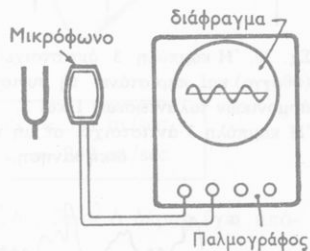
β. Ὅρισμός τοῦ ἤχου. Ἀπό ὅσα ἀναφέραμε παραπάνω μπορούμε νά δώσουμε γιά τόν ἤχο τόν ἐξῆς ὄρισμό :

Ὁ ἤχος εἶναι μιὰ ὑποκειμενική ἐντύπωση πού δημιουργεῖται στό αὐτίμας ἀπό τίς μεταβολές πίεσεως πού προκαλεῖ μιὰ μηχανική ταλάντωση, ἡ ὁποία διαδίδεται μέσα σέ ἔλαστικό ὑλικό καί ἡ συχνότητα καί τό πλάτος της βρίσκονται μέσα σέ ὀρισμένα ὄρια.

Γιά τούς ἤχους μέ τὴ συνηθισμένη ἐνταση οἱ διακυμάνσεις τῆς πίεσεως τοῦ αἵρα εἶναι πολὺ μικρές (10^{-6} ὡς 10^{-7} at).

20. Εἶδη ἤχων

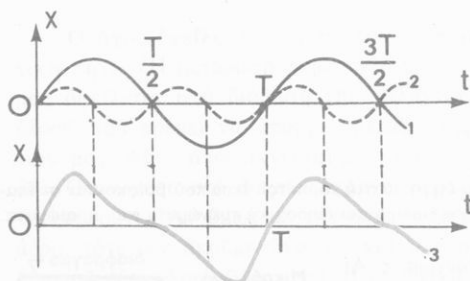
Οἱ ἤχοι πού ἀκοῦμε δέ μᾶς προκαλοῦν πάντοτε τὴν ἴδια ἐντύπωση. Οἱ ἀκουστοὶ ἤχοι διακρίνονται σέ τόνους, φθόγγους, θορύβους καί κρότους. Στά ἐργαστήρια μέ κατάλληλες διατάξεις (π.χ. μέ τόν παλμογράφο) καταγράφουμε τὰ ἤχητικά κύματα πού ἀντιστοιχοῦν στό κάθε εἶδος ἤχου. Ἔτσι



Σχ. 34. Ἡ καμπύλη πού βλέπουμε στόν παλμογράφο ἀντιστοιχεῖ στή μηχανική ταλάντωση τοῦ διαπασών.

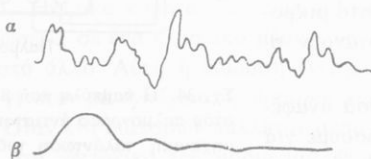


Σχ. 35. 'Ο άπλός ήχος αντιστοιχεί σε άρμονικά ήχητικά κύματα.



Σχ. 36. 'Η καμπύλη 3 αντιστοιχεί σε σύνθετο ήχο (φθόγγο) και παριστάνει τη συνισταμένη δύο άπλών άρμονικών ταλαντώσεων 1 και 2.

'Η καμπύλη 3 αντιστοιχεί σε μή ήμιτονοειδή περιοδική κίνηση.



Σχ. 37. Καταγραφή θορύβου (α) και κρότου (β).

τήν πρόσθεση άπλών ήχων με συχνότητες οι οποίες είναι *άκέραια* πολλαπλάσια μιās αρχικής συχνότητας (ν).

'Ο *θόρυβος* αντιστοιχεί σε άκανόνιστα ήχητικά κύματα που δέν παρουσιάζουν καμιά περιοδικότητα (σχ. 37α). Τέλος ο *κρότος* αντιστοιχεί σε μιιά άπότομη και ισχυρή δόνηση του άερα, όπως π.χ. συμβαίνει, όταν ένα όπλο εκπυρσοκροτεί (σχ. 37β).

'Από τά παραπάνω καταλήγουμε στα εξής:

I. Οι ήχοι που μās ενδιαφέρουν περισσότερο είναι ο *τόνος* και ο *φθόγγος*.

II. 'Ο *τόνος* ή *άπλός ήχος* οφείλεται σε *άρμονική ταλάντωση* όρισμέ-

βρήκαμε ότι ο ήχος που παράγεται από ένα διαπασών αντιστοιχεί σε *άρμονικά ήχητικά κύματα* (σχ. 35). Αυτός ο ήχος οφείλεται σε *άρμονική ταλάντωση* τής ήχητικής πηγής και ονομάζεται *τόνος* ή *άπλός ήχος*. Τέτοιους ήχους παράγουν μόνο όρισμένα εργαστηριακά όργανα π.χ. τά διαπασών. Οι ήχοι που παράγονται από τά συνηθισμένα μουσικά όργανα αντιστοιχούν σε *περιοδική κίνηση*, ή όποία όμως δέν είναι *άρμονική ταλάντωση*. Αυτοί οι ήχοι ονομάζονται *φθόγγοι*. Στο σχήμα 36 ή καμπύλη 3 αντιστοιχεί σε φθόγγο. 'Η ταλάντωση 3 στο σχήμα είναι συνισταμένη των δύο άρμονικών ταλαντώσεων 1 και 2, που οι συχνότητές τους αντίστοιχα είναι ν_1 και $\nu_2 = 2\nu_1$. 'Ωστε, ο φθόγγος είναι *σύνθετος ήχος* που αποτελείται από

νης συχνότητας (ν). Ο φθόγγος είναι σύνθετος ήχος και προκύπτει από τη σύνθεση δύο ή περισσότερων απλών ήχων, που οι συχνότητές τους είναι άκεραια πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους συχνότητας (ν).

21. Ταχύτητα διαδόσεως των ήχητικῶν κυμάτων

α. Στόν αέρα. Στόν αέρα διαδίδονται μόνο διαμήκη ήχητικά κύματα και για τή μέτρηση τῆς ταχύτητας (c), μέ τήν ὁποία διαδίδονται, ἐφαρμόζουμε διάφορες μεθόδους (ἄμεσες καί ἔμμεσες). Ἐτσι βρήκαμε ὅτι:

Ἡ ταχύτητα διαδόσεως τοῦ ἤχου στόν αέρα εἶναι ἀνεξάρτητη ἀπό τή συχνότητα τοῦ ἤχου καί τήν ἀτμοσφαιρική πίεση, καί ἀυξάνει ὅταν ἀυξάνει ἡ θερμοκρασία τοῦ αέρα.

Ἀπό τίς μετρήσεις βρίσκουμε ὅτι εἶναι:

ταχύτητα τοῦ ἤχου	σέ 0° C	$c_0 \approx 331$ m/sec
στόν αέρα	σέ 15° C	$c \approx 340$ m/sec

Ἀποδεικνύεται ὅτι ἡ ταχύτητα (c) τοῦ ἤχου, ὅταν ὁ αέρας ἔχει ἀπόλυτη θερμοκρασία T , δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

$$\begin{array}{l} \text{ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν αέρα} \\ \text{σέ } T^\circ \text{ K} \end{array} \quad c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (1)$$

ὅπου $1/273 \text{ grad}^{-1}$ εἶναι ὁ θερμικός συντελεστής τῶν ἀερίων. Ἡ ἐξίσωση (1) φανερώνει ὅτι:

Ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν αέρα εἶναι ἀνάλογη μέ τήν τετραγωνική ρίζα τῆς ἀπόλυτης θερμοκρασίας τοῦ αέρα.

Ἀπόδειξη τῆς ἐξισώσεως (1). Στά αέρια τά διαμήκη κύματα διαδίδονται μέ ταχύτητα (c) που δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (2)$$

ὅπου ρ εἶναι ἡ πυκνότητα τοῦ αερίου, p ἡ πίεσή του καί γ εἶναι ὁ λόγος τῶν δύο εἰδικῶν θερμοτήτων τοῦ αερίου ($\gamma = c_p/c_v$).

Επειδή σε όρισμένη θερμοκρασία ή πυκνότητα (ρ) του αερίου είναι ανάλογη με την πίεσή του (p), από την εξίσωση (2) συμπεραίνουμε ότι η ταχύτητα (c) διαδόσεως του ήχου στον αέρα είναι *ανεξάρτητη από την πίεση*. Αν ο αέρας βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες, δηλαδή έχει πίεση $p_0 = 76 \text{ cm Hg}$ και θερμοκρασία $\theta = 0^\circ\text{C}$ ($T_0 = 273^\circ\text{K}$), τότε έχει πυκνότητα ρ_0 και η ταχύτητα (c_0) του ήχου στον αέρα δίνεται από την εξίσωση:

$$c_0 = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_0}{\rho_0}} \quad \left\{ \begin{array}{l} p_0 \text{ σε N/m}^2, \rho_0 \text{ σε kg/m}^3 \\ v_0 \text{ σε m/sec} \end{array} \right. \quad (3)$$

Από την εξίσωση (3) βρίσκουμε $c_0 = 331 \text{ m/sec}$. Η πυκνότητα ρ του αέρα σε θερμοκρασία T και πίεση p δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273}{T} \quad \text{άρα} \quad \frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \frac{T}{273} \quad (4)$$

Αν στην εξίσωση (2) αντικαταστήσουμε τό p/ρ από την εξίσωση (4) έχουμε:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \frac{T}{273}} \quad \text{άρα} \quad c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}}$$

* **Ταχύτητα του ήχου στα άλλα αέρια.** Ένα αέριο (υδρογόνο, οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα κ.λ.) έχει *σχετική πυκνότητα* δ ως προς τον αέρα και την ίδια θερμοκρασία (T) με τον αέρα. Αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα του ήχου στο αέριο δίνεται από την εξίσωση:

$$c_{\text{αέριο}} = \frac{c_{\text{αέρας}}}{\sqrt{\delta}}$$

β. Στα υγρά και στα στερεά. Αποδεικνύεται (πειραματικά και θεωρικά) ότι:

Η ταχύτητα του ήχου στα υγρά είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου στα αέρια και στα στερεά είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου στα υγρά.

Σε θερμοκρασία 20°C η ταχύτητα του ήχου είναι στο νερό 1457 m/sec και στο χάλυβα 5100 m/sec .

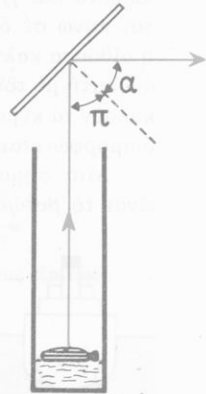
22. 'Ανάκλαση τών ήχητικῶν κυμάτων

Τά ήχητικά κύματα έχουν γενικά όλες τις γνωστές ιδιότητες τών κυμάτων ελαστικότητας. Όταν λοιπόν τά ήχητικά κύματα πέσουν πάνω σε κατάλληλα εμπόδια, *ανακλώνται* σύμφωνα με τούς νόμους τής ανα-

κλάσεως τῶν κυμάτων ελαστικότητας (§ 14). Πειραματικά ἡ ἀνάκλαση τῶν ἡχητικῶν κυμάτων δείχνεται μέ τό ἐξῆς πείραμα: Στόν πυθμένα ἑνός κυλινδρικοῦ δοχείου βάζουμε βαμβάκι καί πάνω του τοποθετοῦμε ἕνα συνηθισμένο ρολόγι (σχ. 38). Ἄν στό στόμιο τοῦ δοχείοῦ τούς φέρουμε πλάγια μιᾶ γυάλινη πλάκα, τότε ἀκοῦμε καθαρά τούς χτύπους τοῦ ρολοιοῦ μόνο κατά μιᾶ ὀρισμένη διεύθυνση, γιά τήν ὁποία ἰσχύει ἡ γνωστή σχέση ὅτι ἡ γωνία ἀνακλάσεως εἶναι ἴση μέ τή γωνία προσπτώσεως.

α. Ἡχώ καί μετήχηση. Τά ἡχητικά κύματα ἀνακλῶνται καί ὅταν πέσουν πάνω σέ ἀκανόνιστα ἐμπόδια πού ἔχουν μεγάλες διαστάσεις (τοιχος, λόφος, συστάδα ἀπό δέντρα κ.λ.). Ἄν ἕνας παρατηρητής πυροβολήσῃ καί σέ ἀρκετή ἀπόσταση ἀπό αὐτόν ὑπάρχει ἕνα ἐμπόδιο, τότε ὁ παρατηρητής ἀκοῦει *νά ἐπαναλαμβάνεται* ὁ κρότος τοῦ πυροβολισμοῦ. Τό φαινόμενο αὐτό ὀνομάζεται *ἡχώ* καί τό ἀντιλαμβανόμετε, ἂν ἡ ἀπόστασή μας ἀπό τό ἐμπόδιο εἶναι μεγαλύτερη ἀπό 17 m. Αὐτό ἐξηγεῖται ὡς ἐξῆς: "Ὅταν τό αὐτί μας δέχεται ἕναν πολύ σύντομο ἡχητικό ἐρεθισμό, ἡ ἐντύπωση πού προκλήθηκε παραμένει 1/10 τοῦ δευτερολέπτου. Ἐπομένως δύο ἤχοι προκαλοῦν δύο χωριστούς ἐρεθισμούς, ὅταν μεταξύ αὐτῶν τῶν δύο ἤχων μεσολαβεῖ χρονικό διάστημα ἴσο μέ 1/10 sec. Σ' αὐτό τό χρονικό διάστημα τά ἡχητικά κύματα διατρέχουν ἀπόσταση 34 m." Ἄρα, γιά νά ἀκούσουμε τήν ἡχώ, πρέπει ὁ δρόμος πού διατρέχουν τά κύματα γιά νά πᾶνε στό ἐμπόδιο καί νά ἐπιστρέψουν στόν παρατηρητή νά εἶναι περίπου 34 m." Ἄν τό ἐμπόδιο ἀπέχει ἀπό τόν παρατηρητή λιγότερο ἀπό 17 m, τότε τά ἀνακλῶμενα κύματα φτάνουν στόν παρατηρητή πρῖν τελειώσει ἡ ἐντύπωση τοῦ πρώτου ἤχου καί ἔτσι *παρατείνεται ἡ διάρκεια τῆς ἐντυπώσεως* πού προκάλεσε ὁ πρῶτος ἤχος. Τό φαινόμενο αὐτό ὀνομάζεται *μετήχηση*. Σέ μερικές περιπτώσεις τά ἡχητικά κύματα ἀνακλῶνται διαδοχικά πάνω σέ περισσότερα ἐμπόδια καί τότε ὁ παρατηρητής ἀκοῦει *νά ἐπαναλαμβάνεται* πολλές φορές ὁ ἴδιος ἤχος. Τό φαινόμενο αὐτό ὀνομάζεται *πολλαπλή ἡχώ*.

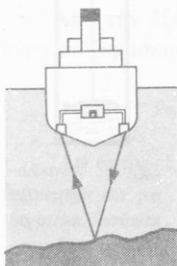
β. Ἐφαρμογές τῆς ἀνακλάσεως τῶν ἡχητικῶν κυμάτων. Τό φαινόμενο τῆς ἀνακλάσεως τῶν ἡχητικῶν κυμάτων ἰδιαίτερα τό ὑπολογίζουμε, ὅταν διαμορφώνουμε μεγάλες αἰθουσες (θεάτρου, κοινοβουλίου, συναυλιῶν, διαλέξεων). Ὅταν μέσα σέ μιᾶ μεγάλη αἰθουσα μιᾶ ἡχητικὴ πηγὴ παράγει ἡχητικά κύματα, τότε ὁ ἀκροατής πού βρίσκεται μέσα στήν αἰθουσα δέχεται: α) ἡχητικά κύματα μέ ἀπευθείας διάδοση, β) ἡχητικά κύματα ἀπὸ τὴ διάχυση (δηλ. τήν ἀκανόνιστη ἀνάκλαση) πού προκαλοῦν διάφορα ἀντι-



Σχ. 38. Ἀνάκλαση τῶν ἡχητικῶν κυμάτων πάνω σέ γυάλινη πλάκα.

κείμενα καί γ) ἠχητικά κύματα ἀπὸ τὴν « κανονικὴ » ἀνάκλαση, πού γίνονται πάνω σέ διάφορα ἐμπόδια (τοῖχοι, ὀροφή, κολῶνες κ.λ.). Γιά νά ἔχει ἡ αἴθουσα καλὴ « ἀκουστικὴ », πρέπει τὰ ἠχητικά κύματα πού φτάνουν στὸν ἀκροατὴ μὲ τοὺς δύο τελευταίους τρόπους νά ἐνισχύουν τὸν ἦχο πού προκαλοῦν τὰ κύματα πού φτάνουν ἀπευθείας στὸν ἀκροατὴ. Γι' αὐτὸ τὸ σκοπὸ διαμορφώνεται κατάλληλα ἡ αἴθουσα.

Μιά σημαντικὴ ἐφαρμογὴ τῆς ἀνακλάσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων εἶναι τὸ *βυθόμετρο*, πού τὸ χρησιμοποιοῦμε γιά νά μετράμε τὸ βάθος τῆς



Σχ. 39. Βυθόμετρο

θάλασσας. Στὰ ὕφαλα τοῦ σκάφους ὑπάρχει ἓνας πομπὸς ἠχητικῶν κυμάτων μεγάλης συχνότητας. Αὐτὸς ἐκπέμπει ἓνα ἠχητικὸ σῆμα, δηλαδή ἓνα συρμὸ ἠχητικῶν κυμάτων, πού ἀνακλῶνται πάνω στό βυθὸ καί ἐπιστρέφουν σέ ἓνα δέκτη, πού βρίσκεται καί αὐτὸς στὰ ὕφαλα τοῦ σκάφους (σχ. 39). Ἡ ἀναχώρηση τῶν κυμάτων ἀπὸ τὸν πομπὸ καί ἡ ἐπιστροφή τους στό δέκτη καταγράφονται αὐτόματα καί ἔτσι εἶναι ἀμέσως γνωστὴ ἡ διάρκεια t τῆς διαδρομῆς τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. Ἄν c εἶναι ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων στὴ θάλασσα, τότε τὸ βάθος s εἶναι $s = c \cdot t/2$.

23. Διάθλαση τῶν ἠχητικῶν κυμάτων

Ὅταν τὰ ἠχητικά κύματα περνοῦν ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια πού διαχωρίζει δύο διαφορετικὰ ἐλαστικά μέσα, τότε τὰ ἠχητικά κύματα διαθλῶνται σύμφωνα μὲ τοὺς νόμους τῆς διαθλάσεως τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας (§ 14).

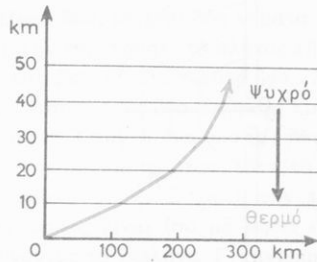
Ἡ διάθλαση τῶν ἠχητικῶν κυμάτων ὀφείλεται στό ὅτι ἡ ταχύτητα διαδόσεώς τους εἶναι διαφορετικὴ στὰ δύο ἐλαστικά μέσα. Διάθλαση, τῶν ἠχητικῶν κυμάτων μπορεῖ νά παρατηρηθεῖ καί στὴν ἀτμόσφαιρα, γιατί τὰ στρώματα τοῦ ἀέρα ἔχουν διαφορετικὴ θερμοκρασία καί ἐπομένως ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων στὰ διάφορα στρώματα τοῦ ἀέρα εἶναι διαφορετικὴ. Συνήθως τὰ στρώματα τοῦ ἀέρα πού βρίσκονται κοντὰ στὴν ἐπιφάνεια τοῦ ἐδάφους εἶναι θερμότερα ἀπὸ τὰ ἄλλα στρώματα πού βρίσκονται πιὸ ψηλά. Μιά ἠχητικὴ ἀκτῖνα πού διευθύνεται πλάγια πρὸς τὰ πάνω μπαινει ἀπὸ θερμότερα σέ ψυχρότερα στρώματα ἀέρα, δηλαδή μπαινει σέ στρώματα ἀέρα στὰ ὁποῖα ἡ ταχύτητα τῶν ἠχητικῶν κυμάτων γίνεται διαρκῶς μικρότερη (σχ. 40). Τότε ἡ γωνία διαθλάσεως εἶναι μικρότερη ἀπὸ τὴ γωνία προσπτώσεως. Ἐτσι ἡ ἠχητικὴ ἀκτῖνα μεταβάλλεται σέ καμπύλη γραμμῆ. Σέ μερικές ὁμως περιπτώσεις καί κυρίως τὴ νύχτα μπορεῖ τὰ στρώματα τοῦ ἀέρα, πού βρί-

σκονται κοντά στο έδαφος, να γίνουν ψυχρότερα από τα άλλα στρώματα που βρίσκονται πιο ψηλά. Τότε η ήχητική ακτίνα μπαίνει από ψυχρότερα σε θερμότερα στρώματα και η γωνία διαθλάσεως είναι μεγαλύτερη από τη γωνία προσπτώσεως (σχ. 41). Η ήχητική ακτίνα μπορεί σε όρισμένο ύψος να πάθει ολική ανάκλαση και τότε ακολουθώντας μία συμμετρική πορεία ξαναγυρίζει στο έδαφος. Έτσι εξηγείται γιατί σε μερικές περιπτώσεις ο ήχος που παράγεται από μία ισχυρή έκρηξη

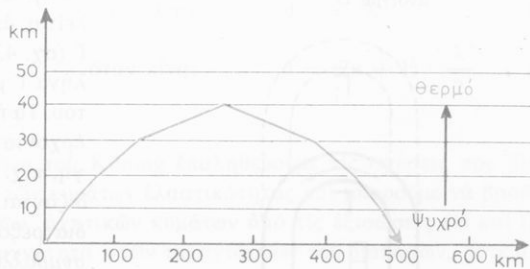
μπορεί να γίνει ακουστός σε τόπους που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση (ως 500 km) από τον τόπο της έκρηξης, ενώ δεν είναι ακουστός σε άλλους τόπους που βρίσκονται πιο κοντά στον τόπο της έκρηξης.

24. Περίθλαση των ήχητικών κυμάτων

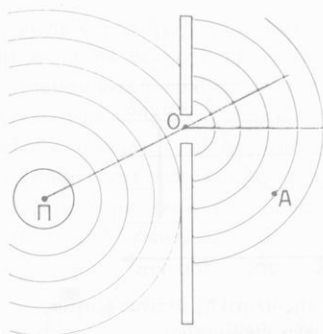
Τα φαινόμενα της περιθλάσεως των κυμάτων ελαστικότητας εμφανίζονται, όταν τα κύματα συναντούν αντικείμενα ή ανοίγματα που οι διαστάσεις τους είναι της τάξεως του μήκους κύματος (από $\lambda/10$ ως και 10λ). Για την όμιλία και τη μουσική το μήκος κύματος των ήχητικών κυμάτων είναι από 30 cm ως 3 m. Τόσες είναι και οι διαστάσεις που έχουν τα αντικείμενα και τα ανοίγματα που στην καθημερινή ζωή συναντούν στο δρόμο τους τα ήχητικά κύματα (πόρτες, παράθυρα, έπιπλα, στύλοι κ.λ.). Το φαινόμενο της περιθλάσεως των ήχητικών κυμάτων μας επιτρέπει να ακούμε αρκετά



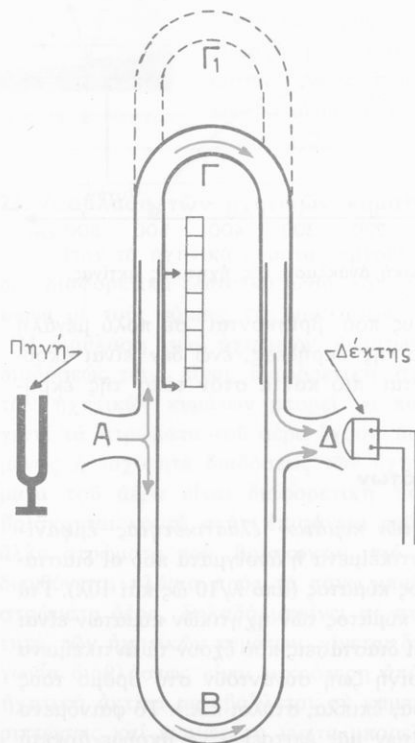
Σχ. 40. Καμπύλωση της ήχητικής ακτίνας εξαιτίας διαδοχικών διαθλάσεων.



Σχ. 41. Όλική ανάκλαση της ήχητικής ακτίνας.



Σχ. 42. Ὁ παρατηρητής A ἀκούει τὸν ἦχο τῆς πηγῆς Π ἐπειδὴ τὰ ἤχητικά κύματα παθαίνουν περίθλαση στὸ ἄνοιγμα O.



καθαρά μιὰ ἤχητική πηγή, χωρίς νά φτάνουν ἀπευθείας σέ μιᾶς οἱ ἤχητικές ἀκτίνες πού φεύγουν ἀπό τήν ἤχητική πηγή (σχ. 42).

25. Συμβολή τῶν ἤχητικῶν κυμάτων

Τά ἤχητικά κύματα προκαλοῦν φαινόμενα *συμβολῆς*. Θά ἐξετάσουμε αὐτά τὰ φαινόμενα μέ μιὰ διάταξη, πού ὀνομάζεται *σωλήνας τοῦ Kōnig* καί ἀποτελεῖται ἀπό δύο σωλήνες B καί Γ (σχ. 43). Ἄνυψώνοντας τὸ σωλήνα Γ μεταβάλλουμε τὸ μήκος του. Τά ἤχητικά κύματα πού προέρχονται ἀπό μιὰ ἤχητική πηγή, π.χ. ἓνα διαπασῶν, διακλαδίζονται στὸ σημεῖο A καί, ἀφοῦ διατρέξουν τοὺς δύο σωλήνες, *συμβάλλουν* στὸ σημεῖο Δ, ὅπου ὑπάρχει ἓνας δέκτης τῶν ἤχητικῶν κυμάτων (τὸ αὐτί μας ἢ μικρόφωνο πού συνδέεται μέ παλμογράφο). Οἱ ἄρμονικὲς ταλαντώσεις πού ἐκτελεῖ τὸ διαπασῶν ἔχουν συχνότητα ν . Ἄν c εἶναι ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στὸν ἀέρα, τότε τὸ μήκος κύματος τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στὸν ἀέρα τῶν σωλήνων εἶναι $\lambda = c/\nu$. Ὄταν οἱ δύο δρόμοι ABΔ καί AΓΔ τῶν ἤχητικῶν κυμάτων πού διαδίδο-

Σχ. 43. Σωλήνας τοῦ Kōnig. Τά δύο ἤχητικά κύματα πού φεύγουν ἀπὸ τὸ σημεῖο A συμβάλλουν στὸ σημεῖο Δ.

νται μέσα στους δύο σωλήνες, είναι *ίσοι*, τότε τα δύο κύματα φτάνουν στο δέκτη *μέ την ίδια φάση*. Σ' αυτή την περίπτωση τό πλάτος τής συνισταμένης ταλαντώσεως είναι *μέγιστο* καί άκούμε *ένα δυνατό ήχο*. Άνυψώνοντας σιγά-σιγά τό σωλήνα Γ κάνουμε *άνισους* τούς δύο δρόμους πού διατρέχουν τά κύματα μέσα στους δύο σωλήνες. "Όταν ή *διαφορά* (d) τών δύο δρόμων ΑΓΔ — ΑΒΔ γίνει *ίση μέ περιττό άριθμό ήμικυμάτων*, τότε τά ήχητικά κύματα φτάνουν στό δέκτη *μέ αντίθετη φάση*. Σ' αυτή την περίπτωση τό πλάτος τής συνισταμένης ταλαντώσεως είναι *ίσο μέ μηδέν* καί συμβαίνει *κατάργηση τοῦ ήχου*. Άν άνυψώνοντας τό σωλήνα Γ κάνουμε τή διαφορά (d) τών δρόμων τών δύο κυμάτων *ίση μέ ένα μήκος κύματος* (λ), τότε στό σημείο Δ τής συμβολής τών δύο κυμάτων δημιουργείται *πάρι μέγιστο* πλάτος τής συνισταμένης ταλαντώσεως, δηλαδή άκούμε *πάρι δυνατό ήχο*. "Ωστε,στό σημείο Δ πού συμβάλλουν τά δύο ήχητικά κύματα έχουμε:

μέγιστο τοῦ ήχου, όταν είναι $d = \kappa \cdot \lambda$ (1)

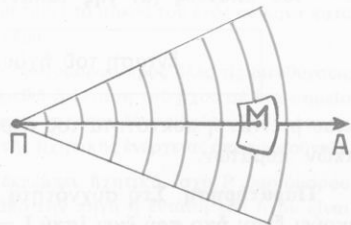
κατάργηση τοῦ ήχου, όταν είναι $d = (2\kappa + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ (2)

όπου κ είναι 0, 1, 2, 3,...

"Έτσι μέ τό σωλήνα τοῦ Kőning επαληθεύουμε τίς σχέσεις πού βρήκαμε γιά τή συμβολή τών κυμάτων *ελαστικότητας* καί μπορούμε νά βρούμε τό *μήκος κύματος* λ τών ήχητικῶν κυμάτων *άπό* τίς εξισώσεις (1) καί (2). Άν είναι γνωστή ή συχνότητα ν τών ταλαντώσεων τοῦ διαπασῶν, τότε *άπό* τήν εξίσωση $c = \nu \cdot \lambda$ *υπολογίζουμε τήν ταχύτητα* c *διαδόσεως* τών ήχητικῶν κυμάτων *στόν άέρα*.

26. Ένταση τοῦ ήχου

α. Όρισμός. Μιά σημειακή ήχητική πηγή πού *έκτελεῖ* *άμείωτες* *ταλαντώσεις* *έκπέμπει* *μηχανική* *ισχύ*. *Αυτή μεταφέρεται* *άπό* *τά ήχητικά κύματα* πού *διαδίδονται* *μέσα* *στόν άέρα* *πρός* *όλες* *τίς* *διευθύνσεις* *γύρω* *άπό* *τήν ήχητική πηγή*. Σέ *ένα σημείο* M *τής ήχητικής* *άκτινας* PA (σχ. 44) καί *κάθετα* S *αυτή τοποθετούμε* *μιά μικρή επιφάνεια* πού *έχει* *κέντρο* *τό σημείο* M *καί* *έμβαδό* S . *Άπό* *αυτή* *τήν επιφάνεια* *περνάει* *μηχανική* *ισχύς* P . *Τότε* *έχουμε* *τόν* *έξήξ* *όρισμό* :



Σχ. 44. Στό σημείο M ή ένταση τοῦ ήχου είναι $I = P/S$.

Ἔνταση τοῦ ἤχου (I) σέ ἓνα σημεῖο μιᾶς ἠχητικῆς ἀκτίνας ὀνομάζεται τὸ πηλίκο τῆς μηχανικῆς ἰσχύος (P), πού περνάει ἀπὸ μιὰ ἐπιφάνεια κάθετη στὴν ἠχητικὴ ἀκτίνα, διὰ τοῦ ἐμβαδοῦ (S) τῆς ἐπιφάνειας.

$$\text{ἔνταση τοῦ ἤχου } I = \frac{P}{S} \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ σέ } W, S \text{ σέ } m^2 \\ I \text{ σέ } W/m^2 \end{array} \right.$$

Στὸ σύστημα MKS μονάδα ἐντάσεως τοῦ ἤχου εἶναι τὸ $1 \text{ Watt}/m^2$. Στὴν πράξη ὡς μονάδα ἐντάσεως τοῦ ἤχου παίρνομε συνήθως τὸ $1 \text{ W}/cm^2$.

β. Μεταβολὴ τῆς ἐντάσεως τοῦ ἤχου μὲ τὴν ἀπόσταση ἀπὸ τὴν ἠχητικὴ πηγὴ. Μιά ἠχητικὴ πηγὴ, πού γιὰ εὐκολία τὴ θεωροῦμε ὡς ὕλικό σημεῖο, ἐκπέμπει ὁμοίμορφα πρὸς ὅλες τὶς διευθύνσεις μηχανικὴ ἰσχύ $P_{ολ}$ καὶ ὑποθέτομε ὅτι ἡ ἰσχύς αὐτὴ διαδίδεται μέσα στὸν ἀέρα χωρὶς καμιά ἀπώλεια. Γύρω ἀπὸ τὴν πηγὴ σχηματίζονται σφαιρικὰ κύματα. Σ' ἓνα σημεῖο M, πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση R ἀπὸ τὴν ἠχητικὴ πηγὴ, ἡ ἐπιφάνεια κύματος ἔχει ἐμβαδὸ $S = 4\pi R^2$ καὶ ἐπομένως στὸ σημεῖο M ἡ ἔνταση (I) τοῦ ἤχου εἶναι:

$$\text{ἔνταση τοῦ ἤχου } I = \frac{P_{ολ}}{4\pi R^2}$$

Παρατηροῦμε ὅτι:

Ἡ ἔνταση (I) τοῦ ἤχου μεταβάλλεται ἀντιστρόφως ἀνάλογα μὲ τὸ τετράγωνο τῆς ἀποστάσεως (R) ἀπὸ τὴν ἠχητικὴ πηγὴ.

γ. Σχέση μεταξὺ τῆς ἐντάσεως τοῦ ἤχου καὶ τοῦ πλάτους τῆς ταλαντώσεως. Σέ ἓνα σημεῖο M μέσα στὸν ἀέρα ἡ ἔνταση τοῦ ἤχου εἶναι I καὶ ἡ συχνότητα ν τῶν ἠχητικῶν κυμάτων εἶναι σταθερὴ. Ἀποδεικνύεται ὅτι :

Ἡ ἔνταση (I) ἑνὸς ἤχου ($\nu = \text{σταθ.}$) εἶναι ἀνάλογη μὲ τὸ τετράγωνο τοῦ πλάτους (a) τῆς ταλαντώσεως.

$$\text{ἔνταση τοῦ ἤχου } I = 2\pi^2 \cdot \rho \cdot a^2 \cdot \nu^2 \cdot c$$

ὅπου ρ εἶναι ἡ πυκνότητα τοῦ ἀέρα καὶ c ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων.

Παρατήρηση. Στὴ συχνότητα $\nu = 3000 \text{ Hz}$ τὸ αὐτί πολλῶν ἀνθρώπων ἀκούει ἓναν ἤχο πού ἔχει ἰσχύ $I = 10^{-12} \text{ W}/m^2$. Ἄν τὸ ἠχητικὸ κύμα διαδίδεται μέσα στὸν ἀέρα πού εἶναι σέ κανονικὲς συνθῆκες (0° C , 1 Atm), τότε ἀπὸ τὴν παραπάνω ἐξίσωση βρίσκουμε ὅτι τὸ πλάτος τῆς ταλαντώσεως

πού διαδίδεται με τό ήχητικό κύμα είναι $a = 3,6 \cdot 10^{-10}$ cm. Αυτό τό πλάτος είναι περίπου τό ένα εκατοστό τῆς διαμέτρου τοῦ ατόμου (10^{-8} cm). Ἀπό τό παράδειγμα αὐτό φαίνεται ἡ ἐξαιρετική εὐαισθησία τοῦ αὐτιοῦ μας

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

37. Σέ θερμοκρασία 0° C ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα είναι 331 m/sec. Σέ ποιά θερμοκρασία τοῦ ἀέρα ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου είναι 350 m/sec;

38. Σέ θερμοκρασία 15° C ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα είναι 340 m/sec. Πόση είναι ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα, ὅταν ἡ θερμοκρασία του είναι 10° C.

39. Ἐνας ἤχος συχνότητας 400 Hz διαδίδεται μέσα στόν ἀέρα καί μέσα σέ μιά ράβδο ἀπό χάλυβα. Ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα είναι 340 m/sec καί στό χάλυβα είναι 5000 m/sec Πόσο είναι τό μήκος κύματος μέσα σ' αὐτά τά δύο ὑλικά;

40. Νά μετρηθεῖ τό μήκος μιᾶς εὐθείας $AB = 10$ m σέ μήκη κύματος ἑνός ἤχου πού ἔχει συχνότητα 440 Hz καί διαδίδεται στόν ἀέρα μέ ταχύτητα 340 m/sec.

41. Γιά τόν ξηρό ἀέρα είναι $\gamma = 1,41$. Στή θερμοκρασία $T_0 = 273^{\circ}$ K (δηλαδή 0° C) ἡ πυκνότητα τοῦ ἀέρα είναι $\rho_0 = 1,293$ kg/m³. Ἡ κανονική πίεση $p_0 = 76$ cm Hg είναι $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ N/m². Πόση είναι ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα;

42. Ἐνας παρατηρητής βρίσκεται μέσα σέ μιά κοιλάδα πού τή σχηματίζουν δύο παράλληλα βουνά μέ ἀπότομες πλαγιές. Ὁ παρατηρητής πυροβολεῖ καί ἀκούει μιά πρώτη ἤχώ 0,5 sec μετά τόν πυροβολισμό καί μιά δεύτερη ἤχώ 1 sec μετά τόν πυροβολισμό. 1) Πόση είναι ἡ ἀπόσταση μεταξύ τῶν δύο βουνῶν; 2) Μπορεῖ ὁ παρατηρητής νά ἀκούσει καί τρίτη ἤχώ; Ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα 340 m/sec.

43. Ἐνα πλοῖο σέ καιρό ὁμίχλης βρίσκεται ἐμπρός ἀπό μιά βραχώδη ἀκτή καί ἐκπέμπει πρὸς τήν ἀκτή ἕνα ἠχητικό σῆμα. Ἀπό τήν ἀνάκλαση τοῦ ἤχου πάνω στήν ἀκτή φτάνουν στό πλοῖο δύο ἤχοι πού χρονικά ἀπέχουν μεταξύ τους 13 sec. Ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα είναι 340 m/sec καί στή θάλασσα 1440 m/sec Πόση είναι ἡ ἀπόσταση τοῦ πλοῖου ἀπό τήν ἀκτή;

44. Γιά νά μετρήσουμε τήν ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα μέ τό σωλήνα τοῦ Κόνιγ, χρησιμοποιοῦμε ἠχητική πηγὴ πού ἔχει συχνότητα $\nu = 262$ Hz. Γιά νά ἀντιληφθοῦμε δύο διαδοχικές καταργήσεις τοῦ ἤχου, πρέπει νά ἀυξηθεῖ τό μήκος τοῦ ἑνός σωλήνα κατά 130 cm. Πόση είναι ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα;

45. Μιά πολύ μικρὴ ἠχητικὴ πηγὴ ἐκπέμπει ὁμοιόμορφα πρὸς ὄλες τὶς διευθύνσεις ἠχητικὴ ἰσχύ μέ σταθερὸ ρυθμὸ $P = 1,5$ W. Νά βρεθεῖ ἡ ἔνταση τοῦ ἤχου σέ ἕνα σημεῖο πού ἀπέχει 25 m ἀπὸ τήν πηγὴ στίς ἐξῆς περιπτώσεις : α) ὅταν δέ συμβαίνει ἀπορρόφηση ἠχητικῆς ἐνέργειας, καί β) ὅταν κάθε 5 m τὰ 2 % τῆς ἠχητικῆς ἐνέργειας ἀπορροφοῦνται.

46. Ἐνηχητικὴ πηγὴ μέ μικρὲς διαστάσεις ἐκπέμπει ἠχητικὴ ἰσχύ P ὁμοιόμορφα πρὸς ὄλες τὶς διευθύνσεις. Σέ ἀπόσταση 100 m ἀπὸ τήν πηγὴ ἡ ἔνταση τοῦ ἤχου είναι $I = 5 \cdot 10^{-8}$ W/cm². Ἄν δέ συμβαίνει ἀπορρόφηση τῆς ἠχητικῆς ἐνέργειας, πόση είναι ἡ ἠχητικὴ ἰσχύς πού ἐκπέμπει ἡ πηγὴ; Πόση ἠχητικὴ ἐνέργεια (E) ἐκπέμπει ἡ πηγὴ μέσα σέ χρονικὸ διάστημα $t = 10$ sec;

Φυσιολογικά χαρακτηριστικά του ήχου

27. Φυσιολογικά χαρακτηριστικά των μουσικών ήχων

Οι τόνοι ή άπλοι ήχοι και οι φθόγγοι ή σύνθετοι ήχοι προέρχονται από περιοδικές κινήσεις και ονομάζονται *μουσικοί ήχοι*. Αυτοί παράγονται από διάφορα μουσικά όργανα ή από τα φωνητικά όργανα του ανθρώπου και προκαλούν στο αυτί μας μία ομοιόμορφη έντύπωση.

Τά ήχητικά κύματα υπάρχουν ανεξάρτητα από τό αυτί μας πού είναι ένας *δέκτης* των ήχητικών κυμάτων. Στους μουσικούς ήχους πού ακούμε, διακρίνουμε ορισμένα *χαρακτηριστικά γνωρίσματα*, μέ τά όποια ξεχωρίζουμε τούς διάφορους ήχους μεταξύ τους. Αυτά τά γνωρίσματα είναι *υποκειμενικά* και χαρακτηρίζουν *τά αισθήματα* πού προκαλούν σέ μās οι διάφοροι ήχοι. Έτσι σέ κάθε μουσικό ήχο αναγνωρίζουμε τά εξής τρία υποκειμενικά γνωρίσματα: **ύψος, άκουστότητα και χροιά.**

Τό *ύψος* είναι ένα γνώρισμα του ήχου πού μās επιτρέπει νά χαρακτηρίζουμε έναν ήχο ως *ψηλό ή βαρύ*.

Η *άκουστότητα* ή *ένταση* του *άκουστικού αισθήματος* (*) είναι ένα γνώρισμα του ήχου πού μās επιτρέπει νά χαρακτηρίζουμε έναν ήχο ως *ίσχυρο ή άσθενή*.

Η *χροιά* είναι ένα γνώρισμα του ήχου πού μās επιτρέπει νά διακρίνουμε μεταξύ τους δύο ήχους πού έχουν τό ίδιο ύψος και τήν ίδια άκουστότητα, αλλά παράγονται από *δύο διαφορετικές* ήχητικές πηγές.

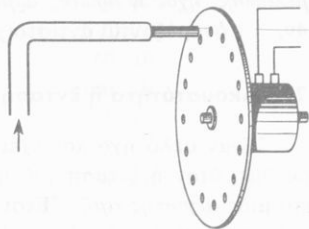
Καθένα από τά τρία *υποκειμενικά γνωρίσματα*, πού τό αυτί μας αναγνωρίζει σέ έναν ήχο, *αντιστοιχεί* σέ ένα *αντικειμενικό γνώρισμα* των ήχητικών κυμάτων, πού είναι ένα ορισμένο *φυσικό μέγεθος*. Αυτό τό μέγεθος μπορούμε νά τό μετρήσουμε. Θά εξετάσουμε ποιά σχέση υπάρχει μεταξύ ενός *υποκειμενικού* γνωρίσματος του ήχου και του *αντίστοιχου αντικειμενικού* γνωρίσματος των ήχητικών κυμάτων.

28. Ύψος του ήχου

Γιά νά βρούμε σέ ποιό φυσικό μέγεθος αντιστοιχεί τό υποκειμενικό γνώρισμα του ήχου, πού τό ονομάζουμε *ύψος* του ήχου, χρησιμοποιούμε

(*) Loudness, intensité physiologique, Lautstärke.

τή σειρήνα (σχ. 45). Αυτή αποτελείται από ένα μεταλλικό δίσκο που έχει μικρές τρύπες σε ίσες αποστάσεις από τον άξονα περιστροφής και σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Ο δίσκος μπορεί να στρέφεται ομαλά με έναν κινητήρα. Από ένα λεπτό σωλήνα που καταλήγει εμπρός από τις τρύπες διαβιβάζουμε ισχυρό ρεύμα αέρα κάθετα στο επίπεδο του δίσκου. Όταν ο δίσκος στρέφεται ομαλά, η ροή του αέρα μέσα από τις τρύπες του δίσκου καταργείται ρυθμικά και έτσι κοντά στον δίσκο προκαλούνται περιοδικές μεταβολές της πίεσης του αέρα. Τότε η σειρήνα παράγει ένα μουσικό ήχο. Τα ήχητικά κύματα που δημιουργούνται έχουν συχνότητα ν , ίση με τον αριθμό των διαταράξεων του ρεύματος του αέρα κατά δευτερόλεπτο, δηλαδή είναι τόση, όσες είναι οι τρύπες που περνούν κατά δευτερόλεπτο εμπρός από την άκρη του λεπτού σωλήνα. Αν ο δίσκος έχει N τρύπες και εκτελεί N στροφές στο δευτερόλεπτο, τότε η συχνότητα ν των ήχητικών κυμάτων είναι $\nu = N \cdot \kappa$. Αν αυξάνουμε τη συχνότητα N της περιστροφής του δίσκου, η συχνότητα ν των ήχητικών κυμάτων αυξάνει και ο ήχος που ακούμε γίνεται διαρκώς πιο ψηλός. Αντίθετα, όταν ελαττώνουμε τη συχνότητα N της περιστροφής του δίσκου, ο ήχος γίνεται διαρκώς πιο βαρύς. Έτσι καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα:



Σχ. 45. Η σειρήνα προκαλεί περιοδικές μεταβολές της πίεσης του αέρα.

Τό ύψος ενός ήχου είναι ανάλογο με τη συχνότητα (ν) της ταλαντώσεως που παράγει τον ήχο.

Όστε, η συχνότητα ν της ταλαντώσεως που εκτελεί η ήχητική πηγή είναι τό αντικειμενικό γνώρισμα που χαρακτηρίζει τό ύψος του ήχου (υποκειμενικό γνώρισμα). Γι' αυτό συνήθως τό ύψος του ήχου εκφράζεται με τη συχνότητα ν της ταλαντώσεως της ήχητικής πηγής.

α. Όρια των ακουστών ήχων. Τό αυτί μας αντιλαμβάνεται μόνο τούς ήχους που έχουν συχνότητα από 16 Hz ως 20 000 Hz. Αυτά όμως τά όρια των ακουστών ήχων διαφέρουν από τό ένα άτομο στο άλλο. Οί ήχοι που έχουν συχνότητα μικρότερη από 16 Hz ονομάζονται *υπόηχοι*, ενώ οί ήχοι που έχουν συχνότητα μεγαλύτερη από 20 000 Hz ονομάζονται *υπέρηχοι* και έχουν σημαντικές εφαρμογές, γιατί έχουν όρισμένες ιδιότητες (§ 31).

β. Άρμονικοί ήχοι. Έχουμε μία σειρά από άπλους ήχους, που έχουν συχνότητες ν , 2ν , 3ν , 4ν , ..., δηλαδή οί συχνότητές τους είναι *άκέραια πολλαπλάσια* της συχνότητας ν . Ο ήχος με τη συχνότητα ν ονομάζεται *θε-*

μελιώδης ήχος ή πρώτος αρμονικός, ενώ οι ήχοι με τις συχνότητες 2ν, 3ν, 4ν, ... ονομάζονται αντίστοιχα δεύτερος, τρίτος, τέταρτος αρμονικός κ.ο.κ.

29. 'Ακουστότητα ή ένταση του ακουστικού αισθήματος

Έναν άπλό ήχο που έχει όρισμένη συχνότητα (π.χ. $\nu = 1000$ Hz) τόν ακούμε, όταν η ένταση του ήχου περιλαμβάνεται μεταξύ μιᾶς ελάχιστης και μιᾶς μέγιστης τιμῆς. Έτσι για κάθε συχνότητα υπάρχει ένα πεδίο ακουστότητας που αρχίζει από μιᾶ ελάχιστη ένταση ήχου, ἡ ὁποία ονομάζεται κατώφλι ακουστότητας, καί τελειώνει σέ μιᾶ μέγιστη ένταση ήχου, ἡ ὁποία ονομάζεται ὄριο πόνου. Όταν ἡ ένταση τοῦ ήχου εἶναι μικρότερη ἀπό τό κατώφλι ακουστότητας, τό αὐτί μας δέν ἀκούει τόν ήχο. Όταν ἡ ένταση τοῦ ήχου εἶναι μεγαλύτερη ἀπό τό ἀνώτατο ὄριο ακουστότητας, δηλαδή τό ὄριο πόνου, τότε ἡ ἀκρόαση αὐτοῦ τοῦ ήχου γίνεται ἀφόρητη. Ἡ μεγαλύτερη ἔκταση τοῦ πεδίου ακουστότητας ἀντιστοιχεῖ στίς συχνότητες γύρω ἀπό τά 1000 Hz.

Ἡ ένταση τοῦ ήχου εἶναι ἀντικειμενικό γνῶρισμα ἑνός ήχου, ἐνῶ ἡ ένταση τοῦ ακουστικοῦ αισθήματος, πού προκαλεῖ ὁ θεωρούμενος ήχος, εἶναι ὑποκειμενικό γνῶρισμα τοῦ ήχου, πού ἐξαρτᾶται ἀπό τή φυσιολογική λειτουργία τοῦ αὐτιοῦ. Ὡστε:

Γιά τήν ἴδια ένταση ήχου ἡ ἀκουστότητα ἢ ένταση τοῦ ακουστικοῦ αισθήματος μεταβάλλεται πολὺ μέ τή συχνότητα τοῦ ήχου. Σέ κάθε συχνότητα ἀντιστοιχεῖ ἕνα κατώφλι ακουστότητας καί ἕνα ὄριο πόνου (*).

Σχέση μεταξύ τῆς ἐντάσεως τοῦ ήχου καί τῆς ἐντάσεως τοῦ ακουστικοῦ αισθήματος. Μεταξύ τῆς ἐντάσεως τοῦ ήχου (ἀντικειμενικό γνῶρισμα) καί τῆς ἐντάσεως τοῦ ακουστικοῦ αισθήματος (ὑποκειμενικό γνῶρισμα) ὑπάρχει ὁρισμένη σχέση πού τήν ἐκφράζει ὁ ἐξῆς νόμος *Weber - Fechner*:

Ἡ ένταση τοῦ ὑποκειμενικοῦ αισθήματος μεταβάλλεται ἀνάλογα μέ τό λογάριθμο τῆς ἐντάσεως τοῦ ἐξωτερικοῦ ἐρεθισμοῦ.

Μονάδα ἀκουστότητας. Στήν Τεχνική ὡς μονάδα ἀκουστότητας χρησιμοποιοῦμε τό 1 *decibel* (1 dB) πού εἶναι τό δέκατο τῆς μονάδας Bel. Ἡ κλίμακα *decibel* βασίζεται στό νόμο *Weber - Fechner*. Στόν παρακάτω πίνακα ἀναφέρονται μερικά παραδείγματα ἀκουστότητας (σέ *decibel*).

(*) Γιά τή συχνότητα $\nu = 1000$ Hz τό κατώφλι ἀκουστότητας ἀντιστοιχεῖ σέ ένταση ήχου 10^{-16} W/cm² καί τό ὄριο πόνου σέ ένταση ήχου 10^{-4} W/cm².

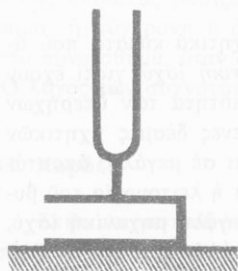
Κατώφλι ακουστότητας	0 dB
Ψίθυρος, κήπος ήρεμος	20 dB
Συνηθισμένη όμιλία	60 dB
Κομπρεσέρ	100 dB
Άπογείωση αεριοθούμενου (σέ απόσταση 100 m)	125 dB
Όριο πόνου	140 dB

30. Χροιά του ήχου

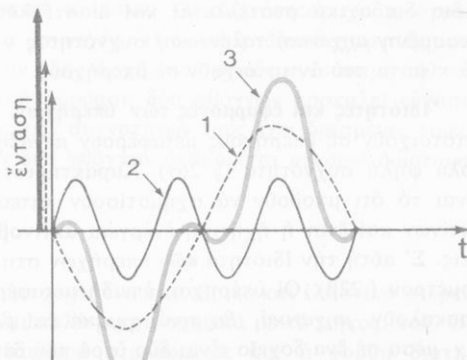
Ένα διαπασών παράγει ήχο που έχει ορισμένη συχνότητα ν (σχ. 46). Αν εξετάσουμε αυτό τον ήχο με ένα ηλεκτρονικό παλμογράφο, όταν το διαπασών δέ στήριζεται στο άντηχειό του, βλέπουμε μία *ήμιτονοειδή* καμπύλη. Ο ήχος του διαπασών είναι ένας *άπλος ήχος* που για το αυτί μας είναι άχρωμος, ούτε δυσάρεστος, ούτε ευχάριστος. Αυτός ο ήχος οφείλεται σέ *ήμιτονοειδή* κίνηση τής ήχητικής πηγής. Αν στήριξουμε το διαπασών στο άντηχειό του (σχ. 47) βλέπουμε στον παλμογράφο μία καμπύλη που αντιστοιχεί σέ *περιοδική* *μή* *ήμιτονοειδή* κίνηση (σχ. 48). Ο ήχος που παράγει τώρα το σύστημα διαπασών - άντηχειό είναι *σύνθετος ήχος*, δηλαδή *φθόγγος*, έχει συχνότητα ν καί για το αυτί μας έχει το γνώρισμα τής *χροιάς*. Η περιοδική κίνηση τής



Σχ. 46. Το διαπασών παράγει άπλο ήχο.



Σχ. 47. Το διαπασών που στήριζεται στο άντηχειό του παράγει φθόγγο (σύνθετο ήχο).



Σχ. 48. Ο φθόγγος προκύπτει από τη σύνθεση άπλων ήχων. Στο σχήμα ο φθόγγος (3) προκύπτει από τη σύνθεση του πρώτου (1) καί του τρίτου άρμονικού (2).

ήχητικῆς πηγῆς πού παράγει τό σύνθετο ἦχο εἶναι συνισταμένη ἡμιτονοειδῶν ταλαντώσεων, πού οἱ συχνότητές τους εἶναι ἀκέραια πολλαπλάσια τῆς θεμελιώδους συχνότητας ν . Ὁ ἀπλός ἦχος μέ τή μικρότερη συχνότητα ν ὀνομάζεται *θεμελιώδης* ἢ *πρῶτος ἀρμονικός* καί οἱ ἀπλοί ἦχοι μέ τίς συχνότητες $2\nu, 3\nu, 4\nu, \dots$ ὀνομάζονται ἀντίστοιχα *δεύτερος, τρίτος, τέταρτος, ἀρμονικός* κ.ο.κ. Ἐπομένως ὁ σύνθετος ἦχος πού παράγει τό σύστημα διαπασῶν - ἀντηχεῖο προέρχεται ἀπό *τήν πρόσθεση* ὀρισμένων ἀπλῶν ἠχῶν πού εἶναι *ἀρμονικοί* ἐνός θεμελιώδους ἠχου συχνότητας ν . Ἔτσι γιά τό φυσικό αἶτιο στό ὁποῖο ὀφείλεται ἡ *χροιά* τοῦ ἠχου, διατυπώνουμε τό ἔξης συμπέρασμα, πού ἐπιβεβαιώνεται μέ τό πείραμα:

■ Ἡ *χροιά* ἐνός σύνθετου ἠχου ἐξαρτᾶται ἀπό τόν ἀριθμό καί τή σχετική ἔνταση τῶν ἀρμονικῶν ἠχῶν πού προσθέτονται στό θεμελιώδη.

31. Ὑπέρηχοι

Ἡ συχνότητα τῶν μουσικῶν ἠχῶν πού ἀκοῦμε συνήθως δέν ὑπερβαίνει τίς 5000 Hz. Ἡ συχνότητα ὅμως τῶν ἀκουστῶν ἠχῶν μπορεῖ νά φτάσει ὡς 20 000 Hz. Πάνω ἀπό αὐτό τό ὄριο τῆς ἀκουστῆς συχνότητας ὑπάρχει ἡ περιοχή τῶν *υπερήχων* πού ἡ συχνότητά τους μπορεῖ νά φτάσει ὡς $5 \cdot 10^8$ Hz (δηλαδή 500 MHz).

Σήμερα γιά τήν παραγωγή τῶν υπερήχων ἐκμεταλλευόμαστε τό *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*. Στίς δύο ἀπέναντι ἔδρες ἐνός πλακιδίου ἀπό χαλαζία εἶναι στερεωμένα δύο μεταλλικά πλακίδια (ἠλεκτρόδια). Ὄταν στά δύο ἠλεκτρόδια ἐφαρμόσουμε ἐναλλασσόμενη τάση συχνότητας ν , τό πλακίδιο διαδοχικά συστέλλεται καί διαστέλλεται, δηλαδή ἐκτελεῖ ἐξαναγκασμένη *μηχανική ταλάντωση* συχνότητας ν καί ἔτσι δημιουργεῖ ἠχητικά κύματα πού ἀντιστοιχοῦν σέ υπερήχους.

Ἰδιότητες καί ἐφαρμογές τῶν υπερήχων. Τά ἠχητικά κύματα πού ἀντιστοιχοῦν σέ υπερήχους μεταφέρουν *μεγάλη μηχανική ἰσχύ*, γιατί ἔχουν πολύ ψηλή συχνότητα (§ 26γ). Χαρακτηριστική ἰδιότητα τῶν υπερήχων εἶναι τό ὅτι μποροῦν νά σχηματίσουν κατευθυνόμενες δέσμες ἠχητικῶν ἀκτίνων καί ἔτσι ἡ ἠχητική ἐνέργεια ἀκτινοβολεῖται σέ μεγάλες ἀποστάσεις. Σ' αὐτή τήν ἰδιότητα τῶν υπερήχων στηρίζεται ἡ λειτουργία τοῦ βυθομέτρου (§ 22β). Οἱ ὑπέρηχοι, ἐπειδή μεταφέρουν μεγάλη μηχανική ἰσχύ, προκαλοῦν *μηχανικά, θερμικά, χημικά* καί *βιολογικά* ἀποτελέσματα. Ἄν π.χ. μέσα σέ ἓνα δοχεῖο εἶναι δύο ὑγρά πού δέν ἀνακατεύονται (π.χ. ὑδράργυρος καί νερό), τότε μέ τήν ἐπίδραση τῶν υπερήχων γίνεται μιά τέλεια ἀνάμιξη τῶν δύο ὑγρῶν (γαλάκτωμα). Τό φαινόμενο αὐτό τό ἐκμεταλλεύομαστε γιά νά παρασκευάζουμε γαλακτώματα (φωτογραφικά φιλμ, φάρμακα,

καλλυντικά κ.λ.). Οἱ ὑπέρηχοι διώχουν τὰ ἀέρια πού ὑπάρχουν μέσα σέ ἕνα ὑγρό. Αὐτή τήν ιδιότητα τήν ἐκμεταλλεῦμαστε γιά τήν παραγωγή ἀνώτατης ποιότητας γυαλιῶ γιά τὰ ὀπτικά ὄργανα καθὼς καί γιά τή βελτίωση τῆς ποιότητας πολλῶν ὑλικῶν. Οἱ ὑπέρηχοι προκαλοῦν ὀξειδώσεις, διαχωρίζουν τίς πολυμερεῖς ἐνώσεις, διασποῦν τοὺς δισακχαρίτες σέ μοσοσακχαρίτες.

Οἱ ὑπέρηχοι διαμελίζουν τὰ κύτταρα τῶν μοκοκύτταρων ὀργανισμῶν καί μποροῦν νά προκαλέσουν τό θάνατο ἢ προσωρινή παράλυση σέ μικροῦς πολυκύτταρους ὀργανισμούς (ψάρια, γυρίνοι). Σήμερα στήν Ἱατρική οἱ ὑπέρηχοι χρησιμοποιοῦνται γιά θεραπευτικούς καί γιά διαγνωστικούς σκοπούς. Γενικά οἱ ὑπέρηχοι ἔχουν πολλές ἐνδιαφέρουσες ἐφαρμογές.

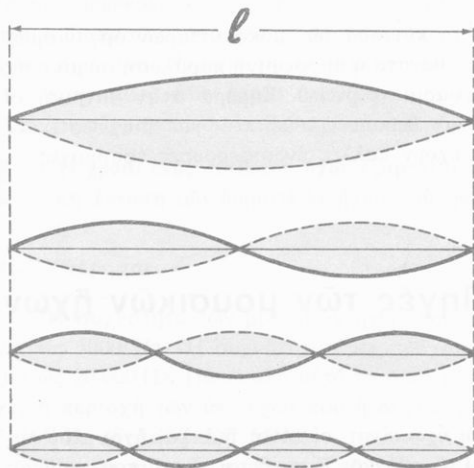
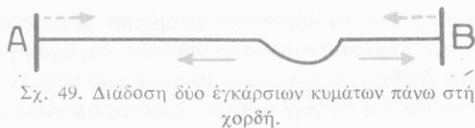
Πηγές τῶν μουσικῶν ἤχων

32. Μουσικοί ἤχοι

Ξέρουμε (§ 20) ὅτι *μουσικοί ἤχοι* εἶναι οἱ τόνοι ἢ ἀπλοί ἤχοι πού παράγονται ἀπό τὰ διαπασῶν καί οἱ φθόγγοι ἢ σύνθετοι ἤχοι πού παράγονται ἀπό τὰ μουσικά ὄργανα καί τό φωνητικό σύστημα τοῦ ἀνθρώπου. Ἐνας φθόγγος χαρακτηρίζεται μέ τή συχνότητα τοῦ θεμελιώδους ἤχου. Στή Μουσική δέ χρησιμοποιοῦνται ὅλοι οἱ ἀκουστοί ἤχοι, ἀλλά μόνο μιά σειρά φθόγγων πού ὀνομάζεται **μουσική κλίμακα**. Οἱ συχνότητες τῶν φθόγγων τῆς κλίμακας αὐξάνονται, ἀλλά ἀσυνεχῶς. Ἡ ἐκλογή τῶν φθόγγων τῆς μουσικῆς κλίμακας βασίζεται στήν ἐξῆς ἀρχή, πού ἀποδεικνύεται μέ τό πείραμα: ἡ σύγχρονη ἢ διαδοχική ἀκρόαση δύο φθόγγων προκαλεῖ εὐχάριστο συναίσθημα, ὅταν ὁ λόγος τῶν συχνοτήτων τοὺς ἔχει ὀρισμένες τιμές. Ὁ λόγος τῶν συχνοτήτων τῶν δύο φθόγγων ὀνομάζεται *μουσικό διάστημα*.

33. Χορδές

Στήν Ἀκουστική ὀνομάζουμε *χορδή* ἕνα κυλινδρικό καί ἐλαστικό στερεό σῶμα πού ἡ διάμετρός του εἶναι πολύ μικρή σχετικά μέ τό μήκος. του. Οἱ δύο ἄκρες τῆς χορδῆς εἶναι σταθερά στερεωμένες καί ἡ χορδή διατηρεῖται πολύ τεντωμένη. Οἱ χορδές πού χρησιμοποιοῦμε στά μουσικά ὄργανα εἶναι μεταλλικές ἢ ἔχουν ζωϊκή προέλευση. Ἄν ἀπομακρύνουμε ἀπό τή θέση ἰσορροπίας του ἕνα σημεῖο τῆς χορδῆς, τότε αὐτό τό σημεῖο



Σχ. 50. Ἡ χορδή δίνει ὅλους τοὺς ἁρμονικοὺς τοῦ θεμελιώδους ἤχου.

μῆκος κύματος ($\lambda/2$), συνάγεται ὅτι σέ μιά χορδή πού ἔχει μῆκος l σχηματίζεται πάντοτε ἀκέραιος ἀριθμὸς (k) στάσιμων κυμάτων καὶ ἰσχύει ἡ σχέση:

$$l = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (\delta\text{που } k = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

Παραγωγή ἤχου ἀπὸ τὴ χορδή. Ἡ παλλόμενη χορδή χτυπάει περιοδικὰ τὸν ἀέρα πού βρίσκεται σέ ἐπαφή μαζί της καὶ ἔτσι δημιουργοῦνται στὸν ἀέρα ἠχητικὰ κύματα. Αὐτὰ ἀντιστοιχοῦν σέ ἓναν ἤχο, πού ἔχει *συχνότητα* ν ἰση μὲ τὴ *συχνότητα* ταλαντώσεως ν τῆς χορδῆς. Ἄν ἡ χορδή ἔχει μάζα m , ἡ γραμμικὴ πυκνότητά της εἶναι $\mu = m/l$. Ἀποδεικνύεται ὅτι γιὰ τὸν παραγόμενο ἤχο ἰσχύουν οἱ ἑξῆς *νόμοι τῶν χορδῶν*:

I. Ἡ *συχνότητα* (ν_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἡ χορδή εἶναι ἀντιστρόφως ἀνάλογη μὲ τὸ μῆκος (l) τῆς χορδῆς, ἀνάλογη μὲ τὴν τετραγωνικὴ ρίζα τῆς δυνάμεως (F) πού τείνει τὴ χορδὴ καὶ

ἐκτελεῖ φθίνουσα ταλάντωση, γιατί οἱ ἐλαστικὲς δυνάμεις δημιουργοῦν δύναμη ἐπιαναφορᾶς πού προσπαθεῖ νά ξαναφέρει τὸ σημεῖο στή θέση ἰσορροπίας του. Πάνω στή χορδὴ διαδίδονται τότε κατ' ἀντίθετη φορά δύο ἐγκάρσια κύματα πού ἀνακλῶνται στίς δύο σταθερὲς ἄκρες τῆς χορδῆς (σχ. 49). Ὅταν ἡ δύναμη F πού τείνει τὴ χορδὴ ἔχει μιά κατάλληλη τιμὴ, τὰ δύο κύματα πού διαδίδονται πάνω στή χορδὴ συμβάλλουν καὶ ἔτσι δημιουργοῦνται *στάσιμα ἐγκάρσια κύματα* (σχ. 50). Οἱ δύο σταθερὲς ἄκρες τῆς χορδῆς εἶναι πάντοτε δεσμοί. Ἐπειδὴ ἡ ἀπόσταση μεταξὺ δύο διαδοχικῶν δεσμῶν εἶναι ἴση μὲ μισό

άντιστρόφως ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της γραμμικής πυκνότητας (μ) της χορδής.

$$\text{συχνότητα θεμελιώδους ήχου} \quad v_1 = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \left\{ \begin{array}{l} l \text{ σε } m, F \text{ σε } N \\ \mu \text{ σε } \text{kg}/m \\ v_1 \text{ σε } \text{Hz} \end{array} \right. \quad (2)$$

II. Μιά χορδή μπορεί να δώσει όλη τη σειρά των αρμονικών του θεμελιώδους ήχου ($v = 2v_1, 3v_1, \dots$).

$$\text{συχνότητα αρμονικών ήχων} \quad v = \frac{k}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (3)$$

όπου $k = 1, 2, 3, \dots$ Για $k = 1$ στη χορδή σχηματίζεται ένα στάσιμο κύμα (σχ. 62) και η χορδή παράγει το θεμελιώδη ήχο (ή πρώτο αρμονικό). Για $k = 2$ σχηματίζονται δύο στάσιμα κύματα και η χορδή παράγει το δεύτερο αρμονικό κ.ο.κ. "Ωστε ο άκεραιος αριθμός k φανερώνει πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται πάνω στη χορδή και τη σειρά του αρμονικού ήχου που παράγει η χορδή." Αν r είναι η πυκνότητα της χορδής και $2r$ ή διάμετρος της τομής της, τότε η γραμμική πυκνότητα της χορδής είναι $\mu = \pi r^2 \cdot \rho$ και η εξίσωση (3) γράφεται ως εξής:

$$v = \frac{k}{2l \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}}$$

Εύρεση της εξίσωσης (3). Η ταχύτητα c διαδόσεως των κυμάτων ελαστικότητας πάνω στη χορδή δίνεται από την εξίσωση:

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4)$$

όπου F είναι η δύναμη που τείνει τη χορδή και μ είναι η γραμμική πυκνότητα της χορδής.

Από την εξίσωση $c = v \cdot \lambda$ και την εξίσωση (1) βρίσκουμε:

$$c = v \cdot \frac{2l}{k} \quad (5)$$

Από τις εξισώσεις (4) και (5) έχουμε: $v = \frac{k}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$

Παρατήρηση. Όλα τα συνηθισμένα μουσικά όργανα παράγουν σύνθετους ήχους (φθόγγους). Ός συχνότητα v του ήχου που παράγει ένα μουσικό όργανο θεωρούμε τη συχνότητα του θεμελιώδους που αντιστοιχεί σ' αυτό το σύνθετο ήχο.

34. Συντονισμός δύο ἤχητικῶν πηγῶν. Ἀντηχεῖα

Δύο ὅμοια διαπασῶν Α καί Β ἔχουν τήν ἴδια ἰδιοσυχνότητα (ν_0) καί ἐπομένως παράγουν τόν ἴδιο ἀπλό ἤχο (π.χ. τό $1a_3$). Τά δύο διαπασῶν εἶναι τό ἓνα λίγο μακρύτερα ἀπό τό ἄλλο. Ἐάν χτυπήσουμε ελαφρά τό διαπασῶν Α, αὐτό παράγει ἤχο. Τότε καί τό διαπασῶν Β διαγείρεται καί παράγει τόν ἴδιο ἤχο, γιατί μεταξύ τῶν δύο διαπασῶν ὑπάρχει *συντονισμός*. Ἐάν ἀκουμπήσουμε τό δάχτυλό μας στό διαπασῶν Α, αὐτό παύει νά πάλλεται καί ἀκούμε μόνο τόν ἤχο πού παράγει τό διαπασῶν Β.

Στό φαινόμενο τοῦ συντονισμοῦ στηρίζεται ἡ χρήση τῶν ἀντηχεῖων. Αὐτά εἶναι κιβώτια (ἀπό ξύλο ἢ μέταλλο) πού σχηματίζουν κοιλότητες γεμάτες μέ ἀέρα. Ὅλα τά ἐγχορδα ὄργανα ἔχουν εἰδικά ἀντηχεῖα, πού συντονίζονται μέ τίς παλλόμενες χορδές καί παράγουν ἤχο πού ἔχει χαρακτηριστική χροιά.

35. Ἠχητικοί σωλήνες

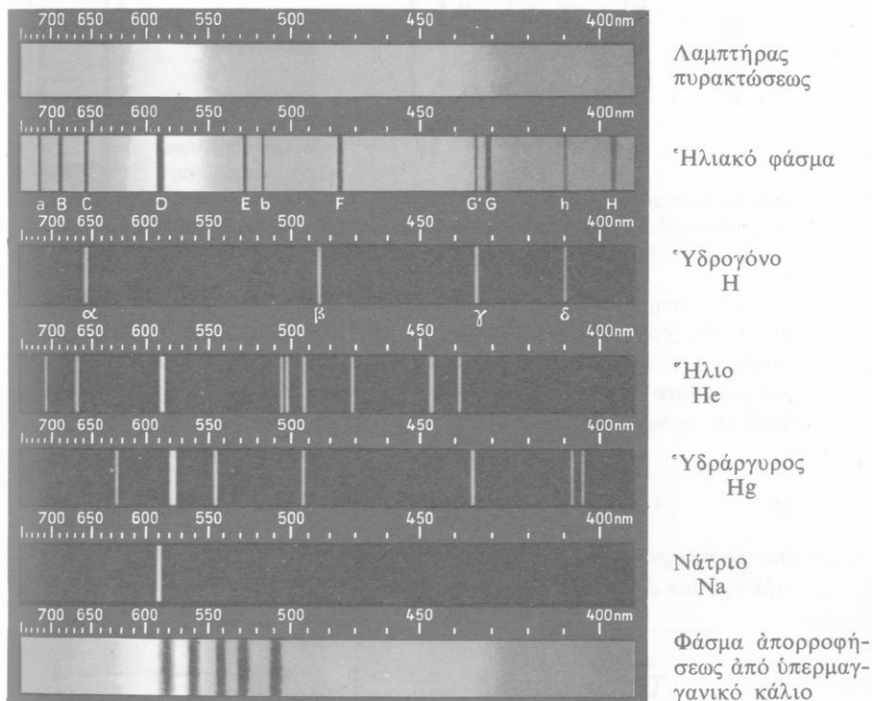
Στήν Ἀκουστική ὀνομάζουμε *ἤχητικό σωλήνα* ἓναν κυλινδρικό ἢ πρισματικό σωλήνα (ἀπό ξύλο ἢ μέταλλο) πού περιέχει μιά *στήλη ἀέρα*. Μέσα σ' αὐτό τόν ἀέρα μποροῦν νά διαδοθοῦν ἤχητικά κύματα. Τά τοιχώματα τοῦ σωλήνα ἔχουν ἄρκετό πάχος, γιά νά μή πάλλονται. Ἡ διέγερση τῆς στήλης τοῦ ἀέρα γίνεται μέ μιά εἰδική διάταξη, πού κοντά στή μιά ἄκρη τοῦ σωλήνα προκαλεῖ περιοδικές μεταβολές τῆς πίεσεως τοῦ ἀέρα. Συνήθως ἡ διέγερση τοῦ ἤχητικοῦ σωλήνα γίνεται μέ *στόμιο* (σχ. 51). Τό ρεῦμα τοῦ ἀέρα πού διοχετεύουμε στό στόμιο σπάζει πάνω σέ μιά λεπτή αἰχμή καί τότε σχηματίζονται δύο συστήματα στροβίλων τοῦ ἀέρα. Τό σύστημα πού σχηματίζεται μέσα στό σωλήνα δημιουργεῖ *διαμήκη κύματα*, πού διαδίδονται μέσα στή στήλη τοῦ ἀέρα. Ἡ ἄκρη τοῦ σωλήνα πού εἶναι ἀπέναντι ἀπό τό στόμιο εἶναι κλειστή ἢ ἀνοικτή. Ἐτσι οἱ ἤχητικοί σωλήνες διακρίνονται σέ *κλειστούς* καί *ἀνοικτούς* σωλήνες.



Σχ. 51. Διέγερση ἤχητικοῦ σωλήνα μέ στόμιο.

α. Κλειστοί ἤχητικοί σωλήνες. Μέσα στόν ἀέρα τοῦ σωλήνα δημιουργοῦνται διαμήκη κύματα πού *ἀνακλῶνται* στήν κλειστή ἄκρη τοῦ σωλήνα (ἀκίνητο ἐμπόδιο). Ὄταν ὑπάρχουν οἱ κατάλληλες συνθήκες (μῆκος τοῦ σωλήνα, συχνότητα διεγέρσεως), τότε ἀπό τή συμβολή τῶν δύο κυμάτων πού διαδίδονται μέ ἀντίθετη φορά, σχηματίζονται μέσα στό σωλήνα *στάσιμα*

Α. Φάσμα πού δίνει τό πρίσμα



Για $k = 1$ ο κλαστικός ηχητικός σάλμας είναι το θεμελιώδες ήχο (1^{ος} ήχος άρμονικός) πού έχει συχνότητα:

Φάσματα έκπομπής και απορροφήσεως.

Οι διαιρέσεις τής κλίμακας δείχνουν τά μήκη κύματος ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

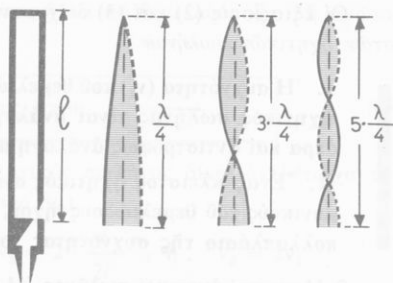
Για $k = 2, k = 3$ ο κλαστικός ηχητικός σάλμας είναι αντίστοιχα 2^{ος} ήχος άρμονικός γ.α. τόν πρίμου άρμονικός (ν_1):

$$\text{2^{ος} άρμονικός } \nu_2 = 2 \cdot \frac{v}{\lambda} = 2 \cdot \nu_1 = 2\nu_1$$

$$\text{3^{ος} άρμονικός } \nu_3 = 3 \cdot \frac{v}{\lambda} = 3 \cdot \nu_1 = 3\nu_1$$



Σχ. 52. Μέσα στο σωλήνα σχηματίζονται διαμήκη κύματα. Στην κλειστή άκρη σχηματίζεται δυσμός.



Σχ. 53. Ο κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει μόνο τους περιττές τάξεις αρμονικούς του θεμελιώδους ήχου.

διαμήκη κύματα (σχ. 52). Στην κλειστή άκρη του σωλήνα σχηματίζεται δυσμός, ενώ κοντά στο στόμιο του σωλήνα σχηματίζεται κοιλία (σχ. 53). Όταν αυξάνει ή ταχύτητα του ρεύματος του αέρα που διοχετεύουμε στο στόμιο, αυξάνει ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων. Το μήκος ενός στάσιμου κύματος είναι $\lambda/2$. Άρα, όταν σχηματίζονται στάσιμα κύματα μέσα σε έναν κλειστό ήχητικό σωλήνα που έχει μήκος l , ισχύει η σχέση:

$$l = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (\text{όπου } k = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

Αν c είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και ν η συχνότητα του ήχου που παράγει ο σωλήνας, τότε από την εξίσωση $c = \nu \cdot \lambda$ και την εξίσωση (1) βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{4l}{(2k - 1)} \quad \text{άρα} \quad \nu = (2k - 1) \cdot \frac{c}{4l} \quad (2)$$

Γιά $k = 1$ ο κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει το θεμελιώδη ήχο (ή πρώτο αρμονικό) που έχει συχνότητα:

$$\text{συχνότητα θεμελιώδους ήχου} \quad \nu_1 = \frac{c}{4l} \quad (3)$$

Γιά $k = 2, k = 3$ ο κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει αντίστοιχα τον τρίτο αρμονικό (ν_3), τον πέμπτο αρμονικό (ν_5):

$$\text{τρίτος αρμονικός} \quad \nu_3 = 3 \cdot \frac{c}{4l} \quad \text{ή} \quad \nu_3 = 3\nu_1$$

$$\text{πέμπτος αρμονικός} \quad \nu_5 = 5 \cdot \frac{c}{4l} \quad \text{ή} \quad \nu_5 = 5\nu_1$$

Οι εξισώσεις (2) και (3) δείχνουν ότι ισχύουν οι εξής νόμοι των κλειστών ήχητικών σωλήνων :

I. 'Η συχνότητα (ν) του θεμελιώδους ήχου που παράγει ένας κλειστός ήχητικός σωλήνας είναι ανάλογη με την ταχύτητα (c) του ήχου στον άερα και αντίστροφως ανάλογη με τό μήκος (l) του σωλήνα.

II. "Ένας κλειστός ήχητικός σωλήνας μπορεί νά δώσει μόνο τούς αρμονικούς του θεμελιώδους ήχου, που οί συχνότητές τους είναι περιττό πολλαπλάσιο τής συχνότητας του θεμελιώδους ($\nu = 3\nu_1, 5\nu_1, 7\nu_1, \dots$).

β. 'Ανοιχτοί ήχητικοί σωλήνες. 'Η στήλη του άερα που είναι μέσα στους άνοιχτούς ήχητικούς σωλήνες συγκοινωνεί ελεύθερα με την άτμόσφαιρα και ή ανάκλαση των κυμάτων (σχ. 54) γίνεται στην άνοιχτή άκρη του σωλήνα (κινητό εμπόδιο). 'Επομένως και στίς δύο άκρες του άνοιχτού ήχητικού σωλήνα σχηματίζονται δύο κοιλίες (σχ. 55). Τό μήκος του σωλήνα είναι l και τό μήκος ενός στάσιμου κύματος είναι $\lambda/2$. "Αρα, όταν σχηματίζονται στάσιμα κύματα μέσα σέ έναν άνοιχτό σωλήνα, ισχύει ή σχέση:

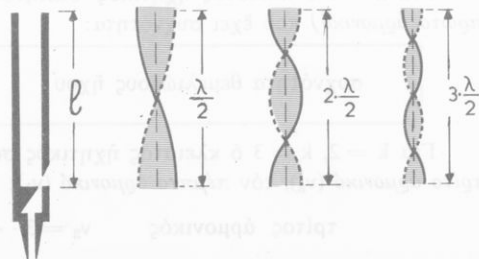
$$l = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (\delta\text{που } k = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

'Από την εξίσωση $c = \nu \cdot \lambda$ και την εξίσωση (4) βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2l}{k} \quad \text{άρα} \quad \nu = k \cdot \frac{c}{2l} \quad (5)$$



Σχ. 54. Στίς δύο άκρες του άνοιχτού ήχητικού σωλήνα σχηματίζονται κοιλίες.



Σχ. 55. 'Ο άνοιχτός ήχητικός σωλήνας δίνει όλη τή σειρά των αρμονικών του θεμελιώδους ήχου.

Γιά $k = 1$ ὁ ἀνοιχτός ἡχητικός σωλήνας δίνει τὸ θεμελιώδη ἦχο (ἢ πρῶτο ἄρμονικό), πού ἔχει συχνότητα:

$$\text{συχνότητα θεμελιώδους ἤχου } v_1 = \frac{c}{2l} \quad (6)$$

Γιά $k = 2, k = 3$ ὁ ἀνοιχτός ἡχητικός σωλήνας δίνει ἀντίστοιχα τὸ δεύτερο ἄρμονικό (v_2), τὸν τρίτο ἄρμονικό (v_3):

$$\text{δεύτερος ἄρμονικός } v_2 = 2 \cdot \frac{c}{2l} \quad \text{ἢ} \quad v_2 = 2v_1$$

$$\text{τρίτος ἄρμονικός } v_3 = 3 \cdot \frac{c}{2l} \quad \text{ἢ} \quad v_3 = 3v_1$$

Οἱ ἐξισώσεις (5) καὶ (6) δείχνουν ὅτι ἰσχύουν οἱ ἐξῆς νόμοι τῶν ἀνοιχτῶν ἡχητικῶν σωλήνων :

I. Ἡ συχνότητα (v_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἀνοιχτός ἡχητικός σωλήνας εἶναι ἀνάλογη μέ τήν ταχύτητα (c) τοῦ ἤχου στόν ἀέρα καὶ ἀντιστρόφως ἀνάλογη μέ τὸ μήκος (l) τοῦ σωλήνα.

II. Ἐνας ἀνοιχτός ἡχητικός σωλήνας μπορεῖ νά δώσει ὅλη τή σειρά τῶν ἄρμονικῶν τοῦ θεμελιώδους ἤχου ($v = 2v_1, 3v_1, 4v_1, \dots$).

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

47. Ὁ δίσκος μιᾶς σειρήνας ἔχει 10 τρύπες καὶ ἐκτελεῖ 26 στροφές τὸ δευτερόλεπτο. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα τοῦ παραγόμενου ἤχου;

48. Οἱ δίσκοι δύο σειρήνων Α καὶ Β ἔχουν ἀντίστοιχα 50 καὶ 80 τρύπες. Ὁ δίσκος τῆς σειρήνας Α ἐκτελεῖ 8 στροφές τὸ δευτερόλεπτο. Πόσες στροφές πρέπει νά ἐκτελεῖ ὁ δίσκος τῆς σειρήνας Β, ὥστε ὁ ἦχος πού παράγει αὐτή ἡ σειρήνα νά εἶναι ὁ δεύτερος ἄρμονικός τοῦ ἤχου πού παράγει ἡ σειρήνα Α;

49. Ὁ δίσκος μιᾶς σειρήνας ἔχει δύο ὁμόκεντρες σειρές ἀπὸ τρύπες. Ἡ ἐξωτερικὴ σειρά ἔχει 40 τρύπες. Πόσες τρύπες πρέπει νά ἔχει ἡ ἐσωτερικὴ σειρά, ὥστε οἱ συχνότητες τῶν δύο ἤχων πού ἀκοῦμε νά ἔχουν λόγος $3/2$;

50. Ἡ συχνότητα ἑνὸς φθόγγου εἶναι $v_1 = 440$ Hz. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα v_2 ἑνὸς ἄλλου φθόγγου, ἂν οἱ συχνότητες τῶν δύο φθόγγων ἔχουν λόγος $v_2/v_1 = 1,122$;

51. Μιά χορδὴ ἔχει μήκος 1 m, μάζα $8 \cdot 10^{-3}$ kg καὶ τείνεται ἀπὸ δύναμη 500 N. 1) Πόση εἶναι ἡ συχνότητα (v_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἡ χορδὴ; 2) Μέ πόση δύναμη πρέπει νά τείνεται ἡ χορδὴ, γιὰ νά δώσει ὡς θεμελιώδη τὸν τέταρτο ἄρμονικό ($v_4 = 4v_1$);

52. Μιά χορδὴ ἔχει μήκος 2 m, μάζα $2 \cdot 10^{-2}$ kg καὶ τείνεται ἀπὸ δύναμη 1600 N.

1) Μέ πόση ταχύτητα διαδίδονται τά εγκάρσια κύματα πάνω στη χορδή; 2) Μέ πόση δύναμη πρέπει να τείνεται ή χορδή, για να διπλασιαστεί ή ταχύτητα διαδόσεως των κυμάτων; 3) 'Υπάρχει σχέση μεταξύ τής συχνότητας του ήχου που παράγει ή χορδή καί τής ταχύτητας διαδόσεως των κυμάτων πάνω στη χορδή;

53. Μιά χορδή έχει μήκος 1 m, μάζα 5 gr καί πάλλεται έτσι, ώστε σχηματίζεται ένα στάσιμο κύμα. 'Ο παραγόμενος ήχος έχει συχνότητα 130,5 Hz. Μέ πόση δύναμη τείνεται ή χορδή;

54. Μιά χορδή έχει μήκος 80 cm, μάζα 4 gr καί δίνει τόν τέταρτο άρμονικό, που έχει συχνότητα 400 Hz. 1) Πόσοι δεσμοί καί πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται πάνω στη χορδή; 2) Μέ πόση δύναμη τείνεται ή χορδή;

55. Μιά χορδή έχει μήκος 1 m, διάμετρο 1 mm, πυκνότητα $8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ καί τείνεται από δύναμη 500 N. Πόση είναι ή συχνότητα του θεμελιώδους ήχου που παράγει ή χορδή;

56. Μιά χορδή Α έχει μήκος l , γραμμική πυκνότητα μ καί όταν τείνεται από μία δύναμη F , παράγει τό θεμελιώδη ήχο που έχει συχνότητα $\nu_1 = 440 \text{ Hz}$. Για να φέρουμε τή χορδή Α σε όμοφονία με μία άλλη χορδή Β, αυξάνουμε τή δύναμη F κατά 9/4 φορές καί ελαττώνουμε τό μήκος της στό μισό. Να βρεθεί ή συχνότητα ν_2 του ήχου που παράγουν οί δύο χορδές.

57. Σε ένα μουσικό όργανο δύο χορδές Α καί Β έχουν τό ίδιο μήκος l , είναι από τό ίδιο υλικό, τείνονται από τήν ίδια δύναμη F καί δίνουν τούς θεμελιώδεις ήχους, που οί συχνότητές τους είναι αντίστοιχα ν_1 καί ν_2 καί έχουν λόγο $\nu_1/\nu_2 = 3/2$. 1) 'Αν ή διάμετρος τής χορδής Α είναι $\delta_1 = 0,4 \text{ mm}$, πόση είναι ή διάμετρος δ_2 τής χορδής Β; 2) 'Αν είναι $\nu_1 = 440 \text{ Hz}$, πόση είναι ή συχνότητα ν_2 ;

58. Σε ένα βιολί μία χορδή του έχει μήκος $l_1 = 33 \text{ cm}$ καί δίνει τό θεμελιώδη ήχο συχνότητας $\nu_1 = 440 \text{ Hz}$ (τό la_3). Σε πόση απόσταση από τήν άνωτερη άκρη τής χορδής πρέπει ό βιολιστής να πιέσει με τό δάχτυλό του τή χορδή, ώστε τό υπόλοιπο τμήμα τής χορδής να δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_2 καί να ισχύει ή σχέση $\nu_2/\nu_1 = 3/2$; Πόση είναι ή συχνότητα ν_2 ;

59. 'Ενας κλειστός ήχητικός σωλήνας έχει μήκος 68 cm. 'Η ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 340 m/sec. 1) Πόση είναι ή συχνότητα ν_1 του θεμελιώδους ήχου; 2) Πόσο πρέπει να γίνει τό μήκος του σωλήνα ώστε ό θεμελιώδης ήχος που παράγεται να έχει συχνότητα ν_2 καί να ισχύει ή σχέση $\nu_1/\nu_2 = 3/2$.

60. 'Ενας κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει θεμελιώδη ήχο που έχει συχνότητα $\nu_0 = 400 \text{ Hz}$, όταν μέσα στό σωλήνα υπάρχει άερας με θερμοκρασία 0° C . Πόση είναι ή συχνότητα ν_1 του θεμελιώδους ήχου, όταν ό άερας που είναι μέσα στό σωλήνα έχει θερμοκρασία 37° C ; Τό μήκος του σωλήνα δε μεταβάλλεται.

61. 'Ενας κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_0 , όταν, ή θερμοκρασία του άέρα είναι 5° C . Πόση πρέπει να είναι ή ύψωση $\Delta\theta$ τής θερμοκρασίας ώστε ό σωλήνας να δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_0 καί να ισχύει ή σχέση $\nu_0/\nu_5 = 1,059$; Τό μήκος του σωλήνα διατηρείται σταθερό.

62. 'Ενας μακρός γυάλινος σωλήνας διατηρείται κατακόρυφος καί ή μιά άκρη του είναι βυθισμένη μέσα σε νερό. 'Εμπρός από τήν άλλη άκρη του σωλήνα πάλλεται ένα διαπασών που παράγει ήχο συχνότητας 512 Hz. Παρατηρούμε ότι υπάρχει συντονισμός του ήχητικού σωλήνα με τό διαπασών, όταν τό τμήμα του σωλήνα που είναι έξω από τό

νερό ἔχει μήκος 51 cm καί ἔπειτα ὅταν ἔχει μήκος 85 cm. Σέ καμιά ἄλλη ἐνδιάμεση τιμή τοῦ μήκους τοῦ σωλήνα δέν παρατηρεῖται συντονισμός. Νά βρεθεῖ ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα.

63. Νά βρεθεῖ τό μήκος l_K ἑνός κλειστοῦ καί l_A ἑνός ἀνοιχτοῦ σωλήνα οἱ ὁποῖοι παράγουν τόν ἴδιο θεμελιώδη ἤχο συχνότητος $\nu = 174$ Hz, ὅταν ὁ ἀέρας μέσα στούς δύο σωλήνες ἔχει θερμοκρασία 0° C καί ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα εἶναι 331 m/sec.

64. Ἐνας ἀνοιχτός καί ἓνας κλειστός σωλήνας ἔχουν τό ἴδιο μήκος $l = 85$ cm καί παράγουν τό θεμελιώδη ἤχο, ὅταν ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα εἶναι 340 m/sec. 1) Ἄν ν_K καί ν_A εἶναι οἱ συχνότητες τῶν δύο ἤχων, νά βρεθεῖ ὁ λόγος ν_K/ν_A . Ποιό γενικό συμπέρασμα βγαίνει γιά τούς κλειστούς καί τούς ἀνοιχτούς σωλήνες; 2) Πόσο πρέπει νά εἶναι τό μήκος l_K τοῦ κλειστοῦ σωλήνα, ὥστε αὐτός νά δίνει τόν ἴδιο θεμελιώδη ἤχο πού δίνει καί ὁ ἀνοιχτός σωλήνας;

65. Ἐνας κλειστός ἠχητικός σωλήνας ἔχει μήκος 1,5 m καί παράγει τόν πέμπτο ἄρμονικό, ὅταν ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα εἶναι 342 m/sec. 1) Νά βρεθοῦν οἱ ἀποστάσεις τῶν κοιλιῶν ἀπό τήν κλειστή ἄκρη τοῦ σωλήνα. 2) Νά ἐξετασθεῖ τό ἴδιο θέμα, ἂν ὁ σωλήνας εἶναι ἀνοιχτός καί ἔχει τό ἴδιο μήκος μέ τόν κλειστό σωλήνα.

66. Ἐνας μακρὺς σωλήνας ΒΓ εἶναι κλειστός στή μιᾷ ἄκρη του Γ καί περιέχει ἓνα ἀέριο, στό ὁποῖο ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου εἶναι 547 m/sec. Στήν ἄλλη ἄκρη Β τοῦ σωλήνα ὑπάρχει μιᾷ ἠχητική πηγὴ πού παράγει ἤχο συχνότητος ν . Μέσα στό σωλήνα σχηματίζονται στάσιμα κύματα καί ἡ ἀπόσταση μεταξύ δύο διαδοχικῶν δεσμῶν εἶναι $14/3$ m. 1) Πόση εἶναι ἡ συχνότητα ν τοῦ ἤχου; 2) Τό πλάτος τῆς ταλαντώσεως τῆς ἠχητικῆς πηγῆς εἶναι $a = 5$ mm. Πόσο εἶναι τό πλάτος Α τῆς ταλαντώσεως ἑνός λεπτοῦ στρώματος ἀερίου πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση d ἀπό τήν κλειστή ἄκρη τοῦ σωλήνα ἴση μέ $d = 0$ m, $7/3$ m καί $14/3$ m; 3) Πόση εἶναι ἡ μέγιστη κινητικὴ ἐνέργεια πού ἔχει μιᾷ μάζα $m = 1$ gr τοῦ ἀερίου πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση $d = \lambda/4$ ἀπό τήν κλειστή ἄκρη τοῦ σωλήνα;

ΟΠΤΙΚΗ

Κυματική φύση του φωτός

36. Φυσική Όπτική

Στή *Γεωμετρική Όπτική* εξετάσαμε διάφορα οπτικά φαινόμενα, χωρίς να είναι απαραίτητο να ξέρουμε ποιά είναι *ή φύση* του φωτός. Άλλά για να εξηγήσουμε πολλά άλλα οπτικά φαινόμενα, πρέπει πρώτα να διατυπώσουμε μία θεωρία για τη φύση του φωτός. Κατά τό δέκατο έβδομο αιώνα διατυπώθηκαν οί πρώτες *φυσικές θεωρίες* για τό φώς καί διαμορφώθηκε ή **Φυσική Όπτική** πού εξετάζει όλα γενικά τά οπτικά φαινόμενα μέ βάση μία θεωρία για τη φύση του φωτός.

37. Θεωρία τής έκπομπής

Ή *θεωρία τής έκπομπής* διατυπώθηκε από τό Νεύτωνα (1669), ό οποίος δέχτηκε ότι τό φώς πού εκπέμπει μία φωτεινή πηγή αποτελείται από μικρότατα *σωματίδια*, πού είναι τελείως *ελαστικά* καί διαδίδονται *εθύγραμμα*. Όταν ένα τέτοιο σωματίδιο πέσει πάνω στην επιφάνεια ενός καθρέφτη, τότε τό σωματίδιο αυτό *ανακλάται*, όπως συμβαίνει καί μέ μία τελείως ελαστική σφαίρα. Γενικά για *τή θεωρία τής έκπομπής* συνάγονται τά ακόλουθα συμπεράσματα:

- I. Ή θεωρία τής έκπομπής δέχεται ότι τό φώς είναι *άκτινοβολία σωματιδίων* (σωματιδιακή *άκτινοβολία*) καί εξηγεί τήν *εθύγραμμη διάδοση*, τήν *ανάκλαση*, τή *διάθλαση* καί τήν *ανάλωση* του λευκού φωτός.
- II. Ή θεωρία τής έκπομπής *άποδεικνύει* ότι ή *ταχύτητα* (c) του φωτός *στά* οπτικώς πυκνότερα διαφανή μέσα (νερό, γυαλί) είναι *μεγαλύτερη* από τήν *ταχύτητα* (c_0) του φωτός *στό* κενό ή *στόν* *άέρα* (δηλαδή είναι $c > c_0$).

38. Θεωρία τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας

Ὁ Huygens (1677) σχεδόν ταυτόχρονα μὲ τὸ Νεύτωνα διατύπωσε ὅτι τὸ φῶς εἶναι *κύματα ἐλαστικότητας* πού διαδίδονται διὰ μέσου τοῦ *αἰθέρα*. Σύμφωνα μὲ τὴ θεωρία τοῦ Huygens ὁ αἰθέρας εἶναι ἕνα χωρίς βάρους διαφανές μέσο, ἀπόλυτα ἐλαστικό πού γεμίζει ὅλο τὸ χῶρο τοῦ Σύμπαντος καὶ τὸ χῶρο πού ὑπάρχει μεταξύ τῶν μορίων τῶν σωμάτων. Γενικά γιὰ τὴν *κυματική θεωρία τοῦ Huygens* συνάγονται τὰ ἑξῆς συμπεράσματα:

I. Ἡ θεωρία τοῦ Huygens δέχεται ὅτι τὸ φῶς εἶναι *κύματα ἐλαστικότητας*, πού διαδίδονται σέ ἕνα ὑποθετικό ἐλαστικό μέσο, τόν αἰθέρα. Ἡ θεωρία αὐτὴ ἐξηγεῖ ὅλα τὰ ὀπτικά φαινόμενα πού ἐξηγεῖ καὶ ἡ θεωρία τῆς ἐκπομπῆς, ἀλλὰ ἐξηγεῖ καὶ τὰ φαινόμενα τῆς συμβολῆς, τῆς πλώσεως καὶ τῆς περιθλάσεως τοῦ φωτός.

II. Ἡ κυματική θεωρία τοῦ φωτός ἀποδεικνύει ὅτι ἡ ταχύτητα (c) τοῦ φωτός στὰ ὀπτικῶς πυκνότερα διαφανή μέσα (νερό, γυάλι) εἶναι μικρότερη ἀπὸ τὴν ταχύτητα (c_0) τοῦ φωτός στὸ κενὸ ἢ στὸν ἀέρα (δηλαδή εἶναι $c < c_0$).

Πειραματικά ἐπιβεβαιώνεται ὅτι ἡ ταχύτητα (c) τοῦ φωτός π.χ. στὸ νερό εἶναι *μικρότερη* ἀπὸ τὴν ταχύτητα (c_0) τοῦ φωτός στὸν ἀέρα καὶ ἐπομένως *ἐπαληθεύεται* ἡ θεωρία τοῦ Huygens. Ἀλλὰ ἡ θεωρία αὐτὴ προϋποθέτει ὅτι τὸ ἀστρικό διάστημα εἶναι γεμάτο μὲ τόν αἰθέρα. Μὲ ἀκριβῆ πειράματα ἀποδείχθηκε ὅτι *ὁ αἰθέρας δὲν ὑπάρχει*.

39. Ἡ φύση τοῦ φωτός

a. Κυματική φύση τοῦ φωτός. Ὁ Νεύτωνας διατύπωσε τὴ θεωρία ὅτι τὸ φῶς ἀποτελεῖται ἀπὸ *σωματίδια*, ἐνῶ ἀντίθετα ὁ Huygens διατύπωσε τὴ θεωρία ὅτι τὸ φῶς εἶναι *κύματα*, πού διαδίδονται στὸ ὑποθετικό ἐλαστικό μέσο, πού ὀνομάστηκε αἰθέρας. Πολλὰ φαινόμενα (ὅπως ἡ συμβολή, ἡ περίθλαση, ἡ πόλωση τοῦ φωτός) ἀπέδειξαν ὀριστικά ὅτι τὸ φῶς εἶναι *ἐγκάρσια κύματα* καὶ βοήθησαν ὥστε ἀπὸ τὴ γενικὴ ἐξίσωση τῶν κυμάτων $c = \nu \cdot \lambda$ νά ὑπολογιστεῖ τὸ μήκος κύματος λ τῶν ὄρατῶν ἀκτινοβολιῶν. Ἀργότερα ὁ Maxwell (1865) ἀπέδειξε ὅτι τὸ φῶς εἶναι *ἠλεκτρομαγνητικὴ ἀκτινοβολία*, δηλαδή εἶναι διάδοση ἠλεκτρομαγνητικοῦ πεδίου, ἡ ὁποία δὲν ἔχει ἀνάγκη ἀπὸ τόν παράδοξο ὑποθετικό αἰθέρα. Ἔτσι ἀποδείχθηκε ὅτι:

Τὸ φῶς εἶναι *ἐγκάρσια ἠλεκτρομαγνητικὰ κύματα* (κυματική φύση τοῦ φωτός).

β. Θεωρία τῶν κβάντα. Τό φῶς ἐκπέμπεται καί ἀπορροφᾶται ἀπό τὰ ἄτομα τῆς ὕλης. Ἐπίσης ἀπό τήν παρατήρηση καταλήγουμε στό συμπέρασμα ὅτι τὰ ἄτομα ἐκπέμπουν καί ἀπορροφοῦν τίς ἀκτινοβολίες *συνεχῶς*. Αὐτή ὁμως ἡ ἀντίληψη γιά τήν ἐκπομπή καί τήν ἀπορρόφηση τῶν ἀκτινοβολιῶν δέν μπορεῖ νά ἐξηγήσει ὀρισμένα φαινόμενα πού παρατηροῦμε, ὅταν συμβαίνει κάποια δράση μεταξύ τῆς ἀκτινοβολίας καί τῆς ὕλης, ὅπως π.χ. συμβαίνει στό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο πού θά γνωρίσουμε στόν Ἡλεκτρισμό. Ὁ Planck (1900) γιά νά ἐξηγήσει μερικά ἀπό τὰ παραπάνω φαινόμενα διατύπωσε τή **θεωρία τῶν κβάντα**, τήν ὁποία ἀργότερα γενίκευσαν ὁ Einstein, ὁ Bohr καί ἄλλοι. Ἡ θεωρία τῶν κβάντα ἀποδείχθηκε ὅτι εἶναι μιά ἀπό τίς ὀραιότερες κατακτήσεις τοῦ ἀνθρώπινου πνεύματος.

Σύμφωνα μέ τή θεωρία τῶν κβάντα τό ἄτομο *ἐκπέμπει* τή φωτεινή ἐνέργεια *ἀσυνεχῶς*, δηλαδή ἐκπέμπει ξεχωριστές ποσότητες ἐνέργειας, πού ὀνομάζονται **κβάντα** ἢ **φωτόνια**. Ἀπό τό ἄτομο δέ φεύγουν συνεχῶς κύματα, ἀλλά διαδοχικά ἐκπέμπονται ὀμάδες κυμάτων (*κυματοσυρροοί*), πού καθεμιά ἀπό αὐτές ἀποτελεῖ *ένα φωτόνιο* καί κλείνει μέσα τῆς ὀρισμένη ἐνέργεια E . Ὄταν ἡ φωτεινή ἀκτινοβολία πέφτει πάνω στήν ὕλη, τό κάθε ἄτομο *ἀπορροφᾷ ἀσυνεχῶς* τήν ἀκτινοβολία, δηλαδή ἀπορροφᾷ ξεχωριστά φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιᾶς ἀκτινοβολίας, πού ἔχει συχνότητα ν , κλείνει μέσα του ἐνέργεια E πού εἶναι ἴση μέ:

$$\text{ἐνέργεια φωτονίου} \quad E = h \cdot \nu$$

ὅπου h εἶναι μιά σταθερή, πού ὀνομάζεται *σταθερή τοῦ Planck* καί εἶναι ἴση μέ:

$$\text{σταθερή τοῦ Planck} \quad h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$$

Ἡ θεωρία τῶν κβάντα δέχεται τήν κυματική φύση τοῦ φωτός, ὅπως τή διατυπώσαμε παραπάνω καί ἐρμηνεύει πῶς τὰ ἄτομα τῆς ὕλης ἐκπέμπουν καί ἀπορροφοῦν τήν ἠλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία. Ὡστε:

- I. Ἡ θεωρία τῶν κβάντα δέχεται ὅτι τὰ ἄτομα τῆς ὕλης ἐκπέμπουν καί ἀπορροφοῦν τήν ἀκτινοβολία μέ τή μορφή φωτονίων.
- II. Κάθε φωτόνιο εἶναι μιά ὀμάδα κυμάτων πού διαδίδονται μέ τήν ταχύτητα τοῦ φωτός.
- III. Τό φωτόνιο μιᾶς *μονοχρωματικῆς* ἀκτινοβολίας μεταφέρει ἐνέργεια (E) ἀνάλογη μέ τή συχνότητα (ν) τῆς ἀκτινοβολίας καί ἴση μέ $E = h \cdot \nu$.

Στά όπτικά φαινόμενα πού θά εξετάσουμε παρακάτω θεωρούμε μόνο ότι τό φῶς εἶναι *ἐγκάρσια κύματα*. Τά φωτόνια θά τά συναντήσουμε σέ ἄλλα φαινόμενα (*).

Παράδειγμα : Ἡ ἐρυθρή ἀκτινοβολία ἔχει συχνότητα $\nu = 4 \cdot 10^{14}$ Hz. Ἄρα κάθε φωτόνιο αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μεταφέρει ἐνέργεια:

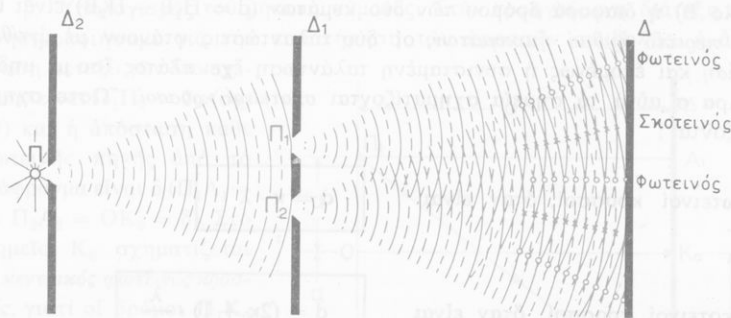
$$E = h \cdot \nu = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec} \cdot 4 \cdot 10^{14} \text{ sec}^{-1}$$

$$\text{καί } E = 26,5 \cdot 10^{-20} \text{ Joule}$$

40. Συμβολή τοῦ φωτός

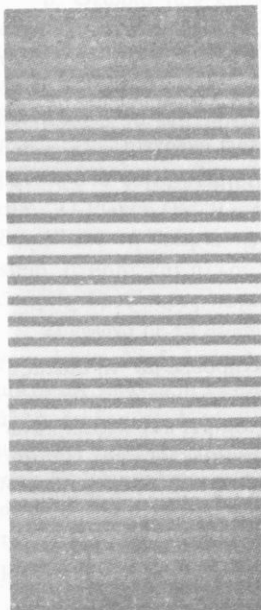
Τό φαινόμενο τῆς *συμβολῆς τοῦ φωτός* τό παρατηροῦμε μέ τή διάταξη πού δίδει τό σχῆμα 56 (*σχισμές τοῦ Young*). Τό *μονοχρωματικό φῶς* μιᾶς ἰσχυρῆς φωτεινῆς πηγῆς περνάει ἀπό μιὰ λεπτή σχισμῆ Π καί πέφτει πάνω σ' ἓνα διάφραγμα Δ_1 . Αὐτό ἔχει δύο πολύ λεπτές σχισμές Π_1 καί Π_2 πού εἶναι παράλληλες μέ τή σχισμῆ Π. Ἡ ἀπόσταση μεταξύ τῶν δύο σχισμῶν Π_1 καί Π_2 εἶναι πολύ μικρή. Τότε οἱ σχισμές Π_1 καί Π_2 εἶναι *δύο σύγχρονες φωτεινές πηγές*, δηλαδή εἶναι δύο σύγχρονα κέντρα παραγωγῆς *φωτεινῶν κυμάτων*. Τά δύο κύματα φτάνουν στό διάφραγμα Δ καί ἀπό τή συμβολή τους σχηματίζονται πάνω στό διάφραγμα *κροσσοί συμβολῆς*, δηλαδή *διαδοχικές φωτεινές καί σκοτεινές ραβδώσεις* (σχ. 57).

Ἐπίσης ὁ σχηματισμός τῶν κροσσῶν συμβολῆς ἐξηγεῖται εὐκόλα (σχ. 58).

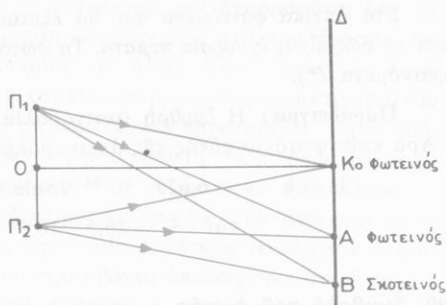


Σχ. 56. Διάταξη γιά τήν παραγωγή τοῦ φαινομένου τῆς συμβολῆς (σχισμές τοῦ Young).

(*) Συμπληρώνοντας τίς ἀντιλήψεις μας γιά τή φύση τοῦ φωτός ἀναφέρουμε ἐδῶ καί τά φωτόνια, ὥστε νά εἶναι γνωστά κατά τήν ἐξέταση ἄλλων φαινομένων (ἀκτίνες Röntgen, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο).



Σχ. 57. Κροσσοί συμβολής.



Σχ. 58 Ὁ σχηματισμός φωτεινῶν ἢ σκοτεινῶν κροσσοῦ εξαρτᾶται ἀπὸ τῆς διαφορᾶς τῶν δρόμων τῶν δύο κυμάτων.

Σε ὅσα σημεῖα τοῦ διαφράγματος (ὅπως π.χ. τὸ σημεῖο A) ἢ διαφορὰ δρόμου τῶν δύο κυμάτων ($d = \Pi_1A - \Pi_2A$) εἶναι ἴση μὲ ἀκέραιο ἀριθμὸ κυμάτων, οἱ δύο ταλαντώσεις φτάνουν μὲ συμφωνία φάσεως καὶ ἐπομένως ἡ συνισταμένη ταλάντωση ἔχει μέγιστο πλάτος. Ἄρα σ' αὐτὰ τὰ σημεῖα σχηματίζονται *φωτεινοὶ κροσσοί*.

Ἀντίθετα σὲ ὅσα σημεῖα τοῦ διαφράγματος (ὅπως π.χ. τὸ σημεῖο B) ἢ διαφορὰ δρόμου τῶν δύο κυμάτων ($d = \Pi_1B - \Pi_2B$) εἶναι ἴση μὲ περιττὸ ἀριθμὸ ἡμικυμάτων, οἱ δύο ταλαντώσεις φτάνουν μὲ ἀντίθετη φάση καὶ ἐπομένως ἡ συνισταμένη ταλάντωση ἔχει πλάτος ἴσο μὲ μηδέν. Ἄρα σ' αὐτὰ τὰ σημεῖα σχηματίζονται *σκοτεινοὶ κροσσοί*. Ὡστε σχηματίζονται :

φωτεινοὶ κροσσοί, ὅταν εἶναι

$$d = \kappa \cdot \lambda$$

σκοτεινοὶ κροσσοί, ὅταν εἶναι

$$d = (2\kappa + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

α. Μῆκος κύματος τῶν ὁρατῶν ἀκτινοβολιῶν. Ἀπὸ τὸ φαινόμενο τῆς συμβολῆς τοῦ φωτός μετρήσαμε τὸ μῆκος κύματος (λ) τῶν ὁρατῶν ἀκτινοβολιῶν καὶ καταλήξαμε στὰ ἑξῆς συμπεράσματα:

I. Τό μήκος κύματος (λ) τών όρατών άκτινοβολιών του φάσματος του λευκού φωτός έλαττώνεται συνεχώς, όσο προχωρούμε από τήν έρυθρή προς τήν ιώδη άκτινοβολία.

II. Τό μήκος κύματος τών όρατών άκτινοβολιών περιλαμβάνεται μεταξύ $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ και $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

μήκος κύματος όρατών άκτινοβολιών

έρυθρή άκτινοβολία : $\lambda_{\text{έρυθρη}} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 8000 \text{ \AA}$

ιώδης άκτινοβολία : $\lambda_{\text{ιώδης}} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 4000 \text{ \AA}$

Συχνότητα τών όρατών άκτινοβολιών. Ή ταχύτητα του φωτός στο κενό ή στον άέρα είναι $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$. Από τήν εξίσωση τών κυμάτων $c = \nu \cdot \lambda$ βρίσκουμε ότι η συχνότητα τών άκραίων όρατών άκτινοβολιών είναι:

$$\nu_{\text{έρυθρη}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}}{0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}}$$

καί

$$\nu_{\text{έρυθρη}} = 375 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$$

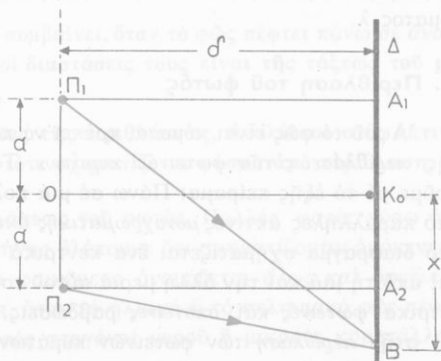
$$\nu_{\text{ιώδης}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}}{0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}}$$

καί

$$\nu_{\text{ιώδης}} = 750 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$$

Όστε η συχνότητα τών όρατών άκτινοβολιών του φάσματος του λευκού φωτός *αυξάνει συνεχώς*, όσο προχωρούμε από τήν έρυθρή προς τήν ιώδη άκτινοβολία.

β. Ύπολογισμός του μήκους κύματος. Στην προηγούμενη διάταξη που χρησιμοποιήσαμε για τήν παρατήρηση τών κροσσών συμβολής, ή απόσταση μεταξύ τών δύο σχισμών είναι $\Pi_1 \Pi_2 = 2a$ (σχ. 59) και ή απόσταση κάθε φωτεινής πηγής από τό διάφραγμα είναι δ ($\Pi_1 A_1 = \Pi_2 A_2 = OK_0 = \delta$). Στο σημείο K_0 σχηματίζεται ό *κεντρικός φωτεινός κροσσός*, γιατί οί δρόμοι $\Pi_1 K_0$ και $\Pi_2 K_0$ τών δύο κυμάτων είναι ίσοι και επομένως οί δύο ταλαντώσεις φτάνουν μέ διαφορά φάσεως ίση μέ μηδέν. Ή μο-



Σχ. 59. Για τή μέτρηση του μήκους κύματος λ μιās άκτινοβολίας.

νοχρωματική ἀκτινοβολία πού ἐκπέμπουν οἱ δύο φωτεινές πηγές Π_1 καὶ Π_2 ἔχει μῆκος κύματος λ . Σὲ ἓνα σημεῖο B τοῦ διαφράγματος σχηματίζεται φωτεινός κροσσός, γιατί ἡ διαφορά δρόμου d τῶν δύο κυμάτων εἶναι ἴση μὲ ἀκέραιο ἀριθμὸ κ κυμάτων, δηλαδή εἶναι :

$$d = \Pi_1 B - \Pi_2 B = \kappa \cdot \lambda \quad (1)$$

Ἀπὸ τὰ ὀρθογώνια τρίγωνα $\Pi_1 A_1 B$ καὶ $\Pi_2 A_2 B$ βρίσκουμε ὅτι εἶναι:

$$(\Pi_1 B)^2 = (\Pi_1 A_1)^2 + (A_1 B)^2 \quad \eta \quad (\Pi_1 B)^2 = \delta^2 + (x + a)^2 \quad (2)$$

$$(\Pi_2 B)^2 = (\Pi_2 A_2)^2 + (A_2 B)^2 \quad \eta \quad (\Pi_2 B)^2 = \delta^2 + (x - a)^2 \quad (3)$$

Ἄν ἀφαιρέσουμε κατὰ μέλη τὶς ἐξισώσεις (2) καὶ (3), ἔχουμε:

$$(\Pi_1 B)^2 - (\Pi_2 B)^2 = 4a \cdot x \quad \eta \quad (\Pi_1 B + \Pi_2 B) \cdot (\Pi_1 B - \Pi_2 B) = 4a \cdot x \quad (4)$$

Ἐπειδὴ ἡ ἀπόσταση $OK_0 = \delta$ εἶναι πολὺ μεγάλη σχετικά μὲ τὴν ἀπόσταση $K_0 A_2 = a$, μποροῦμε νὰ λάβουμε $\Pi_1 B + \Pi_2 B = 2\delta$ καὶ ἐπομένως ἡ ἐξίσωση (4) γράφεται:

$$2\delta \cdot d = 4a \cdot x \quad (5)$$

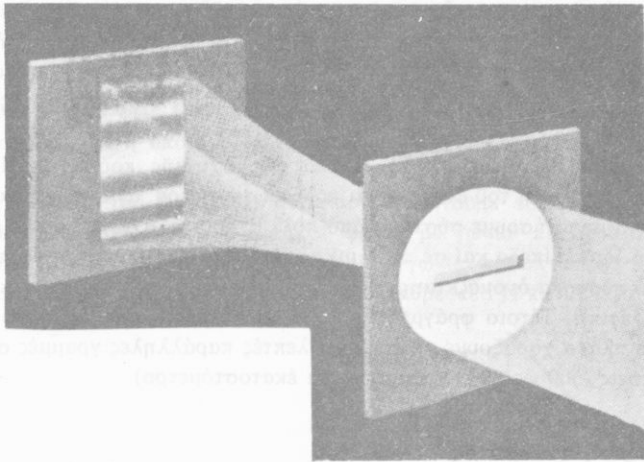
Ἀπὸ τὶς ἐξισώσεις (1) καὶ (5) βρίσκουμε ὅτι τὸ μῆκος κύματος (λ) τῆς μονοχρωματικῆς ἀκτινοβολίας εἶναι:

$\text{μῆκος κύματος} \quad \lambda = \frac{2a \cdot x}{\kappa \cdot \delta} \quad (6)$

Τὸ κ φανερώνει τὸν αὐξοῦντα ἀριθμὸ τοῦ φωτεινοῦ κροσσοῦ (στὸν κεντρικὸ φωτεινὸ κροσσὸ ἀντιστοιχεῖ $\kappa = 0$) καὶ τὸ x φανερώνει τὴν ἀπόσταση τοῦ κ τάξεως φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπὸ τὸν κεντρικὸ φωτεινὸ κροσσό. Ὡστε τὰ μεγέθη πού εἶναι στὸ δεῦτερο μέλος τῆς ἐξισώσεως (6) μποροῦν νὰ μετρηθοῦν μὲ ἀκρίβεια καὶ ἔτσι μποροῦμε νὰ ὑπολογίσουμε τὸ μῆκος κύματος λ .

41. Περιθλασὴ τοῦ φωτός

Ἀφοῦ τὸ φῶς εἶναι κύματα, πρέπει νὰ παρουσιάζεται καὶ τὸ φαινόμενο τῆς *περιθλάσεως τῶν φωτεινῶν κυμάτων*. Τὸ φαινόμενο αὐτὸ τὸ παρατηροῦμε μὲ τὸ ἐξῆς πείραμα: Πάνω σὲ μιά πολὺ λεπτὴ σχισμὴ πέφτει δέσμη ἀπὸ παράλληλες ἀκτίνες *μονοχρωματικῆς ἀκτινοβολίας* (σχ. 60). Τότε πάνω στὸ διάφραγμα σχηματίζεται ἓνα κεντρικὸ φωτεινὸ εἶδωλο τῆς σχισμῆς καὶ ἀπὸ τὴ μιά καὶ τὴν ἄλλη μεριά αὐτοῦ τοῦ εἰδώλου σχηματίζονται συμμετρικὰ *φωτεινές* καὶ *σκοτεινές* ραβδώσεις. Τὸ φαινόμενο αὐτὸ ὀφείλεται στὴν *περιθλασὴ* τῶν φωτεινῶν κυμάτων πού πέφτουν πάνω στὴ λεπτὴ σχισμὴ. Φαινόμενα περιθλάσεως παρατηροῦμε καὶ ὅταν τὸ φῶς πέφτει πάνω σὲ πολὺ μικρὰ ἀντικείμενα ἢ πολὺ λεπτὲς ἀκμές.



Σχ. 60. Περίθλαση του φωτός που προκαλείται από λεπτή σχισμή.

Αν στην πολύ λεπτή σχισμή πέσει μία δέσμη από παράλληλες ακτίνες λευκού φωτός, τότε πάνω στο διάφραγμα σχηματίζεται ένα κεντρικό λευκό είδωλο της σχισμής και από τη μία και την άλλη μεριά του είδωλου σχηματίζονται συμμετρικά φάσματα του λευκού φωτός, που χωρίζονται μεταξύ τους με σκοτεινές ραβδώσεις. Αυτά τα φάσματα τα ονομάζουμε φάσματα από περίθλαση, για να τα διακρίνουμε από τα φάσματα που παίρνουμε με τα πρίσματα. Ωστε για την περίθλαση των φωτεινών κυμάτων καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

I. Περίθλαση του φωτός συμβαίνει, όταν το φως πέφτει πάνω σε ανοίγματα ή αντικείμενα που οι διαστάσεις τους είναι της τάξεως του μήκους κύματος του φωτός.

II. Το λευκό φως, εξαιτίας της περιθλάσεως, αναλύεται στις ακτινοβολίες του φάσματος και τότε σχηματίζεται φάσμα από περίθλαση.

Αποτελέσματα της περιθλάσεως του φωτός. Πολλές φορές γύρω από το δίσκο του Ήλιου ή της Σελήνης βλέπουμε ότι σχηματίζονται όμοιοι έγχρωμοι δακτύλιοι. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *άλως* και οφείλεται στην περίθλαση που συμβαίνει, όταν το ηλιακό ή το σεληνιακό φως πέφτει πάνω σε ένα στρώμα από μικρές σταγόνες νερού ή μικρούς κρυστάλλους πάγου.

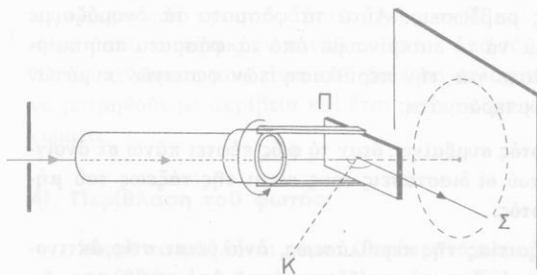
Τό φαινόμενο της περιθλάσεως του φωτός έχει επίδραση στις παρα-

τηρήσεις που κάνουμε με τα διάφορα όπτικά όργανα. Αποδεικνύεται ότι είναι αδύνατο να παρατηρήσουμε ως ξεχωριστά δύο σημεία, όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι *μικρότερη* από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιούμε για την παρατήρηση. Έτσι η περίθλαση του φωτός καθορίζει ένα όριο *στη διαχωριστική ικανότητα* των οπτικών οργάνων.

Φράγματα περιθλάσεως. Τα είδωλα της σχισμής που σχηματίζονται από την περίθλαση του φωτός είναι πολύ φωτεινότερα, αν αντί για μία σχισμή χρησιμοποιήσουμε σύστημα από πολλές όμοιες σχισμές που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και σε πολύ μικρές και ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Αυτό το σύστημα ονομάζεται *φράγμα περιθλάσεως* και χρησιμοποιείται πολύ στην Όπτική. Τέτοιο φράγμα περιθλάσεως σχηματίζεται, αν πάνω σε μία γυάλινη πλάκα χαράξουμε με διαμάντι λεπτές παράλληλες γραμμές σε ίσες αποστάσεις (500 ως 1000 γραμμές κατά εκατοστόμετρο).

42. Πόλωση του φωτός

α. Συμμετρία από περιστροφή του φυσικού φωτός. Το φως, που προέρχεται από μία φωτεινή πηγή, αν δεν έχει πάθει ανάκλαση ή διάθλαση, ονομάζεται *φυσικό φως*. Μία γυάλινη πλάκα Π, που ή μία επιφάνειά της έχει σκεπαστεί με ένα στρώμα καπνιάς (αιθάλης) χρησιμοποιείται ως καθρέφτης¹. Αφήνουμε να πέσει πλάγια πάνω στον καθρέφτη Π μία ακτίνα



Σχ. 61. Ο φωτισμός της κηλίδας Σ δε μεταβάλλεται.

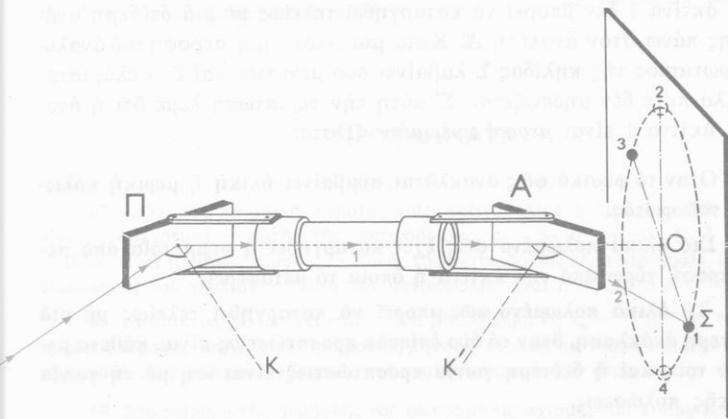
(δηλαδή μία πολύ λεπτή δέσμη) φυσικού φωτός (σχ. 61). Πάνω στο διάφραγμα σχηματίζεται μία μικρή φωτεινή κηλίδα Σ. Περιστρέφουμε τον καθρέφτη Π γύρω από την προσπίπτουσα ακτίνα, που την παίρνουμε ως άξονα περιστροφής,

¹ Η δέσμη φωτός, που πέφτει στην πλάκα Π δίνει μία ανακλώμενη δέσμη και μία διαθλώμενη δέσμη που απορροφάται από το στρώμα της καπνιάς.

τό σημείο O . Παρατηρούμε ότι ο φωτισμός της κηλίδας Σ δέ μεταβάλλεται, όταν γίνεται αυτή ή περιστροφή. Από τό παραπάνω πείραμα βγά-
ζουμε τό έξής συμπέρασμα:

Τό φυσικό φώς έχει απόλυτη συμμετρία από περιστροφή γύρω από
τήν άκτίνα ή όποία τό μεταφέρει.

β. Πόλωση του φωτός από ανάκλαση. Αφήνουμε τώρα νά πέσει πάνω
στόν καθρέφτη Π ή άκτίνα φυσικοῦ φωτός μέ γωνία προσπτώσεως 57° .
Ή ανακλώμενη άκτίνα 1 πέφτει μέ τήν ίδια γωνία προσπτώσεως 57° πάνω
σέ όμοια πλάκα A (σχ. 62). Αρχικά οί δύο καθρέφτες Π καί A είναι παράλ-



Σχ. 62. Ο φωτισμός της κηλίδας 1 περιοδικά μεταβάλλεται μεταξύ ενός μέγιστου καί
ένος ελάχιστου.

λληλοι καί τά δύο επίπεδα προσπτώσεως συμπίπτουν. Περιστρέφουμε τόν
καθρέφτη A γύρω από τήν άκτίνα 1 , πού τήν παίρνουμε ως άξονα, διατη-
ρώντας όμως σταθερή τή γωνία προσπτώσεως. Ή ανακλώμενη άκτίνα 2
διαγράφει πάλι επιφάνεια κώνου καί ή φωτεινή κηλίδα Σ διαγράφει μιά
περιφέρεια πού έχει κέντρο τό σημείο O . Παρατηρούμε ότι σ' αυτή τήν
περίπτωση ό φωτισμός της κηλίδας Σ δέ διατηρείται σταθερός. Ο φωτι-
σμός της κηλίδας Σ :

— είναι μέγιστος, όταν τά δύο επίπεδα προσπτώσεως συμπίπτουν (θέ-
σεις της κηλίδας 1 καί 3)·

— είναι ίσος μέ μηδέν, όταν τά δύο επίπεδα προσπτώσεως είναι κά-
θετα μεταξύ τους (θέσεις της κηλίδας 2 καί 4).

Από τό πείραμα αυτό συνάγεται ότι ή άκτίνα 1, πού προκύπτει από τήν *ανάκλαση* τοῦ φυσικοῦ φωτός, δέν ἔχει τίς ἴδιες ιδιότητες μέ τήν άκτίνα τοῦ φυσικοῦ φωτός, γιατί ή ανακλώμενη άκτίνα 1 μπορεί *νά καταργηθεῖ τελείως* μέ μιá δευτέρη *ανάκλαση*. Τότε λέμε ότι ή ανακλώμενη άκτίνα 1 εἶναι άκτίνα *πολωμένου φωτός*. Ἡ όρισμένη γωνία (57°), μέ τήν όποία πρέπει *νά πέσει* ή άκτίνα τοῦ φυσικοῦ φωτός πάνω στόν καθρέφτη Π, γιά *νά πάθει πόλωση*, *ονομάζεται γωνία όλικῆς πολώσεως*. Ὁ πρώτος καθρέφτης Π πού προκαλεῖ τήν πόλωση, *ονομάζεται πολωτής*, ἐνώ ὁ δεύτερος καθρέφτης Α *ονομάζεται ἀναλύτης*.

Ἄν ή άκτίνα τοῦ φυσικοῦ φωτός πέσει πάνω στόν πολωτή Π μέ γωνία διαφορετική ἀπό τή γωνία *όλικῆς πολώσεως*, τότε παρατηροῦμε ότι ή ανακλώμενη άκτίνα 1 δέν μπορεί *νά καταργηθεῖ τελείως* μέ μιá δευτέρη *ανάκλαση* της πάνω στόν ἀναλύτη Α. Κατά μιá *όλόκληρη* στροφή τοῦ ἀναλύτη Α ὁ φωτισμός τῆς κηλίδας Σ λαβαίνει δύο μέγιστες καί δύο ἐλάχιστες τιμές, *ἀλλά* ποτέ δέν μηδενίζεται. Σ' αὐτή τήν περίπτωση λέμε ότι ή ανακλώμενη άκτίνα 1 εἶναι *μερικά πολωμένη*. Ὡστε:

I. Ὄταν τό φυσικό φῶς *ἀνακλᾶται*, συμβαίνει *όλική* ἢ *μερική πόλωση* τοῦ φωτός.

II. Στό *όλικά πολωμένο* φῶς ἔχει καταργηθεῖ ή *συμμετρία* ἀπό *περιστροφή* γύρω ἀπό τήν άκτίνα ή *όποία* τό μεταφέρει.

III. Τό *όλικά πολωμένο* φῶς μπορεί *νά καταργηθεῖ τελείως* μέ μιá *δευτέρη ανάκλαση*, *όταν* τά δύο *ἐπίπεδα* *προσπτώσεως* εἶναι *κάθετα* *μεταξῶ* *τους* καί ή *δευτέρη γωνία* *προσπτώσεως* εἶναι *ίση* μέ τή *γωνία* *όλικῆς πολώσεως*.

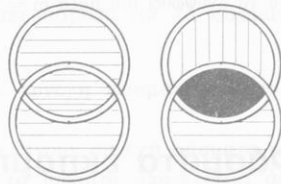
γ. Πόλωση τοῦ φωτός ἀπό διάθλαση. Πάνω σέ μιá γυάλινη πλάκα ἀφήνομε *νά πέσει* μιá λεπτή δέσμη φυσικοῦ φωτός *ὑπό* γωνία *προσπτώσεως* ἴση μέ τή γωνία *όλικῆς πολώσεως*. Τότε ἕνα μέρος (τά 8%) τοῦ φωτός *ἀνακλᾶται* καί εἶναι *όλικά πολωμένο*. Τό ὑπόλοιπο μέρος (92%) τοῦ φωτός *διαθλᾶται*. Μέ ἕναν ἀναλύτη βρῖσκουμε ότι τό *διαθλωμένο* φῶς εἶναι *μερικά πολωμένο*. Ὡστε μέ τό πείραμα βρῖσκουμε ότι:

Τό φυσικό φῶς *κατά* τή *διάθλαση* *παθαίνει* *μόνο* *μερική πόλωση*.

Σημείωση. Μέ διάθλαση μπορούμε *νά πετύχουμε* *όλική πόλωση* τοῦ φυσικοῦ φωτός, *ἂν* *χρησιμοποιήσουμε* *μιá δέσμη* ἀπό 10 *ὡς* 20 *ἐπάλληλες* πλάκες.

δ. Polaroid. Γιά τήν *εὔκολη* *παραγωγή* *πολωμένου* *φωτός* *χρησιμοποιούμε* ἕνα *τεχνητά* *παρασκευαζόμενο* *σῶμα* πού *ονομάζεται* *polaroid* (*πο-*

λωτικό σώμα). Τό polaroid αποτελείται από ένα λεπτό διαφανές στρώμα ζελατίνας πού πάνω του υπάρχουν πάρα πολλοί μικρότατοι κρύσταλλοι μιᾶς ουσίας πού λέγεται έραπαθίτης (είναι ένωση τῆς κινίνης). Τό polaroid τοποθετεῖται ανάμεσα σέ δύο λεπτές γυάλινες πλάκες. Αὐτή ἡ διάταξη ἀποτελεῖ έναν πολωτή. Μιά ἄλλη ὁμοια διάταξη μπορεῖ νά χρησιμοποιηθεῖ ὡς ἀναλύτης (σχ. 63). Τά polaroid χρησιμοποιοῦνται σέ πολλές ἐφαρμογές (ὅταν θέλουμε νά μετριάσουμε τήν ένταση τοῦ φωτός πού μπαίνει στό μάτι μας, σέ φωτογραφικά φίλτρα, σέ ὀπτικά ὄργανα, σέ pare - brise κ.ἄ.).



Σχ. 63. Δίσκοι polaroid.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

67. Στόν ἄερα τό μήκος κύματος μιᾶς ἀκτινοβολίας εἶναι $\lambda_0 = 6000 \text{ \AA}$. 1) Πόση εἶναι ἡ συχνότητα ν_0 αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας; $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$. ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). 2) Πόσο εἶναι τό μήκος κύματος λ_1 αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μέσα στό γυαλί, ἂν ὁ δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιοῦ γι' αὐτή τήν ἀκτινοβολία εἶναι $n = 1,747$;

68. Μιά ἀκτινοβολία ἔχει στόν ἄερα μήκος κύματος $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Νά μετρηθεῖ σέ μήκη κύματος αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μήκος 1 m μέσα στόν ἄερα καί μήκος 1 m μέσα στό γυαλί, ἂν ὁ δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιοῦ ὡς πρός τόν ἄερα εἶναι $n = 3/2$.

69. Στό πείραμα τῆς συμβολῆς τοῦ φωτός μέ τίς σχισμές τοῦ Young βρῖσκουμε ὅτι τό μήκος κύματος λ τῆς ἀκτινοβολίας δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση :

$$\lambda = \frac{2a \cdot x}{\kappa \cdot d}$$

ὅπου $2a$ εἶναι ἡ ἀπόσταση μεταξύ τῶν δύο φωτεινῶν πηγῶν (δηλαδή τῶν σχισμῶν), d ἡ ἀπόσταση τῶν φωτεινῶν πηγῶν ἀπό τό διάφραγμα, x ἡ ἀπόσταση τοῦ κ τάξεως φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπό τόν κεντρικό φωτεινό κροσσό K . Σέ ἕνα τέτοιο πείραμα εἶναι $2a = 4 \text{ mm}$ καί $d = 60 \text{ cm}$. 1) Ἡ ἐρυθρή ἀκτινοβολία πού χρησιμοποιοῦμε ἔχει μήκος κύματος $\lambda_E = 4 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$. Πόση εἶναι ἡ ἀπόσταση x_E τοῦ πρώτου φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπό τόν κεντρικό φωτεινό κροσσό K ; 2) Πόση εἶναι ἡ ἀπόσταση x_I τοῦ πρώτου φωτεινοῦ κροσσοῦ, ἂν χρησιμοποιήσουμε ἰώδη ἀκτινοβολία, πού ἔχει μήκος κύματος $\lambda_I = 8 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$:

70. Σέ ἕνα πείραμα μέ τίς σχισμές τοῦ Young εἶναι $2a = 2 \text{ mm}$ καί $d = 1 \text{ m}$. Ἡ ἀπόσταση δύο διαδοχικῶν φωτεινῶν κροσσῶν εἶναι $e = 0,34 \text{ mm}$. Πόσο εἶναι τό μήκος κύματος λ τῆς ἀκτινοβολίας;

71. Πόση ἐνέργεια μεταφέρει ἕνα φωτόνιο τῆς ἐρυθρῆς ἢ ἕνα φωτόνιο τῆς ἰώδους ἀκτινοβολίας, ἂν τά ἀντίστοιχα μήκη κύματος εἶναι $\lambda_E = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ καί $\lambda_I = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$; $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$.

72. Το φωτόνιο μιάς υπεριώδους ακτινοβολίας μεταφέρει ενέργεια $E = 198,6 \cdot 10^{-20}$ Joule. Πόσο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

73. Το κάθε φωτόνιο μιάς ιώδους ακτινοβολίας μεταφέρει ενέργεια $E_I = 5 \cdot 10^{-19}$ Joule. Πόσα φωτόνια αυτής της ακτινοβολίας μεταφέρουν την ενέργεια E , που χρειάζεται για να ανυψωθεί μιά μάζα $m = 10^{-3}$ gr σε ύψος $h = 1$ mm; $g = 10$ m/sec².

Φάσματα έκπομπής και απορροφήσεως

43. Φάσματα έκπομπής

Μέ το φασματοσκόπιο εξετάζουμε το φάσμα του φωτός που εκπέμπουν οι διάφορες φωτεινές πηγές. Τα φάσματα αυτά ονομάζονται *φάσματα έκπομπής*. Έτσι βρίσκουμε ότι το φῶς που εκπέμπει ένα *διάπυρο στερεό* ή *ύγρο σώμα* σχηματίζει ένα *συνεχές φάσμα* που αποτελείται από μιά συνεχή σειρά όρατων ακτινοβολιών χωρίς καμιά διακοπή. Τέτοιο φάσμα δίνουν π.χ. το διάπυρο σύρμα του ηλεκτρικού λαμπτήρα, το ηλεκτρικό τόξο, ή φλόγα ενός κεριού κ.λ. (βλ. έγχρωμη εικόνα εκτός κειμένου). Για να πάρουμε το φάσμα έκπομπής που δίνουν οι διάπυροι ατμοί των μετάλλων, βάζουμε



Σχ. 64 Σωλήνας Geissler για τή διεγέρση της φωτοβολίας αερίων.

μέσα στή φλόγα του λύχνου Bunsen ένα μικρό κομμάτι από τό μέταλλο ή από ένα άλας αυτού του μετάλλου. Έτσι π.χ. βρίσκουμε ότι οι *διάπυροι ατμοί* νατρίου δίνουν ένα φάσμα έκπομπής που αποτελείται μόνο από *δύο κίτρινες γραμμές*, που είναι ή μιά πολύ κοντά στήν άλλη και αντιστοιχούν σε δύο ακτινοβολίες που έχουν όρισμένο μήκος κύματος. Αυτό τό φάσμα έκπομπής είναι *χαρακτηριστικό* των διάπυρων ατμών νατρίου.

Τά σώματα που στή συνηθισμένη θερμοκρασία είναι άερια (π.χ. τό υδρογόνο, τό όξυγόνο, τό ήλιο) τά αναγκάζουμε να γίνουν φωτεινές πηγές μέ τό *σωλήνα Geissler* (σχ. 64). Αυτός είναι γυάλινος σωλήνας, που στίς δύο άκρες του έχει δύο ηλεκτρόδια και περιέχει άέριο μέ μικρή πίεση. Όταν μέσα στό σωλήνα παράγονται ήλεκτρικές εκκενώσεις, τότε τό άέριο εκπέμπει φῶς και ιδιαίτερα φωτοβολεί τό άέριο που είναι στό στενότερο τμήμα του σωλήνα. Έτσι βρίσκουμε ότι τό φάσμα έκπομπής του υδρογόνου αποτελείται μόνο από *τέσσερις φωτεινές γραμ-*

μές, πού αντιστοιχούν σέ τέσσερις όρισμένες άκτινοβολίες (*). Αυτό τό φάσμα έκπομπής είναι *χαρακτηριστικό* του ύδρογόνου. Παρατηρούμε ότι τό φάσμα έκπομπής των άτμών και των αερίων αποτελείται μόνο από όρισμένες γραμμές, δηλαδή είναι *άσυνεχές φάσμα* ή *άλλιως γραμμικό φάσμα*. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά έξής συμπεράσματα γιά τά φάσματα έκπομπής :

I. Τά φάσματα έκπομπής διακρίνονται σέ *συνεχή φάσματα* και *γραμμικά φάσματα*.

II. Τά διάπυρα στερεά και ύγρά σώματα δίνουν *συνεχή φάσματα* και έπομένως τό φως πού εκπέμπουν αυτά τά σώματα αποτελείται από άκτινοβολίες, πού αντιστοιχούν σέ όλα τά μήκη κύματος των όρατων άκτινοβολιών.

III. Τά άέρια και οί άτμοί, όταν έχουν μικρή πίεση και φωτοβολούν, δίνουν *γραμμικά φάσματα* και έπομένως τό φως πού εκπέμπουν αποτελείται μόνο από όρισμένες άκτινοβολίες, πού είναι *χαρακτηριστικές* γιά τό άτομο του καθενός στοιχείου.

44. Φάσματα απορροφήσεως

Μόνο τό κενό είναι τελείως διαφανές και έπομένως τό φως διαδίδεται μέσα στό κενό χωρίς καμιά απορρόφηση. Αντίθετα, όλα τά διαφανή υλικά πάντοτε *απορροφούν* όρισμένες άκτινοβολίες. Εύκολα μπορούμε νά δούμε ποιές άκτινοβολίες απορροφά ένα διαφανές υλικό. Μέ τό φασματοσκόπιο παρατηρούμε τό *συνεχές φάσμα* του λευκού φωτός πού εκπέμπει τό ήλεκτρικό τόξο. Αν αυτό τό λευκό φως, πρίν μπει στό φασματοσκόπιο, περάσει μέσα από μία γυάλινη πλάκα μέ βαθύ κόκκινο χρώμα, παρατηρούμε ότι από τό προηγούμενο *συνεχές φάσμα* απομένει μόνο τό τμήμα μέ τό βαθύ κόκκινο χρώμα. Όλο τό υπόλοιπο τμήμα του *συνεχούς φάσματος* λείπει, γιατί όλες οί αντίστοιχες άκτινοβολίες *απορροφήθηκαν* από τό γυαλί. Σ' αυτή τήν περίπτωση τό φάσμα πού παρατηρούμε είναι ένα *φάσμα απορροφήσεως* (βλ. έγχρωμη εικόνα εκτός κειμένου). Από τή μελέτη των φασμάτων απορροφήσεως καταλήξαμε στό έξής συμπέρασμα:

Στή *συνθητισμένη θερμοκρασία* κάθε διαφανές υλικό απορροφά όρισμένες άκτινοβολίες, πού είναι *χαρακτηριστικές* γιά τό κάθε διαφανές υλικό.

(*). Τά μήκη κύματος των τεσσάρων άκτινοβολιών πού υπάρχουν στό φάσμα έκπομπής του ύδρογόνου είναι:

0,658 μm 0,486 μm 0,434 μm 0,410 μm

α. Νόμος του Kirchhoff. Μέ το φασματοσκόπιο παρατηρούμε πάλι το συνεχές φάσμα του λευκού φωτός που εκπέμπει το ηλεκτρικό τόξο. Στην πορεία του λευκού φωτός βάζουμε μία μή φωτεινή φλόγα φωταερίου, και μέσα σ' αυτή τή φλόγα εισάγουμε ένα κομμάτι από άλας του νατρίου. Η φλόγα αποκτά το ζωηρό κίτρινο χρώμα των ατμών του νατρίου. Τώρα το λευκό φως του ηλεκτρικού τόξου, πρίν μπει στο φασματοσκόπιο, περνάει μέσα από τους *διάπυρους ατμούς νατρίου*. Παρατηρούμε ότι στο συνεχές φάσμα εμφανίζονται δύο λεπτές *σκοτεινές γραμμές* στην ίδια ακριβώς θέση που πρέπει να σχηματίζονται οι δύο χαρακτηριστικές κίτρινες γραμμές των ατμών του νατρίου. Το φαινόμενο αυτό είναι γενικό και ονομάζεται *αντιστροφή των φασματικών γραμμών*. Το φάσμα που παρατηρούμε σ' αυτή τήν περίπτωση είναι ένα *φάσμα απορρόφησης*, που είναι χαρακτηριστικό για τους ατμούς του νατρίου. Αποδεικνύεται ότι γενικά ισχύει ο εξής νόμος του Kirchhoff:

Ένα διάπυρο αέριο (ή ατμός) απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες που είναι ακριβώς ίδιες με τις ακτινοβολίες τις οποίες αυτό το αέριο εκπέμπει.

β. Ήλιακό φάσμα. Μέ το φασματοσκόπιο παρατηρούμε το φάσμα του ήλιακού φωτός. Τότε βλέπουμε ότι το ήλιακό φάσμα είναι ένα *ασυνχές φάσμα* στο οποίο υπάρχουν πάρα πολλές *σκοτεινές γραμμές* (βλ. έγχρωμη εικόνα εκτός κειμένου). Όσοτε το ήλιακό φάσμα είναι ένα *φάσμα απορρόφησης*. Μερικές από τις σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος οφείλονται στο ότι η *ατμόσφαιρα τής Γης* απορροφά όρισμένες ακτινοβολίες του ήλιακού φωτός. Αυτές οι σκοτεινές γραμμές είναι ζωηρότερες, όταν ο Ήλιος βρίσκεται στον ορίζοντα και εξασθενίζουν, όσο ο Ήλιος πλησιάζει προς το ζενίθ. Τίς ίδιες σκοτεινές γραμμές παρατηρούμε και στο φάσμα του φωτός που εκπέμπει ένας φάρος που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από μās.

Οί περισσότερες όμως σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος διατηρούν σταθερή ένταση, ανεξάρτητα από τήν τροχιά που διατρέχει το ήλιακό φως μέσα στην ατμόσφαιρα τής Γης. Άρα η απορρόφηση των ακτινοβολιών που λείπουν από το ήλιακό φως συμβαίνει *πάνω στον Ήλιο*. Πολλές από τις σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος βρίσκονται ακριβώς στη θέση των φωτεινών γραμμών που δίνουν όρισμένα διάπυρα αέρια. Έτσι π.χ. στο ήλιακό φάσμα υπάρχουν δύο σκοτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν στις δύο ακτινοβολίες που εκπέμπουν οι διάπυροι ατμοί του νατρίου. Επίσης υπάρχουν τέσσερις σκοτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν στο φάσμα εκπομπής του υδρογόνου. Από τή μελέτη του ήλιακού φάσματος κατέλη-

ξαν στο συμπέρασμα ότι στον Ήλιο πρέπει να διακρίνουμε δύο περιοχές που αντίστοιχα ονομάζονται *φωτόσφαιρα* και *χρωμόσφαιρα*. Η *φωτόσφαιρα* αποτελεί το εσωτερικό τμήμα του Ήλιου και εκπέμπει όλη τη σειρά των ακτινοβολιών του συνεχούς φάσματος, που αντιστοιχεί στο λευκό φως. Η *χρωμόσφαιρα* περιβάλλει τη φωτόσφαιρα και αποτελεί την ατμόσφαιρα του Ήλιου. Αυτή είναι ένα στρώμα από αέρια που έχουν πολύ ψηλή θερμοκρασία. Σύμφωνα με το νόμο του Kirchhoff το λευκό φως που εκπέμπει η φωτόσφαιρα, καθώς περνάει μέσα από τη χρωμόσφαιρα, χάνει ορισμένες ακτινοβολίες, γιατί *τις απορροφούν τα άτομα των στοιχείων* που βρίσκονται στη χρωμόσφαιρα. Έτσι στο φάσμα του ηλιακού φωτός που φτάνει σε μας, εμφανίζονται σκοτεινές γραμμές. Επειδή στο ηλιακό φάσμα αναγνωρίζουμε το χαρακτηριστικό *φάσμα απορροφήσεως* ενός στοιχείου (π.χ. του νατρίου ή του υδρογόνου), συμπεραίνουμε ότι στη χρωμόσφαιρα υπάρχουν άτομα αυτού του στοιχείου. Έτσι από τη συστηματική μελέτη του ηλιακού φάσματος βρήκαμε ότι στη χρωμόσφαιρα του Ήλιου υπάρχουν με τη μορφή ελεύθερων ατόμων όλα τα γνωστά μας στοιχεία. Και μάλιστα μερικά στοιχεία, όπως π.χ. το *ήλιο*, πρώτα ανακαλύψαμε από το χαρακτηριστικό τους φάσμα απορροφήσεως ότι υπάρχουν στον Ήλιο και έπειτα βρήκαμε ότι υπάρχουν και στη Γη. Ωστε:

Τό ηλιακό φάσμα είναι ένα φάσμα απορροφήσεως, στο οποίο υπάρχουν τά χαρακτηριστικά φάσματα απορροφήσεως που αντιστοιχούν στά άτομα όλων των γνωστών στοιχείων.

45. Η φασματοσκοπική έρευνα

Τά φάσματα έκπομπής και απορροφήσεως προσφέρουν μεγάλες υπηρεσίες. Η *χημική ανάλυση*, για να προσδιορίσει την παρουσία ενός στοιχείου, χρησιμοποιεί πολλές φορές *τή φασματοσκοπική ανάλυση*, που είναι πολύ πιο ευαίσθητη από τις χημικές μεθόδους. Για να εμφανιστεί π.χ. η διπλή κίτρινη γραμμή του νατρίου αρκεί μία μάζα νατρίου μικρότερη από τό δισεκατομμυριοστό του γραμμαρίου.

Η μελέτη των φασμάτων μας άνοιξε τό δρόμο προς *τήν Ατομική Φυσική* και *τήν Αστροφυσική*.

Φωταύγεια. Χρῶμα τοῦ οὐρανοῦ

46. Τρόποι παραγωγῆς φωτός

Ἀπό τὴν καθημερινή ζωὴ ξέρουμε ὅτι οἱ συνηθισμένες φωτεινές πηγές εἶναι σώματα πού ἔχουν ψηλὴ θερμοκρασία. Τό φῶς πού ἐκπέμπουν αὐτές οἱ φωτεινές πηγές προέρχεται ἀπὸ τὴ μετατροπὴ *θερμικῆς ἐνέργειας* σέ *φωτεινὴ ἐνέργεια*. Ἡ παραγωγή φωτός μέ αὐτό τόν τρόπο ὀνομάζεται *θερμικὴ παραγωγή φωτός*. Ἄν ἡ θερμοκρασία τοῦ σώματος διατηρεῖται σταθερή, τό σῶμα ἀδιάκοπα ἐκπέμπει φῶς. Σέ ὀρισμένες ὅμως περιπτώσεις μερικά σώματα ἐκπέμπουν φῶς, γιατί μιά *ἄλλη μορφή ἐνέργειας*, διαφορετικὴ ἀπὸ τὴ θερμότητα, μετατρέπεται σέ *φωτεινὴ ἐνέργεια*. Αὐτός ὁ τρόπος παραγωγῆς φωτός ὀνομάζεται *φωταύγεια*. Ὡστε:

■ Ὑπάρχουν δύο τρόποι παραγωγῆς φωτός, ἡ *θερμικὴ παραγωγή φωτός* καὶ ἡ *φωταύγεια*.

47. Φωταύγεια

Μερικά ἄτομα ἢ μόρια, ὅταν ἀπορροφήσουν ὀρισμένη ἐνέργεια ΔΕ, πού τούς προσφέρεται ἀπὲξω, τότε ἀποκτοῦν μιά ἀσταθὴ ἐνεργειακὴ κατάσταση πού ὀνομάζεται *διέγερση* τοῦ ἀτόμου ἢ τοῦ μορίου. Ἡ διέγερση μπορεῖ νά προκληθεῖ ἀπὸ *ἠλεκτρομαγνητικὲς ἀκτινοβολίες* (π.χ. ὑπεριώδεις ἀκτινοβολίες, ἀκτίνες Röntgen, ἀκτίνες γ) ἢ καὶ ἀπὸ *σωματιδιακὲς ἀκτινοβολίες* (καθοδικές καὶ θετικὲς ἀκτίνες, σωματίδια α κ.ἄ.) Ἐπίσης μπορεῖ νά προκληθεῖ στὴ διάρκεια μερικῶν μηχανικῶν, χημικῶν, ἠλεκτρικῶν καὶ βιολογικῶν φαινομένων.

Τό ἄτομο ἢ τό μόριο πού βρίσκεται σέ διέγερση, ὅταν ξαναγυρίζει στὴν κανονικὴ κατάστασή του, ἀποβάλλει *ἓνα μέρος* ἀπὸ τὴν ἐνέργεια πού πῆρε μέ τὴ μορφή *φωτονίου*. Αὐτός ὁ τρόπος παραγωγῆς φωτός ὀνομάζεται *φωταύγεια*.

Οἱ πῖο ἐνδιαφέρουσες μορφές φωταύγειας εἶναι ὁ *φθορισμός* καὶ ὁ *φωσφορισμός*.

α. Φθορισμός καὶ φωσφορισμός. Ὀρισμένα σώματα (π.χ. τό φθοριοῦχο ἀσβέστιο, ὁ κυανιοῦχος βαριολευκόχρυσος, τό διάλυμα θεικῆς κινίνης, τὰ πετρέλαια κ.ἄ.), ὅταν πάνω τους πέφτει μιά κατάλληλη ἠλεκτρομαγνητικὴ ἀκτινοβολία ἢ σωματιδιακὴ ἀκτινοβολία *ἐκπέμπουν χαρακτηριστικὲς ὄρατὲς ἀκτινοβολίες*. Ἡ ἐκπομπὴ τοῦ φωτός *παύει*, μόλις καταργηθεῖ ἡ ἀκτινοβολία πού προκαλεῖ τὴ διέγερση. Αὐτὴ ἡ μορφή φωταύγειας ὀνομάζε-

ται φθορισμός. Τό φαινόμενο τοῦ φθορισμοῦ τό ἐκμεταλλεύομαστε σέ πολλές ἐφαρμογές π.χ. στό λαμπτήρα φθορισμοῦ, στό φθοροσκόπιο τῶν ἀκτινολόγων, στήν ὀθόνη τῆς τηλεοράσεως, τοῦ παλμογράφου, τοῦ ραντάρ.

Ὅρισμένα ἄλλα σώματα (π.χ. ὁ θειοῦχος ψευδάργυρος, τά θειοῦχα ἄλλα τοῦ βαρίου καί τοῦ στροντίου, τό διαμάντι κ.ἄ.), ὅταν πάνω τους πέφτει μιᾶ κατάλληλη ἀκτινοβολία ἐκπέμπουν χαρακτηριστικές ὁρατές ἀκτινοβολίες. Ἡ ἐκπομπή τοῦ φωτός διαρκεῖ γιά ἄρκετό χρονικό διάστημα μετά τήν κατάργηση τῆς ἀκτινοβολίας πού προκάλεσε τή διέγερση. Αὐτή ἡ μορφή φωταύγειας ὀνομάζεται *φωσφορισμός* καί παρατηρεῖται πάντοτε σέ στερεά σώματα.

Γενικά γιά τό φθορισμό καί τό φωσφορισμό ἰσχύει ὁ ἀκόλουθος νόμος τοῦ Stokes :

Οἱ ἠλεκτρομαγνητικές ἀκτινοβολίες πού σέ ἓνα σῶμα προκαλοῦν τό φθορισμό ἢ τό φωσφορισμό μετατρέπονται ἀπό τό σῶμα σέ ἠλεκτρομαγνητικές ἀκτινοβολίες μέ μεγαλύτερο μήκος κύματος.

β. Ἄλλες μορφές φωταύγειας. Ὄταν συντρίβονται ὀρισμένα σώματα (π.χ. ἡ ζάχαρη) ἐμφανίζεται ἡ *τριβοφωταύγεια*. Στή διάρκεια ὀρισμένων χημικῶν ἀντιδράσεων (π.χ. κατά τήν ὀξειδωση τοῦ φωσφόρου) ἐμφανίζεται ἡ *χημικοφωταύγεια*. Ὄταν συμβαίνει ἠλεκτρική ἐκκένωση μέσα σέ ἀέριο, ἐμφανίζεται ἡ *ἠλεκτροφωταύγεια*. Σέ ὀρισμένους ὀργανισμούς (πυγολαμπίδα, ἄβυσσικοί ὀργανισμοί) ἐμφανίζεται ἡ *βιοφωταύγεια*.

48. Τό χρῶμα τοῦ οὔρανοῦ

Ὅλα τά ἑτερόφωτα σώματα ἐκπέμπουν φῶς, μόνο ὅταν πέσει πάνω τους τό φῶς μιᾶς φωτεινῆς πηγῆς. Τότε κάθε σημεῖο τῆς ἐπιφάνειας τοῦ σώματος ἐκπέμπει πρὸς ὅλες τίς διευθύνσεις ἓνα μέρος τοῦ φωτός πού ἔλαβε καί ἔτσι τό ἑτερόφωτο σῶμα γίνεται μιᾶ δευτερεύουσα φωτεινὴ πηγή. Αὐτό τό φαινόμενο ὀνομάζεται *διάχυση* τοῦ φωτός.

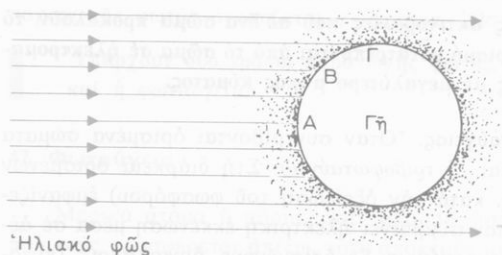
Διάχυση τοῦ φωτός προκαλοῦν καί τά μόρια τῶν ἀερίων καί γενικότερα τά μικρότατα ἄχρωμα σωματίδια πού εἶναι ἄτακτα διασκορπισμένα μέσα σέ ἓνα διαφανές ὑλικό, π.χ. μέσα στόν ἀτμοσφαιρικό ἀέρα. Πειραματικά βρήκαμε ὅτι σ' αὐτή τήν περίπτωση ἰσχύει ὁ ἐξῆς νόμος τοῦ Rayleigh :

Ἡ ἔνταση (I) τοῦ φωτός πού διαχέεται ἀπό μικρότατα αἰωρούμενα σωματίδια εἶναι ἀντιστρόφως ἀνάλογη μέ τήν τέταρτη δύναμη τοῦ μήκους κύματος (λ) τῆς ἀκτινοβολίας πού πέφτει πάνω στά σωματίδια.

$$\text{νόμος του Rayleigh } I = A \cdot \frac{I}{\lambda^4}$$

όπου A είναι μία σταθερή, που εξαρτάται από τη φύση των σωματιδίων.

Τό *κvanό χρωμα* του ούρανού οφείλεται στη διάχυση του ήλιακού φωτός, που την προκαλούν τά μόρια των συστατικών της ατμόσφαιρας και τά μικρότατα άχρωμα σωματίδια που αιωρούνται μέσα σ' αυτή. Όταν ο "Ήλιος βρίσκεται ψηλά σχετικά μέ τόν ορίζοντα, τότε ή ένταση των ακτινοβολιών που διαχέονται είναι πολύ μεγαλύτερη γιά τίς ακτινοβολίες που έχουν τά μικρότερα μήκη κύματος, δηλαδή γιά τίς κυανές και τίς ιώδεις ακτινοβολίες (σχ. 64α). Έτσι στό φώς που διαχέεται από την ατμόσφαιρα



σχ. 64α. Τά μόρια του άερα και τά αιωρούμενα μέσα σ' αυτόν μικρά σωματίδια προκαλούν ισχυρότερη διάχυση της κυανής ακτινοβολίας που έχει μικρότερο μήκος κύματος.

έξαιτίας της διαχύσεως, τό μεγαλύτερο μέρος από τίς κυανές και τίς ιώδεις ακτινοβολίες του. Έτσι τό φώς που φτάνει σέ μάς έχει ένα *ερυθροκίτρινο χρωμα*, που οφείλεται στην ανάμιξη των υπόλοιπων ακτινοβολιών του ήλιακού φωτός. Ωστε:

Τό *κvanό χρωμα* του ούρανού κατά την ήμερα και οί *ερυθροκίτρινες αποχρώσεις* του ούρανού κατά την *άνατολή* και *τή δύση* του Ήλιου οφείλονται στην *ισχυρότερη διάχυση* που παθαίνουν μέσα στην ατμόσφαιρα οί *κvanές* και οί *ιώδεις* ακτινοβολίες του ήλιακού φωτός, γιατί έχουν τά *μικρότερα μήκη κύματος*.

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

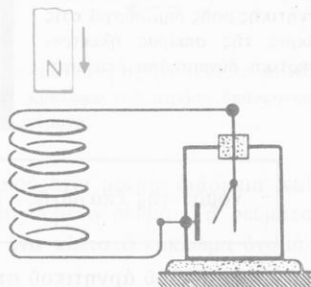
Έπαγωγικά ρεύματα

49. Έπαγωγή

Τίς δύο άκρες ενός πηνίου με πολλές σπειρές τίς συνδέουμε με ευαίσθητο ηλεκτρόμετρο (σχ. 65). Έτσι σχηματίζεται ένα ανοιχτό κύκλωμα. Πλησιάζουμε γρήγορα προς τό πηνίο τό βόρειο πόλο ενός μαγνήτη. Παρατηρούμε ότι τό ηλεκτρόμετρο δείχνει μιά διαφορά δυναμικού, πού εξαφανίζεται, μόλις σταματήσει ή κίνηση του μαγνήτη. Τό ίδιο φαινόμενο παρατηρούμε, αν απομακρύνουμε γρήγορα τό μαγνήτη από τό πηνίο. Η ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού στις άκρες ενός άγωγού με τόν τρόπο πού εξετάσαμε παραπάνω ονομάζεται έπαγωγή.

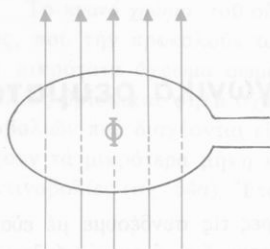
α. Έξήγηση του φαινομένου τής έπαγωγής. Είναι φανερό ότι αίτια του φαινομένου τής έπαγωγής είναι ή κίνηση του μαγνήτη σχετικά με τό πηνίο. Τότε μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή (Φ) πού περνάει από τίς σπειρές του πηνίου. Σ' αυτή τήν περίπτωση αποδεικνύεται ότι τό μετακινούμενο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσει σε κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο του άγωγού μιά ηλεκτρομαγνητική δύναμη (F) πού φέρνει τό ηλεκτρόνιο στή μιά άκρη του άγωγού. Έτσι τά ελεύθερα ηλεκτρόνια του άγωγού συγκεντρώνονται στή μιά άκρη του και έπομένως στις δύο άκρες του άγωγού εμφανίζεται διαφορά δυναμικού από έπαγωγή ($U_{\text{επαγ}}$) ή άλλιώς έπαγωγική τάση.

Όσο χρόνο διαρκεί ή μεταβολή τής μαγνητικής ροής, τό πηνίο συμπεριφέρεται σάν γεννήτρια. Αύτή δέν δίνει ρεύμα στό κύκλωμα, αλλά διατηρεί μεταξύ των δύο πόλων της μιά διαφορά δυναμικού ($U_{\text{επαγ}}$), πού είναι ίση με τήν ηλεκτρεγερτική δύναμη έπαγωγής ($E_{\text{επαγ}}$), ή όποία χαρακτηρίζει αύτή τή γεννήτρια. Ωστε:



Σχ. 65. Στίς άκρες του πηνίου αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από έπαγωγή.

“Όταν μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή που περνάει από ένα πηνίο, τότε συμβαίνει μετακίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων μέσα στον άγωγο και έτσι στις δύο άκρες του πηνίου δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής, που διαρκεί όσο διαρκεί και η μεταβολή της μαγνητικής ροής.



Σχ. 66. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής δημιουργεί στις άκρες της σπείρας ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή.

β. Νόμος της επαγωγής. “Ας θεωρήσουμε έναν άγωγο που δεν είναι κλειστός (σχ. 66). Στη διάρκεια του ελάχιστου χρόνου Δt ή μαγνητική ροή που περνάει από τον άγωγο μεταβάλλεται κατά $\Delta\Phi$. Σε όλη τη διάρκεια του χρόνου Δt στις δύο άκρες του άγωγου αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής ($E_{επαγ}$), για την οποία ισχύει ο εξής νόμος της επαγωγής :

“Η ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής, ή οποία αναπτύσσεται στις άκρες άγωγού που αποτελεί μία σπείρα, είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής.

νόμος της επαγωγής $E_{επαγ} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ σε Wb} \\ \Delta t \text{ σε sec} \\ E \text{ σε V} \end{array} \right. \quad (1)$
---	--

Τή σημασία του άρνητικού σημείου θα μάθουμε παρακάτω. “Αν ένα πηνίο έχει n σπείρες, τότε ο νόμος της επαγωγής δίνεται από την εξίσωση:

νόμος της επαγωγής (για πηνίο) $E_{επαγ} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot n$
--

Παρατήρηση Συνήθως μās ενδιαφέρει τό μέτρο της επαγωγικής ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως, γι’ αυτό τό άρνητικό σημείο μπορούμε νά τό παραλείψουμε.

γ. Μονάδα μαγνητικής ροής. “Από την εξίσωση (1) έχουμε:

$$\Delta\Phi = E_{επαγ} \cdot \Delta t \quad \text{\AA} \text{ρα}$$

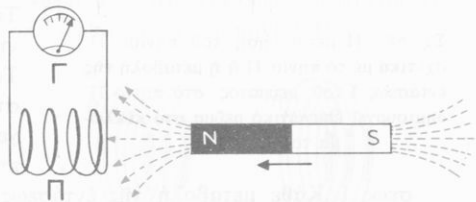
$$1 \text{ Weber} = 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ sec} \quad \text{\AA} \text{ \eta} \quad 1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{sec}$$

“Ωστε για τό μονάδα μαγνητικής ροής στό σύστημα MKSA ισχύει ο εξής ορισμός:

1 Weber είναι ή μαγνητική ροή ή όποια, όταν περνάει από μιá σπειρα καί μέσα σέ 1 δευτερόλεπτο ελαττώνεται όμοιόμορφα ώς τήν τιμή μηδέν, αναπτύσσει ήλεκτρεγερτική δύναμη έπαγωγής ίση μέ 1 Volt.

50. Έπαγωγικά ρεύματα

Τίς δύο άκρες ενός πηνίου τίς συνδέουμε μέ ένα εύπαθές γαλβανόμετρο (σχ. 67). Έτσι σχηματίζεται ένα κλειστό κύκλωμα, αλλά στό κύκλωμα αυτό δέν υπάρχει γεννήτρια. Στή μιá άκρη του πηνίου πλησιάζουμε γρήγορα τό βόρειο πόλο εύθύγραμμου μαγνήτη. Παρατηρούμε ότι τό κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, πού διαρκεί όσο διαρκεί καί ή κίνηση του μαγνήτη. Αν τώρα άπομακρύνουμε γρήγορα τό βόρειο πόλο του μαγνήτη από τό πηνίο, τό κύκλωμα διαρρέεται πάλι από ρεύμα, πού έχει μικρή διάρκεια καί φορά αντίθετη μέ τή φορά πού είχε τό προηγούμενο ρεύμα. Τά ρεύματα πού παράγονται μέ αυτό τόν τρόπο μέσα σέ ένα κλειστό κύκλωμα όνομάζονται **έπαγωγικά ρεύματα**.



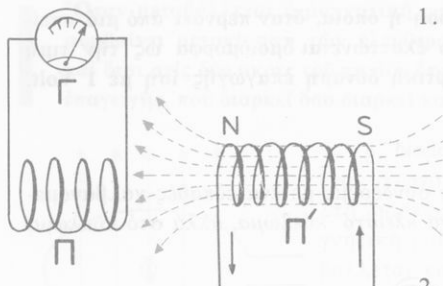
Σχ. 67. Η κίνηση του μαγνήτη σχετικά μέ τό πηνίο δημιουργεί μέσα στό κύκλωμα του πηνίου έπαγωγικά ρεύματα.

Αν τώρα άπομακρύνουμε γρήγορα τό βόρειο πόλο του μαγνήτη από τό πηνίο, τό κύκλωμα διαρρέεται πάλι από ρεύμα, πού έχει μικρή διάρκεια καί φορά αντίθετη μέ τή φορά πού είχε τό προηγούμενο ρεύμα. Τά ρεύματα πού παράγονται μέ αυτό τόν τρόπο μέσα σέ ένα κλειστό κύκλωμα όνομάζονται **έπαγωγικά ρεύματα**.

α. Αίτια παραγωγής των έπαγωγικών ρευμάτων. Όταν ό μαγνήτης πλησιάζει στό πηνίο ή άπομακρύνεται από αυτό, τότε μεταβάλλεται ή **μαγνητική ροή** πού περνάει από τίς σπείρες του πηνίου καί έπομένως στίς άκρες του πηνίου αναπτύσσεται ή **ήλεκτρεγερτική δύναμη από έπαγωγή** ($\mathcal{E}_{\text{επαγ}}$). Έπειδή τό κύκλωμα είναι κλειστό, γι' αυτό μέσα στό κύκλωμα κυκλοφορεί ένα **έπαγωγικό ρεύμα**. Ωστε τό έπαγωγικό ρεύμα είναι άποτέλεσμα του **φαινόμενου τής έπαγωγής**. Σχετικά λοιπόν μέ τήν παραγωγή των έπαγωγικών ρευμάτων μπορούμε νά διατυπώσουμε τό εξής συμπέρασμα:

Όταν μέ όποιοδήποτε τρόπο μεταβάλλεται ή **μαγνητική ροή** πού περνάει από ένα κλειστό κύκλωμα, τότε παράγονται μέσα στό κύκλωμα **έπαγωγικά ρεύματα**, πού διαρκούν όσο διαρκεί καί ή μεταβολή τής **μαγνητικής ροής**.

β. Τρόποι παραγωγής έπαγωγικών ρευμάτων. Η μαγνητική ροή πού περνάει από τίς σπείρες του πηνίου Π (σχ. 67) μπορεί νά μεταβληθεί μέ τους εξής τρόπους:



Σχ. 68. Ή μετακίνηση του πηνίου Π' σχετικά με το πηνίο Π ή η μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος στο πηνίο Π' δημιουργεί επαγωγικό ρεύμα στο κύκλωμα του πηνίου Π.

σεως I. Κάθε μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος στο πηνίο Π' προκαλεί μεταβολή τής μαγνητικής επαγωγής (B) του μαγνητικού πεδίου και, επομένως, προκαλεί μεταβολή τής μαγνητικής ροής που περνάει από το πηνίο Π. Έτσι κάθε μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος στο πηνίο Π' δημιουργεί επαγωγικό ρεύμα στο κύκλωμα του πηνίου Π.

3. Διατηρούμε ακίνητο το πηνίο Π (σχ. 67) και περιστρέφουμε τόν ευθύγραμμο μαγνήτη γύρω από έναν άξονα που είναι κάθετος στον άξονα του μαγνήτη και περνάει από τό κέντρο του μαγνήτη. Τότε ή μαγνητική ροή που περνάει από τό πηνίο Π μεταβάλλεται διαδοχικά μεταξύ μιās μέγιστης τιμής και τής τιμής μηδέν.

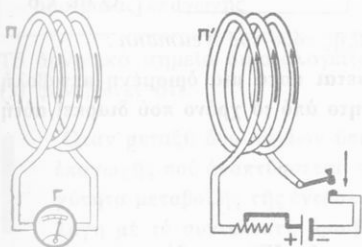
γ. Φορά του επαγωγικού ρεύματος. Στή μιιά άκρη του πηνίου Π (σχ. 67) πλησιάζουμε τό βόρειο πόλο (N) του μαγνήτη. Τότε τό επαγωγικό ρεύμα μέσα στο πηνίο Π έχει τέτοια φορά, ώστε σ' αυτή τήν άκρη του πηνίου εμφανίζεται βόρειος πόλος. Αντίθετα, όταν απομακρύνουμε τό βόρειο πόλο (N) του μαγνήτη, τό επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε σ' αυτή τήν άκρη του πηνίου εμφανίζεται νότιος πόλος. Στήν πρώτη περίπτωση ό βόρειος πόλος του πηνίου άπωθει τό βόρειο πόλο (N) του μαγνήτη και τόν έμποδίζει νά πλησιάσει στο πηνίο. Στή δεύτερη περίπτωση ό νότιος πόλος του πηνίου έλκει τό βόρειο πόλο (N) του μαγνήτη και τόν έμποδίζει νά απομακρυνθεί από τό πηνίο. Καί στίς δύο περιπτώσεις τό μαγνητικό πεδίο του επαγωγικού ρεύματος *αντιδρά στήν αίτία* που προκαλεί τή μεταβολή τής μαγνητικής ροής, δηλαδή *αντιδρά στο πλησίασμα ή τήν απομάκρυνση του μαγνήτη*. Γενικά ή φορά του επαγωγικού ρεύματος προσδιορίζεται από τόν έξής νόμο του Lenz:

1. Πλησιάζουμε στο πηνίο Π ή απομακρύνουμε από αυτό έναν ευθύγραμμο μαγνήτη ή ένα άλλο πηνίο Π' που διαρρέεται από ρεύμα (σχ. 68). Τό πηνίο Π' ισοδυναμεί με ευθύγραμμο μαγνήτη. Καί στίς δύο περιπτώσεις μέσα στο κύκλωμα του πηνίου Π παράγονται επαγωγικά ρεύματα.

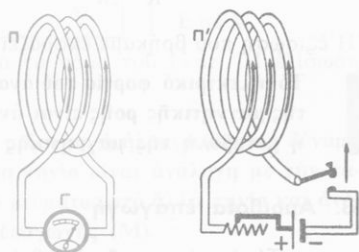
2. Τά δύο πηνία Π και Π' είναι ακίνητα και τό ένα κοντά στο άλλο. Τότε τό πηνίο Π βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί τό πηνίο Π', επειδή αυτό τό πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντά-

Τό έπαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε τό μαγνητικό πεδίο του νά αντίδρα στην αίτια πού προκαλεί την παραγωγή του έπαγωγικού ρεύματος.

Σύμφωνα μέ τό νόμο του Lenz, όταν κλείνουμε τό κύκλωμα του πηνίου Π' (σχ. 69) ή όταν αυξάνουμε την ένταση I του ρεύματος πού διαρρέει αυτό τό κύκλωμα, τότε στό γειτονικό κύκλωμα του πηνίου Π παράγεται έπαγωγικό ρεύμα αντίρροπο μέ τό ρεύμα του πηνίου Π'. Αντίθετα, όταν ανοίγουμε τό κύκλωμα του πηνίου Π' (σχ. 70) ή όταν ελαττώνουμε την ένταση I του ρεύματος πού διαρρέει τό κύκλωμα, τότε στό κύκλωμα του πηνίου Π παράγεται έπαγωγικό ρεύμα όμοροπο μέ τό ρεύμα του πηνίου Π'.



Σχ. 69. Αποκατάσταση ή αύξηση της έντάσεως του ρεύματος δημιουργεί αντίρροπο έπαγωγικό ρεύμα.



Σχ. 70. Διακοπή ή ελάττωση της έντασεως του ρεύματος δημιουργεί όμοροπο έπαγωγικό ρεύμα.

Παρατήρηση. Στην εξίσωση $E_{επαγ} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ τό άρνητικό σημείο

φανερώνει ότι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη έπαγωγής δημιουργεί στό κύκλωμα ρεύμα πού έχει τέτοια φορά, ώστε τό μαγνητικό πεδίο του νά αντίδρα στην αίτια πού προκαλεί την παραγωγή του έπαγωγικού ρεύματος.

51. Ένταση του έπαγωγικού ρεύματος

Ένα κλειστό κύκλωμα, π.χ. τό κύκλωμα του πηνίου Π στό σχήμα 70, έχει αντίσταση R. Στη διάρκεια του χρόνου Δt ή μαγνητική ροή πού περνάει από τό πηνίο μεταβάλλεται κατά $\Delta\Phi$. Τότε σ' αυτό τό κύκλωμα αναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική δύναμη έπαγωγής πού κατ' απόλυτη τιμή έχει μέτρο

$$E_{επαγ} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Σύμφωνα μέ τό νόμο του Ohm ή ένταση I του ρεύματος είναι:

$$I = \frac{E_{\text{επαγ}}}{R} \quad \text{ή} \quad I = \frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ σε Wb} \\ R \text{ σε } \Omega, \Delta t \text{ σε sec} \\ I \text{ σε A} \end{array} \right.$$

52. 'Ηλεκτρικό φορτίο αναπτυσσόμενο από επαγωγή

Τό επαγωγικό ρεύμα διαρρέει τό κύκλωμα επί χρόνο Δt καί μεταφέρει *ηλεκτρικό φορτίο* Q . Αυτό τό φορτίο αναπτύχθηκε στό κύκλωμα από τό φαινόμενο τής επαγωγής καί είναι ίσο μέ

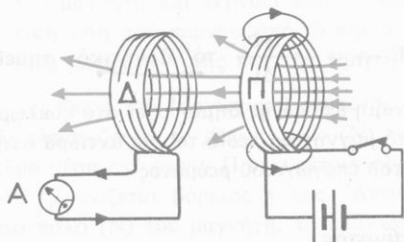
$$Q = I \cdot \Delta t = \frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t} \cdot \Delta t \quad \text{ή} \quad Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ σε Wb} \\ R \text{ σε } \Omega \\ Q \text{ σε Cb} \end{array} \right.$$

'Η εξίσωση πού βρήκαμε εκφράζει τόν *έξής νόμο του Neumann* :

Τό ηλεκτρικό φορτίο πού αναπτύσσεται κατά μιά όρισμένη μεταβολή τής μαγνητικής ροής είναι ανεξάρτητο από τό χρόνο πού διαρκεί αυτή ή μεταβολή τής μαγνητικής ροής.

53. 'Αμοιβαία επαγωγή

α. Τό φαινόμενο τής αμοιβαίας επαγωγής. Έχουμε δύο γειτονικά κυκλώματα (σχ. 71). Τό κύκλωμα του πηνίου Π διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I , ένω στό κύκλωμα του πηνίου Δ δέν υπάρχει γεννήτρια. 'Αν στό πηνίο Π μεταβληθεί ή ένταση του ρεύματος κατά ΔI , μεταβάλλεται καί ή μαγνητική επαγωγή (B) του μαγνητικού πεδίου του πηνίου Π . Τότε στό πηνίο Δ μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή κατά $\Delta\Phi$ καί επομένως στίς άκρες του πηνίου Δ αναπτύσσεται *ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής* ($E_{\text{επαγ}}$). Αυτό τό φαινόμενο ονομάζεται *αμοιβαία επαγωγή*. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μεταξύ των δύο πηνίων (Π καί Δ) υπάρχει *επαγωγική σύζευξη*.



Σχ. 71. Πειραματική απόδειξη τής αμοιβαίας επαγωγής.

Τό φαινόμενο τής αμοιβαίας επαγωγής. Έχουμε δύο γειτονικά κυκλώματα (σχ. 71). Τό κύκλωμα του πηνίου Π διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I , ένω στό κύκλωμα του πηνίου Δ δέν υπάρχει γεννήτρια. 'Αν στό πηνίο Π μεταβληθεί ή ένταση του ρεύματος κατά ΔI , μεταβάλλεται καί ή μαγνητική επαγωγή (B) του μαγνητικού πεδίου του πηνίου Π . Τότε στό πηνίο Δ μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή κατά $\Delta\Phi$ καί επομένως στίς άκρες του πηνίου Δ αναπτύσσεται *ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής* ($E_{\text{επαγ}}$). Αυτό τό φαινόμενο ονομάζεται *αμοιβαία επαγωγή*. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μεταξύ των δύο πηνίων (Π καί Δ) υπάρχει *επαγωγική σύζευξη*.

β. 'Ηλεκτρεγερτική δύναμη αμοιβαίας επαγωγής. 'Η μεταβολή $\Delta\Phi$ τής μαγνητικής ροής στό πηνίο Δ είναι *ανάλογη* μέ τή μεταβολή ΔI τής έντάσεως του ρεύματος στό πηνίο Π , δηλαδή ισχύει ή σχέση:

$$\Delta\Phi = M \cdot \Delta I \quad (1)$$

όπου M είναι ένας συντελεστής αναλογίας που ονομάζεται *συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής* και εξαρτάται από το σχήμα και τη σχετική θέση των δύο κυκλωμάτων καθώς και από τη μαγνητική διαπερατότητα του περιβάλλοντος. Ο συντελεστής M μετριέται με τη μονάδα Henry (1 H), με την οποία μετριέται και ο συντελεστής αυτεπαγωγής L ενός αγωγού. Στις άκρες του πηνίου Δ αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής που είναι:

$$E_{\text{επαγ}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

Από τις εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε :

ηλεκτρεγερτική δύναμη αμοιβαίας επαγωγής	$E_{\text{επαγ}} = - M \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$	$\left\{ \begin{array}{l} \Delta I \text{ σε A, } \Delta t \text{ σε sec} \\ M \text{ σε H} \\ E \text{ σε V} \end{array} \right. \quad (3)$
---	---	--

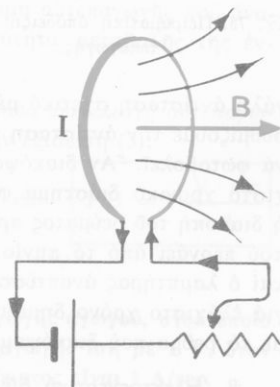
Τό αρνητικό σημείο δικαιολογείται από το νόμο του Lenz. Η εξίσωση (3) φανερώνει ότι:

Όταν μεταξύ δύο πηνίων υπάρχει σύζευξη, η ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής που αναπτύσσεται στο ένα πηνίο είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της έντασης του ρεύματος στο άλλο πηνίο και ανάλογη με το συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής (M).

Παρατήρηση. Αν στην εξίσωση (3) είναι $\Delta I = 1 \text{ A}$ και $\Delta t = 1 \text{ sec}$, τότε έχουμε $|E_{\text{επαγ}}| = M$. Άρα ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M εκφράζει την ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής που αναπτύσσεται στις άκρες του πηνίου Δ , όταν στο άλλο πηνίο Π ή ταχύτητα μεταβολής της έντασης του ρεύματος είναι 1 A/sec .

54. Αυτεπαγωγή

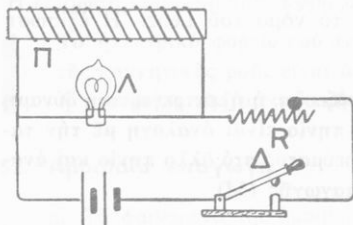
α. Τό φαινόμενο της αυτεπαγωγής. Ένας κυκλικός αγωγός αποτελεί μία σπείρα και διαρρέεται από ρεύμα έντασης I (σχ. 72). Γύρω από τον αγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο και από την επιφάνεια του αγωγού περνάει μαγνητική ροή Φ , που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο του ρεύματος. Αν μεταβληθεί ή ένταση του ρεύματος κατά ΔI , τότε με-



Σχ. 72. Η μεταβολή της έντασης I του ρεύματος προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής B και έτσι δημιουργείται μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει από τη σπείρα.

ταβάλλεται ή μαγνητική επαγωγή (B) του μαγνητικού πεδίου και, έπομένως, ή μαγνητική ροή που περνάει από την επιφάνεια του άγωγού μεταβάλλεται κατά $\Delta\Phi$. Έτσι μέσα στον ίδιο τον άγωγό αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής. Αυτό τό φαινόμενο ονομάζεται **αυτεπαγωγή**.

Έξαιτίας τής αυτεπαγωγής δημιουργούνται μέσα στον άγωγό ρεύματα, που ονομάζονται **ρεύματα αυτεπαγωγής** και διαρκούν όσο διαρκεί ή μεταβολή τής έντάσεως του ρεύματος που διαρρέει τόν άγωγό. Σύμφωνα μέ τό νόμο του Lenz, όταν *αυξάνει* ή ένταση του ρεύματος, τό ρεύμα αυτεπαγωγής είναι *αντίρροπο* μέ τό κύριο ρεύμα και προσπαθεί νά έμποδίσει τήν αύξηση τής έντάσεως του κύριου ρεύματος. Αντίθετα, όταν *ελαττώνεται* ή ένταση του ρεύματος, τό ρεύμα αυτεπαγωγής είναι *όμόρροπο* μέ τό κύριο ρεύμα και προσπαθεί νά έμποδίσει τήν έλάττωση τής έντάσεως του κύριου ρεύματος.



Σχ. 73. Πειραματική απόδειξη τής αυτεπαγωγής.

Πειραματική απόδειξη τής αυτεπαγωγής. Μέ τή διάταξη που δείχνει τό σχήμα 73 μπορούμε νά αποδείξουμε πειραματικά τό φαινόμενο τής αυτεπαγωγής. Τό πηνίο έχει πυρήνα από μαλακό σίδηρο. Παράλληλα μέ τό πηνίο συνδέεται ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας που έχει μεγάλη αντίσταση σχετικά μέ τήν αντίσταση του πηνίου. Μέ ένα ροοστάτη ρυθμίζουμε τήν αντίσταση του κυκλώματος έτσι, ώστε ό λαμπτήρας μόλις νά φωτοβολεί. Αν διακόψουμε άπτόμα τό ρεύμα, ό λαμπτήρας για έλάχιστο χρονικό διάστημα φωτοβολεί πολύ δυνατά. Αυτό συμβαίνει, γιατί ή διακοπή του ρεύματος προκαλεί άπτόμη μεταβολή τής μαγνητικής ροής που περνάει από τό πηνίο. Έτσι στο κύκλωμα που άποτελούν τό πηνίο και ό λαμπτήρας αναπτύσσεται *ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής*, που για έλάχιστο χρόνο δημιουργεί ένα ισχυρό *ρεύμα αυτεπαγωγής*, όμόρροπο μέ τό ρεύμα που διακόψαμε.

β. Ήλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής. Ή μεταβολή $\Delta\Phi$ τής μαγνητικής ροής που περνάει από τήν επιφάνεια του άγωγού είναι *ανάλογη* μέ τή μεταβολή ΔI τής έντάσεως του ρεύματος, δηλαδή ισχύει ή σχέση:

$$\Delta\Phi = L \cdot \Delta I \quad (1)$$

όπου L είναι ένας συντελεστής άναλογίας, που ονομάζεται *συντελεστής αυτεπαγωγής* του άγωγού και εξαρτάται από τό σχήμα του άγωγού και

τή μαγνητική διαπερατότητα του περιβάλλοντος. Στις άκρες του άγωγού αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη που είναι:

$$E_{\text{αυτεπ}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

Από τις εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε:

ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής	$E_{\text{αυτεπ}} = - L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$	$\left\{ \begin{array}{l} \Delta I \text{ σε A, } \Delta t \text{ σε sec} \\ L \text{ σε H} \\ E \text{ σε V} \end{array} \right. \quad (3)$
--------------------------------------	--	--

Τό άρνητικό σημείο δικαιολογείται από τό νόμο του Lenz. Ή εξίσωση (3) φανερώνει ότι:

Ή ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής που αναπτύσσεται στις άκρες άγωγού είναι άνάλογη μέ τήν ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος που διαρρέει τόν άγωγό και άνάλογη μέ τό συντελεστή αυτεπαγωγής (L) του άγωγού.

Παρατήρηση. Άν στην εξίσωση (3) είναι $\Delta I = 1 \text{ A}$ και $\Delta t = 1 \text{ sec}$, έχουμε $|E_{\text{αυτεπ}}| = L$. Άρα ό συντελεστής αυτεπαγωγής L του άγωγού οδουται άριθμητικά μέ τήν ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής που αναπτύσσεται στις άκρες του άγωγού, όταν ή ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος είναι 1 A/sec .

γ. Μονάδα συντελεστή αυτεπαγωγής. Ή μονάδα συντελεστή αυτεπαγωγής ονομάζεται Henry (1 H) και όρίζεται από τήν εξίσωση (3):

$$L = \frac{E_{\text{αυτεπ}} \cdot \Delta t}{\Delta I} \quad \text{άρα} \quad 1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ sec}}{1 \text{ A}} \quad \text{και} \quad 1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{sec}}{\text{A}}$$

Έτσι έχουμε τόν εξής όρισμό:

1 Henry (1 H) είναι ό συντελεστής αυτεπαγωγής άγωγού, στον όποιο αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής ίση μέ 1 V, όταν ή ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος είναι 1 A/sec .

Στήν πράξη χρησιμοποιούμε συνήθως τά ύποπολλαπλάσια τής μονάδας Henry:

$$1 \text{ millihenry: } 1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H} \quad \text{και} \quad 1 \text{ microhenry: } 1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

Μέ τή μονάδα Henry μετριέται και ό συντελεστής άμμοιβαίας επαγωγής M.

δ. Συντελεστής αὐτεπαγωγῆς πηνίου. Ἐνα πηνίο ἔχει μήκος l καὶ ἀποτελεῖται ἀπὸ N σπειρες, πού καθεμιά ἔχει ἔμβαδο S . Ἀποδεικνύεται ὅτι ὁ συντελεστής αὐτεπαγωγῆς L_0 τοῦ πηνίου δίνεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

συντελεστής αὐτεπαγωγῆς
πηνίου χωρὶς πυρήνα

$$L_0 = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_0 \text{ σέ } N/A^2, S \text{ σέ } m^2 \\ l \text{ σέ } m \\ L \text{ σέ } H \end{array} \right.$$

Ἄν τὸ πηνίο ἔχει πυρήνα ἀπὸ μαλακὸ σίδηρο, πού ἔχει μαγνητικὴ διαπερατότητα μ , τότε ὁ συντελεστής αὐτεπαγωγῆς L τοῦ πηνίου εἶναι $L = \mu_0 \cdot L$.

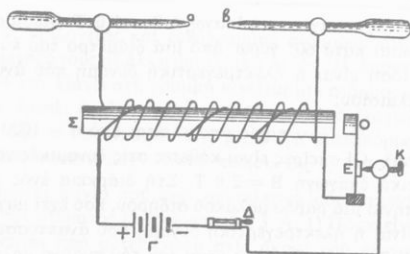
Τὸ φαινόμενο τῆς αὐτεπαγωγῆς εἶναι ἰδιαίτερα ἔντονο στὴν περίπτωση πηνίου, γιατί αὐτὸ ἔχει πολλές σπειρες καὶ ἡ μεταβολὴ $\Delta\Phi$ τῆς μαγνητικῆς ροῆς εἶναι μεγάλη. Ἄν μάλιστα τὸ πηνίο ἔχει *πυρήνα* ἀπὸ μαλακὸ σίδηρο, τότε ἡ μεταβολὴ τῆς μαγνητικῆς ροῆς εἶναι ἀκόμη μεγαλύτερη.

55. Ἐπαγωγικὸ πηνίο

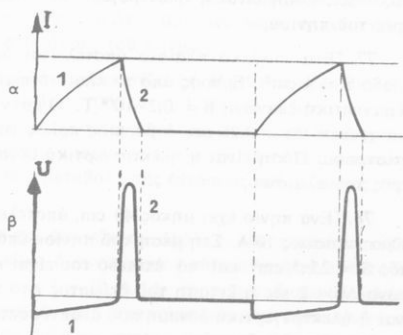
Τὸ *ἐπαγωγικὸ πηνίο* ἢ *πηνίο τοῦ Ruhmkorff* (σχ. 74) ἀποτελεῖται ἀπὸ ἕναν πυρήνα μαλακοῦ σιδήρου γύρω ἀπὸ τὸν ὁποῖο εἶναι τυλιγμένες οἱ λίγες σπειρες ἑνὸς πηνίου Π (πρωτεύον πηνίο). Αὐτὸ τὸ πηνίο Π βρίσκεται μέσα σὲ ἕνα ἄλλο πηνίο Δ (δευτερεύον πηνίο) πού ἀποτελεῖται ἀπὸ πολλές σπειρες ἑνὸς λεπτοῦ σύρματος. Οἱ δύο ἄκρες τοῦ πηνίου Δ καταλήγουν στὰ σημεῖα α καὶ β δύο ἀγωγῶν. Στὸ κύκλωμα ὑπάρχει ἕνας διακόπτης (E), πού λειτουργεῖ ὅπως ὁ διακόπτης πού ὑπάρχει ἐνῆς ηλεκτρικοῦ κουδούνι. Ἔτσι στὸ κύκλωμα τοῦ πηνίου Π γίνονται διαδοχικὲς *διακοπές* καὶ *ἀποκαταστάσεις* τοῦ ρεύματος, πού δημιουργοῦν στὸ ἄλλο πηνίο Δ ἀντίστοιχα *ἐπαγωγικὰ ρεύματα*. Ὅταν συμβαίνει διακοπὴ τοῦ ρεύματος στὸ πηνίο Π, τότε στὸ πηνίο Δ δημιουργεῖται ἐπαγωγικὸ ρεῦμα *ὁμόροπο* μὲ τὸ ρεῦμα τοῦ πηνίου Π. Καὶ ἀντίθετα, ὅταν συμβαίνει ἀποκατάσταση τοῦ ρεύματος στὸ πηνίο Π, τότε στὸ πηνίο Δ δημιουργεῖται ἐπαγωγικὸ ρεῦμα *ἀντίροπο* μὲ τὸ ρεῦμα τοῦ πηνίου Π. Ἔτσι στὶς ἄκρες α καὶ β τοῦ πηνίου Δ ἀναπτύσσεται *ἐναλλασσόμενη τάση*, πού μπορεῖ νά φτάσει σὲ πολλές χιλιάδες βόλτ, γιατί οἱ σπειρες τοῦ πηνίου Δ εἶναι πολὺ περισσότερες ἀπὸ τίς σπειρες τοῦ πηνίου Π καὶ ἐπομένως ἡ μεταβολὴ ($\Delta\Phi$) τῆς μαγνητικῆς ροῆς στὸ πηνίο Δ πολλαπλασιάζεται. Μεταξὺ τῶν σημείων α καὶ β σχηματίζονται τότε ἐναλλασσόμενοι ηλεκτρικοὶ σπινθηρες, πού φανεράνουν ὅτι ἡ τάση στὰ σημεῖα α καὶ β εἶναι τόσο μεγάλη, ὥστε τὸ ρεῦμα πού κυκλοφορεῖ στὸ πηνίο Δ μπορεῖ νά περάσει καὶ μέσα ἀπὸ ἕνα στρῶμα ἀέρα. Ἡ συχνότητα τῶν ἐναλλαγῶν τοῦ ρεύματος στὸ κύκλωμα τοῦ πηνίου Δ εἶναι ἴση μὲ τὸν ἀριθμὸ τῶν διακοπῶν τοῦ ρεύματος στὸ κύκλωμα τοῦ

πηνίου Π. Για να αυξήσουμε τη συχνότητα χρησιμοποιούμε ειδικούς διακόπτες που προκαλούν χιλιάδες διακοπές κατά δευτερόλεπτο. Αν η απόσταση των σημείων α και β γίνει μεγαλύτερη από ένα όριο, οι σπινθήρες σχηματίζονται μόνο κατά τη μία φορά και αντιστοιχούν στις διακοπές του ρεύματος, που είναι πολύ απότομες. Τότε η ταχύτητα μεταβολής της έντασης του ρεύματος είναι πολύ μεγάλη και επομένως η ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής που αντιστοιχεί στη διακοπή είναι πολύ μεγάλη (σχ. 75).

Τό επαγωγικό πηνίο τό χρησιμοποιούσαν για να παράγουν ψηλές τάσεις. Σήμερα ή χρήση του είναι περιορισμένη. Μιά μορφή επαγωγικού πηνίου είναι ό πολλαπλασιαστής, που χρησιμοποιούμε στό αυτοκίνητο για τήν παραγωγή του ηλεκτρικού σπινθήρα στό βενζινοκινητήρα.



Σχ. 74. Έπαγωγικό πηνίο (σχηματική παράσταση)



Σχ. 75. Άποκατάσταση (1) και διακοπή (2) του πρωτεύοντος ρεύματος. β. Τάση στις άκρες του δευτερεύοντος πηνίου κατά τήν άποκατάσταση (1) και τή διακοπή (2) του πρωτεύοντος ρεύματος.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

74. Ένα κυκλικό πλαίσιο άποτελείται από $n = 5$ σπείρες, που καθεμιά έχει έμβαδό $S = 20 \text{ cm}^2$. Τό πλαίσιο έχει αντίσταση $R = 0,2 \Omega$, και είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές όμογενούς μαγνητικού πεδίου, που έχει μαγνητική έπαγωγή $B = 4 \text{ T}$. Μέσα σέ χρόνο $\Delta t = 0,02 \text{ sec}$ τό πλαίσιο στρέφεται κατά 90° γύρω από μιά διάμετρό του κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. 1) Πόση είναι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη από έπαγωγή στις δυναμικές γραμμές του πλαισίου; 2) Πόση είναι ή ένταση του επαγωγικού ρεύματος και τό ηλεκτρικό φορτίο που αναπτύσσεται από έπαγωγή;

75. Ένα κυκλικό πλαίσιο άποτελείται από $n = 10$ σπείρες, που έχουν διάμετρο 20 cm . Τό πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές όμογενούς μαγνητικού πεδίου

πού έχει μαγνητική επαγωγή $B = 1,6 \text{ T}$. Μέσα σε χρόνο $\Delta t = 0,004 \text{ sec}$ το πλαίσιο στρέφεται κατά 60° γύρω από μία διάμετρό του κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του πλαισίου;

76. Ένα πηνίο αποτελείται από $n = 1000$ σπείρες που καθεμιά έχει έμβαδο $S = 50 \text{ cm}^2$. Οι σπείρες είναι κάθετες στις δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου που έχει μαγνητική επαγωγή $B = 2,8 \text{ T}$. Στη διάρκεια ενός χρόνου $\Delta t = 0,04 \text{ sec}$ βάζουμε μέσα στο πηνίο μία ράβδο μαλακού σιδήρου, που έχει μαγνητική διαπερατότητα $\mu = 1240$. 1) Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του πηνίου; 2) Τό πηνίο έχοντας μέσα του τον πυρήνα μαλακού σιδήρου στρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου, ώσπου οι σπείρες να γίνουν παράλληλες με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Αν η στροφή του πηνίου γίνει μέσα σε χρόνο $\Delta t = 0,01 \text{ sec}$, πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του πηνίου;

77. Ένα κυκλικό πλαίσιο αποτελείται από $n = 100$ σπείρες, που καθεμιά έχει έμβαδο $S = 4 \text{ cm}^2$. Έμπρός από το πλαίσιο περιστρέφεται ένας μαγνήτης, που δημιουργεί μαγνητική επαγωγή $B = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$. Ο μαγνήτης περιστρέφεται έτσι, ώστε στη διάρκεια χρόνου $\Delta t = 0,25 \text{ sec}$ ο βόρειος πόλος να παίρνει τη θέση του νότιου πόλου και αντίστροφα. Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή που αναπτύσσεται στις άκρες του πλαισίου;

78. Ένα πηνίο έχει μήκος 40 cm , αποτελείται από 200 σπείρες και διαρρέεται από ρεύμα έντασης 10 A . Στη μέση του πηνίου υπάρχει ένας κυκλικός άγωγος που έχει έμβαδο $S = 25\pi^2 \text{ cm}^2$ και το επίπεδο του είναι κάθετο στον άξονα του πηνίου. Μέσα σε χρόνο $\Delta t = 2 \text{ sec}$ η ένταση του ρεύματος στο πηνίο αυξάνει από 10 A σε 15 A . Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του κυκλικού άγωγου; $\pi^2 \approx 10$.

79. Ένα κυκλικό πλαίσιο έχει ακτίνα 10 cm , αποτελείται από $n = 100$ σπείρες, έχει αντίσταση $R = 6,28 \ \Omega$ και αρχικά το επίπεδο του ταυτίζεται με το επίπεδο του μαγνητικού μεσημβρινού. Απότομα στρέφουμε το πλαίσιο κατά 180° . Πόσο ηλεκτρικό φορτίο αναπτύχθηκε από επαγωγή στο πλαίσιο; Οριζόντια συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής του γήινου μαγνητικού πεδίου $B_0 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$.

80. Ένα πηνίο Π_1 έχει μήκος $l = 40 \text{ cm}$, αποτελείται από $N_1 = 2000$ σπείρες, έχει αντίσταση $R_1 = 256 \ \Omega$ και στις άκρες του εφαρμόζεται τάση $U = 16 \text{ V}$. Γύρω από τό κεντρικό τμήμα του πηνίου Π_1 υπάρχει ένα άλλο πηνίο Π_2 που αποτελείται από $N_2 = 20$ σπείρες, με διάμετρο 10 cm . Τό πηνίο Π_2 έχει αντίσταση $R_2 = 12 \ \Omega$. Πόσο ηλεκτρικό φορτίο αναπτύσσεται από επαγωγή μέσα στο πηνίο Π_2 , όταν διακοπεί τό ρεύμα στο πηνίο Π_1 ;

81. Ένα κυκλικό πλαίσιο αποτελείται από 100 σπείρες, που καθεμιά έχει έμβαδο $S = 1 \text{ m}^2$. Τό πλαίσιο έχει αντίσταση $R = 1 \ \Omega$ και οι σπείρες του είναι κάθετες στις δυναμικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου. Οι δύο άκρες του πλαισίου συνδέονται με βαλλιστικό γαλβανόμετρο, που έχει αντίσταση $r = 9 \ \Omega$ και δείχνει τό ηλεκτρικό φορτίο που περνάει από τό κύκλωμα. Στρέφουμε απότομα τό πλαίσιο κατά 90° , ώστε τό επίπεδο του να γίνει παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Τότε από τό γαλβανόμετρο περνάει ηλεκτρικό φορτίο $1/2500 \text{ Cb}$. 1) Πόση είναι η μαγνητική επαγωγή B του γήινου μαγνητικού πεδίου;

82. Οι δύο παράλληλες ράβδοι μιᾶς ὀριζόντιας καὶ εὐθύγραμμης σιδηροδρομικῆς γραμμῆς στῆ μιὰ ἄκρη τους συνδέονται μεταξύ τους μέ ἄλλη μεταλλικὴ ράβδο. Ἡ ἀπόσταση τῶν δύο ράβδων τῆς γραμμῆς εἶναι 144 cm. Πάνω στῆ γραμμὴ κινεῖται μιὰ σιδηροδρομικὴ μηχανὴ μέ ταχύτητα 100 km/h. Νά βρεθεῖ ἡ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη ἀπὸ ἐπαγωγὴ πού ἀναπτύσσεται στὶς δύο ἄκρες ἑνὸς ἄξονα τῶν τροχῶν τῆς μηχανῆς. Κατακόρυφη συνιστώσα τῆς μαγνητικῆς ἐπαγωγῆς τοῦ γήινου μαγνητικοῦ πεδίου $B_K = 5 \cdot 10^{-4}$ T.

83. Ἐνα ρεύμα ἐντάσεως 12 A διαρρέει πηνίο πού ἔχει συντελεστὴ αὐτεπαγωγῆς 0,2 H. Μέσα σέ χρόνο 0,04 sec ἡ ἔνταση τοῦ ρεύματος ἐλαττώνεται σέ 3 A. 1) Πόση εἶναι ἡ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη πού ἀναπτύσσεται ἀπὸ αὐτεπαγωγὴ στὶς ἄκρες τοῦ πηνίου; 2) Πόσο πρέπει νά μεταβληθεῖ ἡ ἔνταση τοῦ ρεύματος, γιὰ νά εἶναι ἡ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη ἀπὸ αὐτεπαγωγὴ ἴση μέ 30 V;

84. Ἐνα πηνίο ἔχει συντελεστὴ αὐτεπαγωγῆς 0,063 H καὶ διαρρέεται ἀπὸ ρεύμα ἐντάσεως 2 A. Ἄν τὸ ρεύμα διακοπεῖ μέσα σέ χρόνο $\Delta t = 0,02$ sec, πόση ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη ἀπὸ αὐτεπαγωγὴ ἀναπτύσσεται στὶς ἄκρες τοῦ πηνίου;

85. Μεταξύ δύο κυκλωμάτων ὑπάρχει ἐπαγωγικὴ σύζευξη. Ὄταν στὸ πρῶτο κύκλωμα ἡ ἔνταση τοῦ ρεύματος μεταβάλλεται ἀπὸ $I_1 = 1000$ A σέ $I_2 = 200$ A μέσα σέ χρόνο $\Delta t = 1$ sec, τότε στὸ δεύτερο κύκλωμα ἀναπτύσσεται ἀπὸ ἐπαγωγὴ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη $E = 5$ V. 1) Πόσος εἶναι ὁ συντελεστὴς ἀμοιβαίας ἐπαγωγῆς M τῶν δύο κυκλωμάτων; 2) Σέ πόσο χρόνο πρέπει νά γίνει ἡ ἴδια μεταβολὴ τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος, ἂν θέλουμε νά εἶναι $E = 100$ V;

86. Ἐνα πηνίο ἔχει μήκος $l = 1$ m καὶ ἀποτελεῖται ἀπὸ $n = 100$ σπείρες/cm. Κάθε σπείρα ἔχει ἀκτίνα $r = 6$ cm. 1) Πόσος εἶναι ὁ συντελεστὴς αὐτεπαγωγῆς L τοῦ πηνίου; 2) Τὸ πηνίο διαρρέεται ἀπὸ ρεύμα ἐντάσεως $I = 10$ A. Ἄν τὸ ρεύμα διακοπεῖ μέσα σέ χρόνο $\Delta t = 0,5$ sec, πόση ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη ἀναπτύσσεται ἀπὸ αὐτεπαγωγὴ στὶς ἄκρες τοῦ πηνίου; 3) Ἄν μέσα στὸ πηνίο βάλουμε πυρῆνα μαλακοῦ σιδήρου, πού ἔχει μαγνητικὴ διαπερατότητα $\mu = 1000$, πόσος γίνεται ὁ συντελεστὴς αὐτεπαγωγῆς τοῦ πηνίου καὶ πόση εἶναι ἡ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη πού ἀναπτύσσεται ἀπὸ αὐτεπαγωγὴ, ὅταν τὸ ρεύμα ἐντάσεως 10 A καταργεῖται μέσα σέ 0,5 sec;

87. Ἐνα πηνίο ἔχει ἀντίσταση $R = 11$ Ω , συντελεστὴ αὐτεπαγωγῆς $L = 0,1$ H καὶ στὶς ἄκρες του ἐφαρμόζεται τάση $U = 110$ V. 1) Πόση εἶναι τελικὰ ἡ ἔνταση I_0 τοῦ ρεύματος; 2) Ἡ ἔνταση τοῦ ρεύματος συνεχῶς ἀξάνει ἀπὸ 0 ὡς I_0 . Ὄταν ἡ ἔνταση ἔχει φτάσει τὴν τιμὴ $I = 3$ A, πόση εἶναι ἡ πῶση τάσεως ἀποκλειστικὰ πάνω στὴν ἀντίσταση R ; 3) Πόση εἶναι τότε ἡ ταχύτητα μεταβολῆς τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος;

Έναλλασσόμενο ρεύμα

56. Έξιώσεις του έναλλασσόμενου ρεύματος

α. Μεταβολή της μαγνητικής ροής. Ένα ορθογώνιο πλαίσιο από χάλκινο σύρμα, που η επιφάνειά του έχει έμβαδο S , στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω μέσα σε όμογενές μαγνητικό πεδίο, που έχει μαγνητική επαγωγή B (σχ. 76). Ο άξονας περιστροφής του πλαισίου είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Όταν το πλαίσιο στρέφεται, η μαγνητική ροή που περνάει από το πλαίσιο συνεχώς μεταβάλλεται και σε κάθε στιγμή ισχύει η εξίσωση:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

όπου α είναι η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} με την κάθετο στην επιφάνεια του πλαισίου. Όταν το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου ($\alpha = 0$, $\alpha = \pi$), τότε η μαγνητική ροή έχει τη μέγιστη απόλυτη τιμή:

$$\Phi_{\max} = B \cdot S$$

Σχ. 76. Η ομαλή περιστροφή του πλαισίου μέσα στο όμογενές μαγνητικό πεδίο δημιουργεί στις άκρες του πλαισίου ήμιτονοειδή τάση $U_0 = U_0 \cdot \eta \mu \omega t$

Καί όταν το πλαίσιο είναι παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου ($\alpha = \pi/2$, $\alpha = 3\pi/2$), τότε η μαγνητική ροή είναι ίση με μηδέν ($\Phi = 0$). Σε κάθε χρονική τιμή t η γωνία α είναι ίση με $\alpha = \omega t$.

Επομένως η εξίσωση (1) γράφεται:

μεταβολή της
μαγνητικής ροής

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sin \omega t$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B \text{ σε T, } S \text{ σε m}^2 \\ \Phi \text{ σε Wb} \end{array} \right. \quad (2)$$

Η εξίσωση (2) φανερώνει ότι:

«Όταν το πλαίσιο στρέφεται ομαλά, η μαγνητική ροή που περνάει από το πλαίσιο είναι άρμονική συνάρτηση του χρόνου.

Τό μέγεθος ω ονομάζεται *κωκλική συχνότητα* και συνδέεται με την περίοδο T και τή συχνότητα ν με τή γνωστή σχέση $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$.

β. Έναλλασσόμενη τάση. Όταν το πλαίσιο στρέφεται, η μαγνητική ροή που περνάει από αυτό συνεχώς μεταβάλλεται σύμφωνα με τήν εξίσωση

(2). Έπομένως στις άκρες του πλαισίου αναπτύσσεται *επαγωγική τάση* U (ή *ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής*), που τό μέτρο της σέ κάθε χρονική στιγμή δίνεται από τήν εξίσωση (*):

$$U = \omega \cdot B \cdot S \cdot \eta\mu \omega t \quad (3)$$

Όταν γίνεται $\eta\mu \omega t = \pm 1$, τότε ή *επαγωγική τάση* άποκτά τή *μέγιστη* απόλυτη τιμή U_0 , που όνομάζεται *πλάτος τής τάσεως* καί έχει μέτρο ίσο μέ:

$$\text{πλάτος τής τάσεως } U_0 = \omega \cdot B \cdot S \quad \left\{ \begin{array}{l} B \text{ σέ } T, S \text{ σέ } m^2 \\ U_0 \text{ σέ } V \end{array} \right.$$

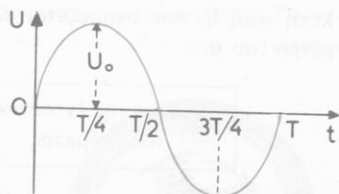
Όστε ή εξίσωση (3) που δίνει τή στιγμιαία τάση γράφεται:

$$\text{στιγμιαία τάση } U = U_0 \cdot \eta\mu \omega t \quad (4)$$

Η εξίσωση (4) φανερώνει ότι:

Όταν ένα *συρματένιο πλαίσιο* στρέφεται όμαλά μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο, τότε στις δύο άκρες του πλαισίου αναπτύσσεται *επαγωγική τάση*, που τό μέτρο της είναι ήμιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου.

Αυτή ή *επαγωγική τάση* όνομάζεται *ήμιτονοειδής έναλλασσόμενη τάση* ή καί *άπλά έναλλασσόμενη τάση*. Γενικά τέτοιες τάσεις χρησιμοποιούμε στις εφαρμογές. Η μεταβολή τής τάσεως U σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο t φαίνεται από τήν ήμιτονοειδή καμπύλη του σχήματος 77. Από τίς εξισώσεις (2) καί (4) σχηματίζουμε τόν εξής πίνακα:



Σχ. 77. Η τάση U στις δύο άκρες του πλαισίου μεταβάλλεται ήμιτονοειδώς.

φάση (ωt)	:	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π
μαγνητική ροή (Φ)	:	Φ_{\max}	0	$-\Phi_{\max}$	0	Φ_{\max}
επαγωγική τάση (U)	:	0	U_0	0	$-U_0$	0

(*) Από τά Μαθηματικά ξέρουμε ότι ή συνάρτηση $y = a \cdot \sigma\upsilon\nu \omega x$ έχει παράγωγο $\frac{dy}{dx} = -a \cdot \omega \cdot \eta\mu \omega x$ όπου a είναι σταθερός παράγοντας.

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} = \omega \cdot B \cdot S \cdot \eta\mu \omega t$$

Παρατηρούμε ότι η τάση λαβαίνει τη μέγιστη απόλυτη τιμή U_0 , όταν η μαγνητική ροή γίνεται ίση με μηδέν (τό πλαίσιο παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές) και η τάση γίνεται ίση με μηδέν ($U = 0$), όταν η μαγνητική ροή λαβαίνει τη μέγιστη απόλυτη τιμή Φ_{\max} (τό πλαίσιο κάθετο στις δυναμικές γραμμές).

γ. Τό ρεύμα στό εξωτερικό κύκλωμα. Οί άκρες του πλαισίου συνδέονται μέ δύο μονωμένους δακτυλίους πού είναι στερεωμένοι στόν άξονα περιστροφής και στρέφονται μαζί μέ τό πλαίσιο (σχ. 76).

Συνδέουμε τούς δύο δακτυλίους (δηλαδή τίς άκρες του πλαισίου) μέ ένα σύρμα πού έχει αντίσταση R . Λέμε ότι τό εξωτερικό κύκλωμα είναι μία *ώμική αντίσταση* R . Τότε τό εξωτερικό κύκλωμα διαρρέεται από *εναλλασσόμενο ρεύμα*, δηλαδή ρεύμα πού ή φορά του *περιοδικά εναλλάσσεται*. Αυτό τό ρεύμα σέ κάθε στιγμή έχει ένταση I , πού δίνεται από τήν εξίσωση :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0 \cdot \eta \mu \omega t}{R} \quad \text{καί} \quad I = \frac{U}{R} \cdot \eta \mu \omega t \quad (5)$$

Όταν γίνεται $\eta \mu \omega t = \pm 1$, ή ένταση του ρεύματος αποκτά ή μέγιστη απόλυτη τιμή I_0 , πού ονομάζεται *πλάτος τής έντάσεως* του ρεύματος και έχει μέτρο ίσο μέ:

$$\left. \begin{array}{l} \text{πλάτος τής έντάσεως} \\ \text{του ρεύματος} \end{array} \right\} I_0 = \frac{U_0}{R} \quad \left\{ \begin{array}{l} U_0 \text{ σέ } V, R \text{ σέ } \Omega \\ I_0 \text{ σέ } A \end{array} \right.$$

Όστε ή εξίσωση (5) γράφεται:

$$\text{στιγμιαία ένταση του ρεύματος} \quad I = I_0 \cdot \eta \mu \omega t \quad (6)$$

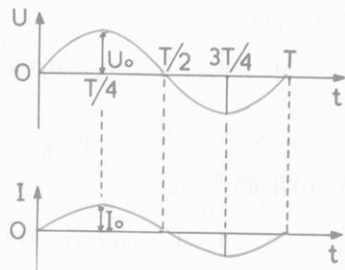
Ή εξίσωση (6) φανερώνει ότι:

Στό εξωτερικό κύκλωμα του στρεφόμενου πλαισίου κυκλοφορεί *εναλλασσόμενο ρεύμα*, πού ή έντασή του είναι ήμιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου (ήμιτονοειδές ρεύμα).

Ή μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο t φαίνεται από τήν ήμιτονοειδή καμπύλη του σχήματος 78. Όταν τό εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται μόνο από *ώμική αντίσταση* R και δέν υπάρχει πηνίο ή πυκνωτής, τότε ή ένταση του ρεύματος λαβαίνει ή μέγιστη και

τήν ελάχιστη τιμή της ταυτόχρονα με την τάση, δηλαδή σ' αυτή την περίπτωση η τάση (U) και η ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε την ίδια φάση ωt.

δ. Άλλη μορφή των εξισώσεων του έναλλασσόμενου ρεύματος. Όταν λέμε έναλλασσόμενο ρεύμα, εννοούμε ήμιτονοειδές ρεύμα που έχει περίοδο T, συχνότητα ν και κυκλική συχνότητα $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$. Ωστε οι εξισώσεις (4) και (6) μπορούν να λάβουν και την εξής μορφή:



Σχ. 78 Η τάση U και η ένταση I του ρεύματος μεταβάλλονται ήμιτονοειδώς σε συνάρτηση με το χρόνο και έχουν πάντοτε την ίδια φάση.

στιγμιαία τάση
$$U = U_0 \cdot \eta\mu \frac{2\pi t}{T} \quad \eta \quad U = U_0 \cdot \eta\mu 2\pi\nu t$$

στιγμιαία ένταση ρεύματος
$$I = I_0 \cdot \eta\mu \frac{2\pi t}{T} \quad \eta \quad I = I_0 \cdot \eta\mu 2\pi\nu t$$

ε. Μονοφασικός έναλλακτήρας. Το στρεφόμενο πλαίσιο είναι η πιό απλή μορφή γεννήτριας έναλλασσόμενου ρεύματος (έναλλακτήρας). Το παραγόμενο έναλλασσόμενο ρεύμα λέγεται μονοφασικό. Τά ίδια φαινόμενα παρατηρούμε και όταν ένας μαγνήτης ή ηλεκτρομαγνήτης (έπαγωγέας) στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα εμπρός από ακίνητο πλαίσιο ή πηνίο (έπαγωγίμο). Στην πράξη ο έπαγωγέας αποτελείται από ζεύγη μαγνητικών πόλων και τό έπαγωγίμο αποτελείται από τόσα πηνία, όσοι είναι οι μαγνητικοί πόλοι του έπαγωγέα (σχ. 79).

Τά έναλλασσόμενα ρεύματα που χρησιμοποιούμε στις συνηθισμένες εφαρμογές (στή βιομηχανία, στό σπίτι) έχουν συχνότητα 50 ως 60 Hz (χαμηλή συχνότητα).



Σχ. 79. Μονοφασικός έναλλακτήρας

Παράδειγμα. Ένα έναλλασσόμενο ρεύμα έχει συχνότητα $\nu = 40$ Hz, πλάτος τάσεως $U_0 = 100$ V και πλάτος έντάσεως του ρεύματος $I_0 = 12$ A.

Κατά τή χρονική στιγμή $t = \frac{1}{480}$ sec είναι:

ή στιγμιαία τάση

$$U = U_0 \cdot \eta\mu 2\pi\nu t = 100 \text{ V} \cdot \eta\mu \left(2\pi \cdot 40 \text{ sec}^{-1} \cdot \frac{1}{480} \text{ sec} \right)$$

$$\text{ή } U = 100 \text{ V} \cdot \eta\mu \frac{\pi}{6} = 100 \text{ V} \cdot \frac{1}{2} \quad \text{καί} \quad U = 50 \text{ V}$$

ή στιγμιαία ένταση

$$I = I_0 \cdot \eta\mu 2\pi\nu t = 12 \text{ A} \cdot \eta\mu \frac{\pi}{6} \quad \text{καί} \quad I = 6 \text{ A}$$

57. 'Αποτελέσματα του έναλλασσόμενου ρεύματος

"Όπως τό συνεχές ρεύμα, έτσι και τό έναλλασσόμενο ρεύμα προκαλεί *θερμικά, χημικά* καί *μαγνητικά* φαινόμενα.

α. "Όταν ένας άγωγός διαρρέεται από ήλεκτρικό ρεύμα, τότε πάνω σ' αυτό τόν άγωγό αναπτύσσεται *θερμότητα* εξαιτίας του φαινομένου Joule, πού είναι ανεξάρτητο από τή φορά του ρεύματος. "Ωστε στό έναλλασσόμενο ρεύμα εμφανίζεται τό φαινόμενο *Joule*, όπως συμβαίνει καί στό συνεχές ρεύμα.

β. Σέ ένα βολτάμετρο υπάρχει άραιό διάλυμα θεϊκού όξέος. "Αν συνδέσουμε τά δύο ήλεκτρόδια του βολταμέτρου μέ τούς πόλους ενός έναλλακτήρα, τότε κάθε ήλεκτρόδιο γίνεται διαδοχικά άνοδος καί κάθοδος, δηλαδή περιοδικά αλλάζει ή πολικότητα του ήλεκτροδίου. "Ετσι δέν μπορούμε νά μαζέψουμε χωριστά τά προϊόντα της ήλεκτρολύσεως (δηλαδή τό υδρογόνο καί τό όξυγόνο). "Ωστε τό έναλλασσόμενο ρεύμα προκαλεί τό φαινόμενο *της ήλεκτρολύσεως*, αλλά ή πολικότητα των ήλεκτροδίων του βολταμέτρου μεταβάλλεται περιοδικά.

γ. "Ενας εϋθύγραμμος άγωγός πού διαρρέεται από έναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο, όπως συμβαίνει καί όταν διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, μέ τή διαφορά όμως ότι ή φορά των δυναμικών γραμμών καί ή φορά της μαγνητικής έπαγωγής (\vec{B}) περιοδικά αντιστρέφεται. "Ωστε τό έναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί *έναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο*.

58. 'Ενεργός ένταση έναλλασσόμενου ρεύματος

"Ενα έναλλασσόμενο ρεύμα έχει πλάτος έντάσεως I_0 καί επί χρόνο t διαρρέει μιά *ώμική αντίσταση* R . Ξέρουμε ότι τό έναλλασσόμενο ρεύμα παράγει τό φαινόμενο Joule καί έπομένως πάνω στην αντίσταση R αναπτύσσεται όρισμένη θερμότητα Q . "Ενα συνεχές ρεύμα πού διαρρέει τήν ίδια

αντίσταση R , αναπτύσσει την ίδια θερμότητα Q στον ίδιο χρόνο t , αν η ένταση του συνεχούς ρεύματος έχει μία ορισμένη τιμή, που την ονομάζουμε **ένεργό ένταση** (I_{ev}) του έναλλασσόμενου ρεύματος. Έτσι έχουμε τον εξής **όρισμό**:

Ένεργός ένταση (I_{ev}) του έναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζεται ή ένταση ενός συνεχούς ρεύματος πού, όταν διαρρέει την ίδια ωμική αντίσταση (R), παράγει στον ίδιο χρόνο (t) την ίδια θερμότητα (Q) πού παράγει καί τό έναλλασσόμενο ρεύμα.

Αποδεικνύεται ότι:

Η ένεργός ένταση (I_{ev}) του έναλλασσόμενου ρεύματος είναι ίση μέ τό πηλίκο του πλάτους τής έντάσεως (I_0) του ρεύματος διά τής τετραγωνικής ρίζας του 2.

$$\text{ένεργός ένταση } I_{ev} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{ή} \quad I_{ev} = 0,707 I_0$$

Η ένεργός ένταση του έναλλασσόμενου ρεύματος μετριέται άμέσως μέ τά **θεσμικά άμπερόμετρα**.

59. Ένεργός τάση

Ένας άγωγός (σύρμα) έχει μόνο **ωμική αντίσταση** R , πού είναι ή ίδια καί στό συνεχές καί στό έναλλασσόμενο ρεύμα. Στίς άκρες του άγωγού εφαρμόζεται ή έναλλασσόμενη τάση $U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t$ καί ό άγωγός διαρρέεται από έναλλασσόμενο ρεύμα πού έχει ένεργό ένταση I_{ev} . Τήν ίδια ένταση ρεύματος (I_{ev}) μπορεί νά δημιουργήσει πάνω στήν ίδια αντίσταση R μία σταθερή τάση, πού έχει ορισμένη τιμή καί τήν όποία ονομάζουμε **ένεργό τάση** (U_{ev}) τής έναλλασσόμενης τάσεως. Έτσι έχουμε τον εξής **όρισμό**:

Ένεργός τάση (U_{ev}) τής έναλλασσόμενης τάσεως ονομάζεται ή σταθερή τάση, ή όποία, όταν εφαρμόζεται στίς άκρες τής ίδιας ωμικής αντίστάσεως (R), παράγει συνεχές ρεύμα, πού έχει ένταση ίση μέ τήν ένεργό ένταση (I_{ev}) του έναλλασσόμενου ρεύματος

Σύμφωνα μέ τον παραπάνω όρισμό τής ένεργού τάσεως έχουμε τήν εξίσωση:

$$U_{ev} = I_{ev} \cdot R \quad \text{ή} \quad U_{ev} = \frac{I_0 \cdot R}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Τή στιγμή που στις άκρες της αντίστασης R ή εναλλασσόμενη τάση έχει τήν τιμή U_0 , τότε ισχύει ή εξίσωση:

$$U_0 = I_0 \cdot R \quad (2)$$

Έτσι από τίς εξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε ότι:

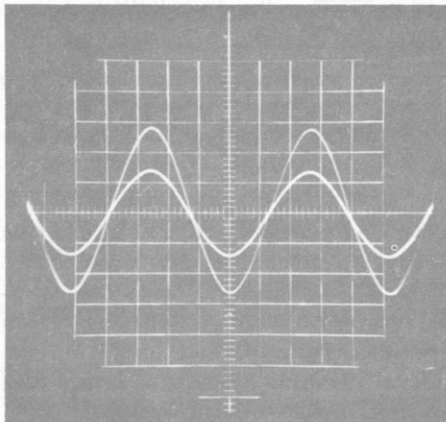
■ **Η ενεργός τάση ($U_{εν}$) μιās εναλλασσόμενης τάσεως είναι ίση μέ τό πηλίκο του πλάτους τής τάσεως (U_0) διά τής τετραγωνικής ρίζας του 2.**

$$\text{ένεργος τάση } U_{εν} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad \text{ή} \quad U_{εν} = 0,707 U_0$$

60. Ο νόμος του Ohm σε κύκλωμα μέ ωμική αντίσταση

Ένα κύκλωμα αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R καί στις άκρες τής εφαρμόζεται ή εναλλασσόμενη τάση:

$$U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t \quad (1)$$



Σχ. 80. Παρατήρηση στον παλμογράφο. Οί καμπύλες τής τάσεως U καί τής έντάσεως ρεύματος I έχουν τήν ίδια φάση.

Στό εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας ή αντίσταση R συμπεριφέρεται όπως καί στό συνεχές ρεύμα, δηλαδή όλη ή ήλεκτρική ένέργεια μετατρέπεται πάνω στην αντίσταση R σε θερμότητα. Η αντίσταση R διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα που ή στιγμιαία έντασή του, σύμφωνα μέ τό νόμο του Ohm, είναι:

$$I = \frac{U}{R}$$

$$\text{ή} \quad I = \frac{U_0}{R} \cdot \eta \mu \omega t \quad (2)$$

Οί εξισώσεις (1) καί (2) δείχνουν ότι ή τάση (U) καί ή ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε *τήν ίδια φάση* (σχ. 80). Από τήν εξίσωση (2) βρίσκουμε ότι τό πλάτος (I_0) τής έντάσεως του ρεύματος είναι :

$$I_0 = \frac{U_0}{R} \quad (3)$$

Ξέρουμε ότι είναι:

$$I_0 = I_{ev} \cdot \sqrt{2} \quad \text{καί} \quad U_0 = U_{ev} \cdot \sqrt{2}$$

Αν βάλουμε αυτές τις τιμές των I_0 και U_0 στην εξίσωση (3), βρίσκουμε ότι σ' αυτή την περίπτωση ο νόμος του Ohm δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{νόμος του Ohm} \quad I_{ev} = \frac{U_{ev}}{R}$$

Από τα παραπάνω συνάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- I. Σέ κύκλωμα πού αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R ή τάση (U) και ή ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε την ίδια φάση.
- II. Ή ενεργός ένταση του ρεύματος (I_{ev}) είναι ίση μέ τό πηλίκο της ενεργού τάσεως (U_{ev}) διά της ωμικής αντιστάσεως (R) του κυκλώματος.

Παρατήρηση. Σέ ένα κύκλωμα έναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να υπάρχουν ωμική αντίσταση R , πηνίο μέ συντελεστή αυτεπαγωγής L και πυκνωτής μέ χωρητικότητα C . Σ' αυτή την περίπτωση ο νόμος του Ohm εκφράζεται μέ διαφορετική εξίσωση.

61. Μέση ισχύς του έναλλασσόμενου ρεύματος

Έχουμε ένα κύκλωμα πού αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R . Αν στις άκρες του κυκλώματος εφαρμόσουμε μιά σταθερή τάση U , τό κύκλωμα διαρρέεται από συνεχές ρεύμα πού έχει σταθερή ένταση I . Επειδή τά μεγέθη U και I είναι σταθερά, ή ισχύς $P = U \cdot I$ του συνεχούς ρεύματος είναι σταθερή.

Αν όμως στις άκρες του κυκλώματος εφαρμόσουμε μιά έναλλασσόμενη τάση $U = U_0 \cdot \eta\mu \omega t$, τότε τό κύκλωμα διαρρέεται από έναλλασσόμενο ρεύμα πού έχει στιγμιαία ένταση $I = I_0 \cdot \eta\mu \omega t$. Επομένως στή διάρκεια μιās περιόδου T ή ισχύς $P = U \cdot I$ του έναλλασσόμενου ρεύματος συνεχώς μεταβάλλεται. Στή διάρκεια μιās περιόδου T τό κύκλωμα παίρνει από τή γεννήτρια ενέργεια E_T . Άρα στή διάρκεια μιās περιόδου T ή μέση ισχύς P_M του έναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

$$\text{μέση ισχύς} \quad P_M = \frac{E_T}{T}$$

Αποδεικνύεται ότι:

Σε κύκλωμα που αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση (R) ή μέση ισχύς (P_M) του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ανάλογη με την ενεργό τάση ($U_{εν}$) και την ενεργό ένταση ($I_{εν}$) του ρεύματος.

μέση ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος

$$P_M = U_{εν} \cdot I_{εν}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{εν} \text{ σε V} \\ I_{εν} \text{ σε A} \\ P_M \text{ σε W} \end{array} \right. \quad (1)$$

Ενέργεια του εναλλασσόμενου ρεύματος. Στις άκρες ενός κυκλώματος που αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_{εν}$. Τότε το εναλλασσόμενο ρεύμα έχει ενεργό ένταση $I_{εν} = U_{εν}/R$ και μέση ισχύ $P_M = U_{εν} \cdot I_{εν}$. Αν το ρεύμα διαρρέει το κύκλωμα επί χρόνο t , τότε το ρεύμα μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια ($E_{ηλεκ}$) που είναι ίση με :

$$\text{ηλεκτρική ενέργεια } E_{ηλεκ} = P_M \cdot t \quad \text{ή} \quad E_{ηλεκ} = U_{εν} \cdot I_{εν} \cdot t \quad (2)$$

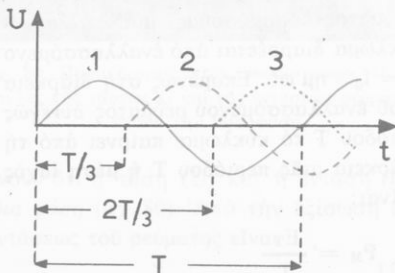
Επειδή το κύκλωμα αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση (R), δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται πάνω στην αντίσταση R σε θερμότητα.

Σύμφωνα με το νόμο του Ohm είναι $U_{εν} = I_{εν} \cdot R$. Άρα οι εξισώσεις (1) και (2) γράφονται και έτσι:

$$P_M = I_{εν}^2 \cdot R \quad \text{και} \quad E_{ηλεκ} = I_{εν}^2 \cdot R \cdot t$$

62. Τριφασικό ρεύμα

α. Όρισμός. Οι μονοφασικοί εναλλακτικές παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα, που ονομάζεται *μονοφασικό ρεύμα*. Αν το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση (R), τότε οι εξισώσεις του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι:



Σχ. 81. Τρία όμοια ρεύματα έχουν το ένα με το άλλο διαφορά φάσεως 120° ή $T/3$.

$$U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t \quad \text{και} \quad I = I_0 \cdot \eta \mu \omega t$$

Ας θεωρήσουμε τρία μονοφασικά ρεύματα που έχουν την ίδια περίοδο T , το ίδιο πλάτος τάσεως U_0 , το ίδιο πλάτος εντάσεως ρεύματος I_0 , αλλά παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσεως 120° . Αυτό σημαίνει ότι σε καθένα από αυτά τα τρία ρεύματα ή τάση (U) και η ένταση (I) του ρεύματος αποκτούν τη μέγιστη τιμή τους (U_0

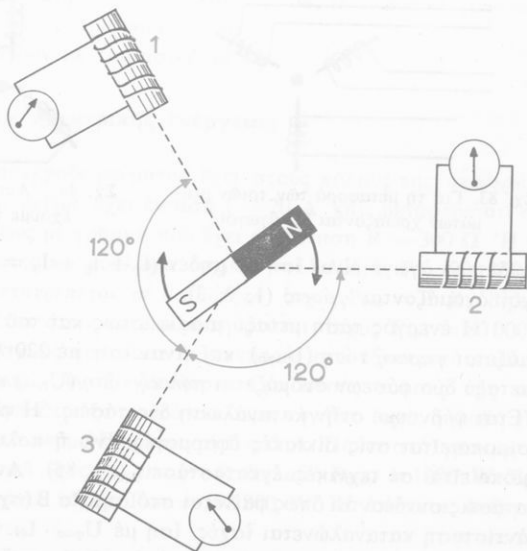
καί I_0) με καθυστέρηση ίση με ένα τρίτο της περιόδου ($T/3$) σχετικά με το προηγούμενο (σχ. 81). Τότε γι' αυτά τα τρία ρεύματα θα ισχύουν αντίστοιχα οι εξισώσεις :

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_0 \cdot \eta \mu \omega t \\ U_2 &= U_0 \cdot \eta \mu (\omega t + 120^\circ) \\ U_3 &= U_0 \cdot \eta \mu (\omega t + 240^\circ) \end{aligned} \right\} (1) \quad \left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 \cdot \eta \mu \omega t \\ I_2 &= I_0 \cdot \eta \mu (\omega t + 120^\circ) \\ I_3 &= I_0 \cdot \eta \mu (\omega t + 240^\circ) \end{aligned} \right\} (2)$$

Αυτό το σύστημα των τριών ρευμάτων ονομάζεται *τριφασικό ρεύμα*.
Ωστε :

Τριφασικό ρεύμα είναι ένα σύστημα από τρία έναλλασσόμενα ρεύματα, που έχουν το ίδιο πλάτος τάσεως (U_0) και έντασεως ρεύματος (I_0) και την ίδια περίοδο (T), αλλά το καθένα παρουσιάζει διαφορά φάσεως 120° σχετικά με καθένα από τα άλλα δύο, δηλαδή παρουσιάζει μία χρονική διαφορά ίση με $T/3$.

β. Παραγωγή του τριφασικού ρεύματος. Για την παραγωγή του τριφασικού ρεύματος χρησιμοποιούμε τον *τριφασικό έναλλακτήρα*, που ή λειτουργία του στηρίζεται στην εξής αρχή: Τρία όμοια πηνία (έπαγωγμο) τοποθετούνται πάνω σε οριζόντιο επίπεδο έτσι, ώστε οι άξονές τους να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνίες 120° (σχ. 82). Πάνω στο ίδιο επίπεδο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ευθύγραμμος μαγνήτης ή ηλεκτρομαγνήτης (έπαγωγέας). Τότε στις άκρες κάθε πηνίου αναπτύσσεται έναλλασσόμενη τάση. Όταν όμως η τάση άποκτῆ τῆ μέγιστη τιμή της (U_0) στο πηνίο 1, τότε στο επόμενο πηνίο 2 ἡ τάση άποκτῆ τῆ μέγιστη

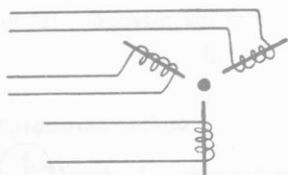


Σχ. 82. Σχηματική παράσταση για τὴν ἐξήγηση τῆς παραγωγῆς τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος.

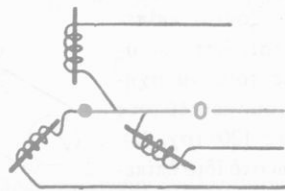
τιμή της με καθυστέρηση ίση με $T/3$, δηλαδή ή τάση στό πηνίο 2 παρουσιάζει διαφορά φάσεως 120° σχετικά με την τάση στό πηνίο 1. Τό ίδιο συμβαίνει μεταξύ τών πηνίων 2 και 3. Έτσι σε μιά χρονική στιγμή t ή στιγμιαία τάση στις άκρες τών τριών πηνίων είναι U_1, U_2, U_3 και εκφράζονται από τις εξισώσεις (1). Αν οι άκρες τών τριών πηνίων συνδεθούν με τρεις ίσες ωμικές αντιστάσεις (R), τότε σχηματίζονται τρία κυκλώματα, στά όποια κυκλοφορούν τρία εναλλασσόμενα ρεύματα πού αποτελούν τό τριφασικό ρεύμα. Στή χρονική στιγμή t ή στιγμιαία ένταση τών τριών ρευμάτων είναι I_1, I_2, I_3 και εκφράζονται από τις εξισώσεις (2).

Αν προσθέσουμε κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε: $U_1 + U_2 + U_3 = 0$ και $I_1 + I_2 + I_3 = 0$. Άρα στό τριφασικό ρεύμα τό άθροισμα τών στιγμιαίων τάσεων καθώς και τό άθροισμα τών στιγμιαίων εντάσεων τών τριών ρευμάτων είναι σε κάθε στιγμή ίσο με μηδέν.

γ. Μεταφορά του τριφασικού ρεύματος. Για τή μεταφορά του τριφασικού ρεύματος φαίνεται ότι χρειάζονται έξι άγωγοί (σχ. 83). Αν όμως ή μιά άκρη κάθε πηνίου συνδεθεί με τόν ίδιο άγωγό, πού ονομάζεται ούδέτερος άγωγός (0), τότε για τή μεταφορά του τριφασικού ρεύματος χρειάζονται μόνο τέσσερις άγωγοί (σχ. 84). Η όλική ένταση του ρεύματος στόν



Σχ. 83. Για τή μεταφορά τών τριών ρευμάτων χρειάζονται έξι άγωγοί.

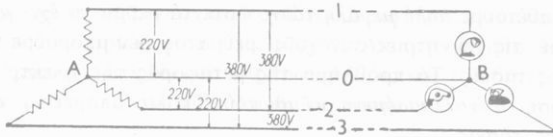


Σχ. 84. Αντί για τούς τρεις άγωγούς έχουμε τόν ούδέτερο άγωγό (0).

ούδέτερο άγωγό είναι ίση με μηδέν ($I_1 + I_2 + I_3 = 0$). Οί άλλοι τρεις άγωγοί ονομάζονται φάσεις (1, 2, 3).

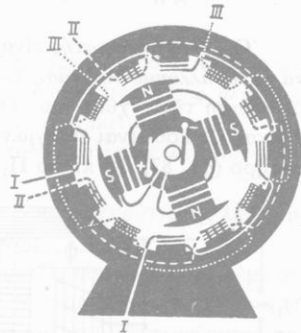
Η ενεργός τάση μεταξύ μιςς φάσεως και του ούδέτερου άγωγού ονομάζεται φασική τάση ($U_{\text{φασ}}$) και είναι ίση με 220 V. Ένω ή ενεργός τάση μεταξύ δύο φάσεων ονομάζεται πολική τάση ($U_{\text{πολ}}$) και είναι ίση με 380 V. Έτσι φέρνουμε στην κατανάλωση δύο τάσεις. Η φασική τάση 220 V χρησιμοποιείται στις οικιακές εφαρμογές, ενώ ή πολική τάση 380 V χρησιμοποιείται σε τεχνικές εγκαταστάσεις (σχ. 85). Αν τρεις ίσες ωμικές αντιστάσεις συνδέονται όπως φαίνεται στό σημείο Β (σχ. 85), τότε πάνω σε κάθε αντίσταση καταναλώνεται ισχύς ίση με $U_{\text{φασ}} \cdot I_{\text{εν}}$. Επομένως ή μέση ισχύς του τριφασικού ρεύματος σ' αυτή τήν περίπτωση είναι:

$$P_{\text{τριφασικού}} = 3 \cdot U_{\text{φασική}} \cdot I_{\text{εν}}$$



Σχ. 85. Πώς χρησιμοποιούμε τό τριφασικό ρεύμα (σχηματική παράσταση).

Στίς γεννήτριες τριφασικού ρεύματος, πού χρησιμοποιεί ή βιομηχανία, ό άριθμός τών πηνίων (επαγωγήμο) είναι *τριπλάσιος* από τόν άριθμό τών μαγνητικών πόλων (επαγωγέας). Στο σχήμα 86 φαίνεται ή άρχή τής λειτουργίας μιās τριφασικής γεννήτριας (I, I — II, II — III, III είναι οί άκρες τοϋ συστήματος τών τριών κυκλωμάτων τοϋ επαγωγήμου).



Σχ. 86. Τριφασικός έναλλακτήρας (ή τριφασική γεννήτρια).

δ. Κινητήρες έναλλασσόμενου ρεύματος. Ό κινητήρας τοϋ συνεχούς ρεύματος μπορει νά λειτουργήσει καί μέ μονοφασικό έναλλασσόμενο ρεύμα. Σήμερα όμως χρησιμοποιούμε κυρίως *τούς τριφασικούς κινητήρες*, πού λειτουργοϋν μέ τριφασικό ρεύμα.

63. Η μεταφορά τής ηλεκτρικής ενέργειας

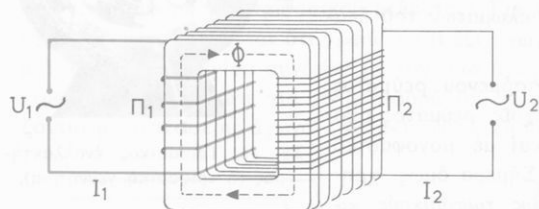
Μιά γεννήτρια συνεχούς ρεύματος έχει στοϋς πόλους τής *σταθερή τάση* $U = 10\ 000\ \text{V}$. Τό ρεύμα έχει ένταση $I = 20\ \text{A}$ καί μεταφέρεται στόν τόπο τής κατανώσεως μέ γραμμή πού έχει αντίσταση $R = 300\ \Omega$. Η γεννήτρια δίνει στό έξωτερικό κύκλωμα ισχύ $P = U \cdot I$, άρα $P = 200\ 000\ \text{W}$. Πάνω στή γραμμή *μετατρέπεται* *σέ θερμοότητα* ισχύς $P_{\theta\epsilon\rho} = I^2 \cdot R$, δηλαδή $P_{\theta\epsilon\rho} = 120\ 000\ \text{W}$. Έτσι στήν κατανάλωση φτάνει ισχύς $P_{\kappa\alpha\tau} = 80\ 000\ \text{W}$. Ωστε τά 60 % τής ισχύος πού δίνει ή γεννήτρια στό έξωτερικό κύκλωμα είναι *άπώλεια* *ένέργειας*. Αν ή γεννήτρια έχει στοϋς πόλους τής τάση $U = 100\ 000\ \text{V}$ καί δίνει στό έξωτερικό κύκλωμα τήν ίδια ισχύ, δηλαδή είναι $P = 200\ 000\ \text{W}$, τότε τό ρεύμα έχει ένταση $I = 2\ \text{A}$. Πάνω στή γραμμή *μετατρέπεται* *σέ θερμοότητα* ισχύς $P_{\theta\epsilon\rho\mu} = I^2 \cdot R$, δηλαδή $P_{\theta\epsilon\rho\mu} = 1200\ \text{W}$. Τώρα στήν κατανάλωση φτάνει ισχύς $P_{\kappa\alpha\tau} = 198\ 800\ \text{W}$. Η άπώλεια *ένέργειας* είναι σχεδόν *άσήμαντη*.

Από τό παράδειγμα αυτό φαίνεται ότι για νά μεταφέρουμε *σέ μεγάλη* *άπόσταση* *μιά μεγάλη* *ηλεκτρική ισχύ* μέ μικρές *άπώλειες* πάνω στή γραμμή,

πρέπει νά διαθέτουμε πολύ μεγάλη τάση, ώστε τό ρεύμα νά έχει μικρή ένταση. Ἀλλά μέ τίς γεννήτριες συνεχούς ρεύματος δέν μπορούμε νά έχουμε πολύ μεγάλες τάσεις. Τό πρόβλημα τῆς μεταφοράς τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας τό ἔλυσε τό ἐναλλασσόμενο ρεύμα πού εύκολα μπορεῖ νά ἀποκτήσει πολύ μεγάλες τάσεις.

64. Μετασχηματιστές

Ὁ μετασχηματιστής εἶναι μιά διάταξη μέ τήν ὁποία εύκολα μπορούμε νά μεταβάλλουμε τήν τάση τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος, χωρίς αἰσθητή ἐλάττωση τῆς ἰσχύος του. Ὁ μετασχηματιστής ἀποτελεῖται ἀπό δύο πηνία Π_1 καί Π_2 πού εἶναι τυλιγμένα στίς δύο πλευρές ἑνός πλαισίου ἀπό μαλακό σίδηρο (σχ. 87). Τό πηνίο Π_1 , ὀνομάζεται πηνίο χαμηλῆς τάσεως ἢ πρωτεύον



Σχ. 87. Σχηματική παράσταση τοῦ μετασχηματιστή

πηνίο Π_2 ὀνομάζεται πηνίο ψηλῆς τάσεως ἢ δευτερεύον πηνίο καί ἀποτελεῖται ἀπό πολλές σπεῖρες λεπτοῦ σύρματος. Τό πηνίο Π_2 ἔχει n_2 σπεῖρες καί οἱ ἄκρες του συνδέονται μέ ἕνα κύκλωμα (δευτερεύον κύκλωμα).

α. Λειτουργία τοῦ μετασχηματιστή. Ἡ γεννήτρια δημιουργεῖ στίς ἄκρες τοῦ πρωτεύοντος πηνίου Π_1 ἐνεργό τάση U_1 μέ συχνότητα ν . Τό κύκλωμα τοῦ πρωτεύοντος πηνίου διαρρέεται ἀπό ρεύμα (πρωτεύον ρεύμα) πού ἔχει ἐνεργό ένταση I_1 καί ἰσχύ $P_1 = U_1 \cdot I_1$. Τότε μέσα στόν πυρήνα τοῦ μαλακοῦ σιδήρου σχηματίζεται ἐναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο πού οἱ δυναμικές γραμμές του μένουν μέσα στό μαλακό σίδηρο σχηματίζοντας ἕνα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα.

Ὅταν τό κύκλωμα τοῦ δευτερεύοντος πηνίου Π_2 εἶναι ἀνοιχτό, λέμε ὅτι ὁ μετασχηματιστής λειτουργεῖ στό κενό. Ἡ συνεχῆ μεταβολή τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου προκαλεῖ συνεχῆ μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ροῆς πού περνáει ἀπό τίς σπεῖρες τοῦ πηνίου Π_2 . Τότε ἐξαιτίας τῆς ἀμοιβαίας ἐπαγωγῆς ἀναπτύσσεται στίς ἄκρες τοῦ δευτερεύοντος πηνίου Π_2 ἐναλλασσόμενη τάση πού ἔχει συχνότητα ν .

β. Έξιώσεις του μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής λειτουργεί στο κενό (τό κύκλωμα του πηνίου Π_2 ανοιχτό). Αν τότε μετρήσουμε την ενέργειά τάση U_1 και U_2 στις άκρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου βρίσκουμε ότι ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\boxed{\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}} \quad (1)$$

όπου n_1 και n_2 είναι αντίστοιχα ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Ο λόγος n_2/n_1 ονομάζεται *λόγος μετασχηματισμοῦ* και είναι χαρακτηριστικός για το μετασχηματιστή.

Αν είναι $n_2 > n_1$, τότε $U_2 > U_1$ και ο μετασχηματιστής λειτουργεί ως *μετασχηματιστής ύψωσης της τάσεως*.

Αν είναι $n_2 < n_1$, τότε είναι $U_2 < U_1$ και ο μετασχηματιστής λειτουργεί ως *μετασχηματιστής ύποβιβασμοῦ της τάσεως*.

Όταν το κύκλωμα του δευτερεύοντος πηνίου Π_2 είναι *κλειστό*, λέμε ότι ο μετασχηματιστής λειτουργεί *μέ φορτίο*. Αν τότε μετρήσουμε την ενέργειά τάση U_1 και U_2 στις άκρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου, βρίσκουμε ότι ισχύει πάλι η εξίσωση (1).

Στό πρωτεύον και στό δευτερεύον κύκλωμα η ενέργειά ένταση του ρεύματος είναι I_1 και I_2 . Η γεννήτρια παρέχει στό πρωτεύον πηνίο Π_1 ισχύ $P_1 = U_1 \cdot I_1$. Τό δευτερεύον πηνίο Π_2 παρέχει στό κύκλωμά του ισχύ $P_2 = U_2 \cdot I_2$.

Κατά μεγάλη προσέγγιση μπορούμε νά δεχτοῦμε ότι στό μετασχηματιστή οι απώλειες ενέργειας είναι *ασήμαντες*. Τότε σύμφωνα μέ τήν αρχή της διατηρήσεως της ενέργειας ισχύει η εξίσωση:

$$P_1 = P_2 \quad \text{ἄρα} \quad \boxed{U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2} \quad (2)$$

Σ' αὐτή τήν περίπτωση ὅλη ἡ ισχύς πού προσφέρεται στό πρωτεύον πηνίο μεταφέρεται μέ τό μαγνητικό πεδίο στό δευτερεύον πηνίο.

Από τίς εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε τήν εξίσωση:

$$\boxed{\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}} \quad (3)$$

Ἡ εξίσωση (3) φανερώνει ότι ὁ λόγος τῶν ἐνεργῶν ἐντάσεων I_1 και I_2 τῶν ρευμάτων στά δύο κυκλώματα τοῦ μετασχηματιστή *διατηρεῖται σταθερός*.

Παράδειγμα. Σέ ένα μετασχηματιστή είναι $n_1 = 10$ σπειρες, $n_2 = 500$ σπειρες, $U_1 = 1000$ V καί $I_1 = 500$ A. Τότε γιά τό δευτερευόν ρεύμα είναι: ένεργός τάση

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} = 1000 \text{ V} \cdot \frac{500 \text{ σπειρες}}{10 \text{ σπειρες}} \quad \text{καί} \quad U_2 = 50\,000 \text{ V}$$

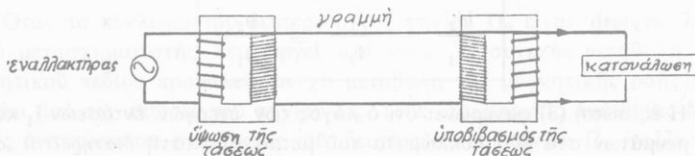
ένεργός ένταση τοῦ ρεύματος:

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} = 500 \text{ A} \cdot \frac{10}{500} \quad \text{καί} \quad I_2 = 10 \text{ A}$$

Αὐτός ὁ μετασχηματιστής λειτουργεῖ ὡς μετασχηματιστής *ὑψώσεως τῆς τάσεως*.

γ. Ἐφαρμογές τῶν μετασχηματιστῶν. Οἱ μετασχηματιστές ἔχουν πολύ σημαντικές ἐφαρμογές. Στήν πράξη ἔχουμε κυκλώματα ἐναλλασσόμενου ρεύματος, στά ὁποῖα χρειάζομαστε *ψηλές τάσεις* καί ἄλλα κυκλώματα, στά ὁποῖα χρειάζομαστε *μεγάλες ἐντάσεις ρεύματος*. Οἱ μετασχηματιστές μᾶς ἐπιτρέπουν νά κάνουμε στό ἐναλλασσόμενο ρεύμα τούς μετασχηματισμούς πού θέλουμε, π.χ. γιά τή λειτουργία τῶν σωλήνων πού παράγουν τίς ἀκτίνες Röntgen χρειάζομαστε τάσεις πού μετριοῦνται σέ δεκάδες χιλιάδες βόλτ καί τότε χρησιμοποιοῦμε μετασχηματιστές πού *ὑψώνουν τήν τάση* τοῦ δικτύου διανομῆς τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας (220 V).

Ἰδιαίτερη ὁμως σημασία ἔχει ἡ παραγωγή ψηλῶν τάσεων *γιά τή μεταφορά τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας*. Σέ κάθε ἐργοστάσιο ἠλεκτροπαραγωγῆς (θερμοηλεκτρικό ἢ ὑδροηλεκτρικό) ὑπάρχει ἕνας μετασχηματιστής πού *ὑψώνει τήν τάση* σέ ἑκατοντάδες χιλιάδες βόλτ (ὡς 500 000 V). Τό ρεύμα ψηλῆς τάσεως μεταφέρεται στόν τόπο καταναλώσεως τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας (π.χ. ἀπό τήν Πτολεμαίδα στήν Ἀθήνα). Στόν τόπο τῆς καταναλώσεως ὑπάρχουν μετασχηματιστές, πού διαδοχικά *ὑποβιβάζουν τήν τάση* (σχ. 88). Σέ πολλές ἄλλες ἐφαρμογές χρησιμοποιοῦμε σήμερα τούς μετασχηματιστές, π.χ. σέ ἐπιστημονικά ἐργαστήρια, σέ βιομηχανικές ἐγκαταστάσεις, στό ἠλεκτρικό κουδούνι κ.ἄ.

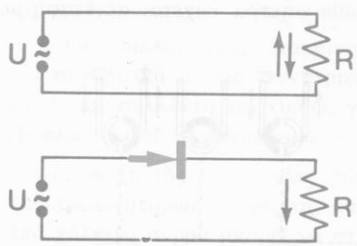


Σχ. 88. Μεταφορά τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος μέ ψηλή τάση

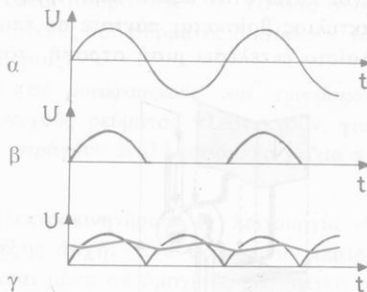
Γενικά στους μετασχηματιστές οι απώλειες ενέργειας είναι πολύ μικρές (ως 5%) και οφείλονται στην παραγωγή θερμότητας στα σύρματα των πηνίων και στον πυρήνα του μαλακού σιδήρου. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν απόδοση που φτάνει ως 99%.

65. Άνορθωση του έναλλασσόμενου ρεύματος

Σε πολλές εφαρμογές (ηλεκτρόλυση, φόρτιση συσσωρευτών κ.ά.) χρειαζόμαστε συνεχές ρεύμα. Είναι λοιπόν απαραίτητο να μετατρέπουμε το έναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα. Αυτή η μετατροπή ονομάζεται *άνορθωση* του έναλλασσόμενου ρεύματος και γίνεται με ειδικές διατάξεις, που ονομάζονται *άνορθωτές* (σχ. 89). Γενικά ο άνορθωτής είναι μία διάταξη, που, όταν είναι στο κύκλωμα έναλλασσόμενου ρεύματος, επιτρέπει στο ρεύμα να περνάει μόνο κατά τη μία φορά (*άγωγή φορά*), ενώ δεν επιτρέπει κατά την αντίθετη φορά (*άνασταλτική φορά*). Έτσι από τον άνορθωτή περνάει τό ρεύμα μόνο κατά τη μία ήμιπερίοδο (σχ. 90). Τό ρεύμα που διαρρέει τότε μία αντίσταση R έχει *σταθερή φορά*, αλλά παρουσιάζει περιοδικές διακοπές, που καθεμιά διαρκεί μισή περίοδο (*ήμιανόρθωση*). Με κατάλληλες διατάξεις μπορούμε να εκμεταλλευόμαστε με τη μορφή συνεχούς ρεύματος και τις δύο ήμιπεριόδους του έναλλασσόμενου ρεύματος (*πλήρης άνορθωση*).



Σχ. 89. Ο άνορθωτής καταργεί τη μία έναλλαγή του ρεύματος και αφήνει να περάσει μόνο τό ρεύμα που έχει ορισμένη φορά.



Σχ. 90. α. Έναλλασσόμενη τάση. β. Ημιάνορθωση της τάσεως. γ. Πλήρης άνορθωση της τάσεως. Η τεθλασμένη γραμμή δείχνει τις διακυμάνσεις της συνεχούς τάσεως.

66. 'Ηλεκτρικές μηχανές

'Ονομάζουμε *ήλεκτρικές μηχανές* τις γεννήτριες ήλεκτρικού ρεύματος και τούς ήλεκτροκινητήρες.

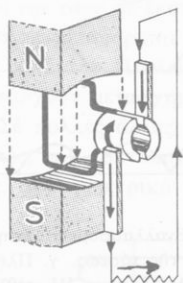
α. 'Αρχή τής λειτουργίας τών γεννητριών. 'Η λειτουργία τών γεννητριών στηρίζεται στην έξιξη άρχή: "Όταν ή μαγνητική ροή (Φ) πού περνάει από ένα πλαίσιο ή πηνίο μεταβάλλεται άρμονικά σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο (σχ. 76), τότε στίς άκρες τού πλαισίου ή τού πηνίου άναπτύσσεται *ήλεκτρογενετική δύναμη* ή *έπαγωγική τάση* πού εκφράζεται μέ τήν έξιωση:

$$U = U_0 \cdot \eta\mu\omega t \quad \text{ή καί} \quad U = U_0 \cdot \eta\mu 2\pi\nu t$$

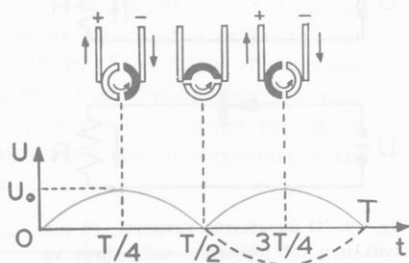
όπου U_0 είναι τό πλάτος τής τάσεως και ν ή συχνότητα τής έναλλασσόμενης τάσεως.

Τό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται κυρίως από ήλεκτρομαγνήτη (*έπαγωγέας*) πού τροφοδοτείται μέ συνεχές ρεύμα. Για νά αύξηθει ή μαγνητική ροή πού περνάει από τό πλαίσιο ή τό πηνίο (*έπαγωγήμο*), τυλίγουμε τό πλαίσιο ή τό πηνίο γύρω από *πυρήνα μαλακού σιδήρου*.

β. Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. 'Έχουμε ένα όρθογώνιο πλαίσιο από χάλκινο σύρμα πού στρέφεται μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα $\omega = 2\pi\nu$ μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο γύρω από άξονα κάθετο στίς δυναμικές γραμμές τού μαγνητικού πεδίου (σχ. 91). Οί δύο άκρες τού πλαισίου συνδέονται μέ δύο μονωμένους ήμιδακτυλίους (*συνλέκτης*) πού είναι στερεωμένοι πάνω στόν άξονα περιστροφής και στρέφονται μαζί του. Κάθε ήμιδακτύλιος βρίσκεται πάντοτε σέ έπαφή μέ ένα έλασμα (*ψήκτρα*). "Όταν τό πλαίσιο εκτελέσει μισή στροφή, τότε κάθε ψήκτρα έρχεται σέ έπαφή μέ



Σχ. 91. 'Αρχή τής λειτουργίας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος. Οί άκρες τού στρεφόμενου πλαισίου συνδέονται μέ τούς δύο ήμιδακτυλίους (συνλέκτης).



Σχ. 92. 'Εξήγηση τής λειτουργίας τού συνλέκτη. Τό ρεύμα βγαίνει στό έξωτερικό κύκλωμα έχοντας πάντοτε τήν ίδια φορά.

τόν άλλο ήμιδακτύλιο. Αυτό συμβαίνει, όταν τό πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή όταν αντιστρέφεται ή τάση. Έτσι τό ρεύμα βγαίνει στό έξωτερικό κύκλωμα έχοντας τήν ίδια πάντοτε φορά (σχ. 92). Η τάση (U) πού αναπτύσσεται στους πόλους τής γεννήτριας είναι *συνεχής*, αλλά ή απόλυτη τιμή της κυμαίνεται περιοδικά μεταξύ τών τιμών 0 και U_0 . Στο έξωτερικό κύκλωμα κυκλοφορεί *συνεχές* ρεύμα.

Οί γεννήτριες συνεχούς ρεύματος πού χρησιμοποιούμε στις εφαρμογές ονομάζονται *δυναμοηλεκτρικές μηχανές* (dynamo) και αποτελούνται από τά εξής μέρη :

1. Από τόν *έπαγωγέα* πού είναι *ακίνητος* ηλεκτρομαγνήτης.

2. Από τό *έπαγώγιμο* πού είναι σύστημα πολλών πλαισίων από σύρμα. Όλο αυτό τό σύστημα *στρέφεται* μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα μέσα στό μαγνητικό πεδίο πού δημιουργεί ό *έπαγωγέας*.

3. Από τό *συλλέκτη* πού είναι σύστημα από πολλά μονωμένα *έλάσματα* στά όποια καταλήγουν τά σύρματα τών πλαισίων.

γ. Γεννήτριες *έναλλασσόμενου* ρεύματος. Οί γεννήτριες *έναλλασσόμενου* ρεύματος ονομάζονται *έναλλακτῆρες* και αποτελούνται από τά εξής μέρη :

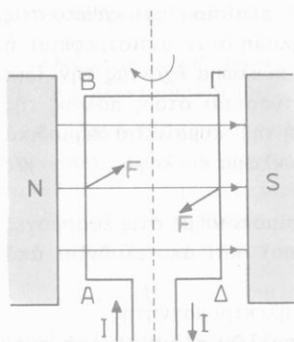
1. Από τόν *έπαγωγέα*, πού είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, ό όποιος *στρέφεται* μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα.

2. Από τό *έπαγώγιμο* πού είναι σύστημα πηνίων, τά όποια είναι *ακίνητα* και έχουν κοινό πυρήνα από μαλακό σίδηρο (σχ. 79). Τό ίδιο σύρμα τυλίγεται σέ όλα τά πηνία και οί δύο άκρες του σύρματος αποτελούν *τούς δύο έναλλασσόμενους πόλους* τής γεννήτριας.

Οί *έναλλακτῆρες* διακρίνονται σέ *μονοφασικούς* και *τριφασικούς* και συγκριτικά μέ τίς γεννήτριες συνεχούς ρεύματος πλεονεκτούν, γιατί δέν έχουν συλλέκτη και κυρίως γιατί παράγουν *έναλλασσόμενο* ρεύμα πού εύκολα μπορεί *νά μετασχηματιστεί*.

δ. Αρχή τής λειτουργίας τών ηλεκτροκινητήρων Η λειτουργία τών ηλεκτροκινητήρων στηρίζεται στην εξής αρχή: Ένα ορθογώνιο πλαίσιο από χάλκινο σύρμα μπορεί *νά στρέφεται* μέσα σέ ομογενές μαγνητικό πεδίο γύρω από άξονα κάθετο στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Αν στό πλαίσιο διαβιάσουμε ρεύμα, τότε στις δύο άπέναντι πλευρές του πλαισίου αναπτύσσονται δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις, δηλαδή αναπτύσσεται ένα ζεύγος δυνάμεων πού αναγκάζει τό πλαίσιο *νά στρέφεται* (σχ. 93).

Η λειτουργία τών *κινητήρων* συνεχούς ρεύματος στηρίζεται στό γεγονός ότι οί γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι *μηχανές αντιστρεπτές*.



Σχ. 93. Πάνω στο πλαίσιο αναπτύσσεται ζεύγος δυνάμεων που αναγκάζει το πλαίσιο να στρέφεται.

τους βασίζεται σε μία ιδιότητα που έχει το μαγνητικό πεδίο του τριφασικού ρεύματος.

Όταν δηλαδή διαβιβάσουμε συνεχές ρεύμα στο επαγωγίμο, τότε το μαγνητικό πεδίο του επαγωγέα αναπτύσσει πάνω στο επαγωγίμο ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που αναγκάζουν το επαγωγίμο να στρέφεται. Η μηχανή λειτουργεί τότε ως *κινητήρας* συνεχούς ρεύματος.

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος μπορεί να λειτουργήσει και με μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα (*μονοφασικός κινητήρας*), αρκεί τά κυκλώματα του επαγωγέα και του επαγωγίμου να συνδέονται κατά σειρά.

Σήμερα όμως χρησιμοποιούνται κυρίως οι *τριφασικοί κινητήρες* που η λειτουργία

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

88. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα έχει πλάτος τάσεως $U_0 = 100 \text{ V}$ και πλάτος έντασης $I_0 = 20 \text{ A}$. 1) Πόση είναι η ενεργός τάση και η ενεργός ένταση του ρεύματος; 2) Πόση είναι η τάση U και η ένταση I τη στιγμή που η φάση (ωt) παίρνει τις τιμές 30° , 60° και 150° ;

89. Η στιγμιαία ένταση ενός εναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται από την εξίσωση $i = 10 \cdot \eta\mu 314t$. Νά βρεθεί το πλάτος της έντάσεως I_0 , η περίοδος T , η συχνότητα ν , η κυκλική συχνότητα ω και η ενεργός ένταση του ρεύματος.

90. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει μία ωμική αντίσταση $R = 5 \Omega$, που είναι βυθισμένη μέσα σε θερμιδόμετρο. Αυτό έχει θερμοχωρητικότητα 1000 cal/grad και μέσα σε 1 λεπτό η θερμοκρασία του υψώνεται κατά 10° C . Πόση είναι η ενεργός ένταση του ρεύματος;

91. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα έχει συχνότητα $\nu = 50 \text{ Hz}$, ενεργό τάση $U_{\text{εν}} = 30 \text{ V}$ και ενεργό ένταση $I_{\text{εν}} = 5 \text{ A}$. Νά γραφούν οι εξισώσεις που δίνουν τη στιγμιαία τάση U και τη στιγμιαία ένταση ρεύματος I .

92. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει μία ωμική αντίσταση $R = 12,26 \Omega$ και μέσα σε κάθε λεπτό αναπτύσσει πάνω της θερμότητα $Q_{\text{θερμ}} = 2816 \text{ cal}$. Πόσο είναι το πλάτος της έντάσεως του ρεύματος; $J = 4,18 \text{ Joule/cal}$.

93. Στη μία άκρη A ενός σύρματος AB φτάνει ένα συνεχές ρεύμα που έχει σταθερή ένταση $I_{\Sigma} = 3 \text{ A}$ και ένα εναλλασσόμενο ρεύμα που έχει ενεργό ένταση $I_E = 4 \text{ A}$. Πόση

είναι ή ενεργός ένταση του ρεύματος που σχηματίζεται από την πρόσθεση των δύο ρευμάτων;

94. Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως έχει ισχύ 25 cd, αντίσταση $R = 440 \Omega$ και τροφοδοτείται με έναλλασόμενο ρεύμα, που έχει ενεργό τάση $U_{ev} = 220 \text{ V}$. 1) Πόσο είναι το πλάτος U_0 της τάσεως και το πλάτος I_0 της έντάσεως του ρεύματος; 2) Πόση μέση ισχύς καταναλώνεται κατά candela;

95. Στις άκρες μιās ωμικής αντίστασεως $R = 12 \Omega$ εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_{ev} = 120 \text{ V}$ και ή συχνότητα του ρεύματος είναι $\nu = 50 \text{ Hz}$. 1) Πόση μέση ισχύς P καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση R ; 2) Ποιά μεταβολή παθαίνει αυτή ή ισχύς P , αν με μία κατάλληλη διάταξη (άνορθωτή) καταργηθεί ή μία από τίς δύο έναλλαγές του ρεύματος ή αν άνορθωθεί και ή δεύτερη έναλλαγή;

96. Σέ ένα ύδροηλεκτρικό έργοστάσιο πέφτουν στόν ύδροστρόβιλο 150 m^3 νερό τό λεπτό από ύψος 120 m . Ό ύδροστρόβιλος έχει άπόδοση 78% και τροφοδοτεί έναν έναλλακτήρα, που έχει άπόδοση 92% και στους πόλους του δημιουργεί έναλλασόμενη τάση, που δίνεται από την έξίσωση $U = 2828 \cdot \eta \text{ m} 314 \text{ t}$. 1) Νά βρεθούν σε κιλοβάτ: α) ή ισχύς $P_{\omega\delta}$ τήν όποια δίνει ή ύδατόπτωση στόν ύδροστρόβιλο· β) ή ισχύς $P_{\sigma\tau}$ τήν όποια δίνει ό ύδροστρόβιλος στόν έναλλακτήρα και γ) ή ηλεκτρική ισχύς $P_{\gamma\lambda}$ τήν όποια δίνει ό έναλλακτήρας. 2) Νά βρεθεί ή συχνότητα ν του ρεύματος και ή ενεργός ένταση I_{ev} του ρεύματος που μπορεί νά δώσει αυτός ό έναλλακτήρας. $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$.

97. Θέλουμε νά υποβιβάσουμε τήν ενεργό τάση από $U_1 = 220 \text{ V}$ σε $U_2 = 5 \text{ V}$. Άν τό πηνίο χαμηλής τάσεως έχει $n_2 = 10$ σπείρες, πόσες σπείρες n_1 πρέπει νά έχει τό πηνίο ψηλής τάσεως;

98. Σέ ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού τής τάσεως στό κύκλωμα ψηλής τάσεως εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_1 = 40\,000 \text{ V}$ και ή ενεργός ένταση του ρεύματος είναι $I_1 = 30 \text{ A}$. Η άπόδοση του μετασχηματιστή είναι 92% . 1) Πόση είναι ή ισχύς στό κύκλωμα χαμηλής τάσεως; 2) Άν ή ενεργός τάση είναι $U_2 = 220 \text{ V}$, πόση είναι ή ενεργός ένταση I_2 του ρεύματος;

99. Σέ ένα μετασχηματιστή τά δύο πηνία του έχουν $n_1 = 100$ σπείρες και $n_2 = 2000$ σπείρες. Στο κύκλωμα χαμηλής τάσεως, που έχει αντίσταση $R_1 = 0,03 \Omega$, διαβιβάζεται ρεύμα που έχει ενεργό τάση $U_1 = 110 \text{ V}$ και ενεργό ένταση $I_1 = 100 \text{ A}$. 1) Πόση είναι ή άπόδοση του μετασχηματιστή και πόση είναι στό κύκλωμα ψηλής τάσεως ή ενεργός ένταση I_2 του ρεύματος, αν ή ενεργός τάση είναι $U_2 = 2200 \text{ V}$; β) Ποιές τιμές έχουν τά παραπάνω μεγέθη I_2 και U_2 , αν είναι $R_1 = 0$;

100. Σέ ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού τής τάσεως ή ενεργός τάση στά δύο πηνία του αντίστοιχα είναι $U_1 = 5000 \text{ V}$ και $U_2 = 220 \text{ V}$. Στο κύκλωμα ψηλής τάσεως ή ισχύς είναι $P_1 = 200 \text{ kW}$ και ή άπόδοση του μετασχηματιστή είναι 97% . Πόση είναι ή ενεργός ένταση I_1 και I_2 του ρεύματος στό καθένα κύκλωμα;

101. Ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού τής τάσεως έχει αντίστοιχα στά δύο πηνία του $n_1 = 4500$ σπείρες και $n_2 = 150$ σπείρες. Στο πηνίο ψηλής τάσεως εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_1 = 3000 \text{ V}$ και στό κύκλωμα χαμηλής τάσεως όλη ή ισχύς, που είναι $P = 9 \text{ kW}$, μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω σε μία αντίσταση R . Η άπόδοση του μετασχηματιστή είναι ίση με τή μονάδα. Πόση είναι ή ενεργός ένταση I_1 στό κύκλωμα ψηλής τάσεως και πόση είναι ή αντίσταση R ;

102. Μιά ισχύς $P = 110 \text{ kW}$ θά μεταφερθεί από τό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στόν τόπο καταναλώσεως με σύρμα που έχει αντίσταση $R = 0,08 \Omega$. 1) Άν ή ισχύς P μεταφερθεί

μέ συνεχές ρεύμα και μέ τάση $U_{\Sigma} = 220 \text{ V}$, πόση είναι ή πτώση τάσεως πάνω στό σύρμα και sé πόσο τοίς έκατό φτάνει ή απώλεια ισχύος πάνω στό σύρμα; 2) Ή ίδια ισχύς P μεταφέρεται μέ εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά στό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής ή ενεργός τάση ύψώνεται από 220 V sé 22 000 V και αντίθετα στόν τόπο καταναλώσεως ή τάση υποβιβάζεται πάλι sé 220 V. Πόση είναι τώρα ή πτώση τάσεως πάνω στό σύρμα και sé πόσο τοίς έκατό φτάνει ή απώλεια ισχύος πάνω στό σύρμα;

103. Μιά ύδατοπίτωση τροφοδοτεί έναν ύδροστρόβιλο, ό όποίος κινεί έναν έναλλακτήρα. Ή απόδοση της έγκαταστάσεως είναι 80 %. Οί πόλοι του έναλλακτήρα συνδέονται μέ τό πηνίο ψηλής τάσεως ενός μετασχηματιστή τό όποίο έχει $n_1 = 3600$ σπειρες. Τό πηνίο χαμηλής τάσεως έχει $n_2 = 180$ σπειρες και οί πόλοι του συνδέονται μέ μία έγκατάσταση ηλεκτροφωτισμού, πού αποτελείται από 1000 λαμπτήρες. Κάθε λαμπτήρας έχει ισχύ 30 W και λειτουργεί μέ ενεργό ένταση ρεύματος 0,25 A. Οί απώλειες πάνω στή γραμμή μεταφορής είναι άσήμαντες. 1) Πόση είναι ή ενεργός τάση στις άκρες του πηνίου χαμηλής τάσεως και πόση στους πόλους του έναλλακτήρα; Πόση είναι ή ενεργός ένταση I_1 του ρεύματος πού δίνει ό έναλλακτήρας; 2) Πόση είναι ή ισχύς της ύδατοπίτσεως; Ή απόδοση του μετασχηματιστή είναι ίση μέ τή μονάδα.

Ή Αγωγιμότητα τῶν στερεῶν

67. Ήλεκτρονική αγωγιμότητα τῶν στερεῶν

Ξέρουμε ότι από τά στερεά σώματα *άγωγοί* είναι κυρίως τά μέταλλα και ότι μέσα sé κάθε μέταλλο υπάρχουν *τά ελεύθερα ηλεκτρόνια* πού είναι ηλεκτρόνια σθένους και κινούνται σύμφωνα μέ τούς νόμους της κινητικής θεωρίας τῶν αερίων. Ο αριθμός τῶν ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι τεράστιος (πάνω από 10^{20} ηλεκτρόνια κατά κυβικό έκατοστόμετρο). Ήν στις άκρες ενός σύρματος εφαρμόσουμε *συνεχή τάση* U , τότε μέσα στό σύρμα δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο και τά ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου *κινούνται* μέσα στό σύρμα μέ φορά αντίθετη μέ τή φορά του έξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Σ' αυτή τήν περίπτωση μέσα στό σύρμα κυκλοφορεί *συνεχές ρεύμα*. Ήν στις άκρες του σύρματος, πού έχει μόνο όμική αντίσταση, εφαρμόσουμε *εναλλασσόμενη τάση* $U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t$, τότε μέσα στό σύρμα δημιουργείται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, πού αναγκάζει κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο του μετάλλου νά εκτελεί *αρμονική ταλάντωση* πού έχει τή συχνότητα ν της τάσεως και κέντρο μιά μέση θέση ίσορροπίας του ηλεκτρονίου. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μέσα στό σύρμα σχηματίζεται *εναλλασσόμενο ρεύμα*. Τά ηλεκτρόνια και στό συνεχές και στό εναλλασσόμενο ρεύμα αποκτούν κινητική ενέργεια εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου. Ήν τό ρεύμα διαρρέει μόνο όμική αντίσταση, όλη ή κινητική ένερ-

για των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα κατά τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα του μετάλλου (*φαινόμενο Joule*).

Η αγωγιμότητα των στερεών ονομάζεται **ηλεκτρονική αγωγιμότητα** και έρμηνεύεται σε γενικές γραμμές από **τή θεωρία των ελεύθερων ηλεκτρονίων**. Αυτή όμως ή θεωρία δέν μπορεί νά εξηγήσει όρισμένες ιδιότητες των μετάλλων ούτε νά δικαιολογήσει γιατί τά στερεά διακρίνονται σε *άγωγούς, μονωτές και ήμιαγωγούς*.

Νεώτερες αντίληψεις γιά τήν ηλεκτρονική αγωγιμότητα των στερεών. Όλα τά στερεά σώματα είναι *κρυσταλλικά σώματα* και έπομένως ή ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός στερεού συνδέεται μέ τήν έσωτερική δομή των κρυστάλλων του. Τά τελευταία χρόνια διαμορφώθηκε ή **θεωρία των στερεών** πού έρμηνεύει τίς μηχανικές, θερμικές, όπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών. Αυτή ή νεώτερη θεωρία άποδεικνύει πότε είναι δυνατή ή *κίνηση των ηλεκτρονίων σθένους μέσα σε έναν κρύσταλλο*, δηλαδή πότε τά ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων ενός στερεού μπορούν νά γίνουν *ελεύθερα ηλεκτρόνια*.

Οί τρείς κατηγορίες στερεών. Τό αντίστροφο τής ειδικής αντίστασης ρ ενός στερεού ονομάζεται *ηλεκτρική αγωγιμότητα* ($1/\rho$) του στερεού. Τά στερεά, σύμφωνα μέ τήν ηλεκτρική αγωγιμότητά τους, διακρίνονται σε τρείς κατηγορίες, σε *άγωγούς, μονωτές και ήμιαγωγούς*.

α. **Άγωγοί** είναι τά μέταλλα πού έχουν μικρή ειδική αντίσταση, ή όποια *αδξάνει* μέ τή θερμοκρασία.

β. Οί **μονωτές** ή **διηλεκτρικά** έχουν πολύ μεγάλη ειδική αντίσταση πού *ελαττώνεται* μέ τή θερμοκρασία.

γ. Οί **ήμιαγωγοί** έχουν σημαντική ειδική αντίσταση πού *ελαττώνεται* μέ τή θερμοκρασία, όπως συμβαίνει και στους μονωτές. Όστε:

Στους άγωγούς (μέταλλα) ή μικρή ειδική αντίστασή τους *αδξάνει* μέ τή θερμοκρασία, ενώ αντίθετα στους μονωτές και στους ήμιαγωγούς ή μεγάλη ειδική αντίστασή τους *ελαττώνεται* μέ τή θερμοκρασία.

68. Άγωγοί, μονωτές, ήμιαγωγοί

Θά εξετάσουμε πολύ άπλά τή διάκριση των στερεών στις παραπάνω τρείς κατηγορίες.

α. **Οί άγωγοί.** Στους άγωγούς, δηλαδή στά μέταλλα, τά ηλεκτρόνια σθένους είναι *εδκίνητα* (ελεύθερα ηλεκτρόνια). Μέ τήν επίδραση έξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τά ελεύθερα ηλεκτρόνια άποκοιυν κινητική ένέργεια και, καθώς κινούνται μέσα στό στερεό, συγκρούονται μέ τά θετικά ιόντα του κρυστάλλου. Έτσι τό μέταλλο θερμαίνεται και τότε *αδξάνει* τό

πλάτος της ταλαντώσεως πού έκτελούν τά θετικά ιόντα του κρυστάλλου (θερμική κίνηση). Έπομένως αυξάνει καί ό αριθμός των συγκρούσεων του κινούμενου ηλεκτρονίου μέ τά θετικά ιόντα του κρυστάλλου. Αύτή όμως ή αύξηση του αριθμού των συγκρούσεων του ηλεκτρονίου αντίστοιχεί *σέ αύξηση της αντίστασεως του άγωγού*.

β. Οί μονωτές. Σέ έναν απόλυτα καθαρό κρύσταλλο μονωτή, πού έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία, όλα τά ηλεκτρόνια σθένους είναι *δεσμευμένα* από τό ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα του ατόμου. Έτσι σ' αυτό τόν κρύσταλλο δέν υπάρχουν εϋκίνητα ηλεκτρόνια καί γι' αυτό ό κρύσταλλος δέν έχει άγωγιμότητα. Όταν όμως αυξάνει ή θερμοκρασία του κρυστάλλου, λίγα ηλεκτρόνια σθένους άποκτούν ενέργεια καί τότε *άποδεσμεύονται* από την έλξη του πυρήνα καί γίνονται *εϋκίνητα*, δηλαδή *ελεύθερα ηλεκτρόνια*. Μέ την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου αυτά τά ελεύθερα ηλεκτρόνια σχηματίζουν ένα πολύ άσθενές ρεύμα. Η άγωγιμότητα του κρυστάλλου αυξάνει μέ τή θερμοκρασία, γιατί τότε *αυξάνει* καί ό αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους πού άποδεσμεύονται.

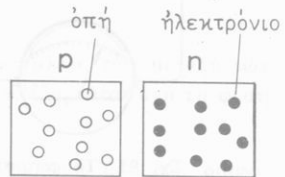
γ. Οί ήμιαγωγοί. Συνηθισμένοι ήμιαγωγοί είναι τό γερμάνιο καί τό πυρίτιο. Σέ έναν απόλυτα καθαρό κρύσταλλο ήμιαγωγού, πού έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία, όλα τά ηλεκτρόνια σθένους είναι *δεσμευμένα*, όπως συμβαίνει καί στους μονωτές. Τότε ό κρύσταλλος δέν έχει άγωγιμότητα. Αλλά στους ήμιαγωγούς τά ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ άσθενέστερα δεσμευμένα καί μόλις πάρουν την άπαιτούμενη λίγη ενέργεια, άμέσως *«έγκαταλείπουν τή θέση τους»* καί γίνονται μέσα στον κρύσταλλο *ελεύθερα ηλεκτρόνια*. Τά ηλεκτρόνια σθένους παίρνουν την άπαιτούμενη ενέργεια είτε όταν θερμαίνεται ό κρύσταλλος είτε από μία άκτινοβολία πού πέφτει πάνω στον κρύσταλλο.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο σθένους *έγκαταλείπει* τή θέση του, τότε σέ εκείνη τή θέση δημιουργείται μέσα στον κρύσταλλο μία *«άδειανή θέση»* ηλεκτρονίου πού ονομάζεται *όπή*. Άποδεικνύεται ότι ή έλλειψη ηλεκτρονίου σ' αυτή τή θέση, δηλαδή ή *όπή*, *ισοδυναμεί μέ ένα στοιχειώδες θετικό ηλεκτρικό φορτίο (+e)*. Η όπή μπορεί νά συμπληρωθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού ατόμου. Τότε όμως δημιουργείται όπή στό γειτονικό άτομο. Όποτε *ή όπή μπορεί νά μετακινείται* μέσα στον κρύσταλλο.

Σέ έναν καθαρό κρύσταλλο ήμιαγωγού ό αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων *είναι ίσος* μέ τόν αριθμό των όπών. Ο καθαρός κρύσταλλος γερμανίου στή συνηθισμένη θερμοκρασία έχει σέ κάθε κυβικό εκατοστόμετρο $2,36 \cdot 10^{13}$ ελεύθερα ηλεκτρόνια καί άλλες τόσες όπές. Αν συνδέσουμε τίς δύο άκρες μιās ράβδου από γερμάνιο μέ τούς πόλους μιās γεννήτριας, τότε μέσα στον ήμιαγωγό δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, πού ανα-

γκάζει *τά ηλεκτρόνια* νά κινούνται προς τό θετικό πόλο τῆς γεννήτριας καί *τίς όπές* νά κινούνται προς τόν άρνητικό πόλο της. Έτσι μέσα στον ήμιαγωγό δημιουργείται **ήλεκτρικό ρεύμα**. Η ένταση του ρεύματος είναι ίση με τό άθροισμα των δύο ίσων εντάσεων, πού αντιστοιχοϋν στά δύο ρεύματα πού δημιουργοϋνται από τήν κίνηση των ηλεκτρονίων καί των όπών.

δ. Οί ήμιαγωγοί προσμίξεως. Τό γερμάνιο καί τό πυρίτιο είναι τετρασθενή στοιχεΐα καί τά άτομά τους έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Τήσουμε γερμάνιο καί προσθέτουμε σ' αυτό μικρή ποσότητα από ένα πεντασθενές στοιχείο (As, P, Sb) πού στά άτομά του υπάρχουν πέντε ηλεκτρόνια σθένους. Όταν αυτό τό υλικό κρυσταλλωθεί, παίρνομε έναν **ήμιαγωγό n** πού έχει τόσα παραπάνω ελεύθερα ηλεκτρόνια, όσα είναι τά άτομα του πεντασθενούς στοιχείου στον κρύσταλλο. Τό σύμβολο n φανερώνει τήν παρουσία ελεύθερων ηλεκτρονίων (από τό negativ = άρνητικός). Αντίθετα, αν νοθεύσουμε τόν κρύσταλλο του γερμανίου με άτομα ενός τρισθενούς στοιχείου (B, Al, Ga) πού στά άτομά του υπάρχουν τρία ηλεκτρόνια σθένους, τότε παίρνομε έναν **ήμιαγωγό p** πού έχει τόσες παραπάνω εϋκίνητες όπές, όσα είναι τά άτομα του τρισθενούς στοιχείου στον κρύσταλλο (σχ. 94).



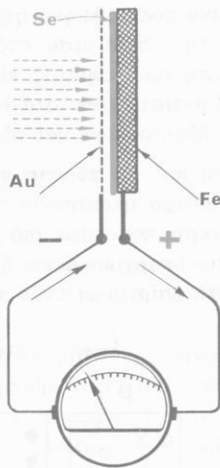
Σχ. 94. Σχηματική παράσταση ήμιαγωγού p καί ήμιαγωγού n.

Οί ήμιαγωγοί προσμίξεως (δηλαδή νοθευμένοι κρύσταλλοι ήμιαγωγών) έχουν σήμερα πολλές καί σημαντικές εφαρμογές, π.χ. χρησιμοποιοϋνται ως ξηροί άνορθωτές, ως τρανζίστορ στά ραδιόφωνα, στά μαγνητόφωνα, στούς ηλεκτρονικούς ύπολογιστές κ.ά.

69. Φωτοστοιχείο

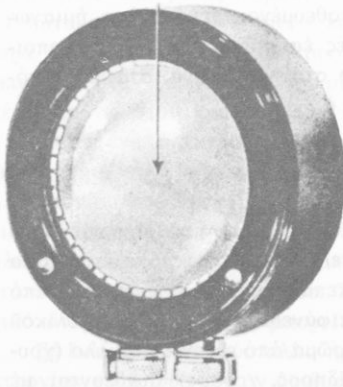
Τό **φωτοστοιχείο** είναι μιά εφαρμογή των ιδιοτήτων πού έχουν οί ήμιαγωγοί. Στην πράξη τό φωτοστοιχείο άποτελείται συνήθως από ένα δίσκο σιδήρου πού ή μιά επιφάνειά του είναι σκεπασμένη με ένα στρώμα από ήμιαγωγό υλικό (σελήνιο ή πυρίτιο). Η επιφάνεια του ήμιαγωγού υλικού είναι σκεπασμένη με ένα λεπτό διαφανές στρώμα από ευγενές μέταλλο (χρυσό ή λευκόχρυσο). Τά δύο ηλεκτρόδια (σίδηρος, χρυσός) συνδέονται με εϋαΐσθητο γαλβανόμετρο. (σχ. 95).

Όταν πάνω στον ήμιαγωγό πέφτει φώς, τότε μέσα στον ήμιαγωγό δημιουργοϋνται *ζεύγη ηλεκτρικών φορέων*, δηλαδή ηλεκτρόνια καί όπές. Τά ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στή μιά άκρη του ήμιαγωγού καί οί όπές στήν



Σχ. 95. Τό φωτοστοιχειο είναι γεννήτρια που μετατρέπει τή φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

φωτοευαίσθητη επιφάνεια



Σχ. 96. Η πρόσοψη του φωτοστοιχειού.

φωτοστήλης φτάνει σε 15%. Σήμερα φωτοστήλες χρησιμοποιούνται κυρίως στους τεχνητούς δορυφόρους και στα διαστημόπλοια. Αυτές οι φωτο-

άλλη άκρη του. Έτσι στους δύο άκροδέκτες του φωτοστοιχειού αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού και τό κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, που ή έντασή του είναι ανάλογη μέ τή φωτεινή ροή που πέφτει πάνω στό φωτοστοιχειο. Ωστε:

Τό φωτοστοιχειο λειτουργεί ως γεννήτρια, στην οποία ή ενέργεια των φωτονίων μετατρέπεται άμέσως σε ηλεκτρική ενέργεια.

Έφαρμογές του φωτοστοιχειού. Τό φωτοστοιχειο χρησιμοποιείται στην φωτομετρία και σε πρακτικές εφαρμογές, όπως π.χ. για τόν προσδιορισμό του φωτισμού όταν φωτογραφίζουμε, για τή ρύθμιση τής λειτουργίας εγκαταστάσεων, για τήν καταμέτρηση ανθρώπων ή αντικειμένων που περνούν εμπρός από τό φωτοστοιχειο (σχ. 96). Στην τελευταία περίπτωση μιά δέσμη φωτεινών ή άορατων υπέρυθρων ακτίνων πέφτει στό φωτοστοιχειο και δημιουργεί ένα φωτοηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό καταργείται κάθε φορά που ένα άδιαφανές σῶμα περνάει εμπρός από τό φωτοστοιχειο. Μιά κατάλληλη ηλεκτρομηχανική διάταξη αυτόματα μετράει πόσες φορές καταργείται τό ρεύμα.

Φωτοστήλη. Αν συνδέσουμε κατά σειρά πολλά φωτοστοιχεια σχηματίζουμε μιά φωτοστήλη (ή ήλιακή συστοιχία) που μπορεί νά μετατρέπει άμέσως τήν ενέργεια του ήλιακου φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση τής

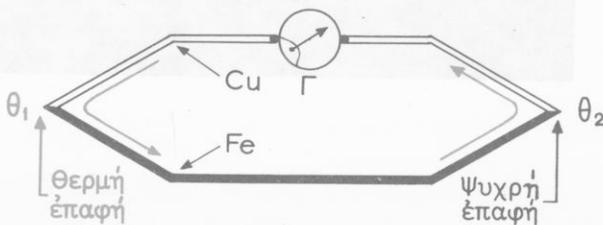
στήλες παράγουν τήν ἠλεκτρική ἐνέργεια πού χρειάζονται οἱ διάφορες συσκευές γιά τή λειτουργία τους. Οἱ φωτοστήλες πού ὑπάρχουν στό δορυφόρο ἤ στό διαστημόπλοιο ἔχουν ὀλική ἰσχύ πού φτάνει σέ ἀρκετές εκατοντάδες βάτ.

70. Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

“Όταν φέρουμε σέ στενή ἐπαφή δύο διαφορετικά μέταλλα (π.χ. σίδηρο καί χαλκό), τότε τά δύο μέταλλα ἀποκοτῶν *ἐτερόζῶμα ἠλεκτρικά φορτία*. Ἐτσι μεταξύ τῶν δύο μετάλλων δημιουργεῖται μιά διαφορά δυναμικοῦ πού ὀνομάζεται *τάση ἐπαφῆς*. Τό φαινόμενο αὐτό εἶναι γενικό καί ὀφείλεται στή μετάβαση ὀρισμένου ἀριθμοῦ ἠλεκτρονίων ἀπό τό ἕνα μέταλλο στό ἄλλο. Ὡστε:

“Όταν ἔρχονται σέ ἐπαφή δύο διαφορετικά μέταλλα, τότε μεταξύ τῶν δύο μετάλλων ἀναπτύσσεται τάση ἐπαφῆς, πού ἐξαρτᾶται ἀπό τή φύση τῶν μετάλλων καί τή θερμοκρασία.

α. Θερμοηλεκτρικό στοιχεῖο. Σχηματίζουμε κύκλωμα ἀπό δύο διαφορετικά μέταλλα, π.χ. ἀπό σίδηρο καί χαλκό (σχ. 97). Ἐτσι σέ δύο σημεία τοῦ κυκλώματος τά δύο μέταλλα βρίσκονται σέ ἐπαφή καί ἐπομένως στά σημεία αὐτά ἀναπτύσσονται τάσεις ἐπαφῆς. “Όταν οἱ δύο ἐπαφές ἔχουν τή ἴδια θερμοκρασία, οἱ δύο τάσεις ἐπαφῆς εἶναι ἴσες καί ἀντίθετες καί τό κύκλωμα δέν διαρρέεται ἀπό ρεῦμα. Ἄν ὅμως οἱ δύο ἐπαφές ἔχουν διαφορετικές θερμοκρασίες θ_1 καί θ_2 , τότε οἱ δύο τάσεις ἐπαφῆς εἶναι ἄνισες καί τό κύκλωμα διαρρέεται ἀπό ρεῦμα (*θερμοηλεκτρικό ρεῦμα*). Σ’ αὐτή τήν περίπτωση στό κύκλωμα ἀναπτύσσεται ἠλεκτρεγερτική δύναμη πού ὀνομάζεται *θερμοηλεκτρική τάση*. Τό ζεῦγος τῶν δύο διαφορετικῶν μετάλλων, πού οἱ δύο ἐπαφές τους ἔχουν διαφορετικές θερμοκρασίες ὀνομάζεται *θερμοηλεκτρικό στοιχεῖο* καί ἀποτελεῖ μιά *γεννήτρια*. Τό φαινόμενο πού παρατηροῦμε στό θερμοηλεκτρικό στοιχεῖο ὀνομάζεται *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο*. Ὡστε:



Σχ. 97. Θερμοηλεκτρικό στοιχεῖο.

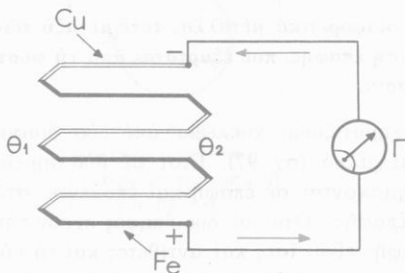
Στό θερμοηλεκτρικό στοιχείο αναπτύσσεται θερμοηλεκτρική τάση ($U_{\text{θερμ}}$) πού είναι ανάλογη μέ τή διαφορά θερμοκρασίας ($\Delta\theta$) τών δύο επαφών καί εξαρτάται από τή φύση τών δύο μετάλλων.

$$\text{θερμοηλεκτρική τάση } U_{\text{θερμ}} = C \cdot \Delta\theta$$

όπου C είναι ένας συντελεστής πού ονομάζεται *συντελεστής θερμοηλεκτρικής τάσεως* καί εξαρτάται από τή φύση τών δύο μετάλλων. Από τήν παραπάνω εξίσωση βρίσκουμε $C = U_{\text{θερμ}}/\Delta\theta$. Άρα μονάδα συντελεστή θερμοηλεκτρικής τάσεως είναι 1 Volt/grad. Για τό θερμοηλεκτρικό ζεύγος σίδηρος - χαλκός πού πήραμε γιά παράδειγμα είναι $C = 16 \cdot 10^{-5}$ V/grad.

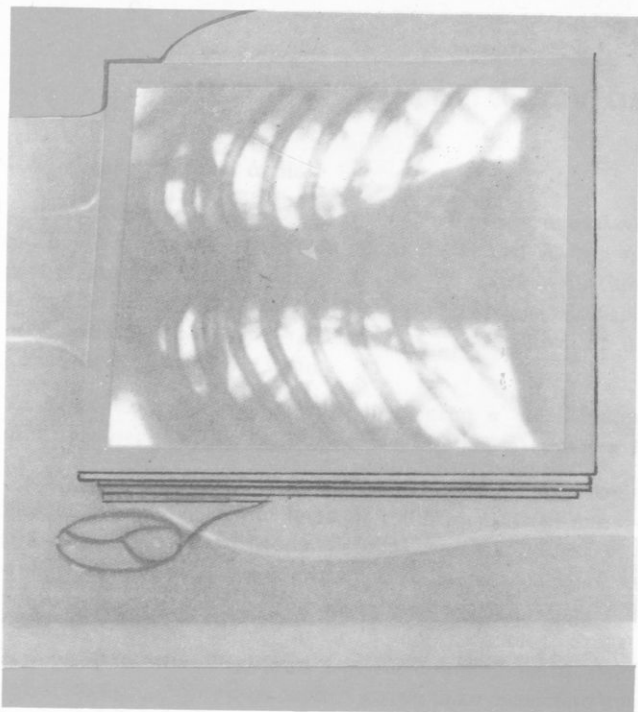
β. Θερμοηλεκτρική στήλη.

Άν συνδέσουμε κατά σειρά πολλά θερμοηλεκτρικά στοιχεία σχηματίζουμε μιά *θερμοηλεκτρική στήλη* (σχ. 98). Αιτή, όταν συνδέεται μέ ευαίσθητο άμπερόμετρο (π.χ. μιλλιαμπερόμετρο), μπορεί νά άποδείξει πολύ μικρές διαφορές θερμοκρασίας. Οι θερμοηλεκτρικές στήλες χρησιμοποιούνται σέ εργαστηριακές μετρήσεις καί στήν

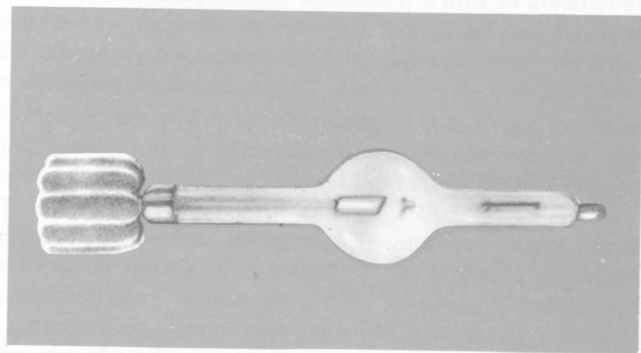


Σχ. 98. Θερμοηλεκτρική στήλη.

τεχνική γιά τή λειτουργία αυτόματων διατάξεων καί γιά τή μέτρηση θερμοκρασιών (θερμοηλεκτρικά θερμόμετρα).



Ακτινοσκόπηση θώρακα



Σωλήνας Coolidge

Ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων

71. Ἡ ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων

Τά ἀέρια στή συνηθισμένη φυσική τους κατάσταση ἀποτελοῦνται ἀπό οὐδέτερα μόρια ἢ ἄτομα. Ἐνα τέτοιο ἀέριο δέν μπορεῖ νά ἔχει ἠλεκτρική ἀγωγιμότητα, γιατί λείπουν οἱ φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, δηλαδή *τά ἠλεκτρόνια ἢ τά ἰόντα*. Ἐν ὅμως μέσα σέ ἕνα ἀέριο ὑπάρχουν ἐλεύθεροι φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, τότε αὐτό τό ἀέριο, ὅταν βρεθεῖ μέσα σέ ἠλεκτρικό πεδίο, ἀποκτᾷ *ἀγωγιμότητα*. Ὡστε:

Τά ἀέρια ἀποκτοῦν ἀγωγιμότητα, ὅταν μέσα σ' αὐτά δημιουργηθοῦν ἐλεύθεροι φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, δηλαδή ἠλεκτρόνια ἢ ἰόντα.

α. Ἴονισμός ἐνός ἀερίου. Ὁ σχηματισμός ἰόντων ἀπό οὐδέτερα ἄτομα (ἢ μόρια) τοῦ ἀερίου ὀνομάζεται *ἰονισμός* τοῦ ἀερίου. Ὅταν ἀπό ἕνα ἄτομο ξεφύγει ἕνα ἠλεκτρόνιο, τό ἄτομο μεταβάλλεται σέ *θετικό ἰόν*. Τό ἠλεκτρόνιο πού ξέφυγε συνήθως κολλᾷει πάνω σέ ἕνα ἄλλο ἄτομο, πού μεταβάλλεται σέ *ἀρνητικό ἰόν*.

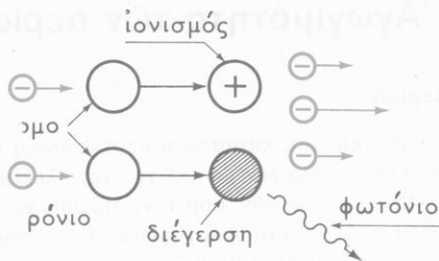
Γιά νά ἰονισθεῖ ἕνα οὐδέτερο ἄτομο (ἢ μόριο), πρέπει τό ἄτομο νά πάρει ὀρισμένη ἐνέργεια, πού ὀνομάζεται *ἐνέργεια ἰονισμού*. Αὐτή τήν ἐνέργεια τήν παίρνει τό ἄτομο, ὅταν συγκρουστεῖ μέ ἕνα ἄλλο σωματίδιο πού ἔχει μεγάλη κινητική ἐνέργεια (*ἰονισμός κρούσεως*), ἢ ὅταν τό ἄτομο ἀπορροφήσει ἐνέργεια ἀπό μιᾶ ἀκτινοβολία (*ἰονισμός ἀπό ἀπορρόφηση ἀκτινοβολίας*).

Συνήθως, ὅταν ἕνα ἀέριο παρουσιάζει ἀγωγιμότητα, τότε λέμε ὅτι συμβαίνει *ἠλεκτρική ἐκκένωση*.

β. Μορφές ἀγωγιμότητας τῶν ἀερίων. Ἀνάλογα μέ τόν τρόπο μέ τόν ὁποῖο σχηματίζονται οἱ ἠλεκτρικοί φορεῖς διακρίνουμε δύο περιπτώσεις ἀγωγιμότητας τῶν ἀερίων, *τήν αὐτοτελή καί τή μὴ αὐτοτελή ἀγωγιμότητα*.

Ἡ ἀγωγιμότητα ὀνομάζεται *αὐτοτελής*, ὅταν οἱ φορεῖς τῶν ἠλεκτρικῶν φορτίων (ἠλεκτρόνια, ἰόντα) παράγονται μέσα στό ἀέριο κατά τή διάρκεια τοῦ φαινομένου τῆς ἀγωγιμότητας μέ τήν ἐπίδραση *ἠλεκτρικοῦ πεδίου*, χωρίς τήν ἐπέμβαση ἐξωτερικοῦ αἰτίου. Ἀντίθετα ἡ ἀγωγιμότητα ὀνομάζεται *μὴ αὐτοτελής*, ὅταν ἡ παραγωγή τῶν ἠλεκτρικῶν φορέων ὀφείλεται σέ *ἐξωτερικά αἴτια*, ἄσχετα μέ τό φαινόμενο τῆς ἀγωγιμότητας. Σ' αὐτή τήν περίπτωση ὁ ἰονισμός τοῦ ἀερίου γίνεται μέ ἐνέργεια πού προσφέρεται στά ἄτομα (ἢ μόρια) τοῦ ἀερίου ἀπέξω. Ὡστε:

Μέσα σέ ἕνα ἀέριο παράγονται φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων (ἠλεκτρόνια, ἰόντα) μέ τήν ἐπίδραση ἠλεκτρικοῦ πεδίου (αὐτοτελής ἀγωγιμότητα) ἢ μέ τήν ἐπίδραση ἐξωτερικῶν αἰτίων (μὴ αὐτοτελής ἀγωγιμότητα).



Από τη σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο προκαλείται η ιονισμός του ατόμου ή διέγερση του ατόμου.

Τα ακόλουθα φαινόμενα:

1) Αν ο ηλεκτρικός φορέας, π.χ. ένα ηλεκτρόνιο, έχει μεγάλη κινητική ενέργεια, τότε κατά τη σύγκρουση του ηλεκτρονίου με ένα άτομο (ή μόριο) του αερίου προκαλείται *ιονισμός* του ατόμου, δηλαδή ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια ξεφεύγουν από το άτομο, και έτσι το άτομο μεταβάλλεται σε θετικό ιόν (σχ. 99).

Αν το ηλεκτρόνιο δεν έχει μεγάλη κινητική ενέργεια, τότε κατά τη σύγκρουσή του με ένα άτομο του αερίου, το άτομο *παίρνει* ενέργεια και περνάει σε μια κατάσταση *διεγέρσεως*, δηλαδή σε μια ασταθή κατάσταση. Η κατάσταση διαρκεί ελάχιστο χρόνο (περίπου 10^{-8} sec) και τότε απονέμεται στην κανονική του κατάσταση *αποβάλλοντας* την ενέργεια ή μορφή *φωτονίου*.

Αν η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου δεν είναι ικανή να προκαλέσει ιονισμό ή διέγερση του ατόμου, τότε η σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο (ή μόριο) του αερίου είναι μία *άπλη έλαστική κρούση*. Ωστε:

Η **φωτοβολία του αερίου κατά την αυτοτελή αγωγιμότητα οφείλεται στην διέγερση των ατόμων του αερίου, ή όποια προκαλείται, όταν τα άτομα (ή μόρια) του αερίου συγκρούονται με ηλεκτρόνια ή ιόντα που έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια.**

Η ενέργεια που μεταβιβάζεται στην αγωγιμότητα είναι η *εκκένωση αΐγλης*. Διάρκειας ιονισμός του αέρα. Αν μέσα στον αέρα αφήσουμε ένα ηλεκτρόνιο και μονωμένο ηλεκτροσκόπιο, παρατηρούμε ότι έπειτα από λίγο το ηλεκτροσκόπιο χάνει το θετικό ή αρνητικό φορτίο του. Συμβαίνει, γιατί πάντοτε μέσα στον αέρα υπάρχουν *θετικά και αρνητικά ιόντα*. Ο αριθμός των ιόντων που υπάρχουν μέσα στον αέρα μεταβάλλεται με το ύψος πάνω από την επιφάνεια της Γης. Σε ύψος πάνω από 100 km

a. Φωτεινά φαινόμενα κατά την αυτοτελή αγωγιμότητα. Συνήθως κατά την αυτοτελή αγωγιμότητα εμφανίζονται *φωτεινά φαινόμενα*. Η φωτοβολία του αερίου ερμηνεύεται ως εξής: Όταν οι φορείς ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρονία ή ιόντα) κινούνται μέσα στο αέριο με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, τότε μπορεί να

υπάρχει ένα στρώμα της ατμόσφαιρας που ονομάζεται **ιονόσφαιρα** και σιάζει ισχυρό ιονισμό. Αυτός οφείλεται στις *υπεριώδεις ήλιακές ακτι* *σέ ηλεκτρόνια* που εκπέμπονται από τον "Ήλιο και σε μία ιδιαίτερη βολία, που φτάνει στον πλανήτη μας από όλα τα σημεία του άστρ. στήματος, και ονομάζεται *κοσμική ακτινοβολία* ή *κοσμικές ακτίνες*.

I. 'Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι πάντοτε ιονισμένος.

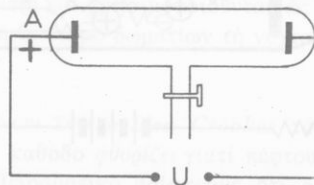
II. 'Ο ιονισμός του αέρα οφείλεται σε ιονισμό κρούσεως κσ' *σμο από απορρόφηση ακτινοβολίας.*

72. Ήλεκτρικές εκκενώσεις μέσα σε άραιομένα αέρια

a. Έκκένωση αϊγλης. Ένας γυάλινος σωλήνας (σχ. 100) ε̄ *ἄκρες του δύο ηλεκτρόδια, που τά ονομάζουμε αντίστοιχα ἄνοδο* *κάθοδο (Κ).* Εφαρμόζουμε στά δύο ηλεκτρόδια μία ψηλή συνεχή *μερικῶν χιλιάδων βόλτ.* Στην ἀρχή ὁ σωλήνας περιέχει αέρα μέ *θισμένη ατμοσφαιρική πίεση.* Τότε ὁ αέρας που εἶναι μέσα στό *δέν ἔχει ἀγωγιμότητα καί στό κύκλωμα δέν κυκλοφορεῖ ρεῦμα.* ἄεραντλία ἀρχίζουμε νά ἐλαττώνουμε προοδευτικά τήν πίεση τῆ *"Όταν ἡ πίεση ἐλαττωθεῖ ἀρκετά (γύρω στά 40 mm Hg), τότε μέσα* *λήνα συμβαίνει ἡλεκτρική ἐκκένωση καί παρατηροῦμε ὅτι μεταξύ* *ἡλεκτροδίων σχηματίζονται φωτεινά νήματα, που δίνουν τήν ἐ* *ἡλεκτρικοῦ σπινθήρα (βλ. εἰκόνα ἐκτός κειμένου). Ἡ πίεση στι,* *ἀρχίζει ἡ ἡλεκτρική ἐκκένωση δέν εἶναι ὀρισμένη, γιατί ἐξαρτά* *τό μήκος τοῦ σωλήνα καί τήν τάση που εφαρμόζεται στά ἡλεκτρό*

"Αν ἡ πίεση ἐλαττωθεῖ ἀκόμη περισσότερο (γύρω στά 10 *τότε τά φωτεινά νήματα γίνονται πλατύτερα καί ἀποτελοῦν μία* *στήλη, που λέγεται θετική στήλη καί γεμίζει ὄλο τό σωλήνα (αἶγλη,* *ὁ σωλήνας ἐκπέμπει ὁμοιόμορφο φῶς μέ χρῶμα κοκκινωπό. Σ' αὐτή* *τῆς ἐκκενώσεως ὁ σωλήνας ονομάζεται σωλήνας Geissler. Ἡ θετικ* *χωρίζεται ἀπό τήν κάθοδο μέ μία σκοτεινή περιοχὴ ἐνῶ πολὺ κον* *κάθοδο ὑπάρχει ἓνα φωτεινὸ* *στρώμα αέρα μέ κυανὸ χρῶμα,* *ἡ ἀρνητικὴ αἶγλη.*

"Αν ἐξακολουθήσουμε τήν ἀ- *ραιώση τοῦ αέρα, ἡ θετικὴ στή-* *λη ἀρχίζει νά ὀπισθοχωρεῖ πρὸς* *τήν ἄνοδο καί ἐμφανίζονται μέ-* *σα στό σωλήνα σκοτεινές πε-* *ριοχές. Ἡ μορφή τῆς ἐκκενώ-* *σεως που παρατηροῦμε μέ αὐτό*



Σχ. 100. Σχηματικὴ διάταξη γιὰ τὴν ἡλεκτρικὴ ἐκκενώσεως μέσα σὲ ἄ- *ἀέριο.*

τό πείραμα ονομάζεται *εκκένωση αΐγλης*.

Όταν η πίεση του αέρα μέσα στο σωλήνα γίνει πολύ μικρή (μικρότερη από 0,05 mm Hg), τότε το ρεύμα εξακολουθεί να κυκλοφορεί στο κύκλωμα, αλλά όλα τα φωτεινά φαινόμενα *εξαφανίζονται*. Το έσωτερικό του σωλήνα είναι σκοτεινό και μόνο τα τοιχώματα του σωλήνα που βρίσκονται άπεναντι από την κάθοδο *φθορίζουν* και εκπέμπουν ένα ασθενές πρασινωπό φως. Αυτός ο φθορισμός φανερώνει ότι πάνω σ' αυτό το τμήμα του γυαλιού πέφτουν *άορατες ακτίνες* που προέρχονται από την κάθοδο και γι' αυτό ονομάστηκαν *καθοδικές ακτίνες*. Τότε ο σωλήνας ονομάζεται *σωλήνας Crookes*.

Τά ίδια φαινόμενα παρατηρούμε και με οποιοδήποτε άλλο αέριο με τη διαφορά ότι το χρώμα που εκπέμπει ή θετική στήλη εξαρτάται από τη φύση του αερίου.

β. Μηχανισμός της εκκένωσης αΐγλης. Όπως ξέρουμε διάφορα αίτια προκαλούν πάντοτε ιονισμό του αέρα. Έπομένως στον αέρα που αρχικά είναι μέσα στο σωλήνα υπάρχει ένας πολύ μικρός αριθμός *θετικών* και *αρνητικών ιόντων* και *ελεύθερων ηλεκτρονίων*. Το ίδιο συμβαίνει και σε κάθε άλλο αέριο. Άς θεωρήσουμε ότι μέσα στο σωλήνα υπάρχει ένα αέριο με μικρή πίεση και ότι πολύ κοντά στην κάθοδο βρίσκεται ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο (σχ. 100α). Με την επίδραση του ισχυρού *ηλεκτρικού πεδίου* το ηλεκτρόνιο αρχίζει να κινείται προς την άνοδο με *επιτάχυνση*. Άλλά στην πορεία του προς την άνοδο *συγκρούεται* με μόρια του αερίου. Όταν η *κινητική ενέργεια* του ηλεκτρονίου δέν είναι αρκετά μεγάλη, τότε κατά τη σύγκρουσή του με το μόριο προκαλεί μόνο *διέγερση* του μορίου, δηλαδή το κάνει ικανό να εκπέμψει φωτεινή ακτινοβολία. Όταν όμως το ηλεκτρόνιο αποκτήσει μεγάλη *κινητική ενέργεια*, τότε κατά τη σύγκρουσή του με ένα μόριο προκαλεί *ιονισμό* του μορίου και έτσι *σχηματίζονται* ένα *θετικό ιόν* και ένα *ελεύθερο ηλεκτρόνιο*,



Σχ. 100α. Από τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του αερίου προκύπτουν ηλεκτρόνια που κατευθύνονται προς την άνοδο Α και θετικά ιόντα που κατευθύνονται προς την κάθοδο Κ.

ση του ηλεκτρικού πεδίου αρχίζει και αυτό να κινείται προς την άνοδο προκαλώντας στην πορεία του *διέγερση* των μορίων και *σχηματισμό* νέων *θετικών ιόντων* και *ελεύθερων ηλεκτρονίων*. Έτσι τελικά φτάνει στην άνοδο ένας *μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων*.

Μέσα στο αέριο σχηματίστηκαν και πολλά θετικά ιόντα. Αυτά, με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, κινούνται προς την κάθοδο. Έπειδή όμως έχουν μεγάλη μάζα, δέν αποκοτούν μεγάλη ταχύτητα και έπομένως δέν έχουν τήν ίκανότητα νά προκαλέσουν ιονισμό. Τά θετικά ιόντα, όταν φτάσουν στην κάθοδο, παίρνουν από αυτή ηλεκτρόνια και γίνονται ουδέτερα μόρια. Μερικά όμως θετικά ιόντα κατά τή σύγκρουσή τους με τήν κάθοδο αναγκάζουν μερικά ηλεκτρόνια νά ξεφύγουν από τήν κάθοδο (δευτερογενή ηλεκτρόνια). Αυτά τά ηλεκτρόνια κατά τήν πορεία τους προς τήν άνοδο δημιουργούν τά ίδια πάλι φαινόμενα. Έτσι ή εκκένωση διατηρείται όσο χρόνο ύπάρχει τό ηλεκτρικό πεδίο. Παρατηρούμε ότι οί φορείς των ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρόνια, θετικά ιόντα) παράγονται κατά τή διάρκεια του φαινομένου τής αγωγιμότητας. Ωστε:

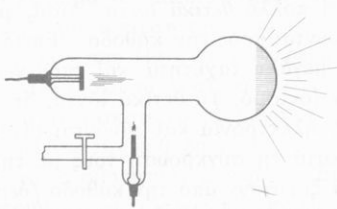
Η εκκένωση αίγλης οφείλεται στον ιονισμό του αερίου, που προκαλείται από τις συνεχείς συγκρούσεις των μορίων του αερίου με ηλεκτρόνια, τά όποια με τήν επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου αποκοτούν μεγάλη κινητική ενέργεια.

γ. Έφαρμογές τής εκκενώσεως αίγλης. Η εκκένωση αίγλης είναι μία μορφή αγωγιμότητας των αερίων που εμφανίζεται σε άερια με μικρή πίεση. Σήμερα σε πολλές εφαρμογές εκμεταλλευόμαστε τήν εκκένωση αίγλης. Στή φασματοσκοπία χρησιμοποιούμε ειδικούς σωλήνες Geissler που περιέχουν ένα άεριο με μικρή πίεση (περίπου 5 mm Hg). Τό φως που εκπέμπει τό άεριο δίνει γραμμικό φάσμα, που είναι χαρακτηριστικό για κάθε άεριο. Οί σωλήνες των φωτεινών διαφημίσεων είναι σωλήνες Geissler, που περιέχουν διάφορα άερια, ανάλογα με τό χρώμα του φωτός που θέλουμε. Η πίεση του αερίου μέσα στο σωλήνα είναι μικρή (περίπου 10 mm Hg). Ως άσθενείς φωτεινές πηγές χρησιμοποιούνται μικροί λαμπτήρες αίγλης που περιέχουν ένα ευγενές άεριο (νέο) με χαμηλή πίεση. Τά δύο ηλεκτρόδια είναι πολύ κοντά τό ένα με τό άλλο και είναι σπειροειδή ή μικρά πλακίδια (συνήθως σε σχήμα σταυρού). Λειτουργούν με τή συνηθισμένη τάση (220 V), έχουν πολύ μικρή κατανάλωση και χρησιμοποιούνται ως δείκτες σε διάφορες συσκευές, για τόν άσθενή φωτισμό δωματίων τή νύχτα κ.ά.

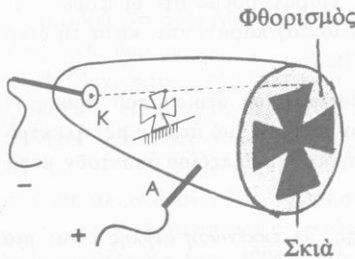
73. Καθοδικές άκτίνες

α. Ιδιότητες των καθοδικών άκτίνων Στο σωλήνα Crookes τό τμήμα του γυαλιού που είναι άπέναντι στην κάθοδο φθορίζει γιατί πέφτουν πάνω του οί καθοδικές άκτίνες (σχ. 101). Πειραματικά βρίσκουμε ότι οί καθοδικές άκτίνες έχουν τίσ έξής ιδιότητες:

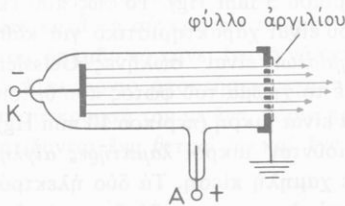
1. Προκαλούν τό φθορισμό πολλών σωμάτων, π.χ. του γυαλιού, του άσβεστίου, του κυανιούχου βαριολευκοχρύσου κ.ά.



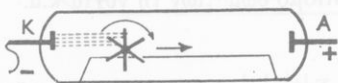
Σχ. 101. Σωλήνας Crookes για την παραγωγή καθοδικών ακτίνων.



Σχ. 102. Ευθύγραμμη διάδοση των καθοδικών ακτίνων.



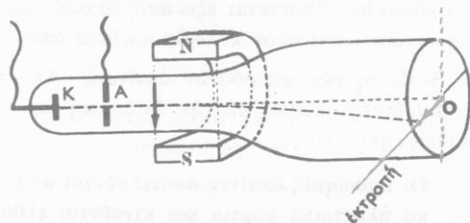
Σχ. 102α. Οι καθοδικές ακτίνες περνούν μέσα από λεπτό φύλλο άλουμινίου.



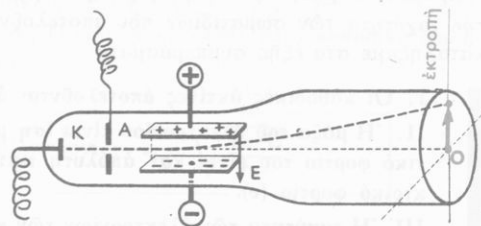
Σχ. 103. Μηχανικά αποτελέσματα των καθοδικών ακτίνων.

2. Προσβάλλουν *τή φωτογραφική πλάκα* και προκαλούν χημικές αλλοιώσεις σε όρισμένα σώματα, π.χ. γυαλί που περιέχει μόλυβδο (κρύσταλλο) μαυρίζει, γιατί *έλευθερώνεται μόλυβδος*.
3. Φεύγουν *κάθετα* από την *κάθοδο* και *διαδίδονται ευθύγραμμα*, ανεξάρτητα από *τή θέση* που έχει ή *άνοδος*. "Αν στην πορεία των καθοδικών ακτίνων βάλουμε ένα σώμα, τότε πίσω από τό σώμα *σχηματίζεται ή σκιά* του σώματος πάνω στο *τοιχώμα* του σωλήνα που *φθορίζει* (σχ. 102).
4. "Όταν *πέφτουν* πάνω σε ένα σώμα, προκαλούν *θέρμανση* του σώματος, π.χ. *μπορούν* να *λευκοκυρώσουν* ένα *έλασμα* από *λευκόχρυσο*.
5. "Έχουν *διεισδυτική ικανότητα*. Τό *τοιχώμα* του σωλήνα που είναι *άπέναντι* από *τήν κάθοδο* έχει *μικρό άνοιγμα* που *κλείνεται* με ένα *λεπτό φύλλο* από *άλουμινίο* (πάχους 0,001 mm). Οι *καθοδικές ακτίνες* περνούν μέσα από *τή μάζα* του *άλουμινίου* και *βγαίνουν* στον *αέρα*, ό *όποιος* *φωτοβολεί* σε *άποσταση* 5 cm από *τό τοίχωμα* του σωλήνα (σχ. 102α).
6. Προκαλούν *μηχανικά φαινόμενα*. "Αν *οι καθοδικές ακτίνες* πέφτουν πάνω *στά πτερύγια* ενός *ευκίνητου μύλου*, αυτός *άρχίζει* να *περιστρέφεται* (σχ. 103).
7. *Μέ* *τήν επίδραση μαγνητικού πεδίου* *έκτρέπονται* από *τήν ευθύγραμμη τροχιά* τους. *Μέ* *ένα διάφραγμα* που έχει *μικρή τρύπα* δημιουργούμε *μιά οριζόντια λεπτή δέσμη* καθοδικών ακτίνων που *σχηματίζει* ένα *φωτεινό σημείο* πάνω στο *τοιχώμα* που *φθορίζει* (σχ. 104).

Όταν οι καθοδικές ακτίνες της δέσμης είναι κάθετες στις δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, παρατηρούμε ότι οι καθοδικές ακτίνες εκτρέπονται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Αυτή η εκτροπή είναι ίδια με την εκτροπή που θα πάθαινε από αυτό το μαγνητικό πεδίο ένα ευθύγραμμο ρεύμα που θα είχε φορά (συμβατική) αντίθετη με τη φορά των καθοδικών ακτίνων.

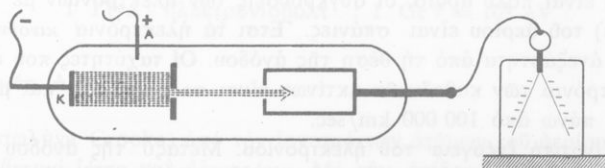


Σχ. 104. Έκτροπή των καθοδικών ακτίνων με την επίδραση μαγνητικού πεδίου.



Σχ. 105. Έκτροπή των καθοδικών ακτίνων με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

8. Με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου εκτρέπονται από την ευθύγραμμη τροχιά τους. Αυτή η εκτροπή φαίνεται, αν μέσα στο σωλήνα υπάρχει ένας πυκνωτής (σχ. 105). Οι καθοδικές ακτίνες μιās λεπτής δέσμης περνώντας μέσα από το ομογενές ηλεκτρικό πεδίο εκτρέπονται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου, σαν να έλκονται από το θετικό όπλισμό του πυκνωτή.
9. Μεταφέρουν αρνητικά ηλεκτρικά φορτία. Αυτό φαίνεται από την εκτροπή που παθαίνουν οι καθοδικές ακτίνες με την επίδραση μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου, τό διαπιστώνουμε όμως και ως εξής: Μέσα στο σωλήνα και απέναντι από την κάθοδο υπάρχει ένας μονωμένος μεταλλικός κύλινδρος (σχ. 106). Αυτός συνδέεται με ηλεκτρο-



Σχ. 106. Οι καθοδικές ακτίνες μεταφέρουν αρνητικά φορτία.

σκόπιο πού βρίσκεται έξω από τό σωλήνα. "Όταν οί καθοδικές άκτίνες πέφτουν μέσα στόν κύλινδρο, αυτός άποκτá άρνητικό φορτίο.

β. Φύση τών καθοδικών άκτίνων. "Από τήν έκτροπή πού παθαίνουν οί καθοδικές άκτίνες μέ τήν επίδραση μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου άποδείχτηκε ότι:

Οί καθοδικές άκτίνες άποτελοϋνται άπό σωματίδια πού έχουν άρνητικό ηλεκτρικό φορτίο καί κινοϋνται εϋθύγραμμα.

Πειραματικά μποροϋμε νά μετρήσουμε *τή μάζα, τό ηλεκτρικό φορτίο καί τήν ταχύτητα* τών σωματιδίων πού άποτελοϋν τις καθοδικές άκτίνες. "Ετσι καταλήξαμε στά εξής συμπεράσματα:

I. Οί καθοδικές άκτίνες άποτελοϋνται άπό ηλεκτρόνια.

II. "Η μάζα τοϋ ηλεκτρονίου είναι ίση μέ $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg καί τό άρνητικό φορτίο του είναι κατ' άπόλυτη τιμή ίσο μέ τό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (e).

III. "Η ταχύτητα τών ηλεκτρονίων τών καθοδικών άκτίνων εξαρτάται άπό τήν τάση πού ύπάρχει μεταξύ τής άνόδου καί τής καθόδου.

μάζα ηλεκτρονίου	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
φορτίο ηλεκτρονίου	$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb

γ. Παραγωγή τών καθοδικών άκτίνων. Στο σωλήνα Crookes ή πίεση τοϋ αερίου είναι πολύ μικρή καί αντίθετα ή τάση πού εφαρμόζεται στά ηλεκτρόδια είναι πολύ μεγάλη. Πειραματικά άποδεικνύεται ότι πολύ κοντά στήν κάθοδο ύπάρχει μιά περιοχή όπου τό ηλεκτρικό πεδίο έχει *μεγάλη ένταση*. Μέσα σ' αϋτή τήν περιοχή μερικά άτομα τοϋ αερίου *ιονίζονται*, δηλαδή χάνουν συνήθως ένα ηλεκτρόνιο κατά άτομο. Τά ηλεκτρόνια πού ελευθερώνονται μέσα σ' αϋτή τήν περιοχή πολύ γρήγορα *άποκτοϋν μεγάλη ταχύτητα* μέ διεϋθυνση *κάθετη στήν επιφάνεια τής καθόδου*, γιατί ή ένταση (\vec{E}) τοϋ ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη στήν επιφάνεια τής καθόδου. "Επειδή τό άέριο είναι πολύ άραιό, οί συγκρούσεις τών ηλεκτρονίων μέ τά άτομα (ή μόρια) τοϋ αερίου είναι *σπάνιες*. "Ετσι τά ηλεκτρόνια *κινοϋνται εϋθύγραμμα*, άνεξάρτητα άπό τή θέση τής άνόδου. Οί ταχύτητες πού άποκτοϋν τά ηλεκτρόνια τών καθοδικών άκτίνων είναι *πολύ μεγάλες* καί μπορεί νά φτάσουν πάνω άπό 100 000 km/sec.

δ. Κινητική ένέργεια τοϋ ηλεκτρονίου. Μεταξύ τής άνόδου καί τής καθόδου ύπάρχει ή τάση U, πού δημιουργεί τό ηλεκτρικό πεδίο. "Ενά ηλεκτρόνιο ξεκινάει άπό τήν επιφάνεια τής καθόδου χωρίς άρχική ταχύτητα.

Τό ηλεκτρόνιο, εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου, κινείται μέ επιτάχυνση καί ἄν στήν πορεία του δέ συγκρουστεῖ μέ μόρια τοῦ αἰρίου, φτάνει στήν ἄνοδο μέ *κινητική ἐνέργεια* $E_{κιν} = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$. Αὐτή ἡ ἐνέργεια εἶναι ἴση μέ τό ἔργο πού παράγεται ἀπό τό ηλεκτρικό πεδίο. Τό ἔργο αὐτό εἶναι κατ' ἀπόλυτη τιμή ἴσο μέ $e \cdot U$ καί, ἐπομένως, ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = e \cdot U \quad (1) \quad \text{καί} \quad \boxed{E_{κιν} = e \cdot U} \quad (2)$$

Ἀπό τήν ἐξίσωση (1) βρίσκουμε ὅτι ἡ ταχύτητα v πού ἀποκτᾶ τό ηλεκτρόνιο ἐξαρτᾶται ἀπό τήν τάση U πού ἐφαρμόζεται στόν καθοδικό σωλήνα καί δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

$$\boxed{\text{ταχύτητα ηλεκτρονίου} \quad v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m_e}}}$$

ε. Ἡ μονάδα ἐνέργειας ηλεκτρονιοβόλτ. Ἐάν στήν ἐξίσωση (2) βάλουμε $U = 1 \text{ V}$, βρίσκουμε

$$E_{κιν} = |e| \cdot U = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb} \cdot 1 \text{ V} \quad \text{καί} \quad E_{κιν} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

Αὐτή ἡ ἐνέργεια τοῦ ηλεκτρονίου εἶναι μιᾶ ἄλλη *μονάδα ἐνέργειας*, πού ὀνομάζεται **ηλεκτρονιοβόλτ** (1 eV, electron - Volt) καί ὀρίζεται ὡς ἐξῆς:

1 ηλεκτρονιοβόλτ (1 eV) εἶναι ἡ ἐνέργεια πού ἀποκτᾶ ἕνα ηλεκτρόνιο, ὅταν ἐπιταχύνεται ἀπό τάση πού εἶναι ἴση μέ 1 Volt.

$$\boxed{1 \text{ ηλεκτρονιοβόλτ (1eV)} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}}$$

Ἡ μονάδα ηλεκτρονιοβόλτ χρησιμοποιεῖται πολύ στήν Ἀτομική καί Πυρηνική Φυσική. Συνήθως χρησιμοποιοῦνται καί τά ἐξῆς πολλαπλάσια τῆς μονάδας ηλεκτρονιοβόλτ:

$$1 \text{ Μέγα - ηλεκτρονιοβόλτ} : 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ Γίγα - ηλεκτρονιοβόλτ} : 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

74. Θετικές ἀκτίνες

Στό σωλήνα Crookes ἀπό τόν ἰονισμό τῶν ἀτόμων τοῦ αἰρίου σχηματίζονται *θετικά ἰόντα* καί *ηλεκτρόνια*. Μέ τήν ἐπίδραση τοῦ ηλεκτρικού πεδίου τά θετικά ἰόντα κινοῦνται *πρός τήν κάθοδο*. Ὅπως ὅμως μάθαμε

πολύ κοντά στην κάθοδο υπάρχει μία περιοχή, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ μεγάλη. Μέσα σ' αυτήν την περιοχή, πού είναι μία ζώνη *ιονισμού* και *επιταχύνσεως*, επιταχύνονται όχι μόνο τά ηλεκτρόνια των καθοδικών ακτίνων, αλλά και τά θετικά ιόντα πού κινούνται προς την κάθοδο. Έτσι πολύ κοντά στην κάθοδο τά θετικά ιόντα αποκτούν *μεγάλη ταχύτητα* μέ δεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της καθόδου.

Αν ή κάθοδος έχει μικρές τρύπες, τότε μερικά από τά θετικά ιόντα πού κινούνται προς την κάθοδο περνούν μέσα από τίς τρύπες και εξακολουθούν



Σχ. 107. Οί θετικές ακτίνες είναι θετικά ιόντα.

νά κινούνται *εθύγραμμα* πίσω από την κάθοδο (σχ. 107). Αυτά τά θετικά ιόντα αποτελούν μία δέσμη ακτίνων πού ονομάζονται *θετικές ακτίνες* (ή και *διανλικές ακτίνες*). Η δέσμη των θετικών ακτίνων έχει μία *ασθενή φωτοβολία*.

α. Ίδιότητες των θετικών ακτίνων. Οί θετικές ακτίνες μέ

τήν επίδραση *μαγνητικού* ή *ηλεκτρικού πεδίου* εκτρέπονται από την *εθύγραμμη τροχιά* τους, προσβάλλουν *τή φωτογραφική πλάκα* και προκαλούν *τό φθορισμό* σέ όρισμένα σώματα. Έπειδή τά σωματίδια των θετικών ακτίνων έχουν *μάζα* πολύ μεγαλύτερη από *τή* *μάζα* του ηλεκτρονίου, γι' αυτό τά σωματίδια των θετικών ακτίνων έχουν *ταχύτητα* *πολύ μικρότερη* από *τή* *ταχύτητα* πού έχουν τά ηλεκτρόνια των καθοδικών ακτίνων.

Από την έκτροπή πού παθαίνει μέ την επίδραση *μαγνητικού* και *ηλεκτρικού πεδίου* μία *λεπτή δέσμη* θετικών ακτίνων μπορούμε *νά μετρήσουμε* *τή* *μάζα*, *τό ηλεκτρικό φορτίο* και *τή* *ταχύτητα* ενός σωματιδίου των θετικών ακτίνων. Έτσι καταλήξαμε στό *έξής* *συμπέρασμα*:

Τά σωματίδια των θετικών ακτίνων είναι θετικά ιόντα του αερίου, πού έχουν ένα ή περισσότερα στοιχειώδη θετικά ηλεκτρικά φορτία.

Αν π.χ. μέσα στό σωλήνα Crookes υπάρχει *υδρογόνο*, τότε οί θετικές ακτίνες πού σχηματίζονται, αποτελούνται από τούς πυρήνες των ατόμων υδρογόνου, δηλαδή από *πρωτόνια*. Σ' αυτή την περίπτωση βρίσκουμε τά *έξής* *εξαγόμενα*:

μάζα πρωτονίου	$m_p = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
φορτίο πρωτονίου	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$

Τό υδρογόνο αποτελείται από δύο ισότοπα, τό κοινό υδρογόνο H^1 καί τό δευτέριο H^2 , ενώ άλλα στοιχεία αποτελούνται από περισσότερα ισότοπα, π.χ. ό κασίτερος (Sn) αποτελείται από δέκα ισότοπα. Ή διάταξη μέ τήν όποία διαχωρίζουμε τά ισότοπα ενός στοιχείου ονομάζεται **φασματογράφος των μαζών**. Αυτός διαχωρίζει τά θετικά ίόντα των ισωτόπων ενός στοιχείου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

104. Σέ ένα σωλήνα Crookes σχηματίζεται ρεύμα έντάσεως 10 mA. Πόσα ηλεκτρόνια φτάνουν στήν άνοδο κατά δευτερόλεπτο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

105. Σέ έναν καθοδικό σωλήνα εφαρμόζεται τάση $U = 10\ 000$ V. Πόση ταχύτητα καί πόση κινητική ενέργεια άποκοτούν τά ηλεκτρόνια των καθοδικών άκτίνων; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

106. Μέσα σέ έναν καθοδικό σωλήνα υπάρχει πυκνωτής πού οί όπλισμοί του είναι όριζόντιοι, έχουν μήκος $l = 6$ cm καί ή μεταξύ τους άπόσταση είναι $d = 2$ cm. Στούς όπλισμούς του πυκνωτή εφαρμόζεται τάση $U = 500$ V. Ή λεπτή καθοδική δέσμη είναι όριζόντια καί αποτελείται από ηλεκτρόνια πού κινούνται μέ σταθερή ταχύτητα $v_0 = 25 \cdot 10^3$ km/sec. Ή καθοδική δέσμη μπαίνει μέσα στό ηλεκτρικό πεδίο πού υπάρχει μεταξύ των όπλισμών του πυκνωτή καί κάθετα στίς δυναμικές γραμμές του πεδίου. 1) Πόσο χρόνο ένα ηλεκτρόνιο κινείται μέσα στό ηλεκτρικό πεδίο; 2) Βγαίνοντας τό ηλεκτρόνιο από τό ηλεκτρικό πεδίο, πόσο έχει έκτραπεί από τήν άρχική διεύθυνση τής κινήσεώς του; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

107. Τά ηλεκτρόνια μιās λεπτής καθοδικής δέσμης κινούνται μέ σταθερή ταχύτητα $v_0 = 10^8$ m/sec καί μπαίνουν μέσα σέ όμογενές ηλεκτρικό πεδίο, πού έχει ένταση $E = 2,8 \cdot 10^4$ V/m. Ή ταχύτητα v_0 είναι κάθετη στίς κατακόρυφες δυναμικές γραμμές του πεδίου. 1) Τί τροχιά διαγράφει τό ηλεκτρόνιο μέσα στό ηλεκτρικό πεδίο; 2) Πόση επιτάχυνση άποκτά τό ηλεκτρόνιο; 3) Άν ή κατακόρυφη έκτροπή του ηλεκτρονίου από τήν άρχική όριζόντια διεύθυνση τής κινήσεώς του είναι $h = 4$ cm, πόσο χρόνο κινήθηκε τό ηλεκτρόνιο μέσα στό ηλεκτρικό πεδίο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

108. Τά ηλεκτρόνια μιās λεπτής καθοδικής δέσμης επιταχύνονται από τάση U καί άποκοτούν ταχύτητα $v = 10^4$ km/sec. Πόση είναι ή κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου τής δέσμης καί πόση είναι ή τάση U ; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

109. Μιά λεπτή δέσμη θετικών άκτίνων αποτελείται από άτομικούς πυρήνες υδρογόνου, δηλαδή από πρωτόνια, πού επιταχύνονται από τάση $U = 1000$ V. Πόση ταχύτητα καί πόση κινητική ενέργεια άποκτά κάθε πρωτόνιο αυτής τής δέσμης; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kgr.

Αγωγιμότητα στο κενό

75. Ή άγωγιμότητα στο κενό

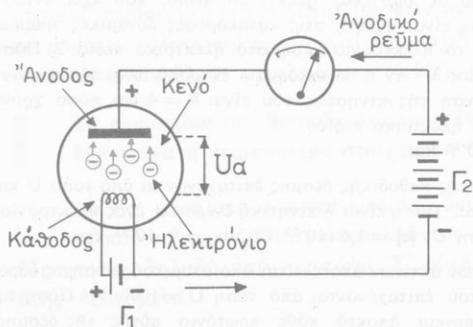
Τό ηλεκτρικό ρεύμα είναι κίνηση φορέων ηλεκτρικού φορτίου. Τέτοιοι φορείς, όπως ξέρουμε, είναι *τά ηλεκτρόνια* και *τά ιόντα*. Τό κενό αποκτά άγωγιμότητα, όταν μέσα σ' αυτό δημιουργηθούν ηλεκτρόνια. Αυτά παράγονται μέσα στο κενό μέ δύο φαινόμενα, πού ονομάζονται αντίστοιχα *θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο* και *φωτοηλεκτρικό φαινόμενο*.

76. Θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο

α. Πειραματική απόδειξη. Από μία παρατήρηση του Edison (1883) ανακάλυψαν τό ακόλουθο φαινόμενο, πού ονομάζεται *θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο* ή *θερμική έκπομπή ηλεκτρονίων* :

Τά μέταλλα, όταν έχουν μεγάλη θερμοκρασία, εκπέμπουν ηλεκτρόνια.

Γιά νά παρατηρήσουμε τό θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο, χρησιμοποιούμε τήν εξής διάταξη (σχ. 108). Μέσα σέ αερόκενο σωλήνα υπάρχει σύρμα *K* (*κάθοδος*), πού διαπυρώνεται μέ τό συνεχές ρεύμα μιās γεννήτριας Γ_1 , και μία μεταλλική πλάκα *A* (*άνοδος*), πού συνδέεται μέ τό θετικό πόλο μιās ισχυρής γεννήτριας Γ_2 . Ο άρνητικός πόλος τής γεννήτριας Γ_2 συν-



Σχ. 108. Από τή διάπυρη κάθοδο βγαίνουν ηλεκτρόνια και εξαιτίας τής άνοδικής τάσεως U_a φτάνουν στην άνοδο και έτσι κλείνει τό κύκλωμα.

δέεται μέ τόν άρνητικό πόλο τής γεννήτριας Γ_1 . Όταν ή κάθοδος *K* έχει τή θερμοκρασία του περιβάλλοντος, στό *κύκλωμα* τής *άνόδου* *A* δέν κυκλοφορεί ρεύμα. Όταν όμως ή κάθοδος *K* διαπυρωθεί και μεταξύ τής άνόδου *A* και τής καθόδου υπάρχει θετική τάση U_a (*άνοδική τάση*), τότε στό κύκλωμα τής *άνόδου* κυκλοφορεί ρεύμα (*άνοδικό ρεύμα*). Αυτό δείχνει ότι τό κενό έχει άπο-

κτήσει *αγωγιμότητα*, πού οφείλεται στά ηλεκτρόνια πού *εκπέμπει ή διάπυρη κάθοδος*. Τά ηλεκτρόνια μέ τήν επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου κινούνται μέσα στό κενό, φτάνουν στήν άνοδο καί έτσι κλείνει τό κύκλωμα τής άνόδου.

Μέσα στό σωλήνα τό άνοδικό ρεύμα έχει συμβατική φορά άπό τήν πλάκα Α πρός τό σύρμα Κ καί γι' αυτό ή πλάκα ονομάζεται άνοδος καί τό σύρμα κάθοδος. Έπειδή μέσα στό σωλήνα υπάρχουν *δύο ηλεκτρόδια* (ή άνοδος Α καί ή κάθοδος Κ), γι' αυτό ό σωλήνας ονομάζεται *δίοδος ηλεκτρονική λυχνία* ή καί *άπλά δίοδος*. Στήν πράξη ή άνοδος είναι ένας κύλινδρος πού άξονά του έχει τό σύρμα τής καθόδου. Από τά παραπάνω βγάζουμε τό έξής συμπέρασμα:

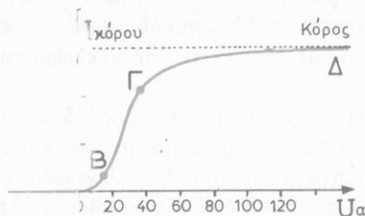
Στή δίοδο ηλεκτρονική λυχνία τό ρεύμα περνάει, μόνο όταν ή άνοδική τάση είναι θετική ($V_a > 0$).

Αν διακόψουμε τή σύνδεση τής άνόδου Α μέ τή γεννήτρια Γ_2 , τό άνοδικό ρεύμα καταργείται. Από τό διάπυρο σύρμα εξακολουθούν *νά βγαίνουν ηλεκτρόνια* καί τότε τό σύρμα αρχίζει *νά αποκτά θετικό φορτίο*. Τά ηλεκτρόνια πού βγαίνουν άπό τό σύρμα σχηματίζουν γύρω του ένα «σύννεφο ηλεκτρονίων» καί έτσι μεταξύ του σύρματος καί του σύννεφου ηλεκτρονίων δημιουργείται *ηλεκτρικό πεδίο*. Τότε όσα ηλεκτρόνια βγαίνουν άπό τό σύρμα μέσα σέ χρόνο Δt , τόσα άκριβώς ηλεκτρόνια μέσα στόν ίδιο χρόνο ξαναγυρίζουν στό σύρμα. Τέτοια π.χ. *ισορροπία* επικρατεί στό περιβάλλον του διάπυρου σύρματος ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως.

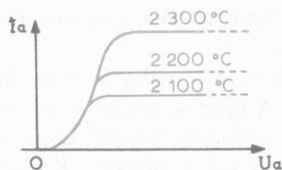
β. Η ένταση του άνοδικού ρεύματος. Διατηρούμε *σταθερή τή θερμοκρασία* τής καθόδου. Όταν αυξάνουμε προοδευτικά *τήν άνοδική τάση* (U_a), συνεχώς αυξάνει καί ή ένταση (I_a) του άνοδικού ρεύματος, άρα συνεχώς αυξάνει ό αριθμός των ηλεκτρονίων πού φτάνουν στήν άνοδο. Καί όταν ή άνοδική τάση αποκτήσκει *μιά όρισμένη τιμή*, *όλα τά ηλεκτρόνια* πού βγαίνουν άπό τό σύρμα φτάνουν στήν άνοδο καί τότε ή ένταση του άνοδικού ρεύματος παίρνει τή μέγιστη δυνατή τιμή τής, πού ονομάζεται *ρεύμα κόρου* (σχ. 109).

Αν αυξάνουμε προοδευτικά *τή θερμοκρασία* του σύρματος (*), βρίσκουμε ότι αυξάνει καί τό ρεύμα κόρου. Άρα, όταν ύψώνεται ή θερμοκρασία του σύρματος, αυξάνει ό *αριθμός των ηλεκτρονίων* πού βγαίνουν άπό τό σύρμα. Πειραματικά βρίσκουμε ότι μικρή αύξηση τής θερμοκρασίας

(*) Η θερμοκρασία του σύρματος αυξάνει, όταν αυξάνει ή τάση πού εφαρμόζεται στό σύρμα.



Η χαρακτηριστική καμπύλη λυχνίας (U_a σε Volt, I_a σε μ Α) από τών σημείων Β και Γ ή το ρεύματος είναι σχεδόν ανά- με την άνοδική τάση.



Σχ. 110. Όταν αυξάνεται ή θερμοκρασία της καθόδου, αυξάνεται ή ένταση του ρεύματος κόρου.

ατος προκαλεί σημαντική αύξηση της έντάσεως του ρεύματος κό- (10). Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά έξηξ συμπεράσματα:

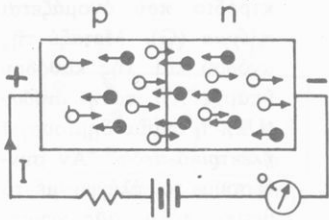
Η ένταση του άνοδικού ρεύματος μπορεί νά λάβει μιά όρισμένη ιστη τιμή (ρεύμα κόρου), πού εξαρτάται από τή θερμοκρασία της όδου.

Ο άριθμός τών ήλεκτρονίων πού κατά μονάδα χρόνου βγαίνουν τό διάπυρο σύρμα αυξάνει μέ τή θερμοκρασία του σύρματος.

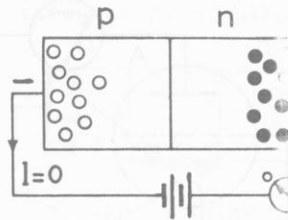
φαρμογές του θερμοηλεκτρονικού φαινομένου. Τό θερμοηλεκτρο- όμενο έχει σημαντικές εφαρμογές. Πολλές συσκευές, πού γε- ίζονται ήλεκτρονικοί σωλήνες, είναι αερόκενοι σωλήνες στους παράγονται ήλεκτρόνια από μιά διαπυρωμένη κάθοδο. Τέτοιοι κοί σωλήνες είναι π.χ. ή τρίοδος ήλεκτρονική λυχνία, ό ήλε- παλμογράφος, ό σωλήνας Braun, ό σωλήνας Coolidge, τό ήλε- μικροσκόπιο κ.ά.

τό άνοδικό κύκλωμα (σχ. 108) αντικαταστήσουμε τή γεννήτρια ρεύματος Γ_2 μέ μιά γεννήτρια έναλλασσόμενου ρεύματος, τότε δο λυχνία περνάει ρεύμα μόνο κατά τή μιά ήμπερίοδο ($T/2$), το χρόνο ή πλάκα Α είναι θετικό ήλεκτρόδιο. Ωστε ή δίοδος ρεί νά χρησιμοποιηθεί ως άνορθωτής του έναλλασσόμενου ρεύ-

σταλλοδίοδος. Ένας ήμιαγωγός p και ένας ήμιαγωγός n βρί- τε στενή έπαφή μεταξύ τους και στίς δύο άκρες τους είναι στερε- ήλεκτρόδια (σχ. 111). Αυτό τό σύστημα τών δύο ήμιαγωγών κρυσταλλοδίοδος ή και δίοδος p — n. Αν συνδέσουμε τήν κρύ- δο μέ μιά γεννήτρια όπως φαίνεται στό σχήμα, τότε μέσα στήν



Σχ. 111. Από την κρυσταλλοδίοδο περνάει ρεύμα. (Αγωγή φορά $p \rightarrow n$).



Σχ. 111α. Από την κρυσταλλοδέν περνάει ρεύμα. (Ανασταλτική φορά $n \rightarrow p$).

κρυσταλλοδίοδο με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τά ηλεκτρόνια κινούνται προς τό θετικό πόλο τής γεννήτριας και οί όπές κινούνται προς τόν άρνητικό πόλο τής. Τό ρεύμα περνάει μέσα από την κρυσταλλοδίοδο συνεχώς άναπληρώνονται. Άν άντιστρέψουμε τή σύνδεση τής κρυσταλλοδίοδου με τή γεννήτρια (σχ. 111α), τότε ή κρυσταλλοδίodos δέν παρουσιάζει άγωγιμότητα. Ώστε



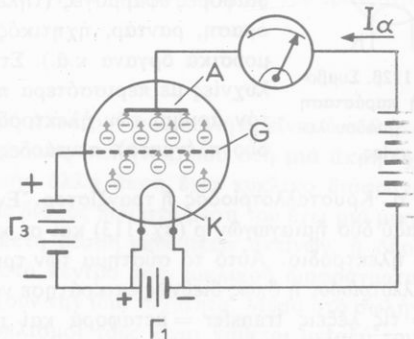
Σχ. 111β. Συμβολική παράσταση κρυσταλλοδίοδου.

Η κρυσταλλοδίodos παρουσιάζει άγωγιμότητα μόνο κατά τή μιά (άγωγή φορά $p \rightarrow n$).

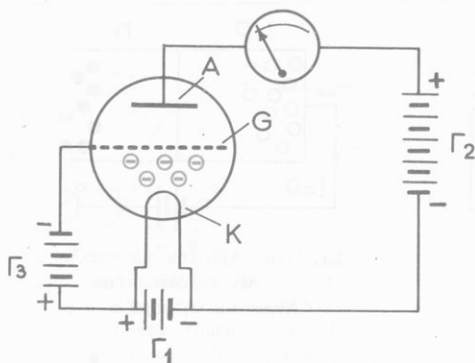
Γι' αυτό ή κρυσταλλοδίodos χρησιμοποιείται ως άνορθωτής άντ την πολυπλοκότερη δίodos ήλεκτρονική λυχνία. Στο σχήμα 111β φαίνεται ή συμβολική παράσταση τής κρυσταλλοδίοδου.

77. Τρίodos ήλεκτρονική λυχνία

Η τρίodos ήλεκτρονική λυχνία ή άπλά τρίodos (σχ. 112) είναι μιά δίodos λυχνία στην όποία μεταξύ τής άνόδου (Α) και τής καθόδου (Κ) έχει προστεθει ένα τρίτο ήλε-

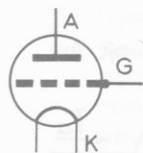


Σχ. 112. Σχηματική παράσταση τής τρίodos ήλεκτρονικής λυχνίας. Τό πλέγμα επιταχώνει τά κτρώνια.



Σχ. 112α. Τό πλέγμα άπωθει τά ηλεκτρόνια καί τό ρεύμα διακόπτεται.

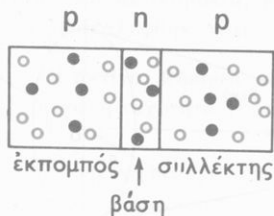
πλέγμα καί έτσι τό άνοδικό ρεύμα *ένισχύεται*. Αντίθετα, άν συνδέσουμε τό πλέγμα μέ τόν άρνητικό πόλο τής γεννήτριας, ώστε τό δυναμικό του πλέγματος νά είναι *άρνητικό* σχετικά μέ τό δυναμικό τής καθόδου, τότε τά ηλεκτρόνια πού βγαίνουν άπό τήν κάθοδο άπωθοούνται άπό τό πλέγμα καί τό άνοδικό ρεύμα *έξασθενίζει* ή καί *καταργείται τελείως* (σχ. 112α). Έτσι μεταξύ του πλέγματος καί τής καθόδου δημιουργούμε τήν *τάση πλέγματος* (U_G), ή όποία δημιουργεί ένα *ήλεκτρικό πεδίο*. Οί μεταβολές τής τάσεως του πλέγματος προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στήν ένταση του άνοδικου ρεύματος. Αυτή τήν ιδιότητα τής τριόδου λυχνίας εκμεταλλευόμαστε σέ διάφορες εφαρμογές (τηλεπικοινωνίες, ραδιοφωνία, τηλεόραση, ραντάρ, ήχητικός κινηματογράφος, ηλεκτρονικά μουσικά όργανα κ.ά.). Στήν πράξη χρησιμοποιούνται καί λυχνίες μέ περισσότερα πλέγματα, οί όποίες ανάλογα μέ τόν αριθμό των ήλεκτροδίων ονομάζονται τετράοδες (μέ δύο πλέγματα), πεντάοδες (μέ τρία πλέγματα) κ.ο.κ.



Σχ. 112β. Συμβολική παράσταση τής τριόδου λυχνίας.

α. Κρυσταλλοτρίοδος ή τρανζίστορ. Ένας ήμιαγωγός η παρεμβάλλεται μεταξύ δύο ήμιαγωγών p (σχ. 113) καί σέ κάθε ήμιαγωγό είναι στερεωμένο ένα ήλεκτροδίο. Αυτό τό σύστημα των τριών ήμιαγωγών ονομάζεται *κρυσταλλοτρίοδος* ή όπως διεθνώς επικράτησε νά λέγεται *τρανζίστορ* (transistor, άπό τίς λέξεις transfer = μεταφορά καί resistance = αντίσταση). Τό μεσαίο τμήμα ονομάζεται *βάση* καί είναι πολύ λεπτό (έχει πάχος 10 ως 100 μm). Τά δύο άκραία τμήματα ονομάζονται τό ένα *έκπομπός* καί τό άλλο *συλλέκτης*.

κτρόδιο πού ονομάζεται *πλέγμα* (G). Μεταξύ τής άνόδου καί τής καθόδου ύπάρχει ή *τάση άνόδου* (U_A), ή όποία δημιουργεί *ήλεκτρικό πεδίο*. Αν συνδέσουμε τό πλέγμα μέ τό θετικό πόλο μιās γεννήτριας, ώστε τό δυναμικό του πλέγματος νά είναι *θετικό* σχετικά μέ τό δυναμικό τής καθόδου, τότε τά ηλεκτρόνια πού βγαίνουν άπό τήν κάθοδο έλκονται άπό τήν άνοδο καί άπό τό

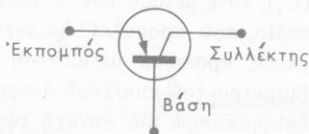


Σχ. 113. Ο p-n-p τρανζίστορ. Αποτελείται από δύο ένωμένες κρυσταλλοδιόδους.



Σχ. 113α. Οι μεταβολές της έντασης του ρεύματος I_E προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην ένταση του ρεύματος I_C .

Ο τρανζίστορ αποτελείται από δύο ένωμένες κρυσταλλοδιόδους. Συνδέουμε τον τρανζίστορ με δύο γεννήτριες όπως φαίνεται στο σχήμα. Τότε, όπως ξέρουμε, η άριστη κρυσταλλοδιόδος παρουσιάζει αγωγιμότητα. Οι μεταβολές της έντασης I_E του ρεύματος που διαρρέει τον έκπομπο προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην ένταση I_C του ρεύματος που διαρρέει το συλλέκτη. Άρα ο τρανζίστορ έχει ιδιότητα ανάλογη με την ιδιότητα της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας. Γι' αυτό σήμερα σε πάρα πολλές ηλεκτρονικές συσκευές ο τρανζίστορ αντικαθιστά την πολυπλοκότερη τριόδο ηλεκτρονική λυχνία. Στο σχήμα 114 δείχνεται η συμβολική παράσταση του τρανζίστορ.

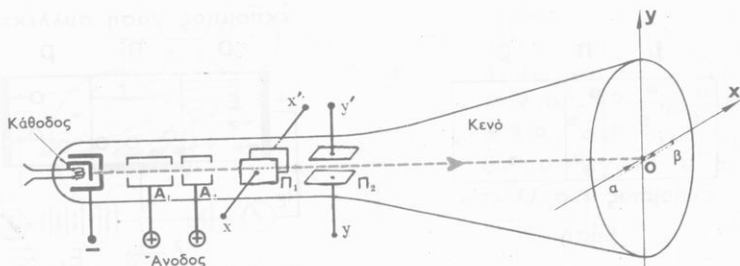


Σχ. 114. Συμβολική παράσταση του τρανζίστορ.

78. Σωλήνας Braun

Μία πολύ ενδιαφέρουσα μορφή ηλεκτρονικού σωλήνα είναι ο σωλήνας Braun (σχ. 115). Αυτός είναι αερόκενος σωλήνας, που στη μία άκρη έχει κάθοδο που διαπυρώνεται και στην άλλη άκρη έχει κυκλικό διάφραγμα που φθορίζει. Η άνοδος είναι ένας δίσκος που στη μέση του έχει μία μικρή τρύπα. Έτσι δημιουργείται μία λεπτή δέσμη καθοδικών ακτίνων, η οποία σχηματίζει ένα φωτεινό σημείο στο κέντρο του κυκλικού διαφράγματος. Όλα τα ηλεκτρόνια της δέσμης έχουν την ίδια ταχύτητα. Μέσα στο σωλήνα υπάρχουν δύο πυκνωτές που οι όπλισμοί τους είναι κάθετοι μεταξύ τους. Έτσι η καθοδική δέσμη περνάει διαδοχικά μέσα από δύο ηλεκτρικά πεδία που οι έντασεις τους είναι κάθετες μεταξύ τους.

Όταν οι δύο πυκνωτές είναι αφόρτιστοι, η καθοδική δέσμη είναι ευ-



Σχ. 115. Σωλήνας Braun. Οι δύο πυκνωτές Π_1 και Π_2 προκαλούν αντίστοιχα οριζόντια και κατακόρυφη έκτροπή της δέσμης των ηλεκτρονίων.

θύγραμμη. Αν στον πρώτο πυκνωτή Π_1 εφαρμόσουμε μία συνεχή τάση (U_1), τότε μεταξύ των όπλισμών του δημιουργείται οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο, που προκαλεί οριζόντια έκτροπή της καθοδικής δέσμης και έπομένως προκαλεί μετακίνηση του φωτεινού σημείου πάνω στην οριζόντια διάμετρο του κυκλικού διαφράγματος. Αν μόνο στο δεύτερο πυκνωτή Π_2 εφαρμόσουμε μία συνεχή τάση (U_2), τότε μεταξύ των όπλισμών του σχηματίζεται κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο, που προκαλεί κατακόρυφη έκτροπή της καθοδικής δέσμης και έπομένως προκαλεί μετακίνηση του φωτεινού σημείου πάνω στην κατακόρυφη διάμετρο του κυκλικού διαφράγματος. Οι έκτροπές της καθοδικής δέσμης είναι ανάλογες με τις εντάσεις των αντίστοιχων ηλεκτρικών πεδίων, άρα είναι ανάλογες με τις τάσεις U_1 και U_2 που εφαρμόζονται στους δύο πυκνωτές. Αν σ' αυτούς εφαρμόσουμε ταυτόχρονα τις τάσεις U_1 και U_2 , τότε εξαιτίας των δύο έκτροπών της καθοδικής δέσμης τό φωτεινό σημείο σχηματίζεται σέ μία όρισμένη θέση της επιφάνειας του κυκλικού διαφράγματος. Ωστε μεταβάλλοντας τις τάσεις U_1 και U_2 μπορούμε νά μετακινούμε τό φωτεινό σημείο πάνω σέ όλο τό διάφραγμα. Η δέσμη των ηλεκτρονίων δέν παρουσιάζει καμιά αδράνεια και έπομένως μπορεί νά παρακολουθεί τις ταχύτατες μεταβολές της εναλλασσόμενης τάσεως που συνήθως εφαρμόζουμε στους δύο πυκνωτές. Έτσι τό φωτεινό σημείο μπορεί νά μετακινείται ταχύτατα σέ όλη τήν έκταση του διαφράγματος που φθορίζει. Ο σωλήνας Braun έχει σήμερα σημαντικές εφαρμογές, π.χ. στον ηλεκτρονικό παλμογράφο, στην τηλεόραση, στο ραντάρ κ.ά.

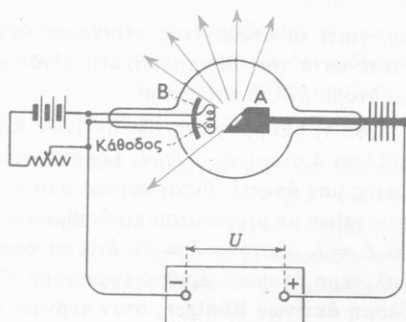
79. Άκτινες Röntgen

α. Παραγωγή των άκτινων Röntgen. Ο Röntgen (1895) μελετώντας τις καθοδικές άκτινες ανακάλυψε ότι τά τοιχώματα του γυάλινου σωλήνα που βρίσκονται άπέναντι άπό τήν κάθοδο έκπέμπουν μία άόρατη και πολύ

διδυσδυτική ακτινοβολία, που ονομάζεται **ακτίνες Röntgen** ή **ακτίνες Χ**. Έτσι ανακαλύφθηκε ότι:

Οι ακτίνες Röntgen παράγονται, όταν ηλεκτρόνια που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα πέφτουν πάνω σε ένα στόχο.

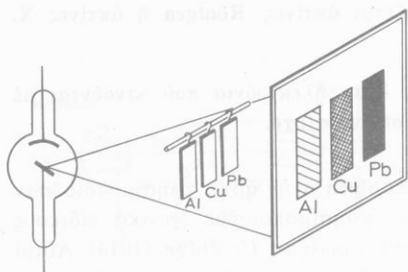
Για την παραγωγή των ακτίνων Röntgen στην αρχή χρησιμοποιούσαν τους σωλήνες Crookes, σήμερα όμως χρησιμοποιούμε γενικά ειδικούς ηλεκτρονικούς σωλήνες που ονομάζονται σωλήνες Coolidge (1914). Αυτοί είναι γυάλινοι αερόκενοι σωλήνες στους οποίους τά απαραίτητα για τη λειτουργία τους ηλεκτρόνια παράγονται από μία διάπυρη κάθοδο (σχ. 116). Η άνοδος που ειδικότερα ονομάζεται *αντικαθόδος*, αποτελείται από ένα δύστηκτο μέταλλο (συνήθως βολφράμιο). Μεταξύ της αντικαθόδου και της καθόδου εφαρμόζεται ψηλή συνεχής τάση (10 ως 1000 kV), η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η διάπυρη κάθοδος. Οι ακτίνες Röntgen που παράγονται από την αντικαθόδο *εκπέμπονται προς όλες τις διευθύνσεις*.



Σχ. 116. Σωλήνας Coolidge για την παραγωγή ακτίνων Röntgen.

β. *Ιδιότητες των ακτίνων Röntgen.* Πειραματικά βρίσκουμε ότι οι ακτίνες Röntgen έχουν τρεις εξής *ιδιότητες*:

1. Προκαλούν *τό φθορισμό* μερικών σωμάτων, (π.χ. του κυανιούχου βαριολευκοχρύσου, του θειούχου ψευδαργύρου).
2. Προσβάλλουν *τή φωτογραφική πλάκα* και προκαλούν *χημικά φαινόμενα*, π.χ. αλλάζουν τό χρώμα μερικών πολύτιμων λίθων, γιατί προκαλούν *αλλαγές* στή δομή του μορίου του σώματος.
3. Προκαλούν *ισχυρό ιονισμό* των αερίων και γι' αυτό ένα φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο, όταν βρίσκεται κοντά σε μία πηγή ακτίνων Röntgen, *εκφορτίζεται* πολύ γρήγορα.
4. Διαδίδονται *εθθύγραμμα*, *δέν* *εκτρέπονται* από μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο και *έπομένως* *δέ μεταφέρουν* ηλεκτρικό φορτίο.
5. Πρόκαλούν *εύκολα* *τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο*, δηλαδή την *έξοδο* ηλεκτρονίων από διάφορα μέταλλα.



Σχ. 117. Ἡ ἀπορρόφηση τῶν ἀκτίνων Röntgen αὐξάνεται μέ τόν ἀτομικό ἀριθμό τοῦ στοιχείου.

κή, γιατί τά άτομα ἑνός στοιχείου ἀπορροφοῦν τίς ἀκτίνες Röntgen πάντοτε κατά τόν ἴδιο τρόπο, εἴτε εἶναι *μονωμένα* ἄτομα, εἴτε εἶναι *ἐνωμένα* μέ ἄτομα ἄλλου στοιχείου.

9. Ἡ ἀπορρόφηση τῶν ἀκτίνων Röntgen αὐξάνει πολύ γρήγορα, ὅταν αὐξάνει ὁ *ἀτομικός ἀριθμός* (Z) τοῦ στοιχείου (σχ. 117). Οἱ σάρκες τοῦ σώματός μας ἀποτελοῦνται κυρίως ἀπό λευκάματα, πού εἶναι χημικές ἐνώσεις στοιχείων μέ μικρό ἀτομικό ἀριθμό (ὑδρογόνο $Z = 1$, ἄνθρακα $Z = 6$, ἄζωτο $Z = 7$, ὀξυγόνο $Z = 8$), ἐνῶ τά κόκκαλα περιέχουν καί στοιχεῖα μέ μεγαλύτερο ἀτομικό ἀριθμό (φωσφόρο $Z = 15$, ἀσβέστιο $Z = 20$). Ἔτσι μιά δέσμη ἀκτίνων Röntgen, ὅταν περνάει μέσα ἀπό τό σῶμα μας, ἀπορροφᾶται λιγότερο ἀπό τίς σάρκες καί πολύ περισσότερο ἀπό τά κόκκαλα. Τότε πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει ἡ στή φωτογραφική πλάκα τά κόκκαλα σχηματίζουν *σκιά*.

10. Σέ μιά πλάκα μέ ὀρισμένο πάχος (π.χ. σέ μιά πλάκα μολύβδου) ἡ ἀπορρόφηση τῶν ἀκτίνων Röntgen αὐξάνει, ὅταν αὐξάνει τό *μήκος κύματος* (λ). Ἔτσι οἱ ἀκτίνες Röntgen πού ἔχουν πολύ μικρά μήκη κύματος εἶναι περισσότερο διεισδυτικές καί ὀνομάζονται *σκληρές*, ἐνῶ ἐκεῖνες πού ἔχουν μεγαλύτερα μήκη κύματος εἶναι λιγότερο διεισδυτικές καί ὀνομάζονται *μαλακές*. Ὅσο μεγαλύτερη γίνεται ἡ *τάση* πού ἐφαρμόζεται μεταξύ τῆς ἀντικαθόδου καί τῆς καθόδου, τόσο μικρότερο γίνεται τό *μήκος κύματος* τῶν ἀκτίνων Röntgen.

γ. Φύση τῶν ἀκτίνων Röntgen. Πειραματικά ἀποδείχθηκε ὅτι μιά λεπτή δέσμη ἀκτίνων Röntgen, ὅταν πέφτει πάνω σέ ἕναν κρύσταλλο, δίνει πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει φαινόμενα *περιθάσεως*, ὅμοια μέ ἐκεῖνα πού δίνει μιά λεπτή μονοχρωματική δέσμη φωτός, ὅταν πέφτει πάνω σέ φράγμα *περιθάσεως*. Γενικά ἀποδείχθηκε ὅτι:

6. Ἐπιδροῦν *στά κύτταρα* τῶν ζωντανῶν ὀργανισμῶν καί προκαλοῦν διάφορες *βιολογικές δράσεις*.

7. Ἔχουν *μεγάλη διεισδυτική ικανότητα* καί περνοῦν μέσα ἀπό σώματα πού εἶναι ἀδιαφανή γιά τό φῶς (ὅπως π.χ. μιά ξύλινη σανίδα, οἱ σάρκες τοῦ σώματός μας κ.ἄ.).

8. Ὅταν οἱ ἀκτίνες Röntgen, περνοῦν μέσα ἀπό τήν ὕλη, πάντοτε συμβαίνει κάποια *ἀπορρόφησή* τους ἀπό τήν ὕλη. Αὕτη ὁμως ἡ ἀπορρόφηση εἶναι *ιδιότητα ἀτομική*.

Οι ακτίνες Röntgen είναι άορατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Σημείωση. Τα μήκη κύματος είναι:

των όρατων ακτινοβολιών	από 7500 Å	ώς 4000 Å
των ακτίνων Röntgen	από 20 Å	ώς 0,05 Å

Παρατηρούμε ότι τα μήκη κύματος των ακτίνων Röntgen είναι πολύ μικρά σχετικά με τα μήκη κύματος των όρατων ακτινοβολιών.

δ. Φασματοσκοπία των ακτίνων Röntgen. Στην Όπτική με το φράγμα περιθλάσεως (§ 41) παίρνουμε το φάσμα μιᾶς δέσμης φωτεινών ακτίνων. Για τις ακτίνες Röntgen το κρυσταλλικό πλέγμα ενός κρυστάλλου παίζει το ρόλο φράγματος περιθλάσεως και επομένως μπορούμε να λάβουμε το φάσμα μιᾶς δέσμης ακτίνων Röntgen. Η πειραματική έρευνα απέδειξε ότι η δέσμη ακτίνων Röntgen, που εκπέμπεται από την αντικάθοδο, όταν αναλυθεί, δίνει ένα συνεχές φάσμα στο οποίο προσθ εται και ένα γραμμικό φάσμα.

1. Τό συνεχές φάσμα των ακτίνων Röntgen. Προς τήν πλευρά των μεγαλύτερων συχνοτήτων τό συνεχές φάσμα των ακτίνων Röntgen τελειώνει απότομα, δηλαδή παρουσιάζει ένα σαφές όριο. Τό συνεχές φάσμα περιλαμβάνει πολλές συχνότητες, οί όποιες αντιστοιχοϋν σε μιά μεγάλη ποικιλία φωτονίων Röntgen. Η γένεση τοϋ συνεχούς φάσματος έρμηνεύεται ως εξής:

Ένα ηλεκτρόνιο που βγαίνει από τή διάπυρη κάθοδο, εξαιτίας τής τάσεως U που ύπάρχει μεταξύ τής καθόδου και τής αντικαθόδου, επιταχύνεται και φτάνει στην αντικάθοδο με κινητική ενέργεια $E_{κιν} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ ίση με τό έργο $e \cdot U$ που παράγεται από τό ηλεκτρικό πεδίο κατά τή μεταφορά τοϋ ηλεκτρονίου από τήν κάθοδο ως τήν αντικάθοδο, Άρα ισχύει ή εξίσωση:

$$\text{ένέργεια ηλεκτρονίου} \quad E_{κιν} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U \quad (1)$$

Σύμφωνα με τήν ηλεκτρομαγνητική θεωρία τοϋ Maxwell, όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται με επιτάχυνση ($\gamma > 0$ ή $\gamma < 0$), τότε τό ηλεκτρόνιο αποβάλλει ενέργεια με τή μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή με τή μορφή φωτονίων.

Όταν τό ηλεκτρόνιο συγκρούεται με τήν αντικάθοδο και προσπαθεί να είσχωρήσει μέσα στην ύλη τής, τότε τό ηλεκτρόνιο ύφίσταται τροχολέδηση (φρενάρισμα) και αποβάλλει ένα μέρος ΔE τής κινητικής ενέργειάς

του μέ τή μορφή *ένός φωτονίου Röntgen*, συχρότητας ν . Σ' αὐτή τήν περίπτωση ἰσχύει ἡ σχέση:

$$\text{ἐνέργεια φωτονίου} \quad \Delta E = h \cdot \nu \quad \eta \quad h \cdot \nu < E_{\text{κιν}}$$

Ἄν *ὄλη ἡ κινητική ἐνέργεια* ($E_{\text{κιν}}$) τοῦ ἠλεκτρονίου μετατραπῆ σέ ἐνέργεια *ένός φωτονίου Röntgen*, τότε αὐτό τό φωτόνιο ἔχει *τή μέγιστη συχρότητα* (ν_{max}) πού ἀντιστοιχεῖ στήν ὑπάρχουσα τάση U . Ἐπομένως ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{μέγιστη ἐνέργεια} \\ \text{φωτονίου} \end{array} \quad h \cdot \nu_{\text{max}} = E_{\text{κιν}} \quad \eta \quad h \cdot \nu_{\text{max}} = e \cdot U} \quad (2)$$

Ἄπό τήν ἐξίσωση (2) βρίσκουμε ὅτι *ἡ μέγιστη συχρότητα* τῶν φωτονίων Röntgen εἶναι:

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{μέγιστη συχρότητα} \\ \text{φωτονίων} \end{array} \quad \nu_{\text{max}} = \frac{e \cdot U}{h}} \quad (3)$$

Αὐτή *ἡ μέγιστη συχρότητα* τοῦ συνεχοῦς φάσματος τῶν ἀκτίνων Röntgen ἀντιστοιχεῖ σέ ἓνα *ἐλάχιστο μήκος κύματος* ἴσο μέ :

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{c}{\nu_{\text{max}}} \quad \eta \quad \boxed{\lambda_{\text{min}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}} \quad (4)$$

Ἄπό τά παραπάνω συνάγεται ὅτι τά μήκη κύματος τῶν ἀκτινοβολιῶν τοῦ *συνεχοῦς φάσματος* τῶν ἀκτίνων Röntgen δίνονται ἀπό τή σχέση :

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{ἀκτινοβολίες τοῦ} \\ \text{συνεχοῦς φάσματος} \end{array} \quad \lambda \geq \frac{h \cdot c}{e \cdot U}} \quad (5)$$

Ἡ σχέση (5) φανερώνει ὅτι στίς πρακτικές ἐφαρμογές, μπορούμε νά λάβουμε τόσο περισσότερο διεισδυτικές ἀκτίνες Röntgen (δηλαδή μέ μικρότερο μήκος κύματος λ), ὅσο *μεγαλύτερη* εἶναι ἡ τάση U μέ τήν ὁποία ἐπιταχύνονται τά ἠλεκτρόνια.

2. Τό γραμμικό φάσμα τῶν ἀκτίνων Röntgen. Τό *γραμμικό φάσμα* τῶν ἀκτίνων Röntgen ἀποτελεῖται ἀπό ὀρισμένες *ὁμάδες γραμμῶν* πού ὀνομάζονται *σειρά K*, *σειρά L* καί *σειρά M*. Ἡ ἐκπομπή τοῦ γραμμικοῦ φάσματος ἐξηγεῖται ὡς ἐξῆς: Τά ἠλεκτρόνια πού πέφτουν πάνω στήν ἀντικάθοδο ἔχουν *μεγάλη κινητική ἐνέργεια*. Τότε μερικά ἄτομα τοῦ μετάλλου ἀπορ-

ροφούν σημαντική ενέργεια και αποκτούν μία άσταθή ενεργειακή κατάσταση που λέγεται *διέγερση* του ατόμου. Άλλά τό άτομο που διεγέρθηκε άμέσως επανέρχεται στή σταθερή ενεργειακή κατάσταση του αποβάλλοντας μέ τή μορφή *φωτονίου Röntgen* τήν ενέργεια που πήρε από τό ηλεκτρόνιο. Ή συχνότητα που μπορεί νά έχει αυτό τό φωτόνιο Röntgen είναι *ορισμένη* και εξαρτάται από τή δομή του ατόμου του μετάλλου. Γι' αυτό παρατηρούμε ότι τό γραμμικό φάσμα των ακτίνων Röntgen είναι *χαρακτηριστικό του μετάλλου* που άποτελεί τήν αντικάθοδο.

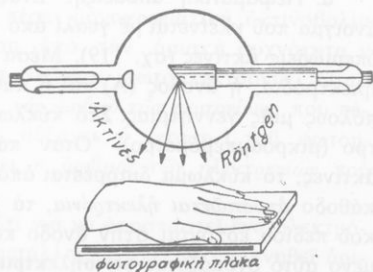
3. **Συμπεράσματα τής φασματοσκοπίας των ακτίνων Röntgen.** Ή πειραματική έρευνα απέδειξε ότι:

I. Μιά δέσμη ακτίνων Röntgen δίνει ένα συνεχές και ένα γραμμικό φάσμα.

II. Τό συνεχές φάσμα τελειώνει άπότομα μέ μία ακτινοβολία συχνότητας v_{max} που εξαρτάται από τήν εφαρμοζόμενη τάση U.

III. Τό γραμμικό φάσμα άποτελείται από τρεις σειρές ακτινοβολιών (K, L, M) που οι συχνότητές τους εξαρτώνται από τή φύση του μετάλλου που χρησιμοποιείται ως αντικάθοδος.

ε. Έφαρμογές των ακτίνων Röntgen. Οι ιδιότητες τής άπορροφήσεως των ακτίνων Röntgen από τήν ύλη έχουν σήμερα μεγάλη εφαρμογή στήν *Ίατρική*, γιατί οι ιστοί του σώματός μας, που άποτελούνται από στοιχεία μέ μικρό άτομικό άριθμό (H,C,N,O), προκαλούν μικρή άπορρόφηση, ενώ ό όστεώδης ιστός, που περιέχει στοιχεία μέ μεγαλύτερο άτομικό άριθμό (P,Ca), προκαλεί μεγαλύτερη άπορρόφηση. Σ' αυτή τήν άρχή στηρίζεται ή *άκτινοσκόπηση* και ή *άκτινογραφία*. Κατά τήν άκτινοσκόπηση παρατηρούμε τίς σκιές που σχηματίζονται πάνω στο διάφραγμα που φθορίζει, ενώ κατά τήν άκτινογραφία οι σκιές άποτυπώνονται πάνω σε φωτογραφική πλάκα (σχ. 118). Μέ τήν άκτινοσκόπηση και τήν άκτινογραφία γίνεται σήμερα ή *διάγνωση* πολλών παθήσεων (π.χ. άλλοιώσεις στά κόκκαλα, κατάγματα, φυματίωση κ.ά.). Γιá τή διάγνωση παθήσεων του πεπτικού ή του ούροποιητικού συστήματος εισάγουμε μέσα σ' αυτά τά συστήματα ένώσεις στοιχείων μέ μεγάλο άτομικό άριθμό (π.χ. ένώσεις βισμούθιου $Z = 83$, βαρίου $Z = 56$, ιωδίου $Z = 53$ κ.λ.).



Σχ. 118. Άκτινογραφία.

Ἐπειδὴ οἱ ἀκτίνες Röntgen ἀσκοῦν βιολογικὲς δράσεις στὰ κύτταρα, γι' αὐτὸ χρησιμοποιοῦνται καὶ γιὰ θεραπευτικούς σκοποὺς (*ἀκτινοθεραπεία*). Γενικά οἱ ἐφαρμογὲς τῶν ἀκτίνων Röntgen στὴν Ἱατρικὴ ἀποτελοῦν ἕναν ἰδιαίτερο κλάδο πού ὀνομάζεται *Ἀκτινολογία*.

Οἱ πολὺ σκληρὲς ἀκτίνες Röntgen χρησιμοποιοῦνται στὴ *μεταλλουργία*. Μὲ αὐτὲς ἐλέγχουμε τὴν ὁμοιογένεια καὶ τὴ συνέχεια τοῦ μεταλλικοῦ ὑλικοῦ καὶ βρῖσκουμε ἂν ὑπάρχουν κενοὶ χώροι μέσα στοῦ ὑλικό ἢ ἂν εἶναι τέλειες οἱ μεταλλικὲς συγκολλήσεις.

Οἱ ἀκτίνες Röntgen παίξουν σπουδαῖο ρόλο στὴ μελέτη τῆς δομῆς τῶν κρυστάλλων (*Κρυσταλλογραφία*).

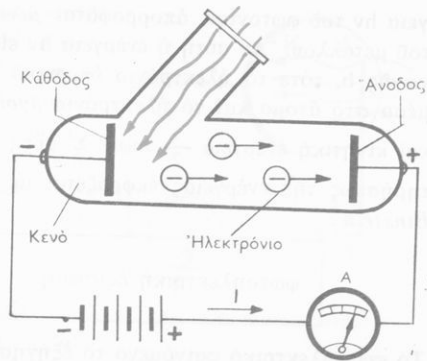
στ. Φυσιολογικὸ ἀποτέλεσμα τῶν ἀκτίνων Röntgen. Ὄταν ἡ προσβολὴ τοῦ ὄργανισμοῦ μὲ τίς ἀκτίνες Röntgen εἶναι σύντομη, τότε εἶναι ἀκίνδυνη. Ὄταν ὅμως ἡ προσβολὴ διαρκεῖ πολὺ χρόνο, τότε προκαλοῦνται στὸν ὄργανισμό σοβαρὲς βλάβες (π.χ. ἐλάττωση τῶν ἐρυθρῶν αἰμοσφαιρίων, ἐπικίνδυνα τραύματα, πού μπορεῖ νὰ ὀδηγήσουν σὲ ἀκρωτηριασμοὺς ἢ καὶ στοῦ θάνατο). Τὰ ἀποτελέσματα τῆς δράσεως τῶν ἀκτίνων Röntgen πάνω στὸν ὄργανισμό εἶναι *ἀθροιστικά*, δηλαδὴ τὰ ἀποτελέσματα τὰ ὅποια προκαλοῦν οἱ ἀκτίνες Röntgen πάνω στὰ κύτταρα δὲν ἐξασθενίζουν μὲ τὸ πέρασμα τοῦ χρόνου, ἀλλὰ προσθέτονται στὰ ἀποτελέσματα τῶν ἐπόμενων ἀκτίνων Röntgen. Βρέθηκε ὅτι ὁ ἀνθρώπινος ὄργανισμὸς σὲ ὅλη τὴ διάρκειά τῆς ζωῆς του δὲν πρέπει νὰ ξεπεράσει μιὰ ὀρισμένη *δόση* ἀκτινοβολίας Röntgen. Ὅσοι ἀσχολοῦνται μὲ ἀκτίνες Röntgen προστατεύονται μὲ διάφορους τρόπους (π.χ. σκεπάζουν τὸ σῶμα τους καὶ τὰ χέρια τους μὲ κάλυμμα ἀπὸ καουτσούκ πού εἶναι ἐμπλουτισμένο μὲ μόλυβδο καὶ φοροῦν γυαλιὰ ἀπὸ γυαλί πού περιέχει πυριτικὸ μόλυβδο).

80. Φωτοηλεκτρικὸ φαινόμενο

α. Πειραματικὴ ἀπόδειξη. Ἐνας ἀερόκενος γυάλινος σωλήνας ἔχει ἄνοιγμα πού κλείνεται μὲ γυαλί ἀπὸ χαλαζία, ὁ ὁποῖος εἶναι διαφανὴς στὶς ὑπεριώδεις ἀκτίνες (σχ. 119). Μέσα στοῦ σωλήνα ὑπάρχουν δύο μεταλλικὰ ἠλεκτρόδια, ἡ ἄνοδος (A) καὶ ἡ κάθοδος (K), πού συνδέονται μὲ τοὺς δύο πόλους μιᾶς γεννήτριας. Στὸ κύκλωμα ὑπάρχει καὶ εὐαίσθητο ἄμπερόμετρο (μικροἰάμπερόμετρο). Ὄταν πάνω στὴν κάθοδο πέσουν ὑπεριώδεις ἀκτίνες, τὸ κύκλωμα διαρρέεται ἀπὸ ρεῦμα. Αὐτὸ συμβαίνει, γιατί ἀπὸ τὴν κάθοδο *ἀποσπῶνται ἠλεκτρόνια*, τὰ ὅποια μὲ τὴν ἐπίδραση τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου ἔρχονται στὴν ἄνοδο καὶ ἔτσι κλείνει τὸ κύκλωμα. Τὸ φαινόμενο αὐτὸ ὀνομάζεται **φωτοηλεκτρικὸ φαινόμενο**. Τὰ ἠλεκτρόνια πού ἀποσπῶνται ἀπὸ τὸ μέταλλο τῆς καθόδου ὀνομάζονται *φωτοηλεκτρόνια* καὶ τὸ

ρεύμα που κυκλοφορεί στο κύκλωμα ονομάζεται *φωτοηλεκτρικό ρεύμα*. Ωστε:

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται η απόσπαση ηλεκτρονίων από τα μέταλλα, όταν πέφτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ορατή ή υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες Röntgen ή γ).



Σχ. 119. Σχηματική διάταξη για την παρατήρηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

β. Εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Ξέρουμε ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος

κύματος λ μιᾶς ηλεκτρομαγνητικῆς ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη είναι ἡ συχνότητά της ν (γιατί είναι $\nu = c/\lambda$) καί, ἐπομένως, τόσο μεγαλύτερη είναι καί ἡ ἐνέργεια $E = h\nu$ πού μεταφέρει κάθε φωτόνιο τῆς ακτινοβολίας. Γιὰ νά ἐξηγήσουμε τὸ φωτοηλεκτρικὸ φαινόμενο, κάνουμε τὰ ἐξῆς πειράματα:

1. Πάνω στὴν κάθοδο, πού ἀποτελεῖται ἀπὸ ὀρισμένο μέταλλο, π.χ. ἀπὸ λευκόχρυσο, ἀφήνουμε νά πέσουν διαδοχικὰ ἀκτινοβολίες μὲ διαρκῶς μεγαλύτερη συχνότητα ν . Παρατηροῦμε ὅτι ἀπὸ τὸ μέταλλο ἀρχίζουν νά ἀποσπῶνται φωτοηλεκτρόνια, ὅταν ἡ συχνότητα ν τῆς ἀκτινοβολίας πού πέφτει πάνω στό μέταλλο γίνεи ἴση ἢ μεγαλύτερη ἀπὸ μιὰ ὀριακὴ συχνότητα $\nu_{ορ}$, πού εἶναι χαρακτηριστικὴ γιὰ τὸ θεωρούμενο μέταλλο. Αὐτὸ δείχνει ὅτι ἀπὸ τὸ μέταλλο ἀποσπῶνται φωτοηλεκτρόνια, μόνο ὅταν κάθε φωτόνιο, πού πέφτει πάνω στό μέταλλο, ἔχει ἐνέργεια E ἴση ἢ μεγαλύτερη ἀπὸ μιὰ ὀριακὴ τιμὴ, πού εἶναι ἴση μὲ $E_{ορ} = h\nu_{ορ}$.
2. Πάνω στὴν κάθοδο ἀφήνουμε νά πέσει μονοχρωματικὴ ἀκτινοβολία πού ἔχει συχνότητα ν μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν ὀριακὴ συχνότητα ν ($\nu > \nu_{ορ}$). Τότε ἀπὸ τὴν κάθοδο ἀποσπῶνται φωτοηλεκτρόνια. Ὄταν αὐξήσουμε τὴ φωτεινὴ ροή, δηλαδή τὸν ἀριθμὸ τῶν φωτονίων, πού πέφτουν πάνω στό μέταλλο, ἀνά sec., αὐξάνει ἡ ἔνταση I τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ ρεύματος, δηλαδή αὐξάνει ὁ ἀριθμὸς τῶν ἠλεκτρονίων πού ἀποσπῶνται ἀπὸ τὸ μέταλλο.

Τὰ παραπάνω πειράματα δείχνουν ὅτι γιὰ νά ἀποσπαστεῖ ἓνα ἠλεκτρόνιο ἀπὸ ἓνα ἄτομο τῆς ἐπιφάνειας τοῦ μετάλλου, πρέπει νά δαπανηθεῖ ὀρισμένο ἔργο b , πού ονομάζεται ἔργο ἐξαγωγῆς καί ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴ φύση τοῦ μετάλλου. Ὄταν ἓνα φωτόνιο πέφτει πάνω στό μέταλλο, τότε ἡ ἐνέρ-

γεια ην του φωτονίου απορροφᾶται μόνο από ένα ηλεκτρόνιο ενός ατόμου του μετάλλου. Αν αυτή ή ενέργεια ην είναι μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής b , τότε το ηλεκτρόνιο υπερνικᾶ τις δυνάμεις πού το συγκρατοῦν μέσα στό ἄτομο καί τό ηλεκτρόνιο βγαίνει από τό ἄτομο μέ ταχύτητα v καί κινητική ἐνέργεια $\frac{1}{2} m_e v^2$. Σ' αὐτή τήν περίπτωση ἡ ἀρχή τῆς διατηρήσεως τῆς ἐνέργειας ἐκφράζεται μέ τή φωτοηλεκτρική ἐξίσωση τοῦ Einstein :

$$\text{φωτοηλεκτρική ἐξίσωση} \quad \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h \cdot \nu - b$$

Τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο τό ἐξήγησε ὁ Einstein γενικεύοντας τή θεωρία τῶν κβάντα πού ἀρχικά διατύπωσε ὁ Planck.

Νόμοι τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου. Ἀπό τά παραπάνω συνάγονται οἱ ἐξῆς νόμοι τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου :

I. Ἡ ἀπόσπαση φωτοηλεκτρονίων ἀπό ένα μέταλλο εἶναι δυνατή, μόνο ὅταν ἡ ἐνέργεια ην τοῦ φωτονίου πού πέφτει πάνω στό μέταλλο εἶναι ἰση ἢ μεγαλύτερη ἀπό τό έργο εξαγωγῆς b , πού εἶναι χαρακτηριστικό γιά τό μέταλλο τῆς καθόδου.

$$\text{ἀπόσπαση φωτοηλεκτρονίου} \quad h\nu \geq b$$

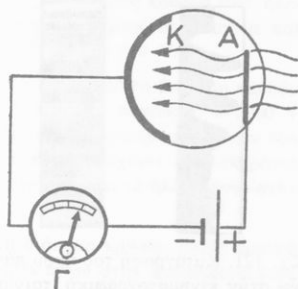
II. Ὁ ἀριθμός τῶν φωτοηλεκτρονίων πού ἀποσπῶνται ἀπό τήν κάθοδο κατά μονάδα χρόνου εἶναι ἀνάλογος μέ τόν ἀριθμό τῶν φωτονίων πού πέφτουν πάνω στήν κάθοδο κατά μονάδα χρόνου.

III. Ἡ κινητική ἐνέργεια τῶν φωτοηλεκτρονίων πού βγαίνουν ἀπό τήν κάθοδο δίνεται ἀπό τή φωτοηλεκτρική ἐξίσωση τοῦ Einstein.

Γιά τά μέταλλα καίσιο, κάλιο, νάτριο καί λίθιο τό έργο εξαγωγῆς b εἶναι μικρό καί γι' αὐτό ἀπό τά μέταλλα αὐτά εὐκόλα ἀποσπῶνται φωτοηλεκτρόνια καί μέ φωτόνια τῶν ὁρατῶν ἀκτινοβολιῶν πού μεταφέρουν μικρή ἐνέργεια. Γιά τά ἄλλα μέταλλα χρειάζονται φωτόνια πού μεταφέρουν μεγαλύτερη ἐνέργεια καί γι' αὐτό στά μέταλλα αὐτά τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρεῖται, μόνο ὅταν στό μέταλλο πέφτουν υπεριώδεις ἀκτινοβολίες.

γ. Ἐφαρμογές τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου. Τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ἔχει σημαντικές ἐφαρμογές. Τό φωτοκύτταρο εἶναι γυάλινος σωλήνας πού περιέχει ένα ἀέριο (ἀργό, ἥλιο) μέ πολύ μικρή πίεση (περίπου 0,1 mm Hg). Ένα τμήμα τῶν ἐσωτερικῶν τοιχωμάτων τοῦ σωλήνα

είναι σκεπασμένο με ένα στρώμα από *καίσιο* (κάθοδος) που είναι ευαίσθητο στις όρατες ακτινοβολίες (σχ. 120). Η άνοδος αποτελείται από ερθύγραμμο ή κυκλικό ηλεκτρόδιο. Η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος είναι ανάλογη με τη φωτεινή ροή που πέφτει πάνω στην κάθοδο. Τα φωτοκύτταρα τά χρησιμοποιούμε, όταν θέλουμε να μετατρέπονται οι μεταβολές της φωτεινής ροής σε μεταβολές της έντάσεως του ρεύματος. Τό φωτοκύτταρο δέν παρουσιάζει καμιά αδράνεια καί γι' αυτό ή ένταση του



Σχ. 120. Φωτοκύτταρο.

φωτοηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλεται τήν ίδια στιγμή που συμβαίνει ή μεταβολή της φωτεινής ροής. Σήμερα τά φωτοκύτταρα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, π.χ. για τόν αυτόματο έλεγχο καί τή ρύθμιση της λειτουργίας μηχανών, για τή ρύθμιση της κυκλοφορίας όχημάτων, σε συστήματα άσφαλείας χρηματοκιβωτίων, στόν ήχητικό κινηματογράφο κ.ά.

Ένα φωτοκύτταρο ειδικής μορφής είναι ό *φωτοπολλαπλασιαστής*, ό όποιος πολλαπλασιάζει τά λίγα φωτοηλεκτρόνια που άρχικά βγαίνουν από τήν κάθοδο (σε κάθε ένα φωτοηλεκτρόνιο που βγαίνει από τήν κάθοδο αντίστοιχούν 10^6 ως 10^8 ηλεκτρόνια που φτάνουν στην άνοδο).

81. Ήχητικός κινηματογράφος

Στόν *ήχητικό κινηματογράφο* πάνω στην κινηματογραφική ταινία αποτυπώνονται ταυτόχρονα οι εικόνες καί οι ήχοι. Η άποτύπωση τών εικόνων βασίζεται στις μεθόδους της φωτογραφίας. Η άποτύπωση τών ήχων πάνω στην κινηματογραφική ταινία ονομάζεται *ήχοληψία* καί γίνεται με τήν έξης σειρά μετατροπών:

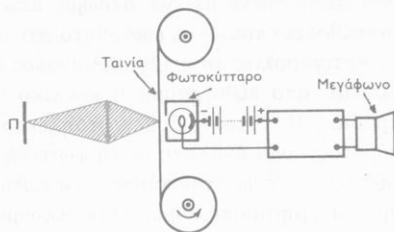
ήχος → μεταβολή έντάσεως ρεύματος → φώς

Η μετατροπή του ήχου σε ηλεκτρικό ρεύμα γίνεται με τό *μικρόφωνο*. Τό ρεύμα του μικροφώνου, άφου ένισχυθεί, μετατρέπεται σε φώς με διάφορους τρόπους, από τούς όποιους άπλούστερος είναι ό έξης:

Τό ρεύμα του μικροφώνου περνάει από μιά ειδική *λυχνία αΐγλης*, ή όποία σε κάθε στιγμή παράγει φωτεινή ροή ανάλογη με τήν ένταση του μικροφωνικού ρεύματος. Οι μεταβολές της φωτεινής ροής αποτυπώνονται πάνω σε φωτογραφική ταινία που ξετυλίγεται όμαλά (σχ. 121). Έτσι πάνω στην ταινία άποτυπώνονται περιοχές που παρουσιάζουν διαφορετικό μαύρισμα



Σχ. 121. Καταγραφή του ήχου πάνω στην κινηματογραφική ταινία (οι ζώνες με τό διαφορετικό μαύρισμα αντίστοιχουν σε ήχους).



Σχ. 122. Σχηματική παράσταση της αναπαραγωγής του ήχου από την κινηματογραφική ταινία. Τό φωτοηλεκτρικό ρεύμα, άφου ένισχυθεί, πηγαίνει στο μεγάφωνο.

(όπτική έγγραφή τών ήχων). Αυτές οί περιοχές άποτυπώνονται δίπλα άπό τίς αντίστοιχες εικόνες.

Όταν γίνεται προβολή τής ταινίας, οί εικόνες φωτίζονται άπό τόν προβολέα καί προβάλλονται στην οθόνη. Ό ήχος πού είναι άποτυπωμένος πάνω στην ταινία αναπαράγεται με τήν έξής σειρά μετατροπών:

φώς \rightarrow μεταβολή έντάσεως ρεύματος \rightarrow ήχος

Ή μετατροπή τού φωτός σε ρεύμα γίνεται με τό φωτοκύτταρο. Ή ταινία ξετυλίγεται καί περνάει μεταξύ μιās φωτεινής πηγής καί τού φωτοκυττάρου (σχ. 122). Ή μεταβλητή φωτεινή ροή πού πέφτει στο φωτοκύτταρο δημιουργεί φωτοηλεκτρικά ρεύματα μεταβλητής έντάσεως. Αυτά τά ρεύματα, άφου ένισχυθούν, έρχονται στο μεγάφωνο πού βρίσκεται πίσω άπό τήν οθόνη καί μετατρέπει τίς μεταβολές τής έντάσεως τού ρεύματος σε αντίστοιχους ήχους.

Σήμερα εφαρμόζεται καί ή μαγνητική έγγραφή τών ήχων πάνω σε λεπτή χαλύβδινη ταινία.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

110. Σε μία δίοδο ηλεκτρονική λυχνία μεταξύ τής άνόδου καί τής καθόδου εφαρμόζεται τάση $U = 250 \text{ V}$. 1) Με πόση κινητική ένέργεια φτάνουν τά ηλεκτρόνια στην άνοδο; 2) Άν τό άνοδικό ρεύμα έχει ένταση $I = 6,4 \text{ mA}$, πόσα ηλεκτρόνια φτάνουν κάθε δευτερόλεπτο στην άνοδο καί πόση ισχύς δαπανάται μέσα στη δίοδο λυχνία; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$. $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kgr}$.

111. Σε μία δίοδο ηλεκτρονική λυχνία βγαίνουν από τη διάπυρη κάθοδο 10^{15} ηλεκτρόνια κατά δευτερόλεπτο. Πόση είναι η ένταση του ρεύματος μέσα στη λυχνία και πόση ισχύς μεταφέρεται στην άνοδο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $U_A = 150$ V.

112. Σε έναν ηλεκτρονικό σωλήνα τα ηλεκτρόνια βγαίνουν από τη διάπυρη κάθοδο χωρίς αρχική ταχύτητα και επιταχύνονται με την επίδραση της τάσεως $U = 2000$ V που υπάρχει μεταξύ της άνοδου και της καθόδου. Η απόσταση μεταξύ αυτών των δύο ηλεκτροδίων είναι $l = 20$ cm. 1) Πόση είναι η δύναμη F που επιταχύνει το ηλεκτρόνιο και πόση είναι η επιτάχυνση γ ; 2) Μέ πόση κινητική ενέργεια φτάνει το ηλεκτρόνιο στην άνοδο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

113. Θεωρούμε ότι ένα ηλεκτρόνιο βγαίνει από τη διάπυρη κάθοδο χωρίς αρχική ταχύτητα και εξαιτίας της τάσεως επιταχύνεται και πέφτει πάνω στην αντικάθοδο ενός σωλήνα Coolidge με ταχύτητα $v = 2 \cdot 10^4$ km/sec. 1) Μέ πόση κινητική ενέργεια το ηλεκτρόνιο φτάνει στην αντικάθοδο και πόση είναι η τάση U ; 2) Αν κατά τη σύγκρουση του ηλεκτρονίου με την αντικάθοδο ολοκληρη η ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου Röntgen, πόση είναι η συχνότητα ν του φωτονίου; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

114. Σε ένα σωλήνα Coolidge εφαρμόζεται τάση $U = 2 \cdot 10^5$ V. Αν ολοκληρη η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατραπεί σε ενέργεια ενός φωτονίου, πόση είναι η συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ αυτής της ακτινοβολίας; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

115. Γιά μία ακτινογραφία χρειαζόμαστε ακτίνες Röntgen με μήκος κύματος $\lambda = 0,12$ Å. Η ένταση της ηλεκτρονικής δέσμης που πέφτει πάνω στην αντικάθοδο είναι 50 mA. 1) Πόση τάση U πρέπει να εφαρμόσουμε στο σωλήνα Coolidge; 2) Πόση ισχύ μεταφέρει η ηλεκτρονική δέσμη; 3) Αν ο συντελεστής αποδόσεως της αντικαθόδου σε ακτινοβολία Röntgen είναι $\eta = 0,003$, πόση ισχύ μεταφέρει η δέσμη των ακτίνων Röntgen; (Τό η φανερώνει ότι από τά 1000 ηλεκτρόνια που πέφτουν πάνω στην αντικάθοδο μόνο 3 από αυτά προκαλούν την έκπομπή 3 φωτονίων). $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

116. Σε ένα φωτοκύταρο τό φωτοηλεκτρικό ρεύμα έχει ένταση $I = 10^{-10}$ A. Πόσα ηλεκτρόνια βγαίνουν από την κάθοδο κάθε δευτερόλεπτο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

117. Πάνω σε μία μεταλλική πλάκα πέφτει ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος $\lambda = 1$ Å. Γιά τό μέταλλο αυτό τό έργο εξαγωγής b θεωρείται άσημαντο. Πόση είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου που βγαίνει από την κάθοδο; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

118. Πάνω στην κάθοδο ενός φωτοκυτάρου πέφτει ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος $\lambda_{op} = 0,66 \cdot 10^{-6}$ m, δηλαδή τό όριακό μήκος κύματος γιά τό μέταλλο της καθόδου. Πόσο είναι τό έργο εξαγωγής γιά τό μέταλλο της καθόδου; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

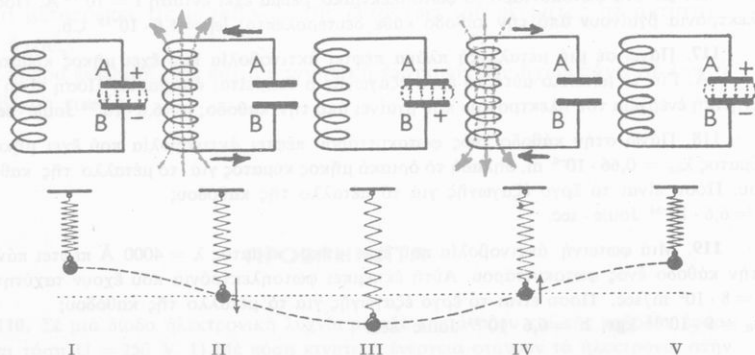
119. Μιά φωτεινή ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος $\lambda = 4000$ Å πέφτει πάνω στην κάθοδο ενός φωτοκυτάρου. Αυτή εκπέμπει φωτοηλεκτρόνια που έχουν ταχύτητα $v = 8 \cdot 10^5$ m/sec. Πόσο είναι τό έργο εξαγωγής γιά τό μέταλλο της καθόδου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

82. Ήλεκτρικές ταλαντώσεις

Ένα κύκλωμα αποτελείται από έναν πυκνωτή που έχει χωρητικότητα C και από ένα πηνίο, που έχει συντελεστή αυτεπαγωγής L και άσημαντη ωμική αντίσταση (σχ. 123). Η ωμική αντίσταση (R) του κυκλώματος θεωρείται ίση με μηδέν και επομένως σ' αυτό το κύκλωμα δέ συμβαίνει άπωλεια ενέργειας εξαιτίας του φαινομένου Joule (δηλαδή δέ συμβαίνει μετατροπή τής ηλεκτρικής ενέργειας σέ θερμότητα). Αυτό το κύκλωμα ονομάζεται κύκλωμα Thomson.

Φορτίζουμε τόν πυκνωτή (σχ. 123). Τότε οί όπλισμοί του έχουν αντίστοιχα φορτίο $+Q$ και $-Q$ και μεταξύ τών όπλισμών του υπάρχει τάση U . Άρα ό πυκνωτής έχει ενέργεια $\frac{1}{2}QU$, που είναι αποταμιευμένη μέσα στό ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ τών όπλισμών του πυκνωτή (ηλεκτροστατική ενέργεια).

Έπειδή οί δύο όπλισμοί του πυκνωτή συνδέονται μεταξύ τους μέ τό πηνίο, ό πυκνωτής αρχίζει νά έκφορτίζεται. Τότε τό πηνίο διαρρέεται από ρεύμα και στό έσωτερικό του δημιουργείται μαγνητικό πεδίο (σχ. 123 II). Όταν ό πυκνωτής έκφορτίζεται, ή ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου συνεχώς ελαττώνεται, ενώ αντίθετα ή ενέργεια του μαγνητικού πεδίου συνεχώς αυξάνει. Και όταν ό πυκνωτής έκφορτιστεί, τότε όλη ή ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου έχει μετατραπεί σέ ενέργεια μαγνητικού πεδίου



Σχ. 123. Στο κύκλωμα ταλαντώσεων τό ηλεκτρικό φορτίο εκτελεί ταλάντωση ανάλογη μέ τή μηχανική ταλάντωση μιός σφαίρας κρεμασμένης από έλατήριο.

$\frac{1}{2} L I^2$ (ήλεκτρομαγνητική ενέργεια). "Όταν ο πυκνωτής εκφορτιστεί, τό ρεύμα καταργείται. Τότε από αὐτεπαγωγή δημιουργείται μέσα στο πηνίο ρεύμα, πού είναι *ὁμόροσο* μέ τό ρεύμα πού διακόπηκε. Αυτό τό ρεύμα φορτίζει τόν πυκνωτή, ἀλλά μέ αντίθετη τώρα πολικότητα (σχ. 123 III). Τό μαγνητικό πεδίο καταργήθηκε καί ἡ ἐνέργειά του ἔχει μετατραπεί σέ ἐνέργεια τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου πού ὑπάρχει τώρα μεταξύ τῶν ὀπλισμῶν τοῦ πυκνωτή. Ἀκολουθεῖ ἔπειτα νέα ἐκφόρτιση τοῦ πυκνωτή, πού δημιουργεῖ νέο μαγνητικό πεδίο (σχ. 123 IV). Αυτό, ὅταν καταργηθεῖ, προκαλεῖ νέα φόρτιση τοῦ πυκνωτή, ἀλλά μέ *τήν ἀρχική του πολικότητα* (σχ. 123 V).

Ἐπειδή δεχτήκαμε ὅτι σ' αὐτό τό κύκλωμα δέν ὑπάρχουν ἀπώλειες ἐνέργειας, τό φαινόμενο θά ἐπαναλαμβάνεται διαρκῶς, δηλαδή μέσα στό κύκλωμα δημιουργεῖται ἕνα *ἡμιτονοειδές ρεῦμα* μεγάλης συχνότητας, πού ὀνομάζεται **ἠλεκτρική ταλάντωση**. Τό κύκλωμα Thomson λέγεται καί *κύκλωμα ταλαντώσεων*. Ἀπό τά παραπάνω βγάζουμε τό ἐξῆς συμπέρασμα :

Ἡ ἠλεκτρική ταλάντωση πού παράγεται σέ ἕνα κύκλωμα Thomson ὀφείλεται σέ περιοδική μετατροπή τῆς ἐνέργειας τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου τοῦ πυκνωτή σέ ἐνέργεια τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τοῦ πηνίου καί ἀντίστροφα.

Αὐτές οἱ μετατροπές τῆς ἐνέργειας προκαλοῦνται ἀπό *τήν αὐτεπαγωγή* τοῦ πηνίου, ἡ ὁποία εἶναι ἡ κύρια αἰτία γιά τήν παραγωγή τῶν ἠλεκτρικῶν ταλαντώσεων.

Περίοδος καί συχνότητα τῶν ἠλεκτρικῶν ταλαντώσεων. Ἄν σέ ἕνα κύκλωμα Thomson ὁ πυκνωτής ἔχει χωρητικότητα C καί τό πηνίο ἔχει συντελεστή αὐτεπαγωγῆς L, ἀποδεικνύεται ὅτι ἡ *ἰδιοπερίοδος* (T_0) τῆς ἠλεκτρικῆς ταλαντώσεως πού παράγεται μέσα σ' αὐτό τό κύκλωμα δίνεται ἀπό τήν ἀκόλουθη **ἐξίσωση τοῦ Thomson** :

$$\boxed{\text{ἐξίσωση τοῦ Thomson } T_0 = 2\pi \sqrt{LC}} \quad \left\{ \begin{array}{l} L \text{ σέ H, } C \text{ σέ F} \\ T \text{ σέ sec} \end{array} \right.$$

Ἐπομένως ἡ *ἰδιοσυχνότητα* (ν_0) τῆς ἠλεκτρικῆς ταλαντώσεως εἶναι

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0} \quad \text{καί} \quad \nu_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Ἐπειδή στό κύκλωμα Thomson δέν ὑπάρχουν ἀπώλειες ἐνέργειας, ἡ ἠλεκτρική ταλάντωση εἶναι *ἀμείωτη*, δηλαδή τό πλάτος (I_0) τῆς ἐντάσεως τοῦ ἡμιτονοειδοῦς ρεύματος διατηρεῖται *στεθερό*. Αὐτή ἡ ἠλεκτρική ταλάντωση εἶναι *ελεύθερη ταλάντωση*, ἀνάλογη μέ τή μηχανική ταλάντωση

πού έκτελει μιά μεταλλική σφαίρα κρεμασμένη από σπειροειδές ελατήριο (σχ. 123).

Παράδειγμα. Σέ ένα κύκλωμα Thomson ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C = 0,01 \mu\text{F}$ και τό πηνίο έχει συντελεστή αὐτεπαγωγῆς $L = 1 \mu\text{H}$. Ἡ ἠλεκτρική ταλάντωση έχει ἰδιοπερίοδο

$$T_0 = 2\pi \sqrt{LC} = 2\pi \cdot \sqrt{10^{-6} \text{ H} \cdot 10^{-8} \text{ F}} \quad \text{καί} \quad T_0 = 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$$

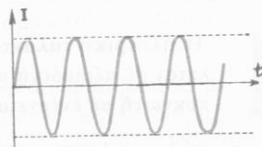
Ἡ ἰδιοσυχνότητα τῆς ἠλεκτρικῆς ταλαντώσεως εἶναι

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{10^7}{6,28} \text{ sec}^{-1} \quad \text{ἢ} \quad \nu_0 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 1,6 \text{ MHz}$$

Παρατηροῦμε ὅτι οἱ ἠλεκτρικὲς ταλαντώσεις εἶναι *ἐναλλασσόμενα ρεύματα ψηλῆς συχνότητας*.

83. Παραγωγή ἠλεκτρικῶν ταλαντώσεων

Σέ ένα κύκλωμα Thomson στήν πραγματικότητα ὑπάρχουν πάντοτε ἀπώλειες ἐνέργειας ἐξαιτίας τοῦ φαινομένου Joule καί ἐπομένως τό πλάτος τῆς ἐντάσεως (I_0) τοῦ ρεύματος συνεχῶς ἐλαττώνεται. Γιά νά διατηρηθεῖ σταθερό τό πλάτος τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος (σχ. 124), πρέπει ρυθμικά νά προσφέρεται ἀπέξω στό κύκλωμα τόση ἀκριβῶς ἐνέργεια, ὅση εἶναι ἡ ἐνέργεια πού χάνεται μέ τίς ἀπώλειες. Αὐτό τό πετυχαίνουμε μέ τήν *τριόδο ἠλεκτρονική λυχνία*.



Σχ. 124. Τό πλάτος τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος διατηρεῖται σταθερό.

84. Ἐπαγωγική σύζευξη δύο κυκλωμάτων ταλαντώσεων

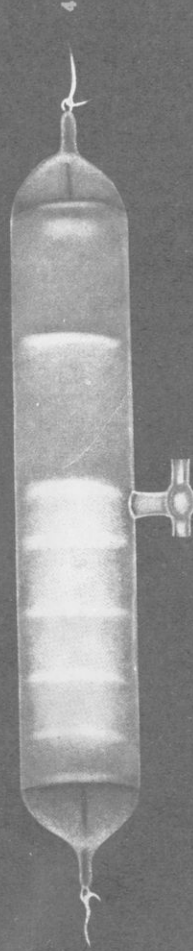
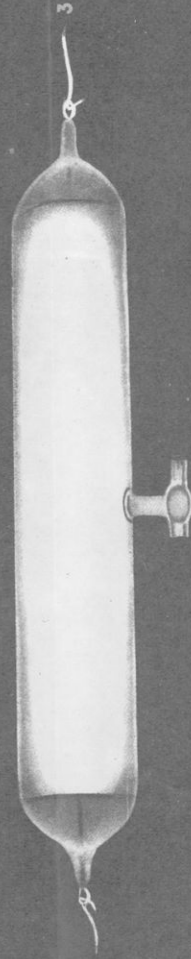
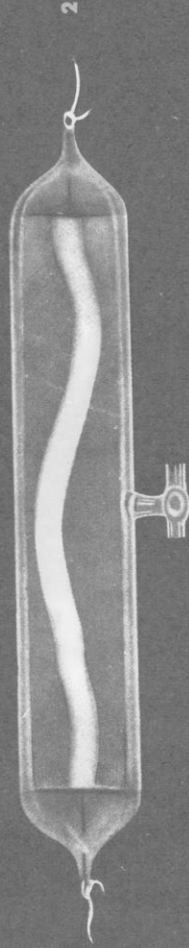
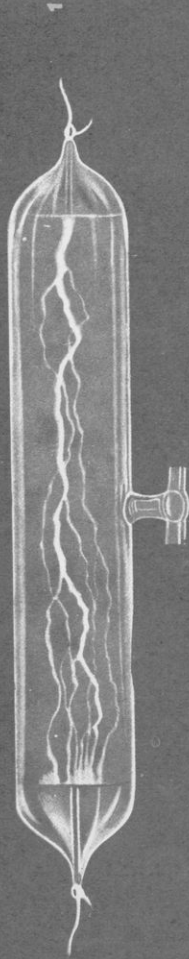
Ἔχουμε δύο κυκλώματα Thomson, τά Α καί Β (σχ. 125). Τό πρῶτο κύκλωμα έχει ἰδιοπερίοδο $T_1 = 2\pi \sqrt{L_1 C_1}$. Τά πηνία L_1 καί L_2 τῶν δύο κυκλωμάτων βρίσκονται σέ μικρή ἀπόσταση τό ένα ἀπό τό ἄλλο. Στό πρῶτο κύκλωμα παράγεται ἀμειωτή ἠλεκτρική ταλάντωση μέ ἰδιοπερίοδο T_1 . Οἱ δυναμικὲς γραμμὲς τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου πού παράγεται ἀπό τό πηνίο L_1 , περνοῦν ἀπό τίς σπείρες τοῦ πηνίου L_2 . Τότε λέμε ὅτι μεταξύ τῶν δύο κυκλωμάτων Α καί Β ὑπάρχει *ἐπαγωγική σύζευξη*. Ἡ μαγνητική ροή πού περνάει ἀπό τίς σπείρες τοῦ πηνίου L_2 μεταβάλλεται ἡμιτονοειδῶς μέ τή συχνότητα ν_1 , πού έχει ἡ ἠλεκτρική ταλάντωση στό πρῶτο κύκλωμα Α. Ἐτσι μέσα στό δεύτερο κύκλωμα Β παράγεται *ἐξαναγκασμένη ἠλεκτρική ταλάντωση*, πού έχει περίοδο T_1 ἴση μέ τήν ἰδιοπερίοδο τοῦ πρώτου κυκλώματος Α.

Διάφορες φάσεις τής ηλεκτρικής έκκενώσεως

1. 'Υπό τήν ατμοσφαιρική πίεση ό ηλεκτρικός σπινθήρας εΐναι διακλαδισμένος.
2. 'Υπό πίεση ίση μέ τό 1/4 τής ατμοσφαιρικής ό ηλεκτρικός σπινθήρας έχει τήν όψει έγχρωμης φωτεινής στήλης.
3. 'Υπό πίεση ίση μέ τό 1/20 τής ατμοσφαιρικής όλο τό άέριο φωτοβολεί.
4. 'Υπό πίεση ίση μέ τό 1/100 τής ατμοσφαιρικής έμφανίζονται σκοτεινές περιοχές μέσα στό σωλήνα.
5. 'Υπό πίεση ίση μέ τό 1/1000 τής ατμοσφαιρικής τό στενό τμήμα του σωλήνα φωτοβολεί ισχυρότερα.

ΑΝΟΔΟΙ (+)

ΚΑΘΟΔΟΙ (-)



Ή ηλεκτρική ταλάντωση στο δεύτερο κύκλωμα Β άποδεικνύεται από τή φωτοβολία του λαμπτήρα. Τό κύκλωμα Β έχει μεταβλητό πυκνωτή. Μεταβάλλοντας τή χωρητικότητα του πυκνωτή μεταβάλλουμε τήν ιδιοπερίοδο του κυκλώματος Β. Τότε βρίσκουμε ότι τό πλάτος τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως στο δεύτερο κύκλωμα παίρνει τή μέγιστη τιμή, όταν ή ιδιοπερίοδος του δεύτερου κυκλώματος $T_2 = 2\pi \sqrt{L_2 C_2}$ γίνει ίση μέ τήν ιδιοπερίοδο T_1 του πρώτου κυκλώματος, δηλαδή όταν είναι :

$$T_1 = T_2 \quad \eta \quad 2\pi \sqrt{L_1 C_1} = 2\pi \sqrt{L_2 C_2}$$

Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μεταξύ των δύο κυκλωμάτων υπάρχει συντονισμός. Τότε ή φωτοβολία του λαμπτήρα είναι έντονη. Ωστε :

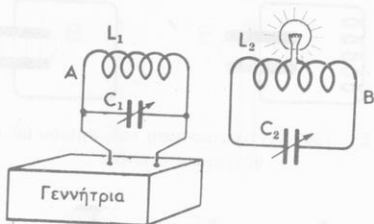
Δύο κυκλώματα ταλαντώσεων πού συνδέονται μέ επαγωγική σύζευξη βρίσκονται σέ συντονισμό, όταν ισχύει ή εξίσωση :

συνθήκη συντονισμού $L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2$

Ή ηλεκτρική ταλάντωση πού παράγεται μέσα στο δεύτερο κύκλωμα οφείλεται σέ ενέργεια πού μεταφέρεται από τό πρώτο κύκλωμα μέ τό μαγνητικό πεδίο του.

85. Παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο

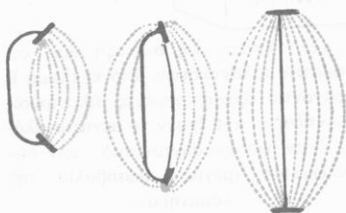
Οί ηλεκτρικές ταλαντώσεις μέσα σέ ένα κύκλωμα ταλαντώσεων μπορούν νά προκαλέσουν εξαναγκασμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις μέσα σέ δεύτερο κύκλωμα ταλαντώσεων πού βρίσκεται κοντά στο πρώτο κύκλωμα (σχ. 125). Ή διέγερση του δεύτερου κυκλώματος οφείλεται μόνο στην επίδραση του μαγνητικού πεδίου πού δημιουργείται γύρω από τό πρώτο κύκλωμα, γιατί τό ηλεκτρικό πεδίο μένει έντοπισμένο μεταξύ των δύο όπλισμών του πυκνωτή. Μπορούμε όμως νά προκαλέσουμε τή διέγερση του δεύτερου κυκλώματος καί μέ τό ηλεκτρικό πεδίο του πρώτου κυκλώματος, αν διαμορφώσουμε κατάλληλα τά δύο κυκλώματα ταλαντώσεων.



Σχ. 125. Ή επαγωγική σύζευξη δύο κυκλωμάτων ταλαντώσεων. Στο κύκλωμα Β παράγονται εξαναγκασμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις, πού έχουν τό μέγιστο πλάτος, όταν υπάρχει συντονισμός των δύο κυκλωμάτων (μέγιστη φωτοβολία του λαμπτήρα).



Σχ. 126. 'Αντικατάσταση του πηνίου με ευθύγραμμο αγωγό



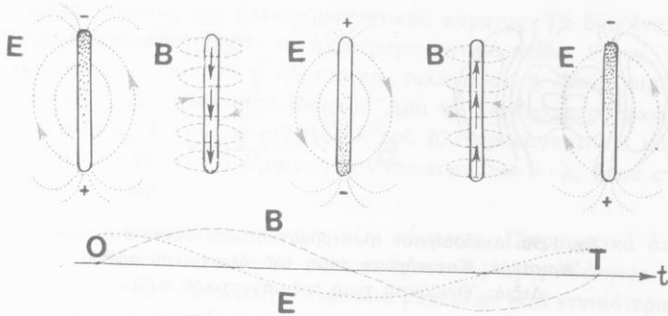
Σχ. 127. Τό ηλεκτρικό πεδίο απλώνεται στο χώρο.

του να καταλήγει ελεύθερα ή να έχει μικρές πλάκες ή σφαιρές. Αυτό τό ανοιχτό κύκλωμα Thomson, που αποτελείται μόνο από έναν ευθύγραμμο αγωγό, ονομάζεται **παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο**, γιατί σε μία στιγμή της ηλεκτρικής ταλάντωσης στις δύο άκρες του αγωγού βρίσκονται ίσα και αντίθετα ηλεκτρικά φορτία (όπως συμβαίνει και στους δύο όπλισμούς του πυκνωτή στο κλειστό κύκλωμα Thomson). 'Ο ευθύγραμμος αγωγός μπορεί να έχει στη μέση του μία μικρή διακοπή (σπινθηριστή).

86. 'Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων

α. Τό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. "Όταν μέσα στο παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο παράγεται αμείωτη ηλεκτρική ταλάντωση, στις δύο άκρες του διπόλου αναπτύσσεται έναλασσόμενη τάση, γιατί περιοδικά τά ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού συγκεντρώνονται τότε στη μία και τότε στην άλλη άκρη του διπόλου. 'Ετσι οί δύο άκρες του διπόλου αποκτούν διαδοχικά θετικό και άρνητικό δυναμικό. 'Επομένως γύρω από τό δίπολο δημιουργείται ένα **έναλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο** (σχ. 128). 'Εξαιτίας της έναλασσόμενης τάσεως δημιουργείται μέσα στον αγωγό έναλασσόμενο ρεύμα, που παράγει γύρω του ένα **έναλασσόμενο μαγνητικό πεδίο**. Οί δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι όμόκεντροι κύκλοι, κάθετοι στον αγωγό. "Όταν σιγά - σιγά εξασθενίζει τό ηλεκτρικό πεδίο, ενισχύεται τό μαγνητικό πεδίο και αντίστροφα, όταν εξασθενίζει τό μαγνητικό πεδίο,

Στό κύκλωμα Thomson στη θέση του πηνίου βάζουμε έναν ευθύγραμμο αγωγό (σχ. 126). Αυτή ή αντικατάσταση του πηνίου δέν αλλάζει τίς ιδιότητες του κυκλώματος, αλλά προκαλεί μόνο ελάττωση του συντελεστή αὐτεπαγωγῆς (L) του κυκλώματος και επομένως ελάττωση τῆς ιδιοπεριόδου (T) του κυκλώματος. Σιγά - σιγά ἀπομακρύνουμε τόν ένα όπλισμό του πυκνωτή από τόν άλλο, ὥσπου οί δύο όπλισμοί νά βρεθοῦν στίς δύο ἄκρες ἑνός ευθύγραμμου αγωγού (σχ. 127). Τότε τό ηλεκτρικό πεδίο ἀπλώνεται στό χώρο. 'Ο ευθύγραμμος αγωγός μπορεί στίς δύο ἄκρες

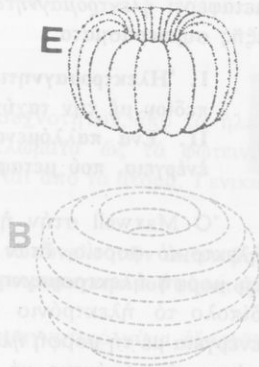


Σχ. 128. Γύρω από το παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο σχηματίζονται ένα *έναλλασσόμενο* ηλεκτρικό πεδίο (\vec{E}) και ένα *έναλλασσόμενο* μαγνητικό πεδίο (\vec{B}).

ένισχύεται τό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτά τά δύο *έναλλασσόμενα πεδία*, τό ηλεκτρικό και τό μαγνητικό, είναι *άλληλένδετα* και *άποτελούν* τό *ήλεκτρομαγνητικό πεδίο*. Ωστε :

Ή *ηλεκτρική ταλάντωση* πού παράγεται μέσα στό *παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο* δημιουργεί γύρω άπό αυτό *έναλλασσόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο*, πού είναι *άλληλένδετα* και *άποτελούν* τό *ήλεκτρομαγνητικό πεδίο*.

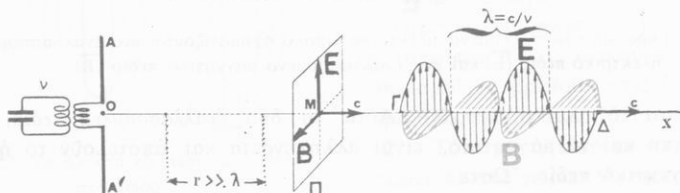
β. Ήλεκτρομαγνητικά κύματα. Κάθε μισή περίοδο *άλλάζει* ή *φορά* των *δυναμικών γραμμών* του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Στο διάστημα αυτό τό ηλεκτρικό και τό μαγνητικό πεδίο *διαδίδονται* στό *γύρω χώρο* μέ τήν ταχύτητα του φωτός (c) και έτσι οί *δυναμικές γραμμές* των δύο πεδίων *συνεχώς άπλώνονται* μέσα στό χώρο γύρω άπό τό δίπολο (σχ. 129). Σέ ένα σημείο M του χώρου πού βρίσκεται σέ *άρκετή άπόσταση* άπό τό δίπολο ή *ένταση* \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου και ή *μαγνητική έπαγωγή* \vec{B} του μαγνητικού πεδίου είναι *κάθετες* μεταξύ τους και *κάθετες* στη διεύθυνση τής *διαδόσεως* του *ήλεκτρομαγνητικού πεδίου* (σχ. 130). Στη διάρκεια μιās περιόδου τά μεγέθη E και B *μεταβάλλονται ήμιτονοειδώς* και σέ κάθε στιγμή *έχουν* τήν *ίδια φάση* (δηλαδή ταυτόχρονα παίρνουν τή *μεγίστη* τιμή τους και ταυτόχρονα *μηδενίζονται*). Αυτή ή *διάδοση* του *ή-*



Σχ. 129. Διάδοση του *ήλεκτρομαγνητικού πεδίου* στο χώρο. Πάνω: *διάδοση* του *ηλεκτρικού πεδίου*. Κάτω: *διάδοση* του *μαγνητικού πεδίου*.



Σχ. 129α. Διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο
 'Αριστερά: Κατακόρυφη τομή του ηλεκτρικού πεδίου
 Δεξιά: 'Οριζόντια τομή του μαγνητικού πεδίου



Σχ. 130. 'Η απόσταση r από τό παλλόμενο δίπολο είναι μεγάλη σχετικά μέ τό μήκος κύματος λ . 'Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου καί ή μαγνητική επαγωγή B του μαγνητικού πεδίου βρίσκονται σέ συμφωνία φάσεως.

λεκτρομαγνητικού πεδίου αποτελεί τό **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**, τό όποιο μεταφέρει **ηλεκτρομαγνητική ενέργεια**. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά εξής συμπεράσματα :

- I. Ήλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ή διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέ τήν ταχύτητα του φωτός.
- II. Ένα παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, πού μεταφέρεται από τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

'Ο Maxwell στήν ηλεκτρομαγνητική θεωρία του απέδειξε ότι κάθε ηλεκτρικό φορτίο, όταν κινείται μέ επιτάχυνση, **αποβάλλει ενέργεια** μέ τή μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Μέσα στο παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο τό ηλεκτρόνιο κινείται μέ επιτάχυνση καί επομένως εκπέμπει ενέργεια μέ τή μορφή **ηλεκτρομαγνητικού κύματος**. 'Η ενέργεια, τήν όποία χάνει τό κινούμενο μέ επιτάχυνση ηλεκτρόνιο, αναπληρώνεται από τή γεννήτρια πού υπάρχει στο κύκλωμα.

'Αργότερα ό Hertz επιβεβαίωσε πειραματικά τίς θεωρητικές προβλέψεις του Maxwell καί απέδειξε τήν ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Σήμερα τό ραδιόφωνο, ή τηλεόραση, τό ραντάρ είναι μεγάλες εφαρμογές των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

γ. Μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τά δύο έναλλασσόμενα πεδία πού αποτελούν τό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, έχουν τήν ίδια συχνότητα πού έχει καί ή ηλεκτρική ταλάντωση ή όποία παράγεται μέσα στό παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο. Άρα τό ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει συχνότητα ν . Τό μήκος κύματος λ του ηλεκτρομαγνητικού κύματος υπολογίζεται από τή γενική εξίσωση των κυμάτων $c = \nu \cdot \lambda$, όπου c είναι ή ταχύτητα του φωτός.

δ. Ίδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν τίς εξής ιδιότητες:

1. "Όταν πέφτουν πάνω στην επιφάνεια μετάλλων (καί γενικότερα άγωγών), ανακλώνται σύμφωνα μέ τούς νόμους τής ανακλάσεως του φωτός.

2. "Όταν περνούν τήν επιφάνεια πού χωρίζει δύο διαφορετικά διηλεκτρικά ύλικά, διαθλώνται σύμφωνα μέ τούς νόμους τής διαθλάσεως του φωτός.

3. Παράγουν φαινόμενα συμβολής καί περιθλάσεως, όπως καί στην περίπτωση του φωτός.

4. Είναι εγκάρσια κύματα, όπως είναι καί τά φωτεινά κύματα. "Όστε τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν όλες τίς ιδιότητες των φωτεινών κυμάτων. Πρώτος ό Maxwell (1865) απέδειξε ότι ή φύση των ηλεκτρομαγνητικών καί των φωτεινών κυμάτων είναι ή ίδια καί διατύπωσε τήν ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός, πού έδωσε ενιαία εξήγηση σε όλα τά ως τότε γνωστά ηλεκτρομαγνητικά καί οπτικά φαινόμενα.

87. Ήλεκτρομαγνητική άκτινοβολία

Σήμερα έχει συμπληρωθεί όλη ή σειρά των συχνοτήτων, από τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα πού παράγονται μέ κυκλώματα ως τά φωτεινά κύματα καί τίς άκτίνες Röntgen ή γ πού παράγονται από τά άτομα. Γενικά έχουμε τόν εξής όρισμό:

Ήλεκτρομαγνητική άκτινοβολία ονομάζεται τό σύνολο των άκτινοβολιών πού μεταφέρουν ενέργεια μέ τή μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Η ενέργεια πού μεταφέρεται από τό ηλεκτρομαγνητικό κύμα εξαρτάται από όρισμένα χαρακτηριστικά του κύματος.

Τό φάσμα τής ηλεκτρομαγνητικής άκτινοβολίας. Πειραματικά αποδείχτηκε ότι τά τεχνικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα, οι υπέρυθρες άκτίνες, οι όρατές άκτινοβολίες, οι υπεριώδεις άκτίνες, οι άκτίνες Röntgen καί οι άκτίνες γ είναι διάφορες μορφές ηλεκτρομαγνητικής άκτινοβολίας, πού ή

μόνη διαφορά τους είναι στο μήκος κύματος (λ) και, επομένως, και στη συχνότητα (ν). Οι συχνότητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουν τιμές από $\nu = 0$ ως $\nu = 10^{24}$ Hz. Οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που παράγουμε με κυκλώματα έχουν συχνότητες από 0 ως 10^{13} Hz και διαδίδονται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που συνήθως τα ονομάζουμε *έρτζιανά κύματα*. Οι ακτινοβολίες που έχουν συχνότητες από 10^{13} ως 10^{24} Hz παράγονται από τα άτομα και τα μόρια της ύλης, όταν βρίσκονται σε κατάσταση διεγέρσεως. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι μόνο μία μικρή περιοχή αυτού του φάσματος αποτελεί το *όρατό φάσμα*, δηλαδή τις *όρατές ακτινοβολίες*.

Τό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Συχνότητα ν (σε Hz)	Μήκος κύματος λ
10^{24}	$3 \cdot 10^{-6}$ Å
10^{21}	$3 \cdot 10^{-3}$ Å
10^{18}	3 Å
10^{15}	$3 \cdot 10^3$ Å
10^{12}	300 μm
10^9	30 cm
10^6	300 m
10^3	300 km
10^0	300 000 km

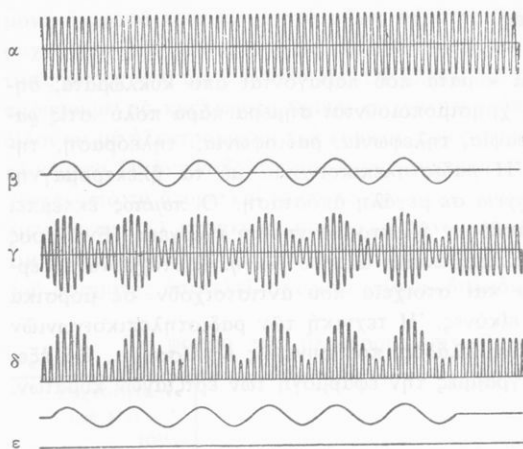
88. Ραδιοηλεκτρομαγνητικές

Τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα πού παράγονται από κυκλώματα, δηλαδή τά *έρτζιανά κύματα*, χρησιμοποιούνται σήμερα πάρα πολύ στις *ραδιοηλεκτρομαγνητικές* (τηλεγραφία, τηλεφωνία, ραδιοφωνία, τηλεόραση, τηλεφωτογραφία, ραντάρ). Η ραδιοηλεκτρομαγνητική με τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα *μεταδίδει ενέργεια* σε μεγάλη απόσταση. Ο *πομπός* εκπέμπει έρτζιανά κύματα πού μεταφέρουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Ένα μέρος από αυτή τήν ενέργεια συλλαμβάνεται από τό *δέκτη*. Ταυτόχρονα τά έρτζιανά κύματα *μεταφέρουν* και στοιχειά πού αντιστοιχούν σε μουσικά σήματα, σε ήχους ή σε εικόνες. Η τεχνική τών ραδιοηλεκτρομαγνητικών είναι σήμερα ένας τεράστιος κλάδος, πού συνεχώς εξελίσσεται. Θα εξετάσουμε σε πολύ γενικές γραμμές τήν εφαρμογή τών έρτζιανών κυμάτων.

89. Πομπός έρτζιανών κυμάτων

α. Φέρον κύμα. Ο *πομπός* έρτζιανών κυμάτων αποτελείται από ένα *κύκλωμα ταλαντώσεων*, στο όποιο παράγονται αμείωτες ηλεκτρικές ταλαντώσεις πού έχουν πολύ μεγάλη συχνότητα (ν). Η συχνότητα αυτή ονομάζεται *φέρουσα συχνότητα* (και είναι τής τάξεως του MHz). Για τήν παραγωγή αυτών τών ταλαντώσεων χρησιμοποιούνται κυρίως τρίοδοι ηλεκτρονικές λυχνίες. Τό παραπάνω κύκλωμα συνδέεται με τήν *κεραία*, πού είναι ένα παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο, στο όποιο παράγονται ηλεκτρικές ταλαντώσεις με τήν ίδια συχνότητα (ν). Η *κεραία* εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα, πού έχει *σταθερή μεγάλη συχνότητα* (ν) και ονομάζεται *φέρον κύμα*.

β. Διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Κατά τήν όμιλία και στή μουσική παράγονται ήχοι πού έχουν *χαμηλές συχνότητες* (ώς 12 kHz). Αυτοί οί ήχοι, όταν φτάνουν στο μικρόφωνο προκαλούν μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος του μικροφώνου με τή συχνότητα ($\nu_{\eta\chi}$), πού έχει ό αντίστοιχος ήχος. Για τή μετάδοση ήχων (*ραδιοηλεφωνία, ραδιοφωνία*) τό κύκλωμα του μικροφώνου συνδέεται με τό κύκλωμα ταλαντώσεων. Οί μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος του μικροφώνου (πού αντιστοιχούν σε ήχο όρισμένης συχνότητας $\nu_{\eta\chi}$) προκαλούν αντίστοιχες *μεταβολές στο πλάτος του φέροντος κύματος* με τό ρυθμό τής ήχητικής συχνότητας. Τότε ή *κεραία* εκπέμπει ένα *διαμορφωμένο κύμα*, πού μεταφέρει τίς χαρακτηριστικές μεταβολές πού προκάλεσε ό ήχος στο ρεύμα του μικροφώνου. Στο σχήμα 131 τό α δείχνει τό φέρον κύμα, πρίν πάθει διαμόρφωση. Τό β δείχνει τήν ήμιτονοειδή μεταβολή πού προκαλεί στήν ένταση του ρεύμα-

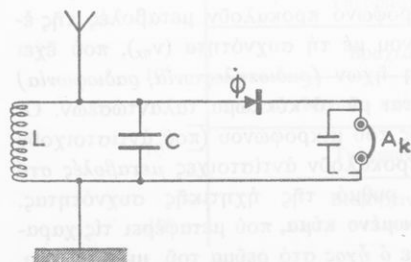


Σχ. 131. Διαμόρφωση των κυμάτων στο σταθμό έκπομπής και άποδιαμόρφωση στο δέκτη
 (α φέρον κύμα,
 β μικροφωνικό ήμιτονοειδές ρεύμα,
 γ διαμορφωμένο κύμα,
 δ άνορθωση,
 ε άνορθωμένο ρεύμα όμοιο με τό μικροφωνικό ρεύμα)

τος του μικροφώνου ένας άπλός ήχος. Τό γ δείχνει τή διαμόρφωση πού παθαίνει τό φέρον κύμα.

90. Δέκτης έρτζιανών κυμάτων

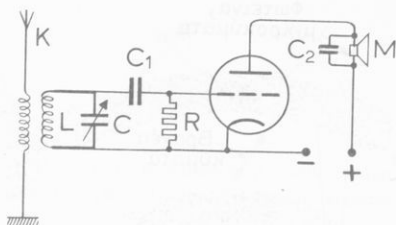
Ό δέκτης έρτζιανών κυμάτων άποτελείται από τήν *κεραία*, πού συνδέεται με ένα κύκλωμα ταλαντώσεων. Αυτό βρίσκεται σε *συντονισμό* με τό *κύκλωμα ταλαντώσεων* του πομπού. Έτσι μέσα στο κύκλωμα του δέκτη παράγονται *διαμορφωμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις*, ίδιες με εκείνες πού σχηματίστηκαν στο κύκλωμα του πομπού. Αν αυτές οι ταλαντώσεις έρθουν στο άκουστικό ή στο μεγάφωνο, δέν παράγεται ήχος, γιατί ή πλάκα του άκουστικού ή ή μεμβράνη του μεγάφώνου δέν μπορούν νά παρακολουθήσουν τίς τόσο γρήγορες μεταβολές τής εντάσεως του ρεύματος. Μεταξύ



Σχ. 132. Άπλή διάταξη δέκτη με κρυσταλλικό άνορθωτή (φωρατή Φ) και άκουστικά

τού κυκλώματος ταλαντώσεων και του άκουστικού ή του μεγάφώνου παρεμβάλλουμε έναν άνορθωτή (λέγεται *φωρατής*). Τότε από τόν *άνορθωτή* περνάει ρεύμα μόνο κατά τή μιά ήμιπερίοδο. Τό *άνορθωμένο ρεύμα* είναι συνεχές ρεύμα πού παρουσιάζει μεταβολές τής εντάσεώς του με τή συχνότητα ($\nu_{\text{ηχ}}$) πού έχει ό άρχικός ήχος. Τώρα ή πλάκα του άκουστικού ή ή μεμβράνη του μεγάφώνου μπορούν νά παρακολου-

θήσουν τις μεταβολές της έντασεως του ρεύματος και έτσι αναπαράγεται ο αρχικός ήχος. Στο σχήμα 131 το δ δείχνει το άνορθωμένο ρεύμα και το ε δείχνει το ρεύμα που περνάει από το ακουστικό ή το μεγάφωνο και όπως βλέπουμε διατηρείται η ήμιτονοειδής μεταβολή της έντασεως του ρεύματος του μικροφώνου. Στο σχήμα 132 φαίνεται μία άπλη διάταξη δέκτη με ακουστικά.



Σχ. 133. Σχηματική διάταξη δέκτη με τρίοδο λυχνία

Ένισχυση, επιλογή. Οι διαμορφωμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις που παράγονται στο κύκλωμα του δέκτη είναι πολύ ασθενείς και γι' αυτό ενισχύονται με κατάλληλους *ενισχυτές*. Στην κεραία πέφτουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με πολύ διαφορετικές συχνότητες. Για να μπορούμε να κάνουμε *επιλογή* και να συντονίζουμε το δέκτη με τον πομπό, ο δέκτης έχει έναν πυκνωτή μεταβλητής χωρητικότητας, με τον οποίο μεταβάλλουμε την ιδιοσυχνότητα του κυκλώματος του δέκτη. Όταν υπάρχει συντονισμός του δέκτη με τον πομπό, οι ταλαντώσεις στο κύκλωμα του δέκτη έχουν μεγάλο πλάτος.

Ραδιόφωνο. Το *ραδιόφωνο* είναι ένας δέκτης έρτζιανών κυμάτων, στον οποίο ή ανόρθωση και ή ενίσχυση γίνεται με κατάλληλες ηλεκτρονικές λυχνίες ή με ήμιαγωγούς (ραδιόφωνα με τρανζίστορ). Το σχήμα 133 δείχνει τη συνδεσμολογία ενός άπλου ραδιοφώνου με μία τρίοδο ηλεκτρονική λυχνία.

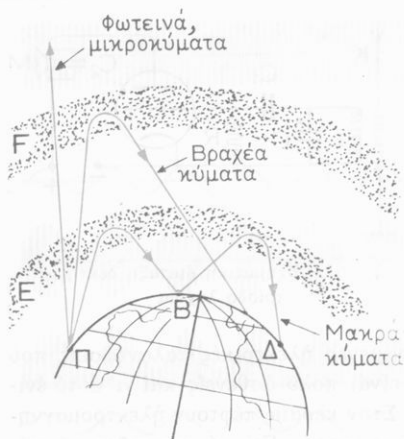
91. Διάδοση των ηλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων που εκπέμπονται από την κεραία επηρεάζεται κυρίως από τους εξής δύο παράγοντες :

α) Από την παρουσία του εδάφους, που *ή αγωγιμότητά του* εξαρτάται από τη φύση του εδάφους.

β) Από την παρουσία μέσα στην ατμόσφαιρα και σε ύψος από 100 ως 350 km περίπου ενός στρώματος αέρα που έχει σημαντική *αγωγιμότητα* και ονομάζεται **ιονόσφαιρα**. Η αγωγιμότητα της ιονόσφαιρας οφείλεται σε θετικά ιόντα και ηλεκτρόνια που προέρχονται από τον ιονισμό του αέρα.

Τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από την κεραία διακρίνονται στις εξής δύο κατηγορίες : α) *στά κύματα επιφάνειας*, που δια-



Σχ. 134. Ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα στρώματα E και F της ιονόσφαιρας

δίδονται κοντά στην επιφάνεια της Γης, και β) *στά κύματα χώρου*, που εκπέμπονται από την κεραία προς τα πάνω.

Τα κύματα επιφανείας *απορροφούνται* από την επιφάνεια της Γης και η απορρόφηση είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο *μικρότερο* είναι το μήκος κύματος (λ) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τα κύματα χώρου, όταν έχουν μήκος κύματος (λ) μεγαλύτερο από ένα όριο, *ανακλώνται* πάνω στην ιονόσφαιρα και ξαναγυρίζουν στην επιφάνεια της Γης (σχ. 134). Έτσι τα *ανακλώμενα* κύματα φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική εξασθένηση.

α. Τα *έρτζιανά* κύματα στις τηλεπικοινωνίες. Τα *έρτζιανά* κύματα που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες διακρίνονται στις *έξι* κατηγορίες :

α) Τα *μακρά κύματα* ($\lambda > 600 \text{ m}$) παρουσιάζουν μικρή απορρόφηση των κυμάτων επιφανείας και είναι κατάλληλα για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις.

β) Τα *μεσαία κύματα* ($100 \text{ m} < \lambda < 600 \text{ m}$) παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορρόφηση των κυμάτων επιφανείας, αλλά τα κύματα χώρου *ανακλώνται* πάνω στην ιονόσφαιρα και φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις από τον πομπό.

γ) Τα *βραχεία κύματα* ($10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$) παρουσιάζουν πολύ μεγάλη απορρόφηση των κυμάτων επιφανείας, αλλά αντίθετα τα κύματα χώρου *μπορούν* να πάθουν διαδοχικές *ανακλάσεις* πάνω στην ιονόσφαιρα και στο έδαφος και να φτάσουν σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς αισθητή εξασθένηση.

δ) Τα *υπερβραχεία κύματα* ($1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$) *δεν* *ανακλώνται* πάνω στην ιονόσφαιρα, αλλά *περνούν* μέσα από αυτήν και *βγαίνουν* στο *αστρικό διάστημα*. Επομένως για τη μετάδοση χρησιμοποιούμε μόνο τα κύματα επιφανείας, που έχουν πολύ μικρή *εμβέλεια*. Τα *υπερβραχεία* κύματα *αποδίδονται* *επίθετα*, όπως και το φως, και γι' αυτό ο δέκτης πρέπει να βρίσκεται στον *οπτικό ορίζοντα* του πομπού. Χρησιμοποιούνται στην τηλεόραση.

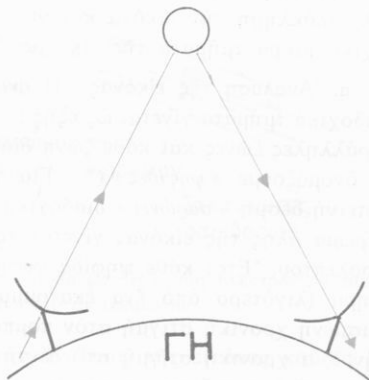
ε) Τα *μικροκύματα* ($0,1 \text{ mm} < \lambda < 1 \text{ m}$) περνούν από την ιονόσφαιρα

καί βγαίνουν στο άστρικό διάστημα. Μπορούν να αποτελέσουν μία κατευθυνόμενη δέσμη ανάλογη με μία δέσμη φωτεινών ακτίνων. Χρησιμοποιούνται στο ραντάρ και στη ραδιοτηλεφωνία.



Σχ. 135. Σχηματική παράσταση σταθμών αναμεταδόσεως των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

β. Αναμετάδοση των κυμάτων. Τά υπερβραχέα κύματα και τά μικροκύματα διαδίδονται εὐθύγραμμα και ἐπομένως τά βουνά και ἡ καμπυλότητα τῆς Γῆς ἐμποδίζουν τῆ διάδοση αὐτῶν τῶν κυμάτων σέ μεγάλες ἀποστάσεις. Σ' αὐτή τὴν περίπτωση χρησιμοποιοῦμε σταθμούς ἀναμεταδόσεως τῶν κυμάτων πού βρίσκονται στίς κορυφές βουνῶν, ὥστε νά ἀντικρύζουν ὁ ἕνας τόν ἄλλο σταθμό (σχ. 135). Σέ κάθε σταθμό ἀναμεταδόσεως ὑπάρχει δέκτης τῶν κυμάτων, ἐνισχυτής και πομπός πού ξαναεκπέμπει τά κύματα πρὸς ὀρισμένη κατεύθυνση. Ὁ δέκτης και ὁ πομπός εἶναι μεγάλοι παραβολικοί μεταλλικοί καθρέφτες, πού ἔχουν κεραία στήν ἐστία τους.



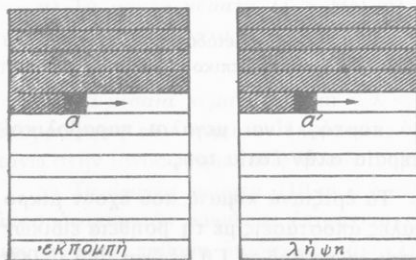
Σχ. 136. Αναμετάδοση τῶν κυμάτων ἀπό τεχνητό τηλεπικοινωνιακό δορυφόρο

γ. Διαστημικές τηλεπικοινωνίες. Τά ἐρτζιανά κύματα πού ἔχουν μικρό μήκος κύματος μεταδίδονται σέ μεγάλες ἀποστάσεις με τῆ βοήθεια εἰδικῶν τεχνητῶν δορυφόρων πού περιφέρονται γύρω ἀπό τῆ Γῆ σέ ὕψη ἀπό 10 000 km ὡς 36 000 km και ὀνομάζονται τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι (σχ. 136). Κάθε τέτοιος δορυφόρος ἔχει δέκτη, ἐνισχυτή και πομπό. Οἱ συσκευές τοῦ δορυφόρου λειτουργοῦν με συσσωρευτές πού φορτίζονται με τό ἠλεκτρικό ρεῦμα τό ὄποιο παράγεται ἀπό πολλές φωτοστήλες. Αὐτές μετατρέπουν τὴν ἐνέργεια τοῦ ἠλιακοῦ φωτός σέ ἠλεκτρική ἐνέργεια. Τά ἐρτζιανά κύματα πού ἐκπέμπονται ἀπό τὴν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς ξαναγυρίζουν σ' αὐτή, ἀφοῦ διατρέξουν μεγάλες ἀποστάσεις ἔξω ἀπό τὴν ἀτμόσφαιρα, δηλαδὴ μέσα στο ἀστρικό διάστημα (διαστημικές τηλεπικοινωνίες).

92. Τηλεόραση

Στήν τηλεόραση μέ τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται εικόνας προσώπων ή αντικειμένων πού μπορεί νά βρίσκονται καί σέ κίνηση. Όπως ξέρουμε, τό μάτι μας δέν μπορεί νά διακρίνει όστι στήν όθόνη του κινηματογράφου προβάλλονται πολύ γρήγορα διαδοχικές εικόνας του αντικειμένου πού κινείται. Σ' αυτή τήν ιδιότητα του ματιού στηρίζεται καί ή τηλεόραση, μέ τή διαφορά όστι ακόμα δέν μπορούμε νά μεταδώσουμε μονομιᾶς όλόκληρη τήν εικόνα καί γι' αυτό μεταδίδουμε πολύ γρήγορα διαδοχικά μικρά τμήματα τής εικόνας.

α. Άνάλυση τής εικόνας. Ή *ανάλυση* τής εικόνας σέ πολλά μικρά διαδοχικά τμήματα γίνεται ώς εξής : Ή εικόνα διαιρείται σέ πολλές στενές παράλληλες ζώνες καί κάθε ζώνη διαιρείται σέ πολλά μικρά τμήματα πού τά όνομάζουμε « ψηφίδες » (*). Για τή μετάδοση τής εικόνας μιά λεπτή φωτεινή δέσμη « *σαρώνει* » διαδοχικά τίς ζώνες τή μιά μετά τήν άλλη. Τό σάρωμα όλης τής εικόνας γίνεται πολύ γρήγορα, μέσα σέ 1/25 του δευτερολέπτου. Έτσι κάθε ψηφίδα φωτίζεται επί ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα (λιγότερο από ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου). Σέ μιά όρισμένη χρονική στιγμή στόν πομπό φωτίζεται ή ψηφίδα *a* τής εικόνας. Τήν ίδια χρονική στιγμή στό δέκτη *αναπαράγεται* ή ψηφίδα *a'* πού αντι-



Σχ. 137. Άνάλυση τής εικόνας σέ μικρά τμήματα (*a*) πού μεταδίδονται διαδοχικά

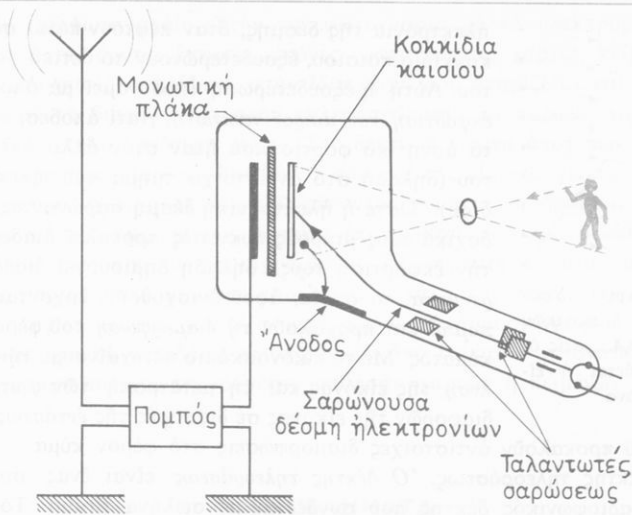
στοιχεί στό μικρό τμήμα *a* τής εικόνας πού μεταδίδεται (σχ. 137).

Ή διαμόρφωση του φέροντος κύματος ή όποία αντιστοιχεί σέ μιά ψηφίδα, διαρκεί επί ελάχιστο χρόνο. Έπομένως, ή περίοδος του φέροντος κύματος πρέπει νά είναι πολύ μικρότερη από αυτό τό χρόνο. Γι' αυτό στήν τηλεόραση πρέπει νά χρησιμοποιούμε φέροντα κύματα μέ

πολύ μεγάλη συχνότητα, δηλαδή *υπερβραχεία κύματα* ή *μικροκύματα* ($\lambda < 1 \text{ m}$). Άλλά αυτά τά κύματα έχουν πολύ μικρή εμβέλεια.

(*) Άν π.χ. ή εικόνα διαιρεθεί σέ 625 ζώνες καί κάθε ζώνη διαιρεθεί σέ 640 ψηφίδες τότε όλη ή εικόνα αναλύεται σέ 400 000 ψηφίδες. Ή μετάδοση μιᾶς ψηφίδας διαρκεί επί χρόνο

$$\frac{1/25 \text{ sec}}{4 \cdot 10^5 \text{ ψηφίδες}} = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ sec/ψηφίδα}$$

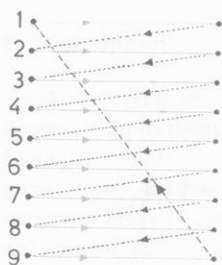


Σχ. 138. Σχηματική παράσταση πομπού τηλεόρασης. Ή δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει τό «ήλεκτρικό είδωλο» του αντικειμένου.

β. Πομπός τηλεόρασης. Γιά τήν ανάλυση τής εικόνας καί τή διαδοχική μετάδοση των μικρών τμημάτων της εφαρμόζουμε διάφορα συστήματα. Ένα από αυτά είναι τό **εικονοσκόπιο Zworykin**. Αυτό είναι ένας σωλήνας Braun, πού στό έσωτερικό του υπάρχει μιά λεπτή μονωτική πλάκα (σχ. 138). Ή μιά επιφάνεια τής πλάκας σκεπάζεται μέ μιά λεπτή μεταλλική πλάκα (ήλεκτροδίο) πού συνδέεται μέ τό κύκλωμα ταλαντώσεων του πομπού. Ή άλλη επιφάνεια τής μονωτικής πλάκας έχει σκεπαστεί μέ πολύ μικρά κοκκίδια καισίου, πού είναι μονωμένα τό ένα από τό άλλο. Έτσι κάθε κοκκίδιο καισίου καί τό αντίστοιχο τμήμα του ήλεκτροδίου αποτελούν ένα **μικρότατο πυκνωτή**.

Μέ ένα φακό σχηματίζεται πάνω στό στρώμα του καισίου τό πραγματικό είδωλο τής εικόνας πού θέλουμε νά μεταδώσουμε. Τότε από κάθε κοκκίδιο καισίου αποσπώνται φωτοηλεκτρόνια καί τό κοκκίδιο αποκτά **θετικό φορτίο ανάλογο μέ τή φωτεινή ροή** πού έπεσε πάνω του Έτσι οί μικρότατοι πυκνωτές **φορτίζονται** καί μπορούμε νά πούμε ότι πάνω στό στρώμα του καισίου έχει σχηματιστεί τό «ήλεκτρικό είδωλο» του αντικειμένου.

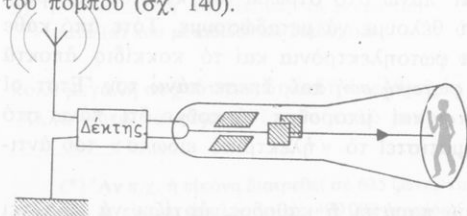
Ή ηλεκτρονική δέσμη πού παράγει ή κάθοδος, αρχίζει νά σαρώνει διαδοχικά κάθε ζώνη καί όταν σαρώσει όλες τς ζώνες, ξαναγυρίζει απότομα στην αρχή τής πρώτης ζώνης καί αρχίζει νέο σάρωμα (σχ. 139). Τά



Σχ. 139. Τό ρυθμικό σάρωμα των διαδοχικών ζωνών 1,2,3,4... στις οποίες αναλύεται η εικόνα

ηλεκτρόνια της δέσμης, όταν πέφτουν πάνω σε ένα κοκκίδιο καισίου, εξουδετερώνουν τό θετικό φορτίο του. Αυτή ή εξουδετέρωση ίσοδυναμεί με απότομη εκφόρτιση του μικρού πυκνωτή, γιατί αποδεσμεύεται τό άρνητικό φορτίο πού ήταν στόν άλλο όπλισμό του (δηλαδή στό αντίστοιχο τμήμα του ηλεκτροδίου). Όστε ή ηλεκτρονική δέσμη σαρώνοντας διαδοχικά τούς μικρούς πυκνωτές προκαλεί διαδοχικά τήν εκφόρτισή τους, δηλαδή δημιουργεί διαδοχικά ρεύματα, τά όποια, άφου ένισχυθούν, έρχονται στόν πομπό και προκαλούν τή διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Με τό εικονοσκόπιο πετυχαίνουμε τήν ανάληψη της εικόνας και τή μετατροπή των φωτεινών διαφορών της εικόνας σε διαφορές της έντάσεως ρεύματος πού προκαλούν αντίστοιχες διαμορφώσεις στό φέρον κύμα.

γ. Δέκτης τηλεόρασεως. Ο δέκτης τηλεόρασεως είναι ένας συνηθισμένος ραδιοφωνικός δέκτης πού συνδέεται με σωλήνα Braun. Τό διάφραγμα πού φθορίζει (όθόνη) είναι ένα παραλληλόγραμμο. Τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα πού πέφτουν στην κεραία δημιουργούν στό κύκλωμα ταλαντώσεων του δέκτη διαμορφωμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις. Αυτές, άφου ένισχυθούν, υποβάλλονται σε άνόρθωση. Οί μεταβολές της έντάσεως του άνορθωμένου ρεύματος ρυθμίζουν τήν ένταση της ηλεκτρονικής δέσμης πού εκπέμπει ή διάπυρη κάθοδος στό σωλήνα Braun. Έτσι ή φωτεινότητα σε ένα σημείο της όθόνης είναι άνάλογη με τήν ένταση της ηλεκτρονικής δέσμης. Στο δέκτη τό σάρωμα πού κάνει ή ηλεκτρονική δέσμη πάνω στην όθόνη του σωλήνα Braun είναι άπόλυτα συγχρονισμένο με τό σάρωμα πού κάνει ή ηλεκτρονική δέσμη πάνω στό «ηλεκτρικό είδωλο» πού σχηματίζεται στόν πομπό. Τό σάρωμα της όθόνης του δέκτη γίνεται μέσα σε 1/25 του δευτερολέπτου. Έτσι κάθε στιγμή στην όθόνη του δέκτη σχηματίζεται ή εικόνα του φωτεινού αντικειμένου πού βρίσκεται στόν τόπο του πομπού (σχ. 140).



Σχ. 140. Σχηματική παράσταση του δέκτη τηλεόρασεως

Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ή έγχρωμη τηλεόραση πού βασίζεται στην εξής αρχή: με τρία μόνο χρώματα, τό έρυθρό, τό πράσινο και τό κυανό μπορούμε νά λάβουμε όλα τά άλλα χρώματα.

δ. Τηλεφωτογραφία. Στην τηλεφωτογραφία με τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται έντυπες εικόνες (φωτογραφίες, χάρτες, κείμενα). Η τηλεφωτογραφία στηρίζεται στην ίδια αρχή που στηρίζεται και η τηλεόραση, με τη διαφορά ότι στην τηλεφωτογραφία τό σάρωμα τής εικόνας γίνεται με πολύ άργότερο ρυθμό. Στο δέκτη ή εικόνα άποτυπώνεται πάνω σε φωτογραφική ταινία. Έπειδή τό σάρωμα τής εικόνας γίνεται με άργότερο ρυθμό, ή διαμόρφωση του φέροντος κύματος, ή όποία άντιστοιχεί σε μία ψηφίδα τής εικόνας, διαρκεί επί περισσότερο χρόνο και γι' αυτό στην τηλεφωτογραφία χρησιμοποιούμε ως φέροντα κύματα τά συνηθισμένα ραδιοφωνικά κύματα, που έχουν μεγάλη έμβέλεια. Μεγάλη χρήση τής τηλεφωτογραφίας κάνει σήμερα κυρίως ή δημοσιογραφία και ή τηλεόραση γιά τή μετάδοση φωτογραφιών από επίκαιρα γεγονότα. Έπίσης χρησιμοποιείται γιά τή γρήγορη μετάδοση χαρτών ή κειμένων.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

120. Σε ένα κύκλωμα ταλαντώσεων ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C = 1 \mu\text{F}$ και τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L = 1 \mu\text{H}$. Πόση είναι ή περίοδος και ή συχνότητα τών ήλεκτρικών ταλαντώσεων;

121. Σε ένα κύκλωμα ταλαντώσεων τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L = 0,1 \mu\text{H}$. Πόση πρέπει να είναι ή χωρητικότητα του πυκνωτή, ώστε ή συχνότητα τών ήλεκτρικών ταλαντώσεων να είναι ίση με $\nu = 1 \text{ MHz}$; $\pi^2 = 10$.

122. Ό πυκνωτής ενός κυκλώματος ταλαντώσεων έχει χωρητικότητα $C = 0,2 \mu\text{F}$. Πόσος πρέπει να είναι ό συντελεστής άυτεπαγωγής του πηνίου, ώστε ή συχνότητα τών ήλεκτρικών ταλαντώσεων να είναι $\nu = 2 \text{ MHz}$; $\pi^2 = 10$.

123. Σε ένα κύκλωμα ταλαντώσεων Α ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C_1 = 2 \mu\text{F}$ και τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L_1 = 4 \mu\text{H}$. Οι παραγόμενες ήλεκτρικές ταλαντώσεις έχουν συχνότητα ν_0 ίση με τήν ίδιουσυχνότητα του κυκλώματος. Σε ένα γειτονικό κύκλωμα ταλαντώσεων Β τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L_2 = 10 \mu\text{H}$. Πόση πρέπει να γίνει ή χωρητικότητα C_2 του πυκνωτή, ώστε τά δύο κυκλώματα να βρίσκονται σε συντονισμό;

124. Τό κύκλωμα ταλαντώσεων ενός πομπού άποτελείται από ένα πηνίο που έχει συντελεστή άυτεπαγωγής: $L = \frac{1}{\pi \cdot 10^6} \text{ H}$ και από έναν πυκνωτή που έχει χωρητικότητα $C = \frac{1}{\pi \cdot 10^6} \text{ F}$. Πόσο είναι τό μήκος κύματος λ και ή συχνότητα ν τών ήλεκτρομαγνητικών κυμάτων που έκπέμπει αυτός ό σταθμός;

125. Σε ένα ραδιοφωνικό δέκτη τό κύκλωμα ταλαντώσεων άποτελείται από ένα πηνίο που έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L = 0,8 \text{ mH}$ και από έναν πυκνωτή που ή χωρη-

τικότητά του μπορεί να μεταβάλλεται από $C_1 = 2 \cdot 10^{-12}$ F ως $C_2 = 50 \cdot 10^{-12}$ F. Για ποιά μήκη κύματος λειτουργεί αυτός ο δέκτης;

126. Τό κύκλωμα ταλαντώσεων ενός ραδιοφωνικού δέκτη έχει ένα πηνίο με $L = 0,2$ mH και ένα μεταβλητό πυκνωτή που η χωρητικότητα του μπορεί να μεταβάλλεται από $C_1 = 50$ pF ως $C_2 = 200$ pF. Μπορούμε με αυτό το δέκτη να πιάσουμε κύματα που έχουν μήκη κύματος $\lambda_1 = 100$ m, $\lambda_2 = 300$ m και $\lambda_3 = 500$ m;

127. Ένας ραδιοφωνικός δέκτης προορίζεται για τὰ μεσαία κύματα που έχουν μήκος κύματος από $\lambda_1 = 180$ m ως $\lambda_2 = 600$ m. Τό κύκλωμα ταλαντώσεων τού δέκτη έχει πηνίο με $L = 0,8$ mH. Ανάμεσα σε ποιά όρια πρέπει να μεταβάλλεται η χωρητικότητα C τού πυκνωτή που θά βάλουμε σ' αυτό τό κύκλωμα;

ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Εισαγωγή

93. Η θεωρία τών κβάντα

Μάθαμε (§ 87) ότι τά άτομα τής ύλης εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που έχουν πολύ μεγάλες συχνότητες (από 10^{13} Hz ως 10^{24} Hz). Για νά εξηγηθούν όρισμένα φαινόμενα, διατυπώθηκε ή θεωρία τών κβάντα (§ 39 β), που απέδειξε ότι τά άτομα τής ύλης εκπέμπουν καί απορροφούν φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιās ακτινοβολίας μεταφέρει όρισμένη ενέργεια, ίση μέ $E = h \cdot \nu$, όπου ν είναι ή συχνότητα τής ακτινοβολίας. Όπως θά δοϋμε παρακάτω, ή θεωρία τών κβάντα μās επιτρέπει νά εξηγήσουμε πώς τό άτομο εκπέμπει καί απορροφά τό φωτόνιο μιās ακτινολοβίας.

94. Η θεωρία τής σχετικότητας

Ό Einstein, για νά εξηγήσει όρισμένα πειραματικά αποτελέσματα, διατύπωσε μιιά πολύ γενική θεωρία, που είναι γνωστή μέ τό όνομα **θεωρία τής σχετικότητας**. Θά εξετάσουμε μόνο δύο πολύ ενδιαφέρουσες συνέπειες τής θεωρίας τής σχετικότητας.

a. Μεταβολή τής μάζας μέ τήν ταχύτητα. Στην Κλασική Μηχανική αποδεικνύεται θεωρητικά καί πειραματικά ότι ή μάζα m ενός σώματος είναι μέγεθος σταθερό καί ανεξάρτητο από τήν κατάσταση τής ήρεμίας ή τής κινήσεως του σώματος. Αντίθετα, ή θεωρία τής σχετικότητας αποδεικνύει θεωρητικά ότι ή μάζα ενός σώματος *έξαστάται από τήν ταχύτητα* μέ τήν όποια κινείται τό σώμα καί διατυπώνει τόν εξής νόμο μεταβολής τής μάζας μέ τήν ταχύτητα :

“Αν ή μάζα ενός σώματος στην κατάσταση ήρεμίας είναι m_0 (μάζα ήρεμίας), τότε για έναν παρατηρητή, που σχετικά μέ αυτόν τό σώμα κινείται μέ ταχύτητα v , ή μάζα m του σώματος είναι ίση μέ :

$$\text{μάζα κινούμενου σώματος} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (1)$$

ὅπου c εἶναι ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός στό κενό ($c = 3 \cdot 10^8$ m/sec). Οἱ ταχύτητες πού ἔχουμε στό μακρόκοσμο εἶναι πολύ μικρές σχετικά μέ τήν ταχύτητα τοῦ φωτός. Ἔτσι, ὁ λόγος $(v/c)^2$ εἶναι πολύ μικρός καί δέν μπορούμε νά διαπιστώσουμε τή μεταβολή τῆς μάζας ἑνός σώματος πού κινεῖται (γιατί βρῖσκουμε $m = m_0$). Στόν καθοδικό σωλήνα αὐξάνοντας τήν τάση U αὐξάνουμε τήν ταχύτητα v τῶν ἠλεκτρονίων. Ἀπό τίς μετρήσεις βρέθηκε ὅτι ἡ μάζα τῶν ἠλεκτρονίων μεταβάλλεται μέ τήν ταχύτητα ὅπως ἀκριβῶς ὀρίζει ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας.

Ὅταν ἡ ταχύτητα (v) τοῦ σώματος συνεχῶς αὐξάνει, τότε ὁ λόγος v/c τείνει πρός τή μονάδα, καί ἐπομένως ἡ μάζα m τοῦ σώματος συνεχῶς αὐξάνει. Ὅταν ἡ ταχύτητα v τοῦ σώματος τείνει νά γίνει ἴση μέ τήν ταχύτητα c τοῦ φωτός, τότε ἡ μάζα m τοῦ σώματος τείνει νά γίνει ἄπειρη. Στήν ὀριακή περίπτωση $v = c$ ἔχουμε :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{0} \quad \text{ἄρα} \quad m = \infty$$

Ἔτσι καταλήγουμε στό ἐξῆς συμπέρασμα :

Εἶναι ἀδύνατο νά κινηθεῖ ἕνα σῶμα μέ τήν ταχύτητα τοῦ φωτός στό κενό.

Σύμφωνα μέ τή θεωρία τῆς σχετικότητας ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός στό κενό εἶναι τό ὄριο τῶν ταχυτήτων στό Σύμπαν.

Ὅταν λέμε ὅτι ἡ μάζα (m) ἑνός σώματος αὐξάνει μέ τήν ταχύτητα (v) τοῦ σώματος, δέν ἐννοοῦμε ὅτι αὐξάνει ἡ ποσότητα τῆς ὕλης τοῦ σώματος. Ἐκεῖνο πού αὐξάνει εἶναι ἡ ἀδράνεια τοῦ σώματος, γιατί ὅπως ξέροουμε ἡ μάζα ἑνός σώματος ἐκφράζει καί τό βαθμό τῆς ἀδράνειας τοῦ σώματος. Ὡστε, ὅταν εἶναι $v = c$, ἡ ἀδράνεια τοῦ σώματος γίνεται ἄπειρη.

Παράδειγμα. 1) Ἐνα βλήμα ἔχει μάζα ἡρεμίας $m_0 = 1$ kg καί κινεῖται μέ ταχύτητα $v = 1$ km/sec. Τότε εἶναι :

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = \left(\frac{1 \text{ km/sec}}{3 \cdot 10^5 \text{ km/sec}}\right)^2 = \frac{1}{9 \cdot 10^{10}}$$

Τό κινούμενο βλήμα ἔχει μάζα :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{9 \cdot 10^{10}}}} \approx \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{10^{11}}}}$$

Κατά προσέγγιση εἶναι $m = m_0 \left(1 + \frac{5}{10^{12}}\right)$

Άρα η μεταβολή (Δm) της μάζας του βλήματος είναι :

$$\Delta m = m - m_0 = 5 \cdot 10^{-12} \text{ kgr} \quad \text{ή} \quad \Delta m = 5 \cdot 10^{-9} \text{ gr}$$

Είναι φανερό ότι η αύξηση της μάζας του βλήματος κατά πέντε δισεκατομμυριοστά του γραμμαρίου είναι τελείως ασήμαντη.

2) Ένα ηλεκτρόνιο που έχει μάζα ηρεμίας m_0 κινείται με ταχύτητα $v = 0,9c$ (δηλαδή είναι $v = 2,7 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$). Το κινούμενο ηλεκτρόνιο έχει μάζα :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (0,9)^2}} \approx 2,3 m_0$$

Παρατηρούμε ότι η μάζα του κινούμενου ηλεκτρονίου είναι 2,3 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου.

β. Ίσοδυναμία μάζας και ενέργειας. Ένα σώμα που έχει μάζα ηρεμίας m_0 , όταν κινείται με ταχύτητα v , έχει μάζα :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Η θεωρία της σχετικότητας αποδεικνύει ότι το σώμα έχει τότε ολική ενέργεια $E_{ολ} = m \cdot c^2$ και ισχύει η εξίσωση :

$$m \cdot c^2 = m_0 \cdot c^2 + \frac{1}{2} m_0 \cdot v^2 \quad (2)$$

Τό γινόμενο $m_0 \cdot c^2$ εκφράζει ενέργεια. Η εξίσωση (2) δείχνει ότι, αν το σώμα ηρεμεί ($v = 0$) ή κινητική ενέργειά του $\left(\frac{1}{2} m_0 \cdot v^2\right)$ είναι ίση με μηδέν, αλλά η μάζα ηρεμίας m_0 του σώματος εξακολουθεί να έχει ενέργεια ίση με $m_0 \cdot c^2$. Έτσι η θεωρία της σχετικότητας αποδεικνύει ότι η μάζα και η ενέργεια είναι δύο φυσικά μεγέθη ισοδύναμα και διατυπώνει την ακόλουθη αρχή της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας :

Μιά μάζα m ισοδυναμεί με ενέργεια E , ίση με τό γινόμενο της μάζας (m) επί τό τετράγωνο της ταχύτητας (c) του φωτός στό κενό.

ισοδυναμία μάζας και ενέργειας $E = m \cdot c^2$

Η αρχή της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας ισχύει και αντίστροφα, δηλαδή :

Μιά ενέργεια E ισοδυναμεί με μάζα m , ίση με τό πηλίκο της ενέργειας (E) διά του τετραγώνου της ταχύτητας του φωτός στο κενό.

$$\text{ισοδυναμία ενέργειας και μάζας} \quad m = \frac{E}{c^2}$$

Ἡ ἀρχή της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας επιβεβαιώθηκε με τό πείραμα και σήμερα βρίσκει ἐφαρμογή στην ἐκμετάλλευση της πυρηνικής ἐνέργειας.

Παράδειγμα. Μιά μάζα $m = 1$ gr ισοδυναμεί με ενέργεια :

$$E = m \cdot c^2 = 0,001 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec})^2 \quad \text{ἄρα} \quad E = 9 \cdot 10^{13} \text{ Joule}$$

Σύμφωνα με τή γνωστή ἐξίσωση $E = m \cdot g \cdot h$, πού δίνει τή δυναμική ἐνέργεια, μπορούμε με τήν παραπάνω ἐνέργεια νά ἐκσφενδονίσουμε σέ ὕψος $h = 100$ m μιά μάζα m ἴση με :

$$m = \frac{E}{g \cdot h} = \frac{9 \cdot 10^{13} \text{ Joule}}{10 \text{ m/sec}^2 \cdot 100 \text{ m}} \quad \text{καί} \quad m = 9 \cdot 10^{10} \text{ kg}$$

δηλαδή

$$m = 90\,000\,000 \text{ τόνους}$$

γ. Διατήρηση της ὕλοενέργειας. Ὅταν θεωρούσαμε ὅτι ἡ ὕλη και ἡ ἐνέργεια, εἶναι δύο διαφορετικά φυσικά μεγέθη, διατυπώσαμε τήν ἀρχή της διατηρήσεως της ὕλης (της μάζας) και τήν ἀρχή της διατηρήσεως της ἐνέργειας. Ἀλλά θεωρητικά και πειραματικά ἀποδείχτηκε ὅτι ἡ ὕλη και ἡ ἐνέργεια εἶναι ισοδύναμες και ἡ μιά μετατρέπεται στην ἄλλη. Ἄρα στή Φύση ὑπάρχει μόνο μιά φυσική ὄντοτητα, ἡ ὕλοενέργεια, ἡ ὁποία, ἀνάλογα με τίς συνθήκες πού επικρατοῦν, μᾶς ἐμφανίζεται ὡς ὕλη ἢ ὡς ἐνέργεια. Ἐτσι οἱ δύο γνωστές ἀρχές της διατηρήσεως της ὕλης και της ἐνέργειας συγχωνεύονται σήμερα στην ἐξῆς γενικότερη ἀρχή της διατηρήσεως της ὕλοενέργειας :

Ἡ ὕλοενέργεια πού ὑπάρχει στή Φύση εἶναι σταθερή και κάθε ποσότητα ὕλης ισοδυναμεί με ὀρισμένη ποσότητα ἐνέργειας και ἀντίστροφα. Ἡ ισοδυναμία μεταξύ της ὕλης και της ἐνέργειας δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση $E = m \cdot c^2$.

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Τά ηλεκτρόνια του ατόμου

95. Άτομική θεωρία του Δημόκριτου

Από τον έκτο π.Χ. αιώνα οι Έλληνες φιλόσοφοι υποστήριζαν ότι στά φυσικά φαινόμενα δέν επεμβαίνουν υπερφυσικές δυνάμεις, αλλά ότι στή Φύση ισχύουν *ακατάλυτοι φυσικοί νόμοι*. Σχετικά μέ τήν ύλη ιδιαίτερα σημαντική ήταν ή θεωρία πού υποστήριζε ότι ή ύλη δέν είναι άπερίοριστα διαιρετή, καί έπομένως τά σώματα άποτελούνται από πάρα πολλά *μικρότατα σωματίδια*, τά όποια δέν μπορούν νά διαιρεθούν καί γι' αυτό όνομάστηκαν *άτομα* (δηλαδή άτμητα). Τή θεωρία αυτή υποστήριξε κυρίως ό *Λεύκιππος*, αλλά ό μαθητής του *Δημόκριτος* (470 - 360 π.Χ.) τήν έκαμε *γενική θεωρία της ύλης* καί μέ αυτή θέλησε νά εξηγήσει όλες τίς ιδιότητες της ύλης πού ήταν τότε γνωστές.

Τήν άτομική θεωρία του Δημόκριτου τή δίδασκε άργότερα ό *Επίκουρος* (341 - 270 π.Χ.) καί τμήματα από αυτή τή θεωρία βρίσκονται σέ ένα ποίημα γιά τή Φύση του Ρωμαίου ποιητή *Λουκρήτιου* (98 - 55 π.Χ.).

Δυστυχώς από τήν άτομική θεωρία του Δημόκριτου έλάχιστα άποσπάσματα διασώθηκαν. Ό Δημόκριτος υποστήριζε ότι τά άτομα διαφέρουν μεταξύ τους κατά τό σχήμα καί τό μέγεθος, δέ δημιουργούνται ούτε καταστρέφονται, άρα είναι άδιαίρετα καί αιώνια. Τά άτομα είναι πάρα πολλά καί βρίσκονται σέ *διαρκή κίνηση*. Τά διάφορα φυσικά φαινόμενα όφείλονται στήν αιώνια κίνηση των ατόμων, καθώς καί στίς ενώσεις τους μέ άλλα άτομα ή στους άποχωρισμούς τους από τά άτομα μέ τά όποια ήταν ένωμένα. Σ' αυτές τίς αντίληψεις του Δημόκριτου φαίνονται καθαρά ή ιδέα γιά τήν *άτομική δομή της ύλης* καθώς καί ή ιδέα *μιας κινητικής θεωρίας της ύλης*. Είναι χαρακτηριστικό ότι μεταξύ των πολλών φαινομένων πού ό Λουκρήτιος περιγράφει μέ βάση τίς άτομικές αντίληψεις του Δημόκριτου ιδιαίτερη θέση έχουν ή πίεση πού εξασκούν τά άέρια, ή διάχυση των όσμων καί τό σχήμα των κρυστάλλων. Όπως όμως ξέρουμε, αυτά τά τρία φαινόμενα σχετίζονται άμεσα μέ τήν κινητική καί άτομική θεωρία της ύλης.

Ή άτομική θεωρία του Δημόκριτου καταπολεμήθηκε από τή Σωκρα-

τική σχολή και έπεσε σέ άφάνεια ώς τήν Ἀναγέννηση. Τότε άρχισαν νά αναβιώνουν οί ιδέες τοῦ Δημόκριτου και νά κατευθύνουν τήν έπιστημονική σκέψη. Στίς άρχές τοῦ δέκατου ένατου αιώνα ὁ Dalton (1808), γιά νά εξηγήσει τούς δύο νόμους πού ανακάλυψε πειραματικά (τό νόμο τών σταθερών αναλογιών και τό νόμο τών άπλών πολλαπλασίων), δέχτηκε τήν παλιά ιδέα τοῦ Δημόκριτου ὅτι ἡ ὕλη αποτελείται ἀπό ἄτομα. Ἔτσι επιβεβαιώθηκε και πειραματικά ἡ ὑπαρξη τών ἀτόμων, τά ὁποία πρίν ἀπό πολλούς αιώνες είχε συλλάβει ἡ ελεύθερη σκέψη τών Ἑλλήνων ἀτομικῶν φιλοσόφων.

Οί θεωρητικές και πειραματικές έρευνες πού έγιναν ἀπό τίς άρχές τοῦ εικοστοῦ αιώνα έδειξαν ὅτι τό ἄτομο τῆς ὕλης εἶναι ένα πολύπλοκο σύστημα ἑποατομικῶν σωματιδίων, στό ὁποῖο ἰσχύουν και ὀρισμένοι ειδικοί νόμοι. Ἔτσι δημιουργήθηκε ένας ιδιαίτερος κλάδος τῆς Φυσικῆς, ἡ Ἀτομική Φυσική.

96. Μονάδα ἀτομικῆς μάζας

Ἡ μάζα τών ἀτόμων, τών πυρήνων και τών σωματιδίων μετριέται μέ τή μονάδα ἀτομικῆς μάζας, πού συμβολικά γράφεται 1 amu ($1 \text{ atomic mass unit}$) και ὀρίζεται ὡς ἑξής :

Μονάδα ἀτομικῆς μάζας (1 amu) εἶναι τό $1/12$ τῆς μάζας τοῦ ἀτόμου τοῦ ἰσότοπου τοῦ άνθρακα $12 \text{ (C}^{12}\text{)}$.

$$\text{μονάδα ἀτομικῆς μάζας} \quad 1 \text{ amu} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kgr}$$

Σημείωση Τό στοιχείο άνθρακας αποτελείται ἀπό δύο ἰσότοπα πού έχουν αντίστοιχα ἀτομική μάζα 12 και 13. Πιό άφθονο στή Φύση εἶναι τό ἰσότοπο μέ τήν ἀτομική μάζα 12.

Ἰσοδυναμία τῆς μονάδας ἀτομικῆς μάζας μέ ἐνέργεια. Στήν Ἀτομική και στήν Πυρηνική Φυσική τήν ἐνέργεια συνήθως τή μετράμε μέ τή μονάδα ἐνέργειας ἠλεκτρονιοβόλτ (1 eV) και μέ τά πολλαπλάσιά της $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ και $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$. Σύμφωνα μέ τήν ἀρχή τῆς ἰσοδυναμίας μάζας και ἐνέργειας $E = mc^2$ βρίσκουμε ὅτι :

Ἡ μονάδα ἀτομικῆς μάζας (1 amu) ἰσοδυναμεῖ μέ ἐνέργεια 931 MeV (κατά προσέγγιση).

$$1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV} \quad \eta \quad 1 \text{ amu} = 1492 \cdot 10^{-13} \text{ Joule}$$

97. Τό άτομο καί ό πυρήνας του

α. Τά ηλεκτρόνια καί ό πυρήνας. Ἡ παραγωγή τῶν καθοδικῶν ἀκτίνων ἀπό τόν ἰονισμό τῶν ατόμων τοῦ ἀερίου, τό θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο καί τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δείχνουν ὅτι σέ ὀρισμένες περιπτώσεις ἀπό τά ἅτομα τῆς ὕλης βγαίνουν *ἠλεκτρόνια*, πού ὅλα ἔχουν τήν ἴδια *μάζα* (m_e), καί ἓνα *ἀρνητικό στοιχειῶδες ἠλεκτρικό φορτίο* ($-e$). Ἔτσι ἀπό διάφορα φαινόμενα διαπιστώθηκε ὅτι *τό ἠλεκτρόνιο εἶναι κοινό συστατικό τῶν ατόμων τῆς ὕλης*.

Ὁ Rutherford (1911) ἀνακάλυψε πειραματικά ὅτι μέσα στό ἅτομο ὑπάρχει ἓνα πολύ μικρό σωματίδιο πού ὀνομάστηκε *πυρήνας* καί ἔχει *θετικό ἠλεκτρικό φορτίο*. Σχεδόν ὅλη ἡ *μάζα τοῦ ατόμου* εἶναι συγκεντρωμένη στόν πυρήνα του. Ὡστε ἀπό τήν πειραματική ἔρευνα διαπιστώθηκε ὅτι :

Μέσα στό ἅτομο ὑπάρχουν : α) ὁ πυρήνας, στόν ὁποῖο εἶναι συγκεντρωμένη σχεδόν ὅλη ἡ *μάζα τοῦ ατόμου* καί ὅλο τό *θετικό ἠλεκτρικό φορτίο*, καί β) *ἠλεκτρόνια* πού ὅλα ἔχουν τήν ἴδια *μάζα* καί τό ἴδιο *ἀρνητικό ἠλεκτρικό φορτίο* ($-e$).

β. Ἡ διάμετρος τοῦ ατόμου καί τοῦ πυρήνα. Μποροῦμε νά θεωρήσουμε ὅτι τό ἅτομο καί ὁ πυρήνας ἔχουν σφαιρικό σχῆμα. Ἀπό τή μελέτη ὀρισμένων φαινομένων βρήκαμε ὅτι ἡ διάμετρος *τοῦ ατόμου* εἶναι τῆς τάξεως τοῦ 10^{-8} cm, ἐνῶ ἡ διάμετρος *τοῦ πυρήνα* εἶναι τῆς τάξεως τοῦ 10^{-12} cm. Ὡστε :

Ἡ διάμετρος τοῦ πυρήνα εἶναι 10 000 φορές μικρότερη ἀπό τή διάμετρο τοῦ ατόμου.

γ. Συστατικά τοῦ ατομικοῦ πυρήνα. Μέ διάφορα πειράματα ἀποδείχτηκε ὅτι μέσα σέ ὅλους τοὺς πυρήνες ὑπάρχουν δύο εἶδη σωματιδίων, πού ἀντίστοιχα ὀνομάζονται *πρωτόνια* καί *νετρόνια*. Αὐτά τά δύο εἶδη σωματιδίων ὀνομάζονται γενικά *νουκλεόνια* (ἀπό τό nucleus = πυρήνας).

Τό *πρωτόνιο* εἶναι ὁ ατομικός πυρήνας τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου, δηλαδή εἶναι ἓνα ἰόν ὕδρογόνου. Ἐχει ἓνα *θετικό στοιχειῶδες ἠλεκτρικό φορτίο* ($+e$) καί ἡ *μάζα* του ἡρεμίας εἶναι περίπου ἴση μέ μιά μονάδα ατομικῆς *μάζας* (1 amu). Μόνο ὁ πυρήνας τοῦ ατόμου τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου ἀποτελεῖται ἀπό ἓνα πρωτόνιο, ἐνῶ ὅλοι οἱ ἄλλοι πυρήνες ἔχουν πρωτόνια καί νετρόνια.

Τό *νετρόνιο* εἶναι σωματίδιο *οὐδέτερο* καί ἡ *μάζα* του ἡρεμίας εἶναι λίγο μεγαλύτερη ἀπό τή *μάζα* ἡρεμίας τοῦ πρωτονίου. Ἐπειδή τό νετρόνιο

δέν έχει ηλεκτρικό φορτίο, μπορεί νά μπαίνει ἐλεύθερα μέσα στό ηλεκτρικό πεδίο πού ὑπάρχει γύρω ἀπό κάθε ἀτομικό πυρήνα. Ἔτσι τό νετρόνιο ἔχει τήν ἰκανότητα νά πλησιάζει κάθε πυρήνα. Ὡστε :

I. Ὅλοι οἱ ἀτομικοὶ πυρήνες (ἐκτός ἀπό τόν πυρήνα τοῦ ἀτόμου τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου) ἀποτελοῦνται ἀπό πρωτόνια καί νετρόνια πού γενικά ὀνομάζονται νουκλεόνια.

II. Τό πρωτόνιο ἔχει ἓνα θετικό στοιχειῶδες ηλεκτρικό φορτίο, ἐνῶ τό νετρόνιο εἶναι οὐδέτερο.

III. Ἡ μάζα τοῦ πρωτονίου καί τοῦ νετρονίου εἶναι περίπου ἴση μέ μιὰ μονάδα ἀτομικῆς μάζας (1 amu).

δ. Ἀτομικός καί μαζικός ἀριθμός. Ὀνομάζεται ἀτομικός ἀριθμός Z ὁ ἀριθμός πού φανερώνει πόσα θετικά στοιχειῶδη ηλεκτρικά φορτία ἔχει ὁ πυρήνας ἑνός ἀτόμου, π.χ. γιά τόν πυρήνα ὕδρογόνου εἶναι $Z = 1$, γιά τόν πυρήνα ἡλίου εἶναι $Z = 2$, γιά τόν πυρήνα νατρίου εἶναι $Z = 11$ κ.λ. Ἐπειδή κάθε πρωτόνιο ἔχει ἓνα θετικό στοιχειῶδες ηλεκτρικό φορτίο, συμπεραίνομε ὅτι :

Ὁ ἀτομικός ἀριθμός Z εἶναι ἴσος μέ τόν ἀριθμό τῶν πρωτονίων πού ὑπάρχουν μέσα στόν πυρήνα τοῦ ἀτόμου ἑνός στοιχείου.

Ὀνομάζεται μαζικός ἀριθμός A ὁ ἀριθμός πού φανερώνει πόσα νουκλεόνια ἔχει ὁ πυρήνας ἑνός ἀτόμου. Ἐπομένως, ἂν ἓνας πυρήνας ἔχει μαζικό ἀριθμό A (δηλαδή περιέχει A νουκλεόνια) καί ἀτομικό ἀριθμό Z (δηλαδή περιέχει Z πρωτόνια), τότε ὁ ἀριθμός N τῶν νετρονίων πού ὑπάρχουν μέσα σ' αὐτόν τόν πυρήνα εἶναι ἴσος μέ τή διαφορά $N = A - Z$. Ὡστε :

Ὁ ἀτομικός ἀριθμός Z εἶναι ἴσος μέ τόν ἀριθμό τῶν πρωτονίων τοῦ πυρήνα, ἐνῶ ὁ μαζικός ἀριθμός A εἶναι ἴσος μέ τόν ἀριθμό τῶν νουκλεονίων τοῦ πυρήνα, δηλαδή εἶναι ἴσος μέ τό ἄθροισμα τῶν Z πρωτονίων καί τῶν N νετρονίων τοῦ πυρήνα.

$$A = Z + N$$

$$\text{νουκλεόνια} = \text{πρωτόνια} + \text{νετρόνια}$$

Ὁ μαζικός ἀριθμός A τοῦ ἀτομικοῦ πυρήνα ἑνός στοιχείου εἶναι ἴσος μέ τόν ἀκέραιο ἀριθμό πού πλησιάζει πρὸς τήν ἀτομική μάζα τοῦ στοιχείου π.χ. γιά τό ἥλιο καί τό βόριο εἶναι :

στοιχείο	He	B
ατομική μάζα	4,002 604 amu	11,009 305 amu
μαζικός αριθμός	A = 4	A = 11

ε. Τά τρία στοιχειώδη σωματίδια. Είδαμε ότι μέσα στο άτομο υπάρχουν τρία *στοιχειώδη σωματίδια*, το ηλεκτρόνιο, το πρωτόνιο και το νετρόνιο. Η μάζα του ηλεκτρονίου είναι πολύ μικρή σχετικά με τη μονάδα ατομικής μάζας (1 amu) και γι' αυτό θεωρούμε ότι το ηλεκτρόνιο έχει μαζικό αριθμό A ίσο με μηδέν (A = 0). 'Επειδή όμως το ηλεκτρόνιο έχει ένα αρνητικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (-e), γι' αυτό θεωρούμε ότι το ηλεκτρόνιο έχει ατομικό αριθμό Z ίσο με -1 (Z = -1).

Ο ατομικός πυρήνας ενός στοιχείου, π.χ. του άνθρακα C, που έχει ατομικό αριθμό Z και μαζικό αριθμό A, γράφεται συμβολικά ως εξής

${}_Z C^A$ (ή και C_Z^A). Η ίδια συμβολική παράσταση ισχύει και για τα

τρία στοιχειώδη σωματίδια, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Σωματίδιο	Z	Μάζα (σέ amu)	A	Φορτίο	Σύμβολο
Ήλεκτρόνιο	-1	$m_e = 0,000\ 548$	0	-e	${}_{-1}e^0$
Πρωτόνιο	1	$m_p = 1,007\ 825$	1	+e	${}_1P^1$ ή ${}_1H^1$
Νετρόνιο	0	$m_n = 1,008\ 665$	1	0	${}_0n^1$
$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg		$m_p = 1836 m_e$		$m_n = 1838,6 m_e$	
$ e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb					

98. Δομή του ατόμου

α. Το ουδέτερο άτομο. Ο Bohr (1913), γιά νά εξηγήσει τά φαινόμενα πού ως τότε ήταν γνωστά, διατύπωσε μιά θεωρία γιά *τή δομή του ατόμου*, ή όποία άργότερα συμπληρώθηκε από άλλους θεωρητικούς φυσικούς, γιά νά συμφωνεί μέ τά άποτελέσματα του πειράματος.

Αν ένας ατομικός πυρήνας έχει ατομικό αριθμό Z, τότε ό πυρήνας αυτός περιέχει Z πρωτόνια και, επομένως, *τό θετικό φορτίο* του πυρήνα είναι ίσο μέ τό γινόμενο του ατομικού αριθμού Z επί τό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο e. Όσπε :

θετικό φορτίο ατομικού πυρήνα : $+ Z \cdot e$

Ο ατομικός πυρήνας π.χ. του νατρίου έχει ατομικό αριθμό Z = 11.

Ἄρα ὁ ἀτομικός πυρήνας νατρίου ἔχει θετικό φορτίο $+11e$. Ἐνα ἄτομο νατρίου, γιά νά εἶναι οὐδέτερο, πρέπει νά περιέχει τόσα ἠλεκτρόνια, ὥστε τό *συνολικό ἀρνητικό φορτίο* τους νά εἶναι ἴσο μέ $-11e$. Ἄρα τό οὐδέτερο ἄτομο νατρίου ἔχει 11 ἠλεκτρόνια, δηλαδή ὅσος εἶναι ὁ ἀτομικός ἀριθμός Z . Ἀπό τά παραπάνω βγαίνει τό ἐξῆς συμπέρασμα :

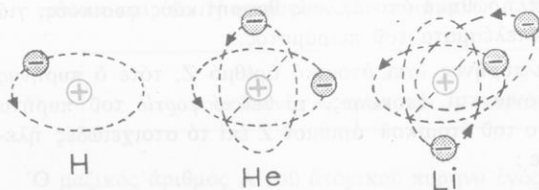
Ἐ ὁ ἀτομικός ἀριθμός Z φανερώνει πόσα πρωτόνια ὑπάρχουν μέσα στόν πυρήνα τοῦ ἀτόμου καί πόσα ἠλεκτρόνια ὑπάρχουν μέσα στό ἄτομο, ὅταν αὐτό εἶναι οὐδέτερο.

θετικό φορτίο τοῦ πυρήνα	$+ Z \cdot e$
ἠλεκτρόνια στό οὐδέτερο ἄτομο	Z





















β. Κατανομή τῶν ἠλεκτρονίων γύρω ἀπό τόν πυρήνα. Σύμφωνα μέ τή θεωρία τοῦ Bohr, πού τήν ἐπιβεβαίωσαν τά πειράματα, τό ἄτομο εἶναι μιά μικρογραφία πλανητικοῦ συστήματος. Στό κέντρο τοῦ ἀτόμου βρίσκεται ὁ *πυρήνας* πού μέ τό θετικό φορτίο του $+Ze$ δημιουργεῖ γύρω του *ἠλεκτρικό πεδίο*. Μέσα σ' αὐτό *περιφέρονται* γύρω ἀπό τόν πυρήνα τά *ἠλεκτρόνια*, ὅπως οἱ πλανῆτες περιφέρονται γύρω ἀπό τόν ἥλιο. Σέ κάθε ἠλεκτρόνιο ἐνεργεῖ ὡς κεντρομόλος δύναμη ἡ *δύναμη Coulomb*, τήν ὁποία ἐξασκεῖ τό θετικό φορτίο τοῦ πυρήνα στό ἀρνητικό φορτίο τοῦ ἠλεκτρονίου. Μόνο τό ἄτομο ὑδρογόνου ἔχει ἓνα ἠλεκτρόνιο πού περιφέρεται γύρω ἀπό τόν πυρήνα, γιατί γιά τό ὑδρογόνο εἶναι $Z = 1$ (σχ. 141). Στό ἄτομο ἡλίου ($Z = 2$) γύρω ἀπό τόν πυρήνα του περιφέρονται δύο ἠλεκτρόνια πάνω σέ τροχιές πού ἔχουν τήν ἴδια ἀκτίνα, ἀλλά δέ βρίσκονται στό ἴδιο ἐπίπεδο. Λέμε ὅτι τά δύο ἠλεκτρόνια βρίσκονται στόν ἴδιο *φλοιό*, (ἢ *στιβάδα*). Τό ἄτομο λιθίου ($Z = 3$) ἔχει τρία ἠλεκτρόνια. Τά δύο ἀπό αὐτά βρίσκονται στόν ἴδιο φλοιό, ἐνῶ τό τρίτο ἠλεκτρόνιο βρίσκεται σέ ἓναν ἄλλο πιό ἐξωτερικό φλοιό.

Γενικά, ὅταν τό ἄτομο ἔχει περισσότερα ἀπό δύο ἠλεκτρόνια (δηλαδή

ὅταν εἶναι $Z > 2$), τότε σύμφωνα μέ μιά βασική ἀρχή τῆς Ἀτομικῆς Φυσικῆς, πού ὀνομάζεται *ἀρχή τοῦ Pauli*, τά ἠλεκτρόνια κατανέμονται πάνω σέ διαδοχικούς ὁμόκεντρους φλοιούς πού χαρα-



Σχ. 141. Σχηματική παράσταση τῆς κατανομῆς τῶν ἠλεκτρονίων, στά ἄτομα ὑδρογόνου ἡλίου καί λιθίου.

1 Υδρογόνο  H = 1		2 Ήλιο  He = 4	
3 Λίθιο  Li = 7	4 Βηρύλλιο 	5 Βόριο 	6 Άνθρακας 
11 Νάτριο  Na = 23	12 Μαγνήσιο 	13 Άργίλιο 	14 Ήνυριο 
19 Κάλιο  K = 39	20 Ασβέστιο 	15 Φωσφόρος 	16 Θείο 
		17 Χλώριο 	18 Αργό 
			9 Φθόριο 
			8 Οξυγόνο 
			7 Άζωτο 
			4 Βηρύλλιο 

Σχ. 142. Σχηματική παράσταση της ηλεκτρονικής δομής των απλούστερων ατόμων με τη σειρά που έχουν στο περι-οδικό σύστημα.

κτηρίζονται με τα γράμματα K, L, M, N, O, P, Q. Σχηματικά ή κατανομή των ηλεκτρονίων σε φλοιούς παριστάνεται πάνω στο ίδιο επίπεδο (σχ. 142), αν και στην πραγματικότητα τα ηλεκτρόνια που ανήκουν στον ίδιο φλοιό δε βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Τα ηλεκτρόνια που ανήκουν στον εξωτερικό φλοιό ονομάζονται *ηλεκτρόνια σθένους*.

γ. Συμπληρωμένος φλοιός. Στους διαδοχικούς φλοιούς αντιστοιχούν οι άκεραιοι αριθμοί $n = 1, 2, 3, 4, \dots$. Ο άκεραιος αριθμός n που αντιστοιχεί σε ένα φλοιό ονομάζεται *κύριος κβαντικός αριθμός*. Σύμφωνα με την αρχή του Pauli βρίσκουμε πόσα ηλεκτρόνια μπορούν να υπάρχουν πάνω στον ίδιο φλοιό. Όταν ο φλοιός έχει το μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων που μπορεί να περιλάβει, τότε λέμε ότι ο φλοιός είναι *συμπληρωμένος*. Γενικά

οί συμπληρωμένοι φλοιοί αποτελούν πολύ σταθερή κατανομή των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα. Άποδεικνύεται ότι :

Κάθε φλοιός, που έχει κύριο κβαντικό αριθμό n , είναι συμπληρωμένος, όταν έχει $2n^2$ ηλεκτρόνια.

Έτσι οί τέσσερις πρώτοι φλοιοί, όταν είναι συμπληρωμένοι, έχουν ηλεκτρόνια :

φλοιός	K	L	M	N
κύριος κβαντικός αριθμός	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
ηλεκτρόνια	2	8	18	32

Στά άτομα στά όποια αντιστοιχεί μεγάλος ατομικός αριθμός Z οί πιό εξωτερικοί φλοιοί O, P, Q ποτέ δέν είναι συμπληρωμένοι. Αυτό όφείλεται στίς άμοιβαίες επιδράσεις των πολλών ηλεκτρονίων που υπάρχουν στό άτομο. Έτσι π.χ. στό άτομο ούρανίου ($Z = 92$) τά 92 ηλεκτρόνια του κατανέμονται ώς έξής :

φλοιός	K	L	M	N	O	P	Q
n	1	2	3	4	5	6	7
ηλεκτρόνια	2	8	18	32	18	12	2

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

128. Άν παρατάξουμε σε μία σειρά, έφαπτόμενα τό ένα μέ τό άλλο, όλα τά άτομα που περιέχονται σε 1 cm^3 ύδρογόνου σε κανονικές συνθήκες, πόσο θά είναι τό μήκος l τής γραμμής που σχηματίζεται; Νά συγκριθεί τό μήκος l αύτής τής γραμμής μέ τό μήκος ενός μεσημβρινού τής Γης $l_{\text{μεσ}} = 40\,000 \text{ km}$. Διάμετρος ατόμου ύδρογόνου $\delta = 10^{-10} \text{ m}$. $N_L = 2,688 \cdot 10^{18}$ μόρια/ cm^3 (αριθμός του Loschmidt).

129. Άποθέτουμε ότι μία μηχανή άπαριθμήσεως μπορεί νά εργάζεται συνεχώς και νά καταμετράει 1 μόριο νερού τό δευτερόλεπτο. Πόσος χρόνος χρειάζεται για νά καταμετρηθούν τά $N = 33 \cdot 10^{15}$ μόρια που υπάρχουν σε 1 έκατομμυριοστό του γραμμαρίου νερού; 1 έτος $\approx 3,15 \cdot 10^7 \text{ sec}$.

130. Ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο επιταχύνονται μέ τήν ίδια τάση $U = 10^6 \text{ V}$. 1) Πόση κινητική ένέργεια σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και Joule άποκτά τό καθένα από αυτά τά σωματίδια; 2) Πόσο είναι ό λόγος τής ταχύτητας v_1 , του ηλεκτρονίου προς τήν ταχύτητα v_2 του πρωτονίου : $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$. $m_p = 1836 m_e$.

131. Πόση είναι ή μάζα ενός ηλεκτρονίου που κινείται μέ ταχύτητα $v = 200\,000 \text{ km/sec}$; Πόση είναι ή σχετική αύξηση τής μάζας του; Μάζα ήρεμίας ηλεκτρονίου $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

132. Ένα σωματίδιο (ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο κ.λ.) έχει μάζα ήρεμίας m_0 . Πόση

ταχύτητα υ πρέπει να αποκτήσει το σωματίδιο, ώστε η μάζα του m να είναι διπλάσια από τη μάζα ηρεμίας (δηλαδή για να γίνει $m = 2m_0$);

133. Πόση είναι σε Joule και MeV η ολική ενέργεια ($E_{ολ}$) ενός ηλεκτρονίου που κινείται με ταχύτητα (v) ίση με τα 0,8 τής ταχύτητας του φωτός; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

134. Πόση τάση πρέπει να εφαρμόσουμε σε έναν καθοδικό σωλήνα ώστε τα ηλεκτρόνια των καθοδικών ακτίνων να έχουν ταχύτητα υ ίση με τα 2/3 τής ταχύτητας του φωτός στο κενό; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

135. Με πόση ενέργεια (E) ισοδυναμεί μάζα $m = 0,1$ mgr. Αν με αυτή την ενέργεια τροφοδοτούσαμε ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως που έχει ισχύ $P = 100$ W, πόσο χρόνο θα μπορούσε να λειτουργεί συνεχώς ο λαμπτήρας; 1 έτος = $3,15 \cdot 10^7$ sec.

136. Με πόση ενέργεια σε Joule και MeV ισοδυναμούν: 1) η μάζα ηρεμίας m_e του ηλεκτρονίου, και 2) η μάζα ηρεμίας m_p του πρωτονίου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

137. Με πόση μάζα m ισοδυναμεί η θερμότητα που ελευθερώνεται, όταν συμβαίνει τέλεια καύση 10^6 λίτρων βενζίνης; Θερμότητα καύσεως τής βενζίνης $8 \cdot 10^3$ kcal κατά λίτρο. $J = 4,2 \cdot 10^3$ Joule/kcal.

138. Μία ακτινοβολία Röntgen έχει μήκος κύματος $\lambda = 0,1$ Å. Με πόση μάζα ισοδυναμεί η ενέργεια που μεταφέρει ένα φωτόνιο αυτής τής ακτινοβολίας;

139. Ένα ηλεκτρόνιο που αρχικά βρίσκεται σε ηρεμία, απορροφά την ενέργεια ην ενός φωτονίου μιάς ακτινοβολίας, που έχει συχνότητα $\nu = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz. Πόση κινητική ενέργεια και πόση ταχύτητα αποκτά το ηλεκτρόνιο; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, $h = 6,67 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

140. Ένα ηλεκτρόνιο επιταχύνεται με την επίδραση τάσεως $U = 506\,000$ V. 1) Πόση ταχύτητα αποκτά το ηλεκτρόνιο; 2) Είναι παραδεκτή αυτή η τιμή τής ταχύτητας του ηλεκτρονίου; Ποιά διόρθωση πρέπει να κάνουμε στους υπολογισμούς μας; 3) Πόση είναι η μάζα του ηλεκτρονίου, όταν κινείται με την ταχύτητα που βρήκαμε μετά τη διόρθωση;

141. Πόσο είναι το δυναμικό σε ένα σημείο B, που απέχει $r = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm από ένα πρωτόνιο; Πόση δυναμική ενέργεια έχει ένα ηλεκτρόνιο, όταν βρίσκεται στο σημείο B; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

142. Πόσο είναι το δυναμικό σε ένα σημείο B, που απέχει $r = 5 \cdot 10^{-12}$ cm από έναν πυρήνα που έχει ατομικό αριθμό $Z = 80$; Πόση δυναμική ενέργεια έχει ο πυρήνας (Z = 2), όταν αυτός βρίσκεται στο σημείο B;

143. Στο άτομο υδρογόνου με πόση ταχύτητα κινείται το ηλεκτρόνιο πάνω σε μία κυκλική τροχιά που έχει ακτίνα $r = 0,5$ Å; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb, $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

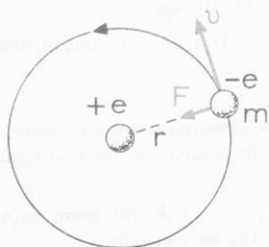
144. Όταν το άτομο υδρογόνου βρίσκεται στην κανονική κατάσταση, το ηλεκτρόνιο κινείται με συχνότητα $\nu = 6,6 \cdot 10^{15}$ Hz πάνω σε κυκλική τροχιά, που έχει ακτίνα $r = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm. 1) Πόση είναι η ένταση του ρεύματος που αντιστοιχεί στην κίνηση του ηλεκτρονίου; 2) Πόση είναι η μαγνητική επαγωγή που δημιουργεί αυτό το κυκλικό ρεύμα στο κέντρο τής κυκλικής τροχιάς;

145. Πόσα ηλεκτρόνια υπάρχουν στο άτομο άργιλιου, που έχει ατομικό αριθμό $Z = 13$, και πώς κατανέμονται αυτά στους φλοιούς;

Συνθήκες του Bohr

99. Στοιχειώδης μελέτη του ατόμου υδρογόνου

α. Οί δύο κινήσεις του ηλεκτρονίου. Στο άτομο υδρογόνου ($Z = 1$) υπάρχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο (σχ. 143). "Όταν το άτομο υδρογόνου βρίσκεται στην κανονική κατάσταση, το μοναδικό ηλεκτρόνιό του περιφέρεται



Σχ. 143. Κίνηση του ηλεκτρονίου στο άτομο υδρογόνου.

γύρω από τον πυρήνα διαγράφοντας με σταθερή γωνιακή ταχύτητα κυκλική τροχιά που έχει ακτίνα r . Έπομένως το ηλεκτρόνιο κινείται με ταχύτητα $v = \omega r$. Αυτή η κυκλική κίνηση του ηλεκτρονίου ισοδυναμεί με ένα κυκλικό ρεύμα, που αποτελεί ένα μαγνητικό δίπολο.

"Όπως ή Γη περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο και ταυτόχρονα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της, έτσι και το ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα, αλλά ταυτόχρονα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Αυτές οι δύο κινήσεις του

ηλεκτρονίου δημιουργούν στο άτομο υδρογόνου όρισμένες ιδιότητες. "Ωστε :

Στο άτομο υδρογόνου το ηλεκτρόνιο εκτελεί ταυτόχρονα δύο κινήσεις, δηλαδή περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του.

β. Ένέργεια του ηλεκτρονίου. Το ηλεκτρόνιο, επειδή βρίσκεται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα έχει δυναμική ενέργεια $E_{δυν}$ και επειδή κινείται με ταχύτητα v , έχει κινητική ενέργεια $E_{κιν}$. Έπομένως το ηλεκτρόνιο έχει ολική ενέργεια $E_{ολ}$ ίση με το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής ενέργειάς του, δηλαδή είναι

$$E_{ολ} = E_{δυν} + E_{κιν}$$

γ. Το φάσμα έκπομπής του υδρογόνου. Ξέρουμε ότι το φάσμα έκπομπής του υδρογόνου αποτελείται από όρισμένες φασματικές γραμμές, που καθεμιά από αυτές αντιστοιχεί σε μία ακτινοβολία με όρισμένη συχνότητα. "Ωστε το άτομο υδρογόνου μπορεί να εκπέμπει μόνο όρισμένες ακτινοβολίες που έχουν συχνότητες $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$ Σύμφωνα με τη θεωρία των κβάντα πρέπει να δεχτούμε ότι το άτομο υδρογόνου μπορεί να εκπέμπει μόνο όρισμένα φωτόνια που μεταφέρουν ενέργεια $h\nu_1, h\nu_2, h\nu_3, \dots$

Ο Bohr, για να εξηγήσει το φάσμα έκπομπής του υδρογόνου, δια-

τύπωσε δύο άρχες, που ονομάζονται **κβαντικές συνθήκες του Bohr** και επιβεβαιώνονται πειραματικά.

δ. Πρώτη συνθήκη του Bohr. Γιά *τήν κίνηση του ηλεκτρονίου* γύρω από τον πυρήνα ισχύει η εξής **πρώτη συνθήκη του Bohr** :

Στό άτομο υδρογόνου το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται γύρω από τον πυρήνα μόνο πάνω σε όρισμένες επιτρεπόμενες τροχιές (κβαντικές τροχιές).

Η κβαντική τροχιά με τη *μικρότερη* δυνατή ακτίνα ονομάζεται *θεμελιώδης τροχιά* και η ακτίνα της είναι ίση με $r_1 = 0,5 \text{ \AA}$. Οί ακτίνες των άλλων κβαντικών τροχιών δίνονται από την εξίσωση :

$$\text{ακτίνες κβαντικῶν τροχιῶν} \quad r = n^2 \cdot r_1$$

όπου n είναι άκεραίος αριθμός, που ονομάζεται **κύριος κβαντικός αριθμός** και μπορεί να λάβει τίς τιμές από ένα ως άπειρο.

$$\text{κύριος κβαντικός αριθμός} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \infty$$

Στή θεμελιώδη τροχιά αντιστοιχεί ο κύριος κβαντικός αριθμός $n = 1$. "Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται πάνω στή θεμελιώδη τροχιά, τότε το άτομο υδρογόνου βρίσκεται σε κατάσταση *ισορροπίας*, δηλαδή βρίσκεται στήν *κανονική κατάσταση*. Σ' αυτή τήν περίπτωση το ηλεκτρόνιο έχει *τήν ελάχιστη ολική ενέργεια* (E_1) που είναι ίση με $E_1 = -13,53 \text{ eV}$ (*). "Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται πάνω στις άλλες κβαντικές τροχιές, ή ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από τήν εξίσωση :

$$\text{ολική ενέργεια ηλεκτρονίου} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{ή} \quad E_n = \frac{-13,53}{n^2} \text{ eV}$$

Η τελευταία εξίσωση φανερώνει ότι :

"Όταν αυξάνει ή ακτίνα τής τροχιάς του ηλεκτρονίου, τότε αυξάνει **άποτομα** ή **ολική ενέργεια** του ηλεκτρονίου.

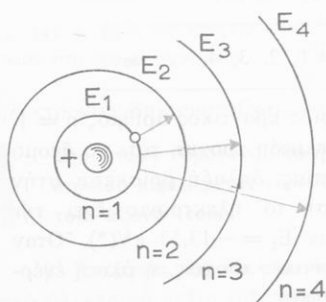
(*) Τό άρνητικό σημείο οφείλεται στό ότι κατ' άπόλυτη τιμή ή δυναμική ενέργεια ($E_{δυν}$) του ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερη από τήν κινητική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια είναι άρνητική, γιατί είναι ίση με τό γινόμενο του δυναμικού U_r σε απόσταση r από τον πυρήνα επί τό φορτίο $-e$ του ηλεκτρονίου, δηλαδή είναι $E_{δυν} = U_r \cdot (-e)$.

ε. Δεύτερη συνθήκη του Bohr. Για *τήν έκπομπή* και *τήν απορρόφηση* της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το άτομο υδρογόνου ισχύει η *έξής δεύτερη συνθήκη του Bohr*:

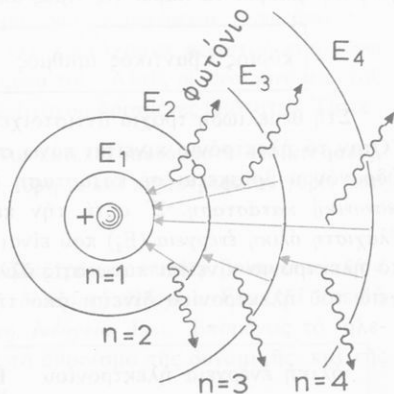
Τό ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου *εκπέμπει* ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μόνο όταν τό ηλεκτρόνιο *πηδάει* από μία κβαντική τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας ($E_{αρχ}$) σέ μία άλλη κβαντική τροχιά μικρότερης ενέργειας ($E_{τελ}$). 'Η ενέργεια ($h\nu$) του φωτονίου που *εκπέμπεται* είναι *ίση* μέ τή διαφορά των ενεργειών του ηλεκτρονίου πάνω στίς δύο κβαντικές τροχιές.

$$\text{ένέργεια φωτονίου που εκπέμπεται} \quad h\nu = E_{αρχ} - E_{τελ}$$

Σύμφωνα μέ τή δεύτερη συνθήκη του Bohr ή *γένεση* της ακτινοβολίας *οφείλεται* σέ *απότομα πηδήματα* του ηλεκτρονίου από μία *έξωτερική* κβαντική τροχιά σέ μία άλλη κβαντική τροχιά που είναι *πιο κοντά* στον



Σχ. 144. Διέγερση του ατόμου υδρογόνου. Τό ηλεκτρόνιο πηδάει από τή θεμελιώδη ($n=1$) σέ μία *πιο έξωτερική* τροχιά ($n=1,2,3,4,\dots$).



Σχ. 145. Έκπομπή ακτινοβολίας από τό άτομο υδρογόνου (αποδιέγερση του ατόμου).

πυρήνα. Όταν τό άτομο υδρογόνου βρίσκεται στήν κανονική κατάσταση, τότε τό ηλεκτρόνιο κινείται πάνω στή *θεμελιώδη τροχιά* ($n=1$) και έχει ενέργεια E_1 . Σ' αυτή τήν περίπτωση τό ηλεκτρόνιο *δέν εκπέμπει* ακτινοβολία.

Όταν τό ηλεκτρόνιο πάρει μία ενέργεια ΔE , τότε τό ηλεκτρόνιο *πηδάει* *απότομα* σέ μία άλλη *έξωτερική* τροχιά, στήν όποία *άντιστοιχεί* ενέργεια του ηλεκτρονίου $E_n = E_1 + \Delta E$ (σχ. 144). Αυτό τό *απότομο πηδήμα*

του ηλεκτρονίου από τη θεμελιώδη σε μία πιο εξωτερική τροχιά λέγεται **διέγερση** του ατόμου. Η διέγερση είναι μία άσταθής κατάσταση του ατόμου, που διαρκεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 10^{-8} sec). Έτσι το άτομο υδρογόνου πολύ γρήγορα επανέρχεται στην κανονική του κατάσταση, γιατί το ηλεκτρόνιο επανέρχεται στη θεμελιώδη τροχιά, είτε με ένα μόνο πήδημά του είτε με διαδοχικά πηδήματά του από μία εξωτερική σε μία πιο εσωτερική τροχιά (σχ. 145). Με αυτό όμως το πήδημά του από τη μία τροχιά στην άλλη το ηλεκτρόνιο **αποβάλλει απότομα** το πλεόνασμα της ενέργειάς του με τη μορφή ενός **φωτονίου** που έχει ενέργεια $(h\nu)$ ίση με τη διαφορά των ενεργειών του ηλεκτρονίου πάνω στις δύο τροχιές. Έτσι η δεύτερη συνθήκη του Bohr εξηγεί εύκολα γιατί τό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου αποτελείται μόνο από όρισμένες ακτινοβολίες, που τά φωτόνιά τους έχουν όρισμένες συχνότητες. Από τά παραπάνω συνάγεται ότι *η δεύτερη συνθήκη του Bohr* μπορεί νά διατυπωθεῖ γενικότερα ως εξής :

Τό ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου, όταν πηδάει από μία κβαντική τροχιά σε άλλη, εκπέμπει ή απορροφά τήν ενέργεια ενός φωτονίου $(h\nu)$ καί επομένως ή μεταβολή τής όλικῆς ενέργειας του ηλεκτρονίου γίνεται μόνο κατά $h\nu$.

στ. Ίονισμός του ατόμου υδρογόνου. Όταν τό άτομο υδρογόνου βρίσκεται στην κανονική κατάσταση, τότε τό ηλεκτρόνιο κινείται πάνω στη θεμελιώδη τροχιά ($n = 1$) καί έχει τή μικρότερη δυνατή ενέργεια E_1 . Όταν τό ηλεκτρόνιο πάρει μία ενέργεια $(h\nu)$, τότε πηδάει σε μία εξωτερική τροχιά καί προκαλείται **διέγερση** του ατόμου. Αν ή ενέργεια που παίρνει τό ηλεκτρόνιο είναι μεγαλύτερη από ένα όριο, τότε τό ηλεκτρόνιο πετάγεται έξω από τό ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα καί τό άτομο υδρογόνου μεταβάλλεται τότε σε **θετικό ίόν**. Η ενέργεια που πρέπει νά πάρει τό ηλεκτρόνιο για νά μεταπηδήσει από τή θεμελιώδη τροχιά έξω από τά όρια του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται **ενέργεια ιονισμού**. Είναι φανερό ότι :

Γιά τό άτομο υδρογόνου ή ενέργεια ιονισμού είναι ίση με τήν όλική ενέργεια E_1 που έχει τό ηλεκτρόνιο όταν κινείται πάνω στη θεμελιώδη τροχιά (δηλαδή κατ' απόλυτη τιμή είναι ίση με $E_1 = 13,53$ eV).

Η διέγερση καί ό ιονισμός του ατόμου υδρογόνου συμβαίνουν, όταν τό άτομο απορροφήσει ενέργεια είτε από μία **ακτινοβολία** που πέφτει πάνω του είτε κατά **τή σύγκρουσή του** με άτομο ή σωματίδιο που έχει μεγάλη κινητική ενέργεια. Αν ή ενέργεια E που απορροφά τό άτομο υδρογόνου

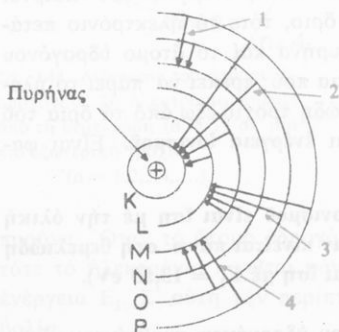
είναι *μεγαλύτερη* από την ενέργεια ιονισμού E_1 , τότε το πλεόνασμα της ενέργειας μένει πάνω στο ηλεκτρόνιο ως *κινητική ενέργεια* και ισχύει η εξίσωση :

$$\text{κινητική ενέργεια εξερχόμενου ηλεκτρονίου} \quad E_{\text{κιν}} = E - E_1$$

100. Άτομα με πολλά ηλεκτρόνια

Τά άτομα που έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό (Z) έχουν πολλά ηλεκτρόνια, π.χ. το άτομο λευκοχρύσου ($Z = 78$) έχει 78 ηλεκτρόνια που κατανέμονται πάνω σε έξι φλοιούς (από τον K ως τον P). Όταν ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια βρίσκεται στην *κανονική κατάσταση*, τότε όλα τα ηλεκτρόνια του κατανέμονται πάνω σε κβαντικές τροχιές έτσι, ώστε κάθε ηλεκτρόνιο να έχει την επιτρεπομένη ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Αν αυτό το άτομο προσλάβει ενέργεια, τότε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια μεταπηδούν σε κβαντικές τροχιές που έχουν μεγαλύτερες ακτίνες και το άτομο βρίσκεται για έναν ελάχιστο χρόνο σε κατάσταση *διεγέρσεως*, Όταν τα ηλεκτρόνια ξαναγυρίζουν με πηδήματα στις αρχικές θέσεις τους, το άτομο *εκπέμπει ακτινοβολίες*, δηλαδή *φωτόνια*, σύμφωνα με τη δεύτερη κβαντική συνθήκη του Bohr.

Σε ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια, π.χ. στο άτομο λευκοχρύσου, κατά τη διεγέρσή του ένα ηλεκτρόνιο πηδάει από τους δύο προτελευταίους φλοιούς N ή O στον τελευταίο φλοιό P (σχ. 146). Όταν το ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζει στην αρχική του θέση, τότε το ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο, που έχει σχετικά μικρή ενέργεια και ανήκει στις *ορατές*, τις *υπέρουθρες* ή τις *υπεριώδεις ακτινοβολίες*. Αν όμως κατά τη διεγέρση του ατόμου ένα ηλεκτρόνιο των εσωτερικών φλοιών K, L, M πηδήσει στους πιο εξωτερικούς φλοιούς, τότε το ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζοντας στην αρχική θέση του εκπέμπει ένα φωτόνιο, που έχει μεγάλη ενέργεια και ανήκει στις *ακτίνες Röntgen*. Από τα παραπάνω βγαίνει το εξής συμπέρασμα :



Σχ. 146. Παραγωγή των ορατών ακτινοβολιών και των ακτίνων Röntgen (1 ορατές ακτινοβολίες, 2, 3, 4, σειρές ακτίνων Röntgen)

Σε ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια κατά την πτώση των ηλεκτρονίων πάνω στους πιο εξωτερικούς φλοιούς παράγονται ορατές, υπέρυθρες ή υπεριώδεις ακτινοβολίες, ενώ

Περιοδικό σύστημα των στοιχείων

Ο μ ά δ ε ε ς

Περίοδος	I	II											III	IV	V	VI	VII	0			
1	H 1	He 4																	He 2		
2	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10			
3	Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18			
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36			
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54			
6	Cs 55	Ba 56	57-71 *	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86			
7	Fr 87	Ra 88	89- 103 **	Ku 104	Ha 105																

* Σειρά λαθάνου	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
** Σειρά άκτινίου	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lw 103

κατά την πτώση των ηλεκτρονίων πάνω στους τρεις πιό έσωτερικούς φλοιούς (K, L, M) παράγονται ακτίνες Röntgen.

Αν ένα άτομο μέ πολλά ηλεκτρόνια πάρει την απαιτούμενη *ένεργεια ιονισμού*, τότε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια του πηδούν έξω από τά όρια του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα και τό άτομο μεταβάλλεται σέ *θετικό ίόν*. Η *ένεργεια ιονισμού* είναι μικρότερη γιά τά ηλεκτρόνια του έξω-τερικού φλοιού (ηλεκτρόνια σθένους).

101. Περιοδικό σύστημα τών στοιχείων

Μέ βάση *τήν ηλεκτρονική δομή* τών ατόμων κατατάσσουμε τά στοιχεία στό περιοδικό σύστημα (βλ. σελίδα 195). Όταν στό *περιοδικό σύστημα* προχωρούμε από τό ένα στοιχείο στό άμέσως επόμενο, ό ατομικός αριθμός Z αυξάνει κατά μία μονάδα, άρα ό αριθμός τών ηλεκτρονίων του ατόμου αυξάνει κατά ένα ηλεκτρόνιο. Η διαδοχική πρόσθεση ενός ηλεκτρονίου προχωρεί μέ τέτοιο τρόπο, ώστε *νά συμπληρώνονται διαδοχικά* οί διάφοροι φλοιοί (σχ. 142).

Τά χημικά φαινόμενα όφείλονται σέ μεταβολές του αριθμού τών ηλεκτρονίων που ανήκουν στον έξωτερικό φλοιό. Έπομένως ή περιοδικότητα που παρουσιάζουν οί χημικές ιδιότητες τών στοιχείων όφείλονται στό ότι *περιοδικά* στον έξωτερικό φλοιό υπάρχει ό ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων.

Στά άτομα τών ευγενών αερίων ό έξωτερικός φλοιός είναι συμπληρωμένος και γι' αυτό είναι πολύ σταθερός. Γιά τά άτομα όλων τών άλλων στοιχείων ισχύει ό έξής γενικός κανόνας : τό άτομο αποβάλλοντας ή προσλαμβάνοντας ηλεκτρόνια *τείνει* *νά αποκτήσει* έξωτερικό φλοιό συμπληρωμένο.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

146. Τό ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου κινείται πάνω στή θεμελιώδη τροχιά ($r_1 = 0,5 \cdot 10^{-10}$ m) μέ ταχύτητα $v = 22 \cdot 10^5$ m/sec. Πόση είναι ή κεντρομόλος δύναμη που ενεργεί στό ηλεκτρόνιο; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

147. Όταν τό ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου κινείται πάνω στή θεμελιώδη τροχιά ($r_1 = 0,5 \cdot 10^{-10}$ m), τότε έχει ταχύτητα $v = 22 \cdot 10^5$ m/sec. Πόση είναι σέ Joule και eV ή κινητική ένέργεια του ηλεκτρονίου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

148. Στο άτομο υδρογόνου ή ακτίνα της θεμελιώδους τροχιάς είναι $r_1 = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm. Νά γραφούν οί ακτίνες τών τροχιών του ηλεκτρονίου που άντιστοιχούν στους κβα-ντικούς αριθμούς $n = 1, 2, 3, 4, 5$.

149. Το ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου πάνω στη θεμελιώδη τροχιά έχει ενέργεια $E_1 = -13,53$ eV. 1) Πόση είναι η ενέργειά του E_2, E_3, E_4 και E_5 πάνω στις τέσσερις επόμενες κβαντικές τροχιές; 2) Νά βρεθούν οι εξής διαφορές ενέργειας του ηλεκτρονίου: $E_2 - E_1, E_3 - E_2, E_4 - E_3$ και $E_5 - E_4$.

150. Πόση ενέργεια E πρέπει να απορροφήσει το ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου, για να μεταπηδήσει από τη θεμελιώδη τροχιά ($n = 1$) στην τροχιά που έχει κβαντικό αριθμό $n = 4$; *Αν αυτή η ενέργεια E είναι η ενέργεια ενός φωτονίου ($h\nu$), πόσο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

151. *Ένα άτομο υδρογόνου διεγείρεται και το ηλεκτρόνιο του πηδάει από τη θεμελιώδη τροχιά ($n = 1$) στην τρίτη κβαντική τροχιά ($n = 3$). Πόσα είδη φωτονίων μπορεί να εκπέμψει το ηλεκτρόνιο, όταν ξαναγυρίζει στη θεμελιώδη τροχιά;

152. Σέ ένα άτομο υδρογόνου που διεγέρθηκε το ηλεκτρόνιο του πήδησε από τη θεμελιώδη τροχιά σέ μιá εξωτερική κβαντική τροχιά και η ενέργειά του αυξήθηκε κατά $\Delta E = 12$ eV. Πηδώντας πάλι το ηλεκτρόνιο από τη νέα τροχιά στή θεμελιώδη εκπέμπει ένα φωτόνιο. Πόσο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τό άτομο υδρογόνου; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

153. Στο άτομο υδρογόνου τό ηλεκτρόνιο πάνω στή θεμελιώδη τροχιά έχει όλική ενέργεια κατ' απόλυτη τιμή μέ 13,5 eV. Πόσο πρέπει να είναι τό μήκος κύματος της ακτινοβολίας που ένα φωτόνιο της ($h\nu$) προκαλεί τόν ιονισμό του ατόμου υδρογόνου;

154. Κατά τη διέγερση ενός ατόμου μέ πολλά ηλεκτρόνια ένα ηλεκτρόνιο πηδάει από τη θεμελιώδη σέ μιá εξωτερική κβαντική τροχιά. *Αν η αύξηση της ενέργειας του ηλεκτρονίου είναι ίση μέ $\Delta E = 4,95 \cdot 10^{-19}$ Joule, πόσο είναι τό μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει τό άτομο, όταν τό ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζει μέ ένα πήδημα στή θεμελιώδη τροχιά;

155. Κατά τη διέγερση ενός ατόμου μέ πολλά ηλεκτρόνια δύο ηλεκτρόνια πηδούν από τήν τροχιά που βρίσκονται σέ δύο πιό εξωτερικές τροχιές. *Η αύξηση της ενέργειας είναι για τό ένα ηλεκτρόνιο $\Delta E_1 = 3,3 \cdot 10^{-19}$ Joule και για τό άλλο είναι $\Delta E_2 = 19,8 \cdot 10^{-19}$ Joule. Τά ηλεκτρόνια ξαναγυρίζουν μέ ένα μόνο πήδημα στίς αρχικές θέσεις τους. Πόσο είναι τό μήκος κύματος λ_1 και λ_2 τών δύο ακτινοβολιών που εκπέμπει τό άτομο; Είναι όρατές αυτές οι ακτινοβολίες;

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ο άτομικός πυρήνας

102. Πυρηνική Φυσική

Ο Rutherford απέδειξε πειραματικά ότι μέσα στο άτομο υπάρχει ο μικρότατος *άτομικός πυρήνας*, που έχει θετικό φορτίο. Από την περιθλαση των ακτίνων Röntgen υπολογίζεται ο *άτομικός αριθμός Z* ενός στοιχείου (νόμος του Moseley), δηλαδή βρίσκεται ο αριθμός Z των θετικών στοιχειωδών φορτίων που έχει ο πυρήνας. Έτσι ξέρουμε πόσα *πρωτόνια* υπάρχουν στον πυρήνα. Με το φασματογράφο των μαζών βρίσκουμε *τήν άτομική μάζα*, που σχεδόν *όλόκληρη* είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα. Οι γνώσεις μας για τον άτομικό πυρήνα συμπληρώνονται από τη φυσική και την τεχνητή *ραδιενέργεια*, ή όποια είναι μία έκρηξη του πυρήνα. Με τη μελέτη ειδικά του άτομικού πυρήνα ασχολείται ένας ιδιαίτερος κλάδος της Φυσικής, ή **Πυρηνική Φυσική**.

103. Ισότοποι και ισοβαρείς πυρήνες

α. *Ισότοποι πυρήνες*. Όλα σχεδόν τα φυσικά στοιχεία είναι σταθερά μίγματα από όρισμένα *ισότοπα*, δηλαδή από στοιχεία που έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες, διαφορετική όμως *άτομική μάζα*. Το *όξυγόνο* π.χ. αποτελείται από τρία ισότοπα στοιχεία, στα οποία αντιστοιχούν *τρία είδη* ατομικών πυρήνων. Αυτοί οι πυρήνες έχουν τον ίδιο *άτομικό αριθμό Z = 8*, αλλά οι *μαζικοί αριθμοί τους A* αντίστοιχα είναι 16, 17 και 18. Οι τρεις αυτοί πυρήνες ονομάζονται *ισότοποι πυρήνες* και γράφονται έτσι:



Καί οι τρεις πυρήνες έχουν γύρω τους *Z = 8* ηλεκτρόνια και γι' αυτό τα άτομα των τριών ισότοπων του *όξυγόνου* έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες. *Αλλά* οι τρεις ισότοποι πυρήνες *όξυγόνου* δέν έχουν την ίδια σύσταση, γιατί περιέχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων, διαφορετικό όμως αριθμό νετρονίων, όπως δείχνει ο *επόμενος πίνακας*:

Πυρήνας	Πρωτόνια	Μαζικός αριθμός	Νετρόνια
${}_8\text{O}^{16}$	$Z = 8$	$A = 16$	$N = 8$
${}_8\text{O}^{17}$	$Z = 8$	$A = 17$	$N = 9$
${}_8\text{O}^{18}$	$Z = 8$	$A = 18$	$N = 10$

Από τα παραπάνω βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

I. *Ισότοποι ονομάζονται οι πυρήνες που έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό Z, διαφορετικό όμως μαζικό αριθμό A, γιατί αυτοί οι πυρήνες περιέχουν τον ίδιο αριθμό (Z) πρωτονίων, διαφορετικό όμως αριθμό (N) νετρονίων.*

II. *Οι ισότοποι πυρήνες ανήκουν σε άτομα ισοτόπων του ίδιου στοιχείου.*

β. *Ισοβαρείς πυρήνες. Ονομάζονται ισοβαρείς πυρήνες εκείνοι που περιέχουν τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων και, επομένως, έχουν τον ίδιο μαζικό αριθμό A, διαφορετικό όμως ατομικό αριθμό Z. Τέτοιοι π.χ. είναι οι πυρήνες ${}_3\text{Li}^7$ και ${}_4\text{Be}^7$. Η σύσταση αυτών των πυρήνων φαίνεται στον επόμενο πίνακα:*

Πυρήνας	Μαζικός αριθμός	Πρωτόνια	Νετρόνια
${}_3\text{Li}^7$	$A = 7$	$Z = 3$	$N = 4$
${}_4\text{Be}^7$	$A = 7$	$Z = 4$	$N = 3$

Παρατηρούμε ότι οι δύο ισοβαρείς πυρήνες περιέχουν τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων ($A = 7$), διαφέρουν όμως στον αριθμό των πρωτονίων (Z) και των νετρονίων (N). Έτσι καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

I. *Ισοβαρείς ονομάζονται οι πυρήνες που έχουν τον ίδιο μαζικό αριθμό A, διαφορετικό όμως ατομικό αριθμό Z.*

II. *Οι ισοβαρείς πυρήνες ανήκουν σε άτομα διαφορετικών στοιχείων.*

γ. *Βαρύ νερό. Το υδρογόνο αποτελείται από δύο ισότοπα, το κοινό υδρογόνο και το βαρύ υδρογόνο ή δευτέριο. Οι δύο αυτοί ισότοποι πυρήνες συμβολίζονται με ${}_1\text{H}^1$ και ${}_1\text{H}^2$ ή ${}_1\text{D}^2$. Το βαρύ υδρογόνο έχει ατομικό βάρος 2 και βρίσκεται σε μικρή αναλογία μέσα στο φυσικό υδρογόνο. Το βαρύ υδρογόνο ενώνεται με το οξυγόνο και σχηματίζει το βαρύ νερό D_2O , που έχει μοριακό βάρος 20 και φυσικές ιδιότητες διαφορετικές από το κοινό νερό. Π.χ. το βαρύ νερό σε θερμοκρασία 4°C έχει πυκνότητα $1,104 \text{ gr/cm}^3$, έχει θερμοκρασία πήξεως $3,8^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία βρασμού $101,4^\circ\text{C}$ (σε κανονική πίεση). Αυτές οι διαφορές μās βοηθούν να διαχωρίζουμε εύ-*

κολα τό βαρύ νερό από τό κοινό νερό. Συνήθως τό βαρύ νερό τό παίρνουμε από τά υπολείμματα τής ηλεκτρολύσεως και τό χρησιμοποιούμε σέ όρισμένους τύπους πυρηνικών αντιδραστήρων.

104. Έλλειμμα μάζας και ενέργεια συνδέσεως

α. Έλλειμμα μάζας τών πυρήνων. Κάθε πυρήνας άποτελείται από Z πρωτόνια και N νετρόνια. Έπομένως ή μάζα (ήρεμίας) του πυρήνα πρέπει νά είναι ίση μέ τό άθροισμα τών μαζών (ήρεμίας) τών νουκλεονίων πού υπάρχουν μέσα στον πυρήνα, δηλαδή πρέπει νά ισχύει ή σχέση:

$$\text{μάζα πυρήνα} \quad m_{\text{πυρήνα}} = Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

Άλλά μέ τίς μετρήσεις βρήκαμε ότι πάντοτε ή μάζα του πυρήνα είναι μικρότερη από τό άθροισμα τών μαζών τών πρωτονίων και τών νετρονίων του πυρήνα. Έτσι κάθε πυρήνας παρουσιάζει ένα έλλειμμα μάζας (Δm) πού είναι χαρακτηριστικό για κάθε είδος πυρήνα. "Ωστε:

"Όταν τά πρωτόνια και τά νετρόνια συνδέονται μεταξύ τους για νά σχηματίσουν τόν πυρήνα, πάντοτε εμφανίζεται ένα έλλειμμα μάζας (Δm).

$$\text{έλλειμμα μάζας } \Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_{\text{πυρήνα}}$$

β. Ένέργεια συνδέσεως. Τό έλλειμμα μάζας (Δm) ενός πυρήνα *ισοδυναμεί μέ ενέργεια* $\Delta m \cdot c^2$. Μέσα στον πυρήνα τά πρωτόνια και τά νετρόνια συνδέονται μεταξύ τους πολύ ισχυρά. Για νά διαλυθεί ό πυρήνας και νά διαχωριστούν τά συστατικά του μακριά τό ένα από τό άλλο, πρέπει νά δαπανήσουμε ενέργεια ίση μέ $\Delta m \cdot c^2$, δηλαδή ενέργεια *ισοδύναμη* μέ τό έλλειμμα μάζας (Δm) του πυρήνα. Αυτή ή ενέργεια ονομάζεται *ένέργεια συνδέσεως* του πυρήνα. "Όσο μεγαλύτερη είναι ή ενέργεια συνδέσεως, τόσο σταθερότερος είναι ό πυρήνας. "Ωστε:

I. Ένέργεια συνδέσεως ενός πυρήνα ονομάζεται ή ενέργεια πού πρέπει νά δαπανηθεί, για νά ελευθερωθούν τελείως τά νουκλεόνια του πυρήνα.

II. Η ενέργεια συνδέσεως ενός πυρήνα είναι *ισοδύναμη* μέ τό έλλειμμα μάζας αυτού του πυρήνα.

$$\text{ένέργεια συνδέσεως} \quad E_{\text{συνδέσεως}} = \Delta m \cdot c^2$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

156. Ένας ατομικός πυρήνας βρέθηκε ότι έχει φορτίο $q = 1,76 \cdot 10^{-18}$ Cb. Πόσα πρωτόνια έχει αυτός ο πυρήνας και ποιός είναι ο ατομικός αριθμός του; Σέ ποίο στοιχείο ανήκει τό άτομο πού έχει αυτό τόν πυρήνα; Πόσα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από αυτό τόν πυρήνα καί πώς κατανέμονται; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

157. ‘Ο πυρήνας μολύβδου θεωρείται ως σημείο. 1) Πόσο είναι τό δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου πού δημιουργεί ό πυρήνας μολύβδου ($Z = 82$) σέ απόσταση $r = 4 \cdot 10^{-14}$ m; 2) Πόση δυναμική ενέργεια αποκτά ό πυρήνας ήλιου ($Z = 2$), αν βρεθεί σ’ αυτή τήν απόσταση r από τόν πυρήνα μολύβδου; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

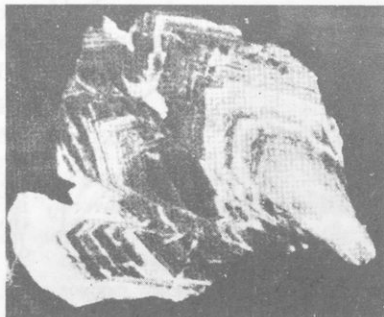
158. Ένας πυρήνας ήλιου (${}^4_2\text{He}$) εκτοξεύεται μέ ταχύτητα $v = 1,78 \cdot 10^7$ m/sec πρός έναν πυρήνα χρυσοῦ ($Z = 79$). Σέ πόση απόσταση r από τόν πυρήνα χρυσοῦ θά κατορθώσει νά φτάσει αυτός ό πυρήνας ήλιου; Μάζα του πυρήνα ήλιου: $m = 6,64 \cdot 10^{-27}$ kgr.

159. Τό δευτερόνιο (${}^1_1\text{H}^2$ ή ${}^2_1\text{D}$), δηλαδή ό πυρήνας του ατόμου του βαριού υδρογόνου, έχει μάζα $m_D = 2,014\ 102$ amu. 1) Πόσο είναι τό έλλειμμα μάζας (Δm); 2) Πόση είναι σέ MeV ή ενέργεια συνδέσεως γι’ αυτό τόν πυρήνα; 3) Πόση είναι κατά νουκλεόνιο ή ενέργεια συνδέσεως;
 $1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$. $m_p = 1,007\ 825$ amu. $m_n = 1,008\ 665$ amu.

160. ‘Η μάζα του πυρήνα ήλιου (${}^4_2\text{He}^2$) είναι $m_{\text{πυρ}} = 4,00260$ amu. 1) Πόσο είναι τό έλλειμμα μάζας (Δm); 2) Πόση είναι ή ενέργεια συνδέσεως; 3) Πόση είναι ή ενέργεια συνδέσεως κατά νουκλεόνιο; Νά συγκριθεί αυτή ή ενέργεια μέ εκείνη πού βρέθηκε γιά τό δευτερόνιο στό προηγούμενο πρόβλημα.
 $1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$. $m_p = 1,00782$ amu. $m_n = 1,00867$ amu.

161. Σέ 1 gr νέου (${}^{10}_{10}\text{Ne}$) υπάρχουν $n = 3 \cdot 10^{22}$ άτομα. Γιά τόν πυρήνα νέου ή ενέργεια συνδέσεως είναι $E_{\text{συνδ}} = 160,6$ MeV. Πόση ενέργεια σέ Joule πρέπει νά δαπανήσουμε, γιά νά διαχωρίσουμε τελείως τούς n πυρήνες στά συστατικά τους;
 $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Joule.

Αυτοραδιογράφημα ορυκτού του ουρανίου (σαμαρκίτη). Διακρίνεται ή κατανομή του ουρανίου μέσα στον κρύσταλλο.



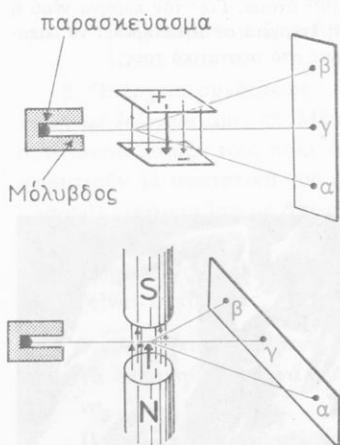
Φυσική ραδιενέργεια

105. Ραδιενέργεια

Ο Becquerel (1896) ανακάλυψε ότι ορυκτά που περιέχουν οὐράνιο ή ένωσησες του εκπέμπουν συνεχώς μία άορατη ακτινοβολία, ή όποία προσβάλλει τή φωτογραφική πλάκα, προκαλεί τό φθορισμό σέ όρισμένα σώματα καί τόν ίονισμό τών αερίων. Η ιδιότητα που έχουν μερικά στοιχεία νά εκπέμπουν *αυτόματα* τέτοια ακτινοβολία όνομάζεται **ραδιενέργεια** καί τά στοιχεία όνομάζονται **ραδιενεργά στοιχεία**. Εκτός από τό οὐράνιο, φυσικά ραδιενεργά στοιχεία είναι τό άκτίνιο, τό θόριο, τό πολώνιο, τό ράδιο κ.ά. Τό πολώνιο καί τό ράδιο τά ανακάλυψε τό ζεύγος Curie. Τά φυσικά ραδιενεργά στοιχεία έχουν μεγάλο άτομικό αριθμό ($Z > 80$).

106. Φύση τής ακτινοβολίας τών ραδιενεργών στοιχείων

Ένα κομμάτι μολύβδου έχει μία στενόμακρη κοιλότητα καί στό βάθος αυτής τής κοιλότητας υπάρχει ένα ραδιενεργό παρασκεύασμα (σχ. 147). Η συσκευή βρίσκεται μέσα σέ αερόκενο δοχείο. Η λεπτή δέσμη τής ακτινοβολίας που βγαίνει από τήν κοιλότητα περνάει μέσα από όμογενές ή-



Σχ. 147. Τό ηλεκτρικό καί τό μαγνητικό πεδίο αναλύουν τήν ακτινοβολία του ραδίου σέ ακτίνες α, β καί γ.

λεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου καί έπειτα πέφτει πάνω σέ φωτογραφική πλάκα, που είναι κάθετη στή δέσμη. Τότε τό ηλεκτρικό ή τό μαγνητικό πεδίο διαχωρίζουν τήν ακτινοβολία του ραδιενεργού στοιχείου σέ τρία είδη ακτίνων, που χαρακτηρίζονται διεθνώς μέ τά γράμματα α, β, γ του έλληνικού αλφάβητου. Οί ακτίνες α καί β αποτελούνται από σωματίδια που έχουν *ηλεκτρικό φορτίο* καί γι' αυτό μέ τήν επίδραση του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου εκτρέπονται από τήν εϋθύγραμμη τροχιά τους. Αντίθετα οί ακτίνες γ είναι *ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία*, ή όποία δέν εκτρέπεται από τό ηλεκτρικό ή τό μαγνητικό πεδίο.

Οι **άκτινες α** είναι σωματίδια και τό καθένα έχει δύο θετικά στοιχειώδη ηλεκτρικά φορτία (+2e). Κάθε σωματίδιο α είναι ένας ατομικός πυρήνας ήλιου, έχει μάζα περίπου ίση με 4 amu και ταχύτητα που μπορεί να φτάσει ως 20 000 km/sec. Έτσι τά σωματίδια α έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια και, έπομένως, προκαλούν ισχυρό ιονισμό.

Οι **άκτινες β** αποτελούνται από ηλεκτρόνια (e⁻), τά όποια έκτοξεύονται μέσα από τόν πυρήνα με πολύ μεγάλη ταχύτητα που μπορεί να φτάσει ως 290 000 km/sec. Έχουν μεγάλη διεισδυτική ικανότητα.

Οι **άκτινες γ** είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκος κύματος πολύ μικρότερο από τό μήκος κύματος τών άκτινων Röntgen. Είναι πολύ περισσότερο διεισδυτικές από τίς άκτινες α και β και έξασκούν έντονες βιολογικές δράσεις.

Από τά παραπάνω βγάζουμε τό έξής συμπέρασμα:

Η ακτινοβολία τών ραδιενεργών στοιχείων αποτελείται από τίς άκτινες α, που είναι ατομικοί πυρήνες ήλιου, από τίς άκτινες β, που είναι ηλεκτρόνια, και από τίς άκτινες γ, που είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος.

Η ραδιενέργεια πυρηνικό φαινόμενο. Η ακτινοβολία που έκπέμπει μία όρισμένη ποσότητα ραδιενεργού στοιχείου (π.χ. ουρανίου) δέν έπηρεάζεται από καμιά έξωτερική αίτια (θερμοκρασία, πίεση), ούτε από τή χημική ένωση αούτου του στοιχείου με άλλα στοιχεία. Άρα ή ραδιενέργεια είναι ένα πυρηνικό φαινόμενο και όφείλεται σέ αυτόματη έκρηξη του ατομικού πυρήνα.

107. Φυσική μεταστοιχείωση

Ο πυρήνας ραδίου ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ έκπέμπει ένα σωματίδιο α που είναι πυρήνας ήλιου ${}_{2}\text{He}^4$. Έτσι όμως ό πυρήνας ραδίου μεταβάλλεται σέ έναν καινούριο πυρήνα που έχει:

$$\text{άτομικό άριθμό} \quad Z = 88 - 2 = 86$$

$$\text{μαζικό άριθμό} \quad A = 226 - 4 = 222$$

Αυτός ό καινούριος πυρήνας άνήκει σέ άτομο ενός άλλου στοιχείου, που είναι εγγενές άέριο και όνομάζεται ραδόνιο (Rn). Άσπε ή ραδιενέργεια προκαλεί μεταστοιχείωση, δηλαδή μεταβολή του ενός στοιχείου σέ άλλο.

Στούς πολύ βαριούς πυρήνες ($Z > 80$) ό άριθμός τών νετρονίων είναι πολύ μεγαλύτερος από τόν άριθμό τών πρωτονίων. Έτσι π.χ. στόν ατομικό

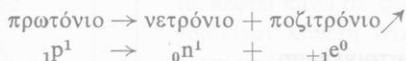
πυρήνα ούρανιου ${}_{92}\text{U}^{238}$ υπάρχουν $Z = 92$ πρωτόνια και $N = 146$ νετρόνια. Ήξαιτίας αττης τής μεγάλης διαφοράς μεταξύ τών νετρονίων και τών πρωτονίων ο πυρήνας ούρανιου είναι **ασταθής** και μέ τή διαδοχική αποβολή σωματιδίων τείνει νά μεταβληθεί σέ ένα **σταθερό** πυρήνα. Ωστε:

Οί άτομικοί πυρήνες τών φυσικῶν ραδιενεργῶν στοιχείων εἶναι **ασταθεῖς** καί αὐτόματα μεταστοιχειώνονται ἐκπέμποντας σωματίδια (φυσική μεταστοιχείωση).

108. Τό ποζιτρόνιο

Ξέρουμε ὅτι μέσα στόν ἀτομικό πυρήνα υπάρχουν μόνο πρωτόνια καί νετρόνια. Σέ ὀρισμένες ὁμως περιπτώσεις μεταστοιχειώσεων βγαίνει μέσα ἀπό τόν πυρήνα ἕνα νέο σωματίδιο, πού ὀνομάζεται **ποζιτρόνιο**. Αὐτό τό σωματίδιο ἔχει μάζα ἴση μέ τή μάζα (m_e) τοῦ ἠλεκτρονίου, ἀλλά ἔχει ἕνα θετικό στοιχειῶδες ἠλεκτρικό φορτίο ($+e$). Ἄρα τό ποζιτρόνιο εἶναι ἕνα ἀντιηλεκτρόνιο. Τό ποζιτρόνιο δέν ὑπάρχει μέσα στόν πυρήνα, ἀλλά σέ ὀρισμένες περιπτώσεις γεννιέται μέσα στόν πυρήνα καί ἀμέσως ἐκπέμπεται ἔξω ἀπό τόν πυρήνα. Τό ποζιτρόνιο συμβολίζεται μέ $+1e^0$ (ἢ e^+).

Γένεση τοῦ ποζιτρονίου. Σέ μερικές περιπτώσεις μέσα στόν πυρήνα ἕνα πρωτόνιο μετατρέπεται σέ νετρόνιο, πού ἐξακολουθεῖ νά παραμένει μέσα στόν πυρήνα. Τό θετικό στοιχειῶδες φορτίο $+e$ πού εἶχε τό πρωτόνιο τό παίρνει τό ποζιτρόνιο καί τό μεταφέρει ἔξω ἀπό τόν πυρήνα. Ἡ γένεση τοῦ ποζιτρονίου ἐκφράζεται μέ τήν ἀκόλουθη πυρηνική ἀντίδραση:

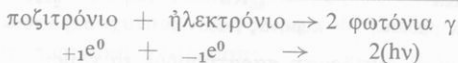


Ἀπό τά παραπάνω συμπεραίνουμε τά ἑξῆς:

- I. Τό ποζιτρόνιο ἔχει μάζα ἴση μέ τή μάζα τοῦ ἠλεκτρονίου, ἀλλά ἔχει πάνω του ἕνα θετικό στοιχειῶδες ἠλεκτρικό φορτίο.
- II. Τό ποζιτρόνιο γεννιέται μέσα στόν πυρήνα, ὅταν ἕνα πρωτόνιο μετατρέπεται σέ νετρόνιο, καί ἀμέσως ἀποβάλλεται ἀπό τόν πυρήνα.

α. Ἡ ἐξαφάνιση τοῦ ποζιτρονίου Τό ποζιτρόνιο, μόλις βγεῖ ἀπό τόν πυρήνα, **ἐξαφανίζεται** πολύ γρήγορα (μέσα σέ χρονικό διάστημα μικρότερο ἀπό 10^{-6} sec). Αὐτή ἡ **ταχύτατη ἐξαφάνιση** τοῦ ποζιτρονίου ὀφείλεται στήν ἑξῆς αἰτία: Ἡ ὕλη ἀποτελεῖται ἀπό ἄτομα καί μέσα σέ αὐτά κινεῖται ἕνα τεράστιο πλῆθος ἠλεκτρονίων. Ὄταν τό ποζιτρόνιο ἀποβληθεῖ ἀπό

τόν πυρήνα, άμέσως βρίσκεται μέσα στο πλήθος των ηλεκτρονίων. Το ποζιτρόνιο και το πρώτο ηλεκτρόνιο που θά βρεθεί μπροστά του, επειδή έχουν αντίθετα φορτία, έλκονται μεταξύ τους και συνενώνονται. Τότε *ολόκληρη ή μάζα* των δύο ετερόνυμων ηλεκτρονίων μετατρέπεται *σε ίσοδύναμη ενέργεια* δύο φωτονίων γ που έχουν τήν ίδια συχνότητα ν . Το καθένα φωτόνιο έχει ενέργεια ($h\nu$) *ισοδύναμη* με τή μάζα ήρεμίας (m_e) του ηλεκτρονίου.

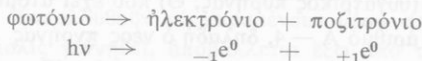


Όταν το ποζιτρόνιο εξαφανίζεται, τότε *εξαφανίζεται μάζα* ίση με $2m_e$ και στή θέση της *εμφανίζεται ενέργεια* ίση με $2(h\nu)$. Τά δύο φωτόνια προέρχονται από τήν *εξαύλωση* τής μάζας $2m_e$. Αυτή ή μετατροπή τής μάζας *σε* ενέργεια γίνεται σύμφωνα με τήν εξίσωση του Einstein $E = mc^2$.
 "Ωστε:

I. *Η ταχύτατη εξαφάνιση του ποζιτρονίου οφείλεται στην ένωση του με ένα ηλεκτρόνιο και τότε συμβαίνει μετατροπή τής μάζας των δύο ετερόνυμων ηλεκτρονίων σε ίσοδύναμη ενέργεια δύο φωτονίων γ .*

II. *Καθένα από τά δύο φωτόνια έχει ενέργεια ($h\nu$) ίσοδύναμη με τή μάζα ήρεμίας (m_e) του ηλεκτρονίου.*

β. Δίδυμη γένεση. Το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο έχουν τήν ίδια μάζα ήρεμίας (m_e), που *ισοδυναμεί* με ενέργεια 0,51 MeV. Ένα φωτόνιο έχει ενέργεια $h\nu$ διπλάσια από τήν παραπάνω ενέργεια, δηλαδή είναι $h\nu = 1,02$ MeV. Αν αυτό το φωτόνιο περάσει πολύ κοντά από ένα βαρύ πυρήνα, τότε *ολόκληρη ή ενέργεια* του φωτονίου μετατρέπεται *σε ίσοδύναμη μάζα* ενός ποζιτρονίου και ενός ηλεκτρονίου. Αυτά τά δύο σωματίδια γεννιούνται από τήν *ύλοποίηση* τής ενέργειας που μεταφέρει το φωτόνιο, σύμφωνα με τήν εξίσωση $m = E/c^2$. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *δίδυμη γένεση* ή *γένεση ζεύγους ηλεκτρονίων*.

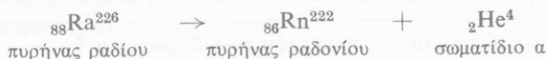


"Αν το φωτόνιο έχει ενέργεια $h\nu > 1,02$ MeV, τότε το πλεόνασμα τής ενέργειας κατανέμεται εξίσου στά δύο σωματίδια με τή μορφή κινητικής ενέργειας. "Ωστε:

"Από τήν *ύλοποίηση* τής ενέργειας ενός φωτονίου, που έχει ενέργεια τουλάχιστο ίση με 1,02 MeV, *σχηματίζεται* ένα ζεύγος ετερόνυμων ηλεκτρονίων (ποζιτρόνιο, ηλεκτρόνιο).

109. Έξήγηση της έκπομπής των ακτινοβολιών

α. Οι δύο άρχες των πυρηνικών αντιδράσεων. Ο πυρήνας ραδίου ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ εκπέμπει ένα σωματίδιο α, δηλαδή έναν πυρήνα ήλιου ${}_2\text{He}^4$ και μεταστοιχειώνεται σε πυρήνα ραδονίου ${}_{86}\text{Rn}^{222}$. Αυτή ή μεταστοιχείωση εκφράζεται με την ακόλουθη πυρηνική αντίδραση:



Στήν πυρηνική αυτή αντίδραση παρατηρούμε τά εξής:

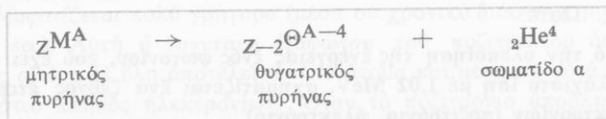
1) Ο μαζικός αριθμός $A = 226$ του αρχικού πυρήνα είναι ίσος με το *άθροισμα* των μαζικών αριθμών των προϊόντων της αντίδρασης. Αυτό σημαίνει ότι κατά την πυρηνική αντίδραση *δέν μεταβάλλεται ο αριθμός των νουκλεονίων*.

2) Ο ατομικός αριθμός $Z = 88$ του αρχικού πυρήνα είναι ίσος με το *άθροισμα* των ατομικών αριθμών των προϊόντων της αντίδρασης. Αυτό σημαίνει ότι κατά την πυρηνική αντίδραση *δέν μεταβάλλεται το αρχικό ηλεκτρικό φορτίο*. Γενικά αποδεικνύεται ότι:

Σε κάθε πυρηνική αντίδραση ισχύουν δύο άρχες, ή αρχή της διατηρήσεως των νουκλεονίων και ή αρχή της διατηρήσεως του ηλεκτρικού φορτίου.

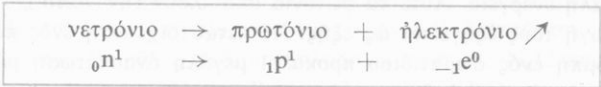
Η μεταστοιχείωση ενός ραδιενεργού πυρήνα είναι μιά πυρηνική αντίδραση, πού γίνεται αυτόματα. Θα εξετάσουμε σε γενικές γραμμές πώς παράγονται οι ακτινοβολίες, όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας μεταστοιχειώνεται.

β. Έκπομπή σωματιδίου α. Ο αρχικός πυρήνας (μητρικός πυρήνας, M) έχει ατομικό αριθμό Z και μαζικό αριθμό A , δηλαδή ο μητρικός πυρήνας είναι ${}_Z\text{M}^A$. Αυτός ο πυρήνας εκπέμπει ένα σωματίδιο α, δηλαδή έναν πυρήνα ήλιου (${}_2\text{He}^4$). Έτσι από τον αρχικό πυρήνα δημιουργείται ένας *νέος πυρήνας* (θυγατρικός πυρήνας, Θ) πού έχει ατομικό αριθμό $Z - 2$ και μαζικό αριθμό $A - 4$, δηλαδή ο νέος πυρήνας είναι ${}_{Z-2}\Theta^{A-4}$. Αυτός ο πυρήνας ανήκει σε άτομο *άλλου στοιχείου*. Επομένως ή έκπομπή ενός σωματιδίου α προκαλεί *μεταστοιχείωση* και εκφράζεται με την πυρηνική αντίδραση:



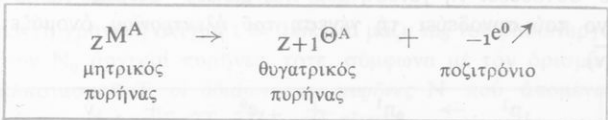
Άν ο θυγατρικός πυρήνας είναι και αυτός άσταθής, τότε θά συμβεί νέα έκπομπή σωματιδίου α και έπομένως νέα μεταστοιχείωση.

γ. Έκπομπή ηλεκτρονίου. Όπως ξέρουμε ο πυρήνας δέν περιέχει ήλεκτρονία. Άρα τό ήλεκτρόνιο (άκτίνες β) πού έκπέμπεται από τόν πυρήνα δημιουργείται μέσα στό μητρικό πυρήνα Μ. Αυτό συμβαίνει, όταν ένα νετρόνιο μεταβάλλεται σε πρωτόνιο πού έξακολουθεί νά παραμένει μέσα στόν πυρήνα. Τό ήλεκτρόνιο, μόλις δημιουργηθεί, έκτοξεύεται έξω από τόν πυρήνα μέ μεγάλη ταχύτητα. Η γένεση του ήλεκτρονίου εκφράζεται μέ τήν ακόλουθη πυρηνική αντίδραση:



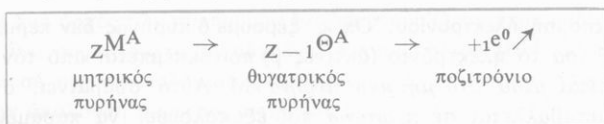
Έτσι από τό μητρικό πυρήνα ${}_Z M^A$ σχηματίζεται ένας θυγατρικός πυρήνας, πού έχει τόν ίδιο μαζικό άριθμό Α, γιατί δέν άλλαξε ο άριθμός των νουκλεονίων του πυρήνα, έχει όμως άτομικό άριθμό $Z + 1$, γιατί αύξηθηκε κατά μία μονάδα ο άριθμός των πρωτονίων. Ο θυγατρικός πυρήνας ${}_{Z+1} \Theta^A$ είναι *ισοβαρής* μέ τό μητρικό πυρήνα και ανήκει σε άτομο άλλου στοιχείου.

Έπομένως ή έκπομπή ενός ήλεκτρονίου προκαλεί **μεταστοιχείωση** και εκφράζεται μέ τήν πυρηνική αντίδραση:



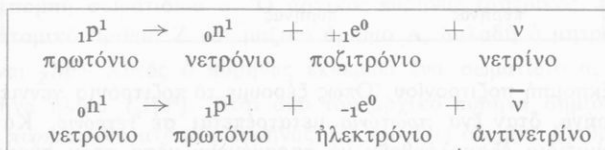
δ. Έκπομπή ποζιτρονίου. Όπως ξέρουμε τό ποζιτρόνιο γεννιέται μέσα στόν πυρήνα, όταν ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο. Και τά δύο αυτά σωματίδια έξακολουθούν νά παραμένουν μέσα στόν πυρήνα, αλλά τό ποζιτρόνιο, μόλις γεννηθεί, αποβάλλεται έξω από τόν πυρήνα. Έτσι από τό μητρικό πυρήνα ${}_Z M^A$ σχηματίζεται ένας θυγατρικός πυρήνας πού έχει τόν ίδιο μαζικό άριθμό Α, γιατί δέν άλλαξε ο άριθμός των νουκλεονίων του πυρήνα, έχει όμως άτομικό άριθμό $Z - 1$, γιατί έλαττώθηκε κατά μία μονάδα ο άριθμός των πρωτονίων. Ο θυγατρικός πυρήνας ${}_{Z-1} \Theta^A$ είναι *ισοβαρής* μέ τό μητρικό πυρήνα και ανήκει σε άτομο άλλου στοιχείου.

Επομένως ή έκπομπή ενός ποζιτρονίου προκαλεί μεταστοιχείωση και εκφράζεται με την πυρηνική αντίδραση:



ε. Έκπομπή φωτονίου γ . Όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας μεταστοιχείωνεται με την έκπομπή σωματιδίου α , ηλεκτρονίου ή ποζιτρονίου, πάντοτε αυτή ή μεταστοιχείωση συνοδεύεται από την έκπομπή ενός φωτονίου γ με μεγάλη ενέργεια. Αυτά τά φωτόνια αποτελούν την ακτινοβολία γ και ή παραγωγή τους εξηγείται ως εξής: Η μεταστοιχείωση ενός πυρήνα με την έκπομπή ενός σωματιδίου προκαλεί μεγάλη αναστάτωση μέσα στον πυρήνα και γι' αυτό ό θυγατρικός πυρήνας πού σχηματίζεται, βρίσκεται σέ κατάσταση διεγέρσεως. Για νά επανέλθει ό νέος πυρήνας στήν κανονική κατάσταση, αποβάλλει τό πλεόνασμα τής ενέργειας πού έχει πάνω του με τή μορφή ενός φωτονίου γ μεγάλης ενέργειας.

στ. Νετρίνο και αντινετρίνο. Τό ηλεκτρόνιο και τό ποζιτρόνιο ονομάζονται και σωματίδια β (ηλεκτρόνιο β^- , ποζιτρόνιο β^+). Θεωρητικά αποδείχτηκε και έπειτα επιβεβαιώθηκε και πειραματικά ότι κατά τή γένεση ενός σωματιδίου β μέσα στον πυρήνα, ταυτόχρονα γεννιέται και ένα άλλο ουδέτερο σωματίδιο, πού ή μάζα του θεωρείται ίση με μηδέν, γιατί είναι ασήμαντη σχετικά με τή μάζα του ηλεκτρονίου. Τό ουδέτερο σωματίδιο πού συνοδεύει τή γένεση του ποζιτρονίου ονομάζεται νετρίνο (ν), ενώ εκείνο πού συνοδεύει τή γένεση του ηλεκτρονίου ονομάζεται αντινετρίνο ($\bar{\nu}$).



ζ. Γενικά συμπεράσματα για τήν έκπομπή των ακτινοβολιών. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά ακόλουθα συμπεράσματα για τήν έκπομπή των ακτινοβολιών από τους ραδιενεργούς πυρήνες:

Ι. Όταν ό ραδιενεργός πυρήνας εκπέμπει σωματίδιο α , ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο, συμβαίνει μεταστοιχείωση, ή όποία πάντοτε συνοδεύεται από τήν έκπομπή φωτονίου γ , για νά μεταπέσει ό νέος πυρήνας από τήν κατάσταση διεγέρσεως στήν κανονική κατάσταση.

II. Τό ποζιτρόνιο ή τό ηλεκτρόνιο γεννιούνται μέσα στό ραδιενεργό πυρήνα καί ταυτόχρονα γεννιέται αντίστοιχα ένα νεutrίνο (ν) ή ένα αντινεutrίνο ($\bar{\nu}$).

110. Νόμος τής ραδιενέργειας

α. Χρόνος υποδιπλασιασμοῦ. Σέ μιά ὀρισμένη χρονική στιγμή $t = 0$, ἔχουμε μιά μάζα m_0 ενός ραδιενεργοῦ στοιχείου, π.χ. ραδίου ^{226}Ra . Στή μάζα αὐτή ἀρχικά ὑπάρχουν N_0 πυρήνες ραδίου. Ἐπειδή συνεχῶς πυρήνες ραδίου διασπῶνται, ὁ ἀρχικός ἀριθμός N_0 τῶν πυρήνων ραδίου συνεχῶς ἐλαττώνεται. Στή διάρκεια ενός χρόνου T διασπῶνται οἱ μισοὶ ἀπό τοὺς ἀρχικοὺς πυρήνες ραδίου, δηλαδή διασπῶνται $N_0/2$ πυρήνες. Ἔτσι κατὰ τή χρονική στιγμή $t = T$ ἔχουν ἀπομείνει ἀδιάσπαστοι οἱ μισοὶ ἀπό τοὺς ἀρχικοὺς πυρήνες, δηλαδή ἔχουν ἀπομείνει $N_0/2$ πυρήνες ραδίου. Ὁ χρόνος T εἶναι σταθερός καί ὀνομάζεται χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ ἢ ἡμιζωή τοῦ ραδίου. Γιά τό ράδιο ^{226}Ra εἶναι $T \approx 1620$ ἔτη. Ὡστε:

Χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ (T) ἢ ἡμιζωή ενός ραδιενεργοῦ στοιχείου ὀνομάζεται ὁ χρόνος, μέσα στόν ὁποῖο διασπῶνται οἱ μισοὶ ἀπό τοὺς πυρήνες (N_0) πού ἀρχικά ὑπάρχουν σέ μιά μάζα (m_0) τοῦ στοιχείου.

Ὁ χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ εἶναι μιά σταθερή, χαρακτηριστική γιά κάθε ραδιενεργό στοιχείο (βλ. πίνακα σελ. 213) καί κυμαίνεται μεταξύ μεγάλων ὀρίων (ἀπό 10^{-9} sec ὡς 10^{10} ἔτη).

Ἄν τή χρονική στιγμή $t = 0$ σέ μιά μάζα m_0 τοῦ ραδιενεργοῦ στοιχείου ὑπάρχουν N_0 ἀρχικοὶ πυρήνες, τότε, σύμφωνα μέ τόν ὀρισμό τοῦ χρόνου ὑποδιπλασιασμοῦ T , οἱ ἀδιάσπαστοι πυρήνες N πού ἀπομένουν κατὰ τή χρονική στιγμή $t = T, 2T, 3T \dots nT$ εἶναι:

$t:$	0	T	$2T$	$3T$	\dots	nT
$N:$	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$	$\frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{2^3}$	\dots	$\frac{N_0}{2^n}$

Ὡστε τή χρονική στιγμή $t = nT$ οἱ ἀδιάσπαστοι πυρήνες N εἶναι :

$$\begin{array}{l} \text{ἀδιάσπαστοι πυρήνες} \\ \text{(γιά } t = nT) \end{array} \quad N = \frac{N_0}{2^n} \quad (1)$$

Μέ τόν ἴδιο ρυθμό ἐλαττώνεται καί ἡ ἀρχική μάζα m_0 καί ἐπομένως

τή χρονική στιγμή $t = nT$ απομένει μάζα m του ραδιενεργού στοιχείου ίση με:

$$m = \frac{m_0}{2^n}$$

β. Νόμος τής ραδιενέργειας "Αν κατά τή χρονική στιγμή $t = 0$ υπάρχουν N_0 πυρήνες ενός ραδιενεργού στοιχείου, τότε κατά τή χρονική στιγμή t θά έχουν απομείνει N αδιάσπαστοι πυρήνες και οι υπόλοιποι θά έχουν μεταστοιχειωθεί. Αποδεικνύεται ότι ισχύει ο εξής νόμος τής ραδιενέργειας (ή νόμος τών ραδιενεργών μετατροπών) :

$$\text{νόμος τής ραδιενέργειας } N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

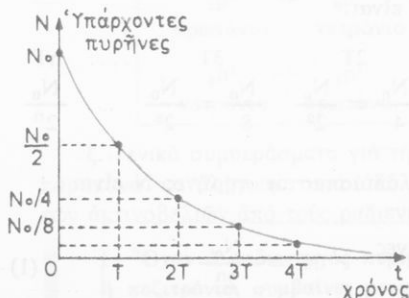
όπου $e = 2,7$ είναι ή βάση τών φυσικόν λογαριθμών και λ μιά σταθερή χαρακτηριστική γιά κάθε ραδιενεργό στοιχείο, ή όποία όνομάζεται **σταθερή διασπάσεως** και είναι ίση με:

$$\text{σταθερή διασπάσεως } \lambda = \frac{0,693}{T}$$

Τό T είναι ό χρόνος ύποδιπλασιασμού του ραδιενεργού στοιχείου. "Αν τή χρονική στιγμή $t = 0$ υπάρχουν N_0 πυρήνες, τότε *στή διάρκεια τής πρώτης χρονικής μονάδας* διασπᾶται ένα ποσοστό λ από τούς πυρήνες N_0 , δηλαδή οί πυρήνες πού διασπῶνται είναι:

$$\text{διασπόμενοι πυρήνες } N_{\text{διασπ}} = -\lambda \cdot N_0 / \text{κατά χρονική μονάδα}$$

Τό άρνητικό σημείο φανερώνει ότι στή διάρκεια τής χρονικής μονάδας (έτος, ήμέρα, δευτερόλεπτο) ελαττώνεται ό αρχικός αριθμός N_0 τών πυρήνων. Η καμπύλη του σχήματος 148 έκφράζει τό νόμο τής ραδιενέργειας.



Σχ. 148. Ο ρυθμός τής ελαττώσεως τών ραδιενεργών πυρήνων.

"Άλλη μορφή του νόμου τής ραδιενέργειας. "Αν στήν εξίσωση (1) βάλουμε $n = t/T$, βρίσκουμε μιά άλλη μορφή του νόμου τής ραδιενέργειας:

$$N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$$

γ. Ένταση ραδιενεργού πηγής. Η ραδιενέργεια μιᾶς ραδιενεργού πηγῆς εἶναι ἀνάλογη μὲ τὸν ἀριθμὸ τῶν πυρήνων πού διασπῶνται κατὰ δευτερόλεπτο, τῆ μετράμε μὲ τῆ μονάδα πού ὀνομάζεται **κιουρί** (1 Curie, 1 Ci), καὶ ὀρίζεται ὡς ἐξῆς:

Μία ποσότητα ἀπὸ οποιαδήποτε ραδιενεργὸ οὐσία ἔχει ἔνταση ραδιενέργειας ἴση μὲ 1 κιουρί, ὅταν σ' αὐτὴ τὴν ποσότητα συμβαίνουν $3,7 \cdot 10^{10}$ διασπάσεις πυρήνων κατὰ δευτερόλεπτο.

$$1 \text{ κιουρί (1 Ci)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ διασπάσεις/sec}$$

Στὴν πράξη χρησιμοποιοῦμε συνήθως τὰ ἐξῆς ὑποπολλαπλάσια τῆς μονάδας κιουρί:

$$1 \text{ μικροκιουρί (1 } \mu\text{Ci)} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ πικοκιουρί (1 pCi)} = 10^{-12} \text{ Ci}$$

III. Βιολογικά ἀποτελέσματα τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν

Ὁ ἄνθρωπος δέχεται τίς *πυρηνικές ἀκτινοβολίες* πού προέρχονται ἀπὸ τὸ κοσμικὸ διάστημα (κοσμικές ἀκτίνες), ἀπὸ τὰ φυσικὰ ραδιενεργὰ στοιχεῖα πού περιέχονται στὰ πετρώματα καὶ ἀπὸ ραδιοϊσότοπα πού ὑπάρχουν μέσα στοὺς ἰστούς (κάλιο 40, ἄνθρακας 14). Οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες προκαλοῦν βιολογικά ἀποτελέσματα πού ὀφείλονται κυρίως στὸν ἰονισμό πού συμβαίνει μέσα στοὺς ἰστούς. Ἀποτέλεσμα τοῦ ἰονιμοῦ εἶναι ὀρισμένες *βιοχημικές μεταβολές* πού δημιουργοῦν πολὺπλοκες διαταραχές. Αὐτές ἔχουν ὡς συνέπεια νὰ ἐμφανιστοῦν ὀρισμένες παθήσεις (π.χ. λευχαιμία τραύματα τοῦ δέρματος κ.ἄ.).

Κατὰ γενικὸ κανόνα περισσότερο εὐαίσθητα στὶς πυρηνικές ἀκτινοβολίες εἶναι τὰ κύτταρα πού ἀναπαράγονται γρήγορα. Οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες προκαλοῦν ἀποτελέσματα *σωματικά*, δηλαδή βλάβες στὸν ὀργανισμό τοῦ ἴδιου τοῦ ἀτόμου, καὶ ἀποτελέσματα *γενετικά*, δηλαδή βλάβες στὰ ὄργανα ἀναπαραγωγῆς μὲ συνέπεια ὀρισμένες μεταβολές στοὺς ἀπογόνους. Ἀποδείχτηκε ὅτι ὁ ἄνθρωπος σέ ὅλη τὴ διάρκεια τῆς ζωῆς του μπορεῖ νὰ προσλάβει ἀκίνδυνα μόνο μιὰ ὀρισμένη ποσότητα τῆς ἐνέργειας πού μεταφέρουν οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες.

Οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες προσβάλλουν τὸν ἀνθρώπινο ὀργανισμό μὲ δύο τρόπους, πού ὀνομάζονται *ἀκτινοβολία* καὶ *μόλυνση*. Ὅταν πάνω σ' ἓνα ἄτομο ἢ (ἀντικείμενο) πέφτουν οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες, λέμε ὅτι τὸ ἄτομο παθαίνει *ἀκτινοβολία*. Αὐτὴ διαρκεῖ ὅσο χρόνο πέφτουν πάνω στό ἄτομο οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες. Ὅταν πάνω σέ διάφορα ἀντικεί-

μενα (π.χ. ενδύματα, τρόφιμα κ.ά.) έχουν κολλήσει ουσίες που έχουν ραδιενέργεια, λέμε ότι αυτά τα αντικείμενα έπαθαν *μόλυνση*. Ο άνθρωπος οργανισμός μπορεί να πάθει είτε *έξωτερική μόλυνση* από ραδιενεργά σώματα που κόλλησαν πάνω στο σώμα του είτε *έσωτερική μόλυνση* από ραδιενεργά σώματα που μπήκαν μέσα στον οργανισμό με τις τροφές ή με τον εισπνεόμενο αέρα. Η μόλυνση διαρκεί όσο συνεχίζεται ή παρουσία του ραδιενεργού σώματος.

112. Οί σειρές τών φυσικών ραδιενεργών στοιχείων

Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα κατατάσσονται σε τέσσαρις σειρές, του ούρανίου, του άκτινίου, του θορίου και του νεπτουνίου (βλ. πίνακα). Το νεπτούνιο είναι τό πρώτο ύπερουράνιο στοιχείο που παρασκευάσαμε και φαίνεται ότι άλλοτε υπήρχε στή Φύση, επειδή όμως είναι σχετικά βραχύβιο εξαφανίσθηκε.

Τά έλαφρά ραδιοϊσότοπα. Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα που έχουν άτομικό αριθμό Z *μεγαλύτερο από 80* κατατάσσονται στις παραπάνω τέσσερις

Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα

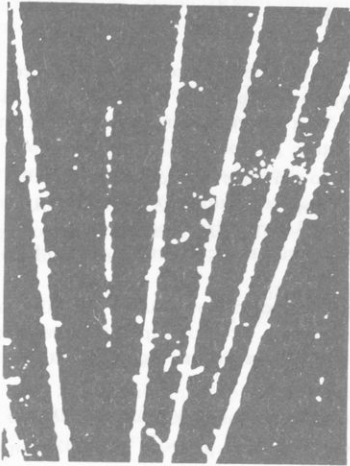
Σειρά	Πρώτο μέλος	Τελικό προϊόν
Ούρανίου	${}_{92}\text{U}^{238}$	${}_{82}\text{Pb}^{206}$
Άκτινίου	${}_{89}\text{Ac}^{227}$	${}_{82}\text{Pb}^{207}$
Θορίου	${}_{90}\text{Th}^{232}$	${}_{82}\text{Pb}^{208}$
Νεπτουνίου	${}_{93}\text{Np}^{237}$	${}_{83}\text{Bi}^{289}$

σειρές. Άλλά στή Φύση βρέθηκαν και μερικά ραδιενεργά ισότοπα που έχουν άτομικό αριθμό *μικρότερο από 80*, εκπέμπουν ασθενείς ακτινοβολίες και μεταστοιχειώνονται κυρίως με τήν έκτομπή ηλεκτρονίων. Από τά έλαφρά ραδιοϊσότοπα ενδιαφέροντα είναι *ό άνθρακας 14* (C^{14})

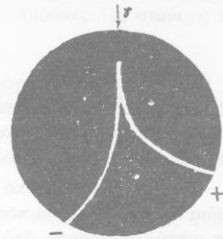
και *τό κάλιο 40* (K^{40}) που υπάρχουν μέσα στους ιστούς των οργανισμών (μέ αντίστοιχο χρόνο υποδιπλασιασμού 5760 έτη και $1,2 \cdot 10^9$ έτη).

113. Η μελέτη τών πυρηνικών ακτινοβολιών

Γιά να μελετήσουμε τις πυρηνικές ακτινοβολίες, εφαρμόζουμε διάφορες μεθόδους οι οποίες βασίζονται στον ιονισμό και στή διέγερση των ατόμων που προκαλούν οι πυρηνικές ακτινοβολίες, όταν διαδίδονται μέσα σε ένα υλικό. Τά σχήματα 149 και 150 δείχνουν τις τροχιές φορτισμένων σωματιδίων που μπορούμε να τις φωτογραφίζουμε.



Σχ. 149. Φωτογραφία των τροχιών σωματιδίων α. Διακρίνονται τά ηλεκτρόνια που εκτοξεύονται κατά τον ιονισμό των μορίων του αερίου.



Σχ. 150. Φωτογραφία που δείχνει την ύλοποίηση της ενέργειας ενός φωτονίου γ. Σχηματίστηκε ένα ηλεκτρόνιο (e⁻) και ένα ποζιτρόνιο (e⁺), τά όποια, εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που υπάρχει, διαγράφουν καμπύλες τροχιές με αντίθετη φορά.

Ἡ σειρά τοῦ οὐρανίου

Ἴσότοπο	Χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ	Ἐνέργεια ἀκτινοβολίας σέ MeV		
		α	β	γ
Οὐράνιο ⁹² U ²³⁸	4,5 · 10 ⁹ y	4,18	—	0,045
Θόριο ⁹⁰ Th ²³⁴	24,1 d	—	0,19	0,09
Πρωτακτίνιο ⁹¹ Pa ²³⁴	1,14 min	—	2,32	1,50
Οὐράνιο ⁹² U ²³⁴	2,48 · 10 ⁵ y	4,76	—	0,055
Θόριο ⁹⁰ Th ²³⁰	8,22 · 10 ⁴ y	4,68	—	0,068
Ράδιο ⁸⁸ Ra ²²⁶	1620 y	4,79	—	0,19
Ραδόνιο ⁸⁶ Rn ²²²	3,825 d	5,49	—	—
Πολώνιο ⁸⁴ Po ²¹⁸	3,05 min	5,998	—	—
Μόλυβδος ⁸² Pb ²¹⁴	26,8 min	—	0,72	0,053
Βισμούθιο ⁸³ Bi ²¹⁴	19,7 min	5,44	3,15	0,426
Πολώνιο ⁸⁴ Po ²¹⁴	1,5 · 10 ⁻⁴ sec	7,68	—	—
Μόλυβδος ⁸² Pb ²¹⁰	25 y	—	0,025	0,047
Βισμούθιο ⁸³ Bi ²¹⁰	4,85 d	5,00	1,17	0,08
Πολώνιο ⁸⁴ Po ²¹⁰	138 d	5,30	—	0,80
Μόλυβδος ⁸² Pb ²⁰⁶	σταθερό	—	—	—

(y = ἔτη, ἀπό τό year, καί d = ἡμέρες ἀπό τό day)

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

162. Ένας ραδιενεργός πυρήνας εκπέμπει σωματίδια α , που έχουν ταχύτητα $v = 2 \cdot 10^7$ m/sec. 1) Πόση είναι σε MeV η κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου α ; 2) Πόση τάση χρειάζεται, για να επιταχυνθεί ένα σωματίδιο α και να άποκτήσει αυτή την κινητική ενέργεια; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_\alpha = 6,6 \cdot 10^{-27}$ kg.

163. Βρήκαμε ότι από 1 gr ραδίου εκπέμπονται κάθε δευτερόλεπτο $1,5 \cdot 10^{11}$ σωματίδια α . Αφήνουμε να πέσουν πάνω σε ένα μονωμένο μεταλλικό συλλέκτη τα σωματίδια α που εκπέμπονται από 0,01 gr ραδίου. Ο συλλέκτης έχει χωρητικότητα $C = 10^{-12}$ F. Παρατηρούμε ότι μέσα σε 1 sec ο συλλέκτης άποκτά δυναμικό $U = 500$ V. Πόσο φορτίο έχει κάθε σωματίδιο α ;

164. Ξέρουμε ότι από 1 gr ραδίου εκπέμπονται κάθε δευτερόλεπτο $1,5 \cdot 10^{11}$ σωματίδια α . Η κινητική ενέργεια αυτών των σωματιδίων, όταν μετατραπεί σε θερμότητα, δίνει 576 Joule την ώρα. Πόση είναι κατά μέσο όρο η ταχύτητα ενός σωματιδίου α ; $m_\alpha = 6,6 \cdot 10^{-27}$ kg.

165. Τα σωματίδια α που εκπέμπει ένας ραδιενεργός πυρήνας έχουν ταχύτητα $v = \sqrt{3} \cdot 10^7$ m/sec και στόν άερα ή έμβλειά τους είναι ίση με $l = 5$ cm. Όλοκληρη ή κινητική ενέργεια κάθε σωματιδίου χρησιμοποιείται για τον ιονισμό των μορίων του άερα τα όποια τό σωματίδιο συναντά στό δρόμο του. Για τον ιονισμό ενός μορίου του άερα πρέπει να δαπανηθεί ενέργεια ίση με 25 eV. Κάθε σωματίδιο α πόσα ζεύγη ιόντων δημιουργεί κατά έκατοστόμετρο τής διαδρομής του; $m_\alpha = 6,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

166. Ο πυρήνας ουρανίου 238, ${}_{92}\text{U}^{238}$, μεταστοιχειώνεται τελικά σε πυρήνα μόλυβδου 206, ${}_{82}\text{Pb}^{206}$, με μιά σειρά μεταστοιχειώσεων, κατά τίς όποίες εκπέμπονται x σωματίδια α και y ηλεκτρόνια. 1) Νά γραφεί μιά συνοπτική πυρηνική αντίδραση, που να δείχνει τό σύνολο των διασπάσεων. 2) Νά βρεθεί πόσα σωματίδια α και πόσα ηλεκτρόνια εκπέμπονται, όταν συμβαίνουν αυτές οί διασπάσεις.

167. Από την ύλοποίηση τής ενέργειας ενός φωτονίου ($h\nu$) σχηματίζεται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο, που τό καθένα έχει κινητική ενέργεια ίση με 0,09 MeV. Η μάζα ήρεμίας m_e του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου ίσοδυναμεί με ενέργεια 0,51 MeV. Πόση είναι η ενέργεια του φωτονίου, η συχνότητα και τό μήκος κύματος;

168. Για τό πολώνιο 210 (Po^{210}) ό χρόνος ύποδιπλασιασμού είναι $T = 138,6$ ήμέρες. Από μιά αρχική μάζα πολωνίου 210 ίση με $m_0 = 0,8$ mgr πόση μάζα άπομένει έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 415,8$ ήμέρες;

169. Έχουμε μιά αρχική μάζα m_0 ραδονίου (Rn^{222}). Έξαιτίας των ραδιενεργών διασπάσεων έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 15,2$ ήμέρες άπομένει τό 1/16 τής αρχικής μάζας. Πόσος είναι για τό ραδόνιο ό χρόνος ύποδιπλασιασμού T ;

170. Ένα ραδιενεργό ισότοπο (Po^{218}) έχει χρόνο ύποδιπλασιασμού $T = 3$ min. Πόσο τοίς έκατό από τούς πυρήνες που ύπάρχουν διασπάται στή διάρκεια 1 sec;

171. Σε 1 gr ραδίου (Ra^{226}) ύπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες. Ο χρόνος ύποδιπλασιασμού του ραδίου είναι $T = 1600$ έτη (y) και η σταθερή διασπάσεως είναι :

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{1600 y} \quad \eta \quad \lambda = 43 \cdot 10^{-5} y^{-1}$$

Στή διάρκεια ενός έτους (1 y) πόσοι πυρήνες διασπώνται κατά γραμμάριο ραδίου;

172. Σέ 1 gr ραδίου (Ra^{226}) υπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες. 'Η σταθερή διασπάσεως τού ραδίου είναι :

$$\lambda = \frac{0,693}{7,24 \cdot 10^{10} \text{ sec}} \quad \text{ή} \quad \lambda = 1,73 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

'Από άρχική μάζα ραδίου $m_0 = 1$ gr, πόση μάζα ραδίου μεταστοιχειώνεται στή διάρκεια ενός δευτερολέπτου (1 sec);

173. Σέ 1 mgr ραδίου Ra^{226} υπάρχουν $N_1 = 2,665 \cdot 10^{18}$ πυρήνες ραδίου, ενώ σέ 1 mgr θορίου (Th^{232}) υπάρχουν $N_2 = 2,596 \cdot 10^{18}$ πυρήνες θορίου. 'Η σταθερή διασπάσεως λ είναι αντίστοιχα :

$$\begin{aligned} \text{γιά τó ράδιο} \quad \lambda_1 &= 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1} \\ \text{γιά τó θόριο} \quad \lambda_2 &= 1,58 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

Πόσοι πυρήνες ραδίου καί πόσοι πυρήνες θορίου διασπώνται στή διάρκεια 1 sec;

174. Σέ μιά μάζα m_0 θορίου Th^{232} στή διάρκεια 1 sec διασπάται ό πυρήνας μόνο ενός ατόμου. Πόσα άτομα υπάρχουν σ' ατή τή μάζα θορίου; Σταθερή διασπάσεως τού θορίου : $\lambda = 1,58 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1}$

175. Τό τελικό προϊόν τών διαδοχικών μεταστοιχειώσεων τού ουρανίου 238 (${}_{92}\text{U}^{238}$) είναι τό σταθερό ισότοπο μόλυβδος 206 (${}_{82}\text{Pb}^{206}$). 1) Πόσος είναι ό λόγος τών νετρονίων (N) πρós τά πρωτόνια (Z) σέ αυτούς τούς δύο πυρήνες; 2) Τί προσπαθει νά πετύχει ένας ραδιενεργός πυρήνας μέ τίς διαδοχικές μεταστοιχειώσεις του;

Πυρηνικές αντιδράσεις

114. Πυρηνικές αντιδράσεις

'Η φυσική μεταστοιχείωση πού παρατηρείται στά φυσικά ραδιενεργά στοιχεία όφείλεται στό ότι οί πυρήνες μέ μεγάλο ατομικό αριθμό είναι άσταθείς καί αυτόματα διασπώνται, γιά νά μεταπέσουν σέ σταθερούς πυρήνες. 'Αλλά καί οί σταθεροί πυρήνες (π.χ. τού όξυγόνου, τού άζώτου) μποροϋν νά γίνουν άσταθείς πυρήνες, άν βομβαρδιστοϋν μέ κατάλληλα βλήματα. Τότε συμβαίνουν πυρηνικές αντιδράσεις καί σχηματίζονται νέοι πυρήνες ή καί σωματίδια. Μέ τήν πυρηνική αντίδραση προκαλοϋμε τεχνητή μεταστοιχείωση, δηλαδή τή μετατροπή τού ενός στοιχείου σέ άλλο. Κατά τίς πυρηνικές αντιδράσεις ισχύουν οί δύο άρχές, τής διατηρήσεως τών νουκλεονίων καί τής διατηρήσεως τού ηλεκτρικού φορτίου.

'Ιδιαίτερη άξία ως βλήμα έχει τό νετρόνιο, επειδή δέν έχει ηλεκτρικό φορτίο καί μπορεί έλεύθερα νά πλησιάζει τούς πυρήνες καί νά ένώνεται μέ

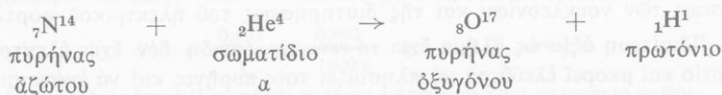
αυτούς. Ἀλλά ἡ πρόσθεση ἑνός νετρονίου σέ ἕνα σταθερό πυρήνα μεταβάλλει τόν πυρήνα σέ ἀσταθή καί ἔτσι προκαλεῖται διάσπασή του.

Ἄλλα βλήματα εἶναι τά σωματίδια πού ἔχουν θετικό φορτίο, ὅπως εἶναι τό πρωτόνιο (${}_1\text{H}^1$), τό δευτερόνιο (${}_1\text{H}^2$), τό σωματίδιο α (${}_2\text{He}^4$). Τά σωματίδια αὐτά, γιά νά φτάσουν σέ ἕνα σταθερό πυρήνα, πρέπει νά ἔχουν μεγάλη κινητική ἐνέργεια, ὥστε νά μπορέσουν νά ὑπερνικήσουν τήν ἄπωση πού ἐξασκεῖ πάνω τους τό ἠλεκτρικό πεδίο τοῦ σταθεροῦ πυρήνα. Σημαντική κινητική ἐνέργεια ἔχουν τά σωματίδια α, πού ἐκπέμπονται ἀπό μερικά φυσικά ραδιοϊσότοπα (βλ. πίνακα σελ. 213). Σήμερα, γιά νά δημιουργήσουμε βλήματα μέ μεγάλη κινητική ἐνέργεια, χρησιμοποιοῦμε εἰδικές διατάξεις, πού ὀνομάζονται ἐπιταχυντές.

α. Ἐπιταχυντές. Ἐνα σωματίδιο μέ θετικό φορτίο, π.χ. ἕνα πρωτόνιο, ἀποκτᾷ μεγάλη κινητική ἐνέργεια, ἂν ἐπιταχυνθεῖ μέσα σέ ἕνα ἠλεκτρικό πεδίο. Ἄν ἡ τάση πού χρησιμοποιοῦμε εἶναι U , τότε τό πρωτόνιο ἀποκτᾷ κινητική ἐνέργεια $E_{\text{κιν}} = eU$. Ἐπειδή, ὅμως, δέν μποροῦμε νά ἔχουμε πολύ μεγάλες τάσεις, γι' αὐτό ἐπινοήσαμε διάφορες διατάξεις, στίς ὁποῖες τό ἠλεκτρικό πεδίο δίνει στό θετικό φορτισμένο σωματίδιο πολύ συχνές διαδοχικές ἐπιταχύνσεις.

Ἐπάρχουν δύο κατηγορίες ἐπιταχυντῶν, οἱ εὐθύγραμμοι καί οἱ κυκλικοί ἐπιταχυντές. Στούς εὐθύγραμμοις ἐπιταχυντές ἡ ταχύτητα (v) τοῦ σωματιδίου ἔχει πάντοτε τήν ἴδια διεύθυνση, γιατί στό σωματίδιο ἐπιδρᾷ μόνο τό ἠλεκτρικό πεδίο. Στούς κυκλικούς ἐπιταχυντές στό σωματίδιο ἐπιδρᾷ ἐκτός ἀπό τό ἠλεκτρικό πεδίο καί ἕνα μαγνητικό πεδίο, πού δέ δίνει ἐπιτάχυνση, ἀλλά ὀδηγεῖ τό σωματίδιο πάνω σέ μιά κυκλική τροχιά. Τό σωματίδιο ἀποκτᾷ ἐπιτάχυνση ρυθμικά, π.χ. στό τέλος κάθε μισῆς στροφῆς. Τά σωματίδια α πού ἐκπέμπονται ἀπό τά φυσικά ραδιοϊσότοπα ἔχουν ἐνέργεια μικρότερη ἀπό 10 MeV (βλ. πίνακα σελ. 213), ἐνῶ μέ τούς σημερινούς ἐπιταχυντές δημιουργοῦμε βλήματα πού ἡ ἐνέργειά τους φτάνει σέ δεκάδες ἢ καί ἑκατοντάδες GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ MeV}$).

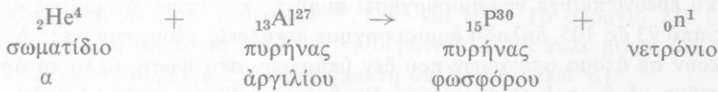
β. Ἡ πρώτη τεχνητή μεταστοιχείωση. Ὁ Rutherford (1919) ἔκαμε τήν πρώτη πυρηνική ἀντίδραση καί πέτυχε τήν πρώτη τεχνητή μεταστοιχείωση. Μέ σωματίδια α βομβάρδισε πυρήνες ἄζωτου καί παρατήρησε ὅτι σχηματίστηκαν ἰόντα ὕδρογόνου, δηλ. πρωτόνια. Ἀργότερα διαπιστώθηκε ὅτι ἐκτός ἀπό τά πρωτόνια σχηματίζονται καί πυρῆνες ὀξυγόνου. Τό πείραμα τοῦ Rutherford ἐκφράζεται μέ τήν ἐξῆς πυρηνική ἀντίδραση:



Ὡστε τὸ πείραμα τοῦ Rutherford ἀπέδειξε ὅτι μπορούμε νὰ πετύχου-
με τὴν τεχνητὴ μεταστοιχείωση τῶν σταθερῶν φυσικῶν πυρῶν.

115. Τεχνητὴ ραδιενέργεια

Σὲ πολλές περιπτώσεις πυρηνικῶν ἀντιδράσεων ἐμφανίζονται νέοι πυ-
ρήνες πού εἶναι ἀσταθεῖς καὶ αὐτόματα διασπῶνται, γιὰ νὰ μεταβληθοῦν
σὲ σταθεροῦς πυρήνες. Οἱ νέοι ἀσταθεῖς πυρήνες μεταστοιχειώνονται ἐκ-
πέμποντας πυρηνικὲς ἀκτινοβολίες (σωματίδια α, ἠλεκτρόνια, ποζιτρόνια,
φωτόνια γ). Ἔτσι δημιουργοῦνται τεχνητοὶ ραδιενεργοὶ πυρῶνες, πού ἀνή-
κουν σὲ ἄτομα στοιχείων τὰ ὁποῖα εἶναι ἰσότοπα μὲ τὰ σταθερά φυσικά στοι-
χεῖα. Αὐτὰ τὰ καινούρια ἰσότοπα στοιχεῖα δὲν ὑπάρχουν στὴ Φύση, ἀλλά
τά δημιουργοῦμε μὲ ὀρισμένες πυρηνικὲς ἀντιδράσεις καὶ γι' αὐτὸ ὀνομά-
ζονται τεχνητὰ ραδιοϊσότοπα. Καὶ γιὰ τὴν τεχνητὴ ραδιενέργεια ἰσχύει
ὁ νόμος τῆς ραδιενέργειας, ὅπως καὶ στὴ φυσικὴ ραδιενέργεια. Κάθε τε-
χνητὸ ραδιοϊσότοπο ἔχει χαρακτηριστικὸ χρόνο ὑποδιπλασιασμοῦ (T). Ἐνα
παράδειγμα πυρηνικῆς ἀντιδράσεως, κατὰ τὴν ὁποία δημιουργεῖται τε-
χνητὸ ραδιοϊσότοπο εἶναι τὸ ἐξῆς: Ἐν βομβαρδίσουμε μὲ σωματίδια α
τοὺς πυρῶνες ἀργιλίου, σχηματίζεται ραδιενεργὸς φωσφόρος καὶ νετρό-
νιο:



Ὁ πυρήνας τοῦ ραδιενεργοῦ φωσφόρου εἶναι ἀσταθῆς καὶ ἐκπέμπο-
ντας ἓνα ποζιτρόνιο καὶ ἓνα νετρόνιο μεταστοιχειώνεται σὲ σταθερὸ πυρή-
να πυριτίου.



Ὁ ραδιενεργὸς φωσφόρος P^{30} ἔχει χρόνο ὑποδιπλασιασμοῦ $T = 2,5 \text{ min}$.

Στόν πίνακα τῆς σελίδας 218 ἀναφέρονται μερικοὶ ἰσότοποι πυρῶνες.
Ὅσοι σημειώνονται μὲ μαῦρα στοιχεῖα δημιουργήθηκαν μὲ πυρηνικὲς
ἀντιδράσεις καὶ εἶναι ἀσταθεῖς (τεχνητὰ ραδιοϊσότοπα).

Μερικοί ισότοποι πυρήνες

Άτομικός αριθμός Z	Στοιχείο	Μαζικός αριθμός A	Ήλεκτρόνια Z	Πρωτόνια Z
1	H	1 2 3	1	1
2	He	3 4 5 6	2	2
3	Li	6 7 8	3	3
4	Be	7 8 9 10	4	4
5	B	8 9 10 11 12	5	5
6	C	10 11 12 13 14	6	6
7	N	12 13 14 15 16 17	7	7
8	O	14 15 16 17 18 19	8	8

116. Τά υπερούρανια στοιχεία

Στή Φύση ο βαρύτερος πυρήνας είναι ο πυρήνας του ουρανίου 238, δηλαδή ο πυρήνας ${}_{92}\text{U}^{238}$ που έχει ατομικό αριθμό $Z = 92$. Η πειραματική έρευνα πέτυχε να δημιουργήσει πυρήνες που έχουν ατομικούς αριθμούς από 93 ως 105, δηλαδή δημιούργησε δεκατρείς νέους πυρήνες. Αυτοί ανήκουν σε άτομα στοιχείων που δεν υπάρχουν στη Φύση, αλλά τά δημιουργούμε με όρισμένες πυρηνικές αντιδράσεις. Τά στοιχεία αυτά ονομάζονται *υπερούρανια στοιχεία*, είναι όλα ραδιενεργά και σχηματίζονται, όταν πυρήνες του ουρανίου ή άλλου υπερούρανιου στοιχείου βομβαρδίζονται με νετρόνια μεγάλης ενέργειας ή με ιόντα ήλιου, άνθρακα, αζώτου κ.ά. που έχουν μεγάλη ενέργεια.

Ίδιαίτερη σημασία έχουν τά δύο πρώτα υπερούρανια στοιχεία, δηλαδή το *νεπτούνιο* (Np, $Z = 93$) και το *πλουτώνιο* (Pu, $Z = 94$). Τό νεπτούνιο σχηματίζεται, όταν οί πυρήνες ουρανίου 238 βομβαρδίζονται με νετρόνια. Τότε σχηματίζεται ο άσταθής πυρήνας *ουρανίου* 239, που μεταστοιχείωνεται σε πυρήνα *νεπτονίου* 239. Αυτός ο πυρήνας μεταστοιχείωνεται τελικά σε πυρήνα *πλουτονίου* 239. Τό ισότοπο αυτό έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 24000$ έτη και παίζει σήμερα σπουδαίο ρόλο στην εκμετάλλευση τής πυρηνικής ενέργειας. Οί παραπάνω ενδιαφέρουσες μεταστοιχειώσεις εκφράζονται σχηματικά ως εξής:



Οί δύο πυρήνες ουρανίου είναι *ισότοποι*, ενώ οί πυρήνες του νεπτουνίου καί του πλουτωνίου είναι *ισοβαρείς*
 Τά γνωστά υπερουράνια στοιχεία είναι τά εξής:

93 Νεπτούνιο	Np	98 Καλιφόρνιο	Cf	103 Λωρέντσιο	Lw
94 Πλουτάνιο	Pu	99 Άϊνστάνιο	Es	104 Κουρτσατόβιο	Ku
95 Άμερίκιο	Am	100 Φέρμιο	Fm	105 Χάνιο	Ha
96 Κιούριο	Cm	101 Μεντελέβιο	Md		
97 Μπερκέλιο	Bk	102 Νομπέλιο	No		

117. Σχάση τών βαριών πυρήνων

Οί βαριοί πυρήνες, όταν *βομβαρδίζονται* μέ σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια, δευτερόνια, σωματίδια α) ή καί μέ φωτόνια γ πολύ μεγάλης ενέργειας ($h\nu > 5 \text{ MeV}$), *διασπώνται* σέ δύο άλλους πυρήνες πού έχουν περίπου ίσες μάζες. Τό φαινόμενο αυτό ονομάζεται **σχάση**. Μερικοί βαριοί πυρήνες καί κυρίως πυρήνες πού ανήκουν σέ πολλά υπερουράνια ισότοπα παθαίνουν *αυτόματη σχάση*, χωρίς νά προηγηθεί βομβαρδισμός τους μέ σωματίδια. "Ωστε ή σχάση είναι ένα φαινόμενο πού εμφανίζεται κυρίως στους βαριούς πυρήνες. Ίδιαίτερη σημασία έχει ή σχάση του πυρήνα ουρανίου.

Σχάση του πυρήνα ουρανίου. Τό ουράνιο πού βρίσκουμε στή Φύση αποτελείται από τά τρία ισότοπα U^{238} , U^{235} καί U^{234} . Τό ουράνιο 238 ύπάρχει σέ μεγάλη αναλογία (99,3 %), τό ουράνιο 235 σέ πολύ μικρή αναλογία (0,7 %) καί τό ουράνιο 234 σέ άσήμαντη αναλογία (0,006 %).

"Όταν οί πυρήνες ουρανίου 238 καί ουρανίου 235 συλλάβουν ένα νετρόνιο, τότε συμβαίνει *σχάση* αυτών των δύο πυρήνων. Τά νετρόνια πού μπορούν νά προκαλέσουν τή σχάση των δύο πυρήνων ουρανίου, κατατάσσονται στίς εξής δύο κατηγορίες:

1) Τά νετρόνια πού έχουν μεγάλη ταχύτητα καί ονομάζονται *νετρόνια ψηλής ενέργειας*, γιατί έχουν πολύ μεγάλη ενέργεια ($E > 1 \text{ MeV}$).

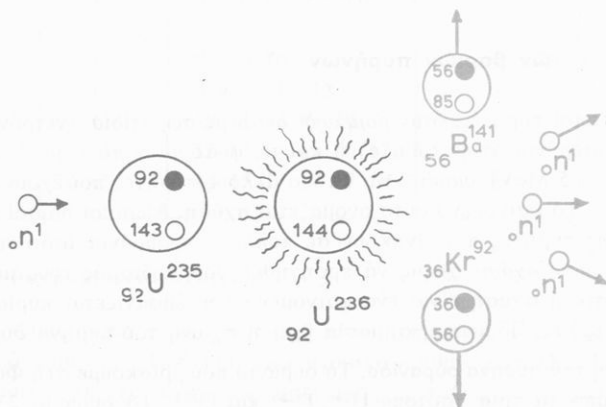
2) Τά νετρόνια πού έχουν μικρή ταχύτητα καί ονομάζονται *θερμικά νετρόνια*, γιατί έχουν μικρή ενέργεια (0,025 eV) ίση περίπου μέ τήν ενέργεια πού έχουν τά μόρια των αερίων εξαιτίας τής θερμικής κινήσεώς τους. Άποδείχτηκε ότι:

I. Ό πυρήνας ουρανίου 235 παθαίνει σχάση κυρίως μέ θερμικά νετρόνια.

II. Ό πυρήνας ουρανίου 238 παθαίνει σχάση μόνο μέ νετρόνια ψηλής ενέργειας, ενώ μέ τά θερμικά νετρόνια μεταστοιχειώνεται σέ πυρήνα νεπτουνίου (Np) καί τελικά σέ πυρήνα πλουτωνίου (Pu).

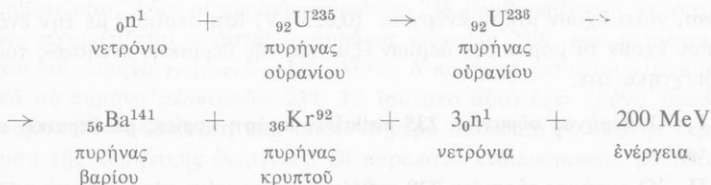
118. Σχάση του πυρήνα ουρανίου 235

α. Προϊόντα της σχάσεως. Ἡ σχάση τοῦ πυρήνα οὐρανίου μέ τά θερμικά νετρόνια ἔχει σήμερα μεγάλες ἐφαρμογές. Ὄταν ὁ πυρήνας οὐρανίου 235 συλλάβει ἕνα θερμικό νετρόνιο, τότε σχηματίζεται ὁ πυρήνας οὐρανίου 236 πού εἶναι ἀσταθής καί ἀμέσως διασπᾶται σέ δύο μικρότερους πυρήνες πού ὁ καθένας ἔχει μάζα περίπου ἴση μέ τή μισή μάζα τοῦ ἀρχικοῦ πυρήνα. Ταυτόχρονα ἐλευθερώνονται μερικά νετρόνια (σχ. 151). Οἱ δύο νέοι πυ-



Σχ. 151. Σχηματική παράσταση τῆς σχάσεως τοῦ πυρήνα οὐρανίου 235 σέ πυρήνα βαρίου 144 καί πυρήνα κρυπτοῦ 89.

ρήνες ἐκτοξεύονται μέ μεγάλη ταχύτητα καί ἐπομένως ἔχουν μεγάλη κινητική ἐνέργεια, ἡ ὁποία τελικά μετατρέπεται σέ θερμότητα. Οἱ δύο νέοι πυρήνες εἶναι ραδιενεργοί καί μέ μιᾶ σειρά διαδοχικῶν μεταστοιχειώσεων καταλήγουν σέ σταθεροῦς πυρήνες. Ἡ ἐπόμενη πυρηνική ἀντίδραση ἐκφράζει ἕναν τρόπο σχάσεως τοῦ πυρήνα οὐρανίου 235:



Ἀπό τά παραπάνω βγάζουμε τό ἑξῆς συμπέρασμα:

Ο πυρήνας ουρανίου 235, όταν συλλάβει ένα θερμικό νετρόνιο, μεταβάλλεται σε άσταθη πυρήνα ουρανίου 236, ο οποίος άμέσως διασπάται σε δύο νέους ραδιενεργούς πυρήνες και ταυτόχρονα εκπέμπονται νετρόνια και ελευθερώνεται μεγάλη ενέργεια (200 MeV κατά πυρήνα ουρανίου 235).

β. Μορφή της ενέργειας που ελευθερώνεται. Από κάθε διασπώμενο πυρήνα ουρανίου 235 ελευθερώνεται ενέργεια 200 MeV (βλ. πίνακα). Από αυτή την ενέργεια τά 190 MeV είναι *κινητική ενέργεια σωματιδίων* (νέοι πυρήνες, νετρόνια, ηλεκτρόνια) και *ενέργεια φωτονίων γ*. Αυτές όμως οι δύο μορφές ενέργειας, όταν απορροφούνται από την ύλη, μετατρέπονται σε *θερμότητα* που μπορούμε άμέσως νά την εκμεταλλευτούμε. Μόνο ή ενέργεια των αντινετρίνων, που συνοδεύουν την έκπομπή των ηλεκτρονίων, διαφεύγει. Ωστε :

Ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση του πυρήνα ουρανίου 235

Μορφή της ενέργειας	Ενέργεια σε MeV
Κινητική ενέργεια νέων πυρήνων	168,8
Κινητική ενέργεια νετρονίων	5,0
Κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων	4,8
Ενέργεια φωτονίων γ	11,4
Ενέργεια αντινετρίνων	10,0
Σύνολο	200

Από την ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση του πυρήνα ουρανίου 235 τά 95 % αυτής της ενέργειας μετατρέπονται άμέσως σε εκμεταλλεύσιμη θερμότητα.

γ. Προέλευση της πυρηνικής ενέργειας. Η ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση του πυρήνα ονομάζεται *πυρηνική ενέργεια*. Θα εξετάσουμε από ποῦ προέρχεται αυτή ή ενέργεια. Όπως ξέρουμε, μιά μάζα m ισοδυναμεί με ενέργεια $E = mc^2$. Κατά τη σχάση ενός πυρήνα ουρανίου 235 βρίσκουμε ὅτι τό ἄθροισμα των μαζών όλων των προϊόντων της σχάσεως είναι *μικρότερο* από τη μάζα του άσταθούς πυρήνα ουρανίου 236 (βλ. πυρηνική αντίδραση σχάσεως). Ωστε, όταν συμβαίνει σχάση του πυρήνα ουρανίου 235 παρουσιάζεται μιά *ἀπώλεια μάζας* Δm . Αυτή ή μάζα Δm μετατρέπεται σε *ισοδύναμη ενέργεια* (πυρηνική ενέργεια) σύμφωνα με την εξίσωση

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

Είδαμε ὅτι από κάθε διασπώμενο πυρήνα ουρανίου 235 ελευθερώνεται

ένεργεια 200 MeV. Αυτή ή ένεργεια είναι τεράστια. Εύκολα βρίσκουμε ότι κατά τη διάσπαση των πυρήνων που περιέχονται σε ένα γραμμάριο ούρανιου 235 ελευθερώνεται ένεργεια ίση με $8,2 \cdot 10^{10}$ Joule (δηλαδή περίπου 23 000 kWh). Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

I. Η πυρηνική ένεργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση των πυρήνων ούρανιου 235 προέρχεται από τη μετατροπή ελάχιστης πυρηνικής μάζας σε ισοδύναμη ένεργεια.

II. Η πυρηνική ένεργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση του πυρήνα ούρανιου 235 είναι τεράστια ($8,2 \cdot 10^{10}$ Joule κατά γραμμάριο).

δ. Άλλοι πυρήνες διασπώμενοι με θερμικά νετρόνια. Από τη σχάση των πυρήνων ούρανιου 235 παίρνουμε εκμεταλλεύσιμη πυρηνική ένεργεια. Άλλά το ούράνιο 235 είναι ένα σπάνιο φυσικό ισότοπο. Πειραματικά αποδείχτηκε ότι:

Μέ θερμικά νετρόνια παθαίνουν σχάση μόνο οι πυρήνες του ούρανιου 235, του πλουτωνίου 239 και του ούρανιου 233.

Τό πλουτόνιο 239 και τό ούράνιο 233 δέν υπάρχουν στή Φύση και τά δημιουργοῦμε μέ ὀρισμένες πυρηνικές ἀντιδράσεις.

Τό πλουτόνιο 239 σχηματίζεται, ὅταν τό ούράνιο 238 (πού εἶναι ἄφθο-νο) βομβαρδίζεται μέ νετρόνια κατάλληλης ἐνέργειας. Αυτό συμβαίνει μέσα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και έτσι μπορούμε να έχουμε ἀρκετό πλουτόνιο, πού εἶναι μακρόβιο ($T = 24\,000$ ἔτη).

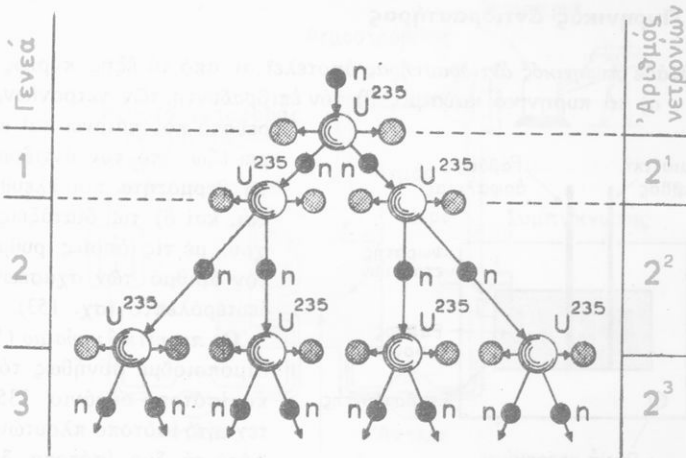
Τό ἄλλο σχάσιμο ισότοπο, δηλαδή τό ούράνιο 233, πού και αυτό εἶναι μακρόβιο ($T = 163\,000$ ἔτη), τό παίρνουμε βομβαρδίζοντας μέ νετρόνια τό φυσικό ισότοπο θόριο 232.

Σχηματικά ἡ παραγωγή τοῦ πλουτωνίου 239 και τοῦ ούρανιου 233 ἔχει ὡς ἐξής:



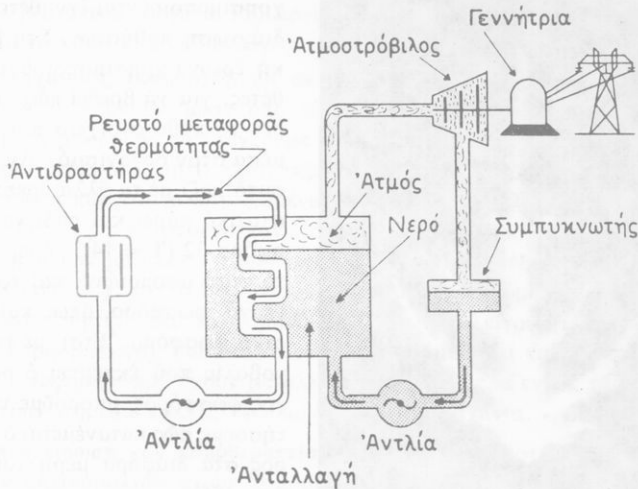
119. Ἀλυσιδωτή ἀντίδραση

Κατά τη σχάση ενός πυρήνα ούρανιου 235 ελευθερώνονται δύο ὡς τρία νετρόνια. Ἄς δεχθοῦμε ὅτι μέσα σε μιά μάζα ούρανιου 235 ελευθερώνονται 2 νετρόνια (πρώτη γενεά) ἀπό ἕναν πυρήνα ούρανιου πού ἀρχικά διασπᾶται. Ἄν αὐτά τά 2 νετρόνια συναντήσουν δύο πυρήνες ούρανιου



Σχ. 152. Άλυσιδωτή αντίδραση συμβαίνει, όταν τα νετρόνια κάθε γενεάς προκαλούν καινούριες σχάσεις πυρήνων ουρανίου 235.

235, θά προκαλέσουν δύο καινούριες σχάσεις και τότε θά ελευθερωθούν 4 νετρόνια ή 2^2 νετρόνια (δεύτερη γενεά). Αυτά τὰ 4 νετρόνια θά προκαλέσουν τέσσερις καινούριες σχάσεις και έτσι θά σχηματιστούν 2^3 νετρόνια (τρίτη γενεά) κ.ο.κ. "Ωστε ή έβδομηκοστή γενεά θά αποτελείται από 2^{70} νετρόνια ($12 \cdot 10^{20}$ νετρόνια), πού θά προκαλέσουν ισάριθμες σχάσεις. Αυτή ή αυτοσυντηρούμενη πυρηνική αντίδραση ονομάζεται *άλυσιδωτή αντίδραση* (σχ. 152). Ο χρόνος πού μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών γενεών νετρονίων είναι ελάχιστος (της τάξεως του 10^{-9} sec). Επομένως, οί παραπάνω έβδομήντα γενεές νετρονίων παράγονται μέσα σέ χρονικό διάστημα μικρότερο από τό ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου. Άλλά μέσα σέ αυτό τό ελάχιστο χρονικό διάστημα ελευθερώνεται τεράστια ποσότητα ενέργειας, δηλαδή συμβαίνει *έκρηξη* (ατομική βόμβα). "Αν όμως, μπορούσαμε νά επιδράσουμε στην εξέλιξη των σχάσεων έτσι, ώστε έπειτα από κάθε σχάση πυρήνα ουρανίου 235 ένα καί μόνο νετρόνιο νά προκαλεί καινούρια σχάση, τότε ο αριθμός των σχάσεων διατηρείται σταθερός και ή αλυσιδωτή αντίδραση είναι *έλεγχομένη*. Αυτό τό πετυχαίνουμε στον *πυρηνικό αντιδραστήρα*.



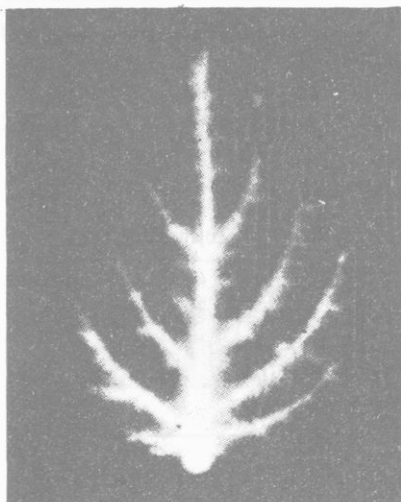
Σχ. 154. Σχηματική παράσταση εγκατάστασας που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνική ενέργεια.

ρες έρευνας χρησιμοποιούνται για επιστημονικές έρευνες. Τέτοιος αντιδραστήρας υπάρχει στο Έλληνικό Κέντρο Πυρηνικών Έρευνών «Δημόκριτος» και είναι τύπου «κολυμβητικής δεξαμενής», δηλαδή οι ράβδοι ουρανίου είναι βυθισμένες μέσα στο νερό, που είναι και ο επιβραδυντής.

121. Έφαρμογές των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων

Σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούμε τεχνητά ραδιοϊσότοπα, δηλαδή ραδιενεργά ισότοπα των φυσικών στοιχείων, π.χ. του ιωδίου, του νατρίου, του φωσφόρου, του χρυσού κ.ά. Συνήθως τά ραδιοϊσότοπα παρασκευάζονται με τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Τοποθετούμε τά φυσικά στοιχεία μέσα στον αντιδραστήρα και τότε οί πυρήνες βομβαρδίζονται με νετρόνια και μεταστοιχειώνονται σε ραδιενεργούς πυρήνες.

Ίχνηθέτες. Τά ραδιοϊσότοπα, με την ακτινοβολία που εκπέμπουν, δείχνουν την παρουσία τους και έτσι μπορούμε νά παρακολουθήσουμε την πορεία ενός φαινομένου. Σ' αυτή την περίπτωση τά ραδιοϊσότοπα ονομάζονται *ίχνηθέτες*. Μέ αυτούς μπορούμε π.χ. νά παρακολουθήσουμε τή ροή ενός υγρού ή τή μετακίνηση τής άμμου σε έναν κόλπο κ.ά. Ίχνηθέτες χρησιμοποιούν και οί βιομηχανίες που κατεργάζονται μίγματα (όπως είναι τά υλικά του τσιμέντου, των λιπασμάτων, του γυαλιού κ.ά.). Στήν Ιατρική



Σχ. 155. Αυτόραδιογράφημα φύλλου έπειτα από την άφομοίωση του ραδιενεργού φωσφόρου.

χρησιμοποιούνται ίχνηθέτες για τή διάγνωση παθήσεων. Στη βιολογική έρευνα χρησιμοποιούνται ίχνηθέτες, για νά βρεθεί πώς κυκλοφορεί τό κάθε στοιχείο πού μπαίνει μέσα στόν οργανισμό. Άν π.χ. ένα φυτό μαζί μέ τά άλλα θρεπτικά συστατικά πάρει καί ραδιενεργό φωσφόρο 32 ($T = 14,3$ ήμέρες), τότε τό φυτό άφομοιώνει καί τό ραδιενεργό φωσφόρο, όπως καί τό φυσικό φωσφόρο. Έτσι μέ τήν άκτινοβολία πού εκπέμπει ό ραδιενεργός φωσφόρος μπορούμε νά μελετήσουμε πώς κατανέμεται ό φωσφόρος στά διάφορα μέρη του φυτού (σχ. 155).

Χρονικοί προσδιορισμοί. Άπό τά φαινόμενα τής ραδιενέργειας πού παρουσιάζουν σήμερα τά όρυκτά ή τά λείψανα όργανισμών (κόκκαλα, άπολιθώματα, ξύλο, στάχτη), μπορούμε νά προσδιορίσουμε πότε σχηματίστηκαν αυτά τά όρυκτά ή πότε έζησαν όρισμένα ζώα καί φυτά. Έτσι από τό ρυθμό μέ τόν όποιο τό ουράνιο 238 (U^{238}) μεταστοιχειώνεται τελικά σε σταθερό μόλυβδο 206 (Pb^{206}) βρίσκουμε ότι ή πιθανή ήλικία τής Γής είναι 4,5 δισεκατομμύρια έτη καί ότι ό στερεός φλοιός τής Γής σχηματίστηκε πριν από 3,5 δισεκατομμύρια έτη.

Γιά νά προσδιορίσουμε μέ άκρίβεια τήν ήλικία πού έχουν όρισμένα άρχαιολογικά εδρήματα, στηριζόμαστε στή ραδιενέργεια του άνθρακα 14 (C^{14}) πού βρίσκεται στό διοξείδιο του άνθρακα τής άτμόσφαιρας καί έχει χρόνο ύποδιπλασιασμού $T = 5600$ έτη. Ό άνθρακας 14 σχηματίζεται (*), όταν οι πυρήνες άζώτου (N^{14}) βομβαρδίζονται μέ νετρόνια των κοσμικών άκτινων. Ό άνθρακας 14 άφομοιώνεται από τά φυτά, όπως καί ό φυσικός άνθρακας 12.

Μετά τό θάνατο του όργανισμού ή ποσότητα του άνθρακα 14, πού

(*) Ό άνθρακας 14 σχηματίζεται καί μεταστοιχειώνεται ως εξής :



υπάρχει μέσα στά λείψανα του οργανισμού, αρχίζει νά ελαττώνεται σύμφωνα μέ τό νόμο τής ραδιενέργειας.

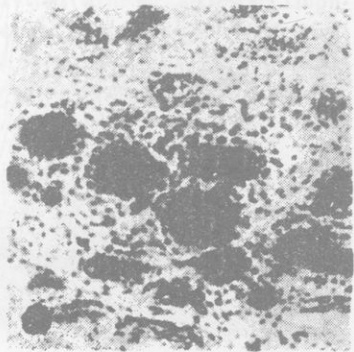
Βιομηχανικές εφαρμογές. Οί άκτινοβολίες πού εκπέμπουν τά ραδιοϊσότοπα, όταν περνούν μέσα από τά διάφορα ύλικά, παθαίνουν *απορρόφηση*. Έτσι μπορούμε νά ελέγξουμε τό πάχος πού έχουν φύλλα ή πλάκες από αυτά τά ύλικά (χαρτί, πλαστικές ύλες, νήματα κ.λ.) ή άν ένα ύλικό έχει σταθερή πυκνότητα καί επομένως δέν περιέχει άλλα ύλικά.

Μέ άκτίνες γ παίρνουμε πάνω σέ φωτογραφικές πλάκες ραδιογραφήματα κομματιών μετάλλων (*ραδιομεταλλογραφία*) καί εξετάζουμε τή δομή ενός ύλικού (π.χ. άν υπάρχουν κενά ή άλλα ελαττώματα). Σ' αυτή τήν περίπτωση χρησιμοποιούμε φορητή συσκευή πού λειτουργεί μέ κοβάλτιο 60 (πολύ ραδιενεργό). Ραδιοϊσότοπα χρησιμοποιούνται καί σέ όρισμένους τύπους *γεννητριών* πού έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Γενικά τά ραδιοϊσότοπα έχουν σήμερα πολλές εφαρμογές στή βιομηχανία.

Άποστείρωση καί ραδιοθεραπεία. Τά βιολογικά αποτελέσματα των πυρηνικών άκτινοβολιών έχουν εφαρμογές στήν *άποστείρωση* καί τή *ραδιοθεραπεία*. Τό γάλα καί τό κρέας πού πρόκειται νά διατηρηθοῦν *άποστειρώνονται* μέ άκτίνες γ, οί όποιες σταματοῦν τίσ ζυμώσεις, χωρίς νά καταστρέφουν τίσ βιταμίνες. Οί άκτίνες γ εμποδίζουν τίσ πατάτες νά βλαστήσουν καί έτσι μπορούν νά διατηρηθοῦν γιά πολλά χρόνια. Μέ τίσ άκτίνες γ λύθηκε τό πρόβλημα τής άποστειρώσεως όρισμένων φαρμακευτικών προϊόντων καί ίδίως των άντιβιοτικών.

Γιά τή *ραδιοθεραπεία* μέ άκτινοβολία άκτίνων γ χρησιμοποιεῖται τό κοβάλτιο 60, άντί γιά τό νανάκριβο ράδιο. Σέ μερικές περιπτώσεις μέσα στους όγκους πού δημιουργοῦνται στό σῶμα, βάζουν μικρή ποσότητα από ένα κατάλληλο ραδιενεργό ισότοπο, π.χ. ιρίδιο 192, χρυσό 198, ιώδιο 131 (σχ. 156).

Πρόκληση μεταλλάξεων. Οί πυρηνικές άκτινοβολίες προκαλοῦν τροποποιήσεις στά γονίδια, πού εἶναι οί φορεῖς των κληρονομικών ιδιοτήτων, καί έτσι προκαλοῦν *μεταλλάξεις*. Μέ αυτό τόν τρόπο δημιουργήθηκαν καινούριες ποικιλίες φυτών, πού έχουν νέες ιδιότητες (π.χ. άντέχουν περισσότερο στίς άσθένειες ή μπορούν νά

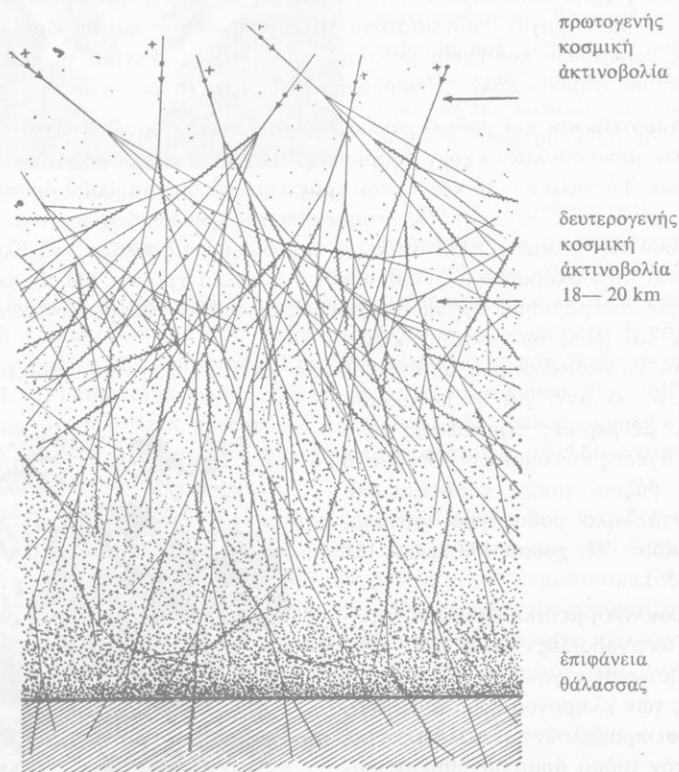


Σχ. 156. Συγκέντρωση του ιωδίου 131 στό εσωτερικό των λοβών του θυρεοειδῆ αδένου.

ανάπτυχθουν σε περισσότερο ψυχρά ή θερμά κλίματα). Ο νέος αυτός κλάδος τής γενετικής δέν ξέρουμε τί μπορεί νά μᾶς δώσει στό μέλλον.

122. Κοσμικές ἀκτίνες

Ένα ἠλεκτροσκόπιο πού ἔχει θετικό ἢ ἀρνητικό φορτίο, ὅταν μείνει μέσα στόν ἀέρα, χάνει τό φορτίο του, γιατί, ὅπως ξέρουμε, πάντοτε μέσα στόν ἀέρα υπάρχουν ἰόντα. Ὁ διαρκής ἰονισμός τοῦ ἀέρα ὀφείλεται σέ ἀκτινοβολίες πού προέρχονται ἀπό τό κοσμικό διάστημα καί ὀνομάζονται *κοσμικές ἀκτίνες* ἢ *κοσμική ἀκτινοβολία*. Στά ἀνώτατα στρώματα τής



Σχ. 157. Σχηματική παράσταση τής παραγωγῆς τῶν δευτερογενῶν κοσμικῶν ἀκτίνων μέσα στά κατώτερα στρώματα τής ἀτμόσφαιρας.

ατμόσφαιρας φτάνουν από όλες τις διευθύνσεις *οί πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες*, πού αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια (85%), υπάρχουν όμως σ' αυτές και ηλεκτρόνια, φωτόνια, σωματίδια α και μερικοί βαρύτεροι πυρήνες (άνθρακα, άζώτου, σιδήρου κ.ά.). Τά σωματίδια των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων έχουν συνήθως *πολύ μεγάλη ενέργεια*, πού μπορεί να φτάσει ως 10^{10} GeV (ένώ με τούς σύγχρονους επιταχυντές μας δίνουμε στά σωματίδια ενέργεια ως 400 GeV). Αυτή ή ενέργεια συγκεντρωμένη πάνω σε ένα σωματίδιο είναι τεράστια.

"Όταν ένα πρωτόνιο των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων μπει μέσα στην ατμόσφαιρα, τό πρωτόνιο *συγκρούεται* με έναν πυρήνα άζώτου ή όξυγόνου. Τότε ό πυρήνας αυτός *διαμελίζεται* σε πολλά νουκλεόνια πού έχουν μεγάλη ενέργεια και καθώς κατεβαίνουν μέσα στην ατμόσφαιρα προκαλούν καινούριες *πυρηνικές αντιδράσεις*. "Ένα μεγάλο όμως μέρος από την ενέργεια πού είχε τό πρωτογενές πρωτόνιο μεταβάλλεται κατά τή σύγκρουσή του σε άσταθείς μορφές ύλης, πού είναι *μύονια* και κυρίως *πιόνια* (*). Αυτά άμέσως διασπώνται και σχηματίζονται ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια γ. "Έτσι στά κατώτερα στρώματα τής ατμόσφαιρας φτάνουν *οί δευτερογενείς κοσμικές ακτίνες*, πού αποτελούνται από μύονια (75%), ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, νουκλεόνια, μερικά σωματίδια α και φωτόνια γ (σχ. 157).

"Υπολογίζεται ότι κάθε δευτερόλεπτο σε κάθε τετραγωνικό έκαστόμετρο τής επιφάνειας τής Γης φτάνει ένα κοσμικό σωματίδιο. Μερικά πρωτογενή κοσμικά σωματίδια πού έχουν πάρα πολύ μεγάλη ενέργεια κατορθώνουν να φτάσουν ως την επιφάνεια τής Γης (σχ. 158). Αυτά τά κοσμικά σωματίδια με την ενέργειά τους ίσως να έξασκοϋν επίδραση σε όρισμένα κύτταρα των οργανισμών.

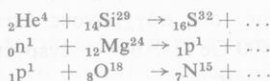
Οί κοσμικές ακτίνες βοήθησαν σημαντικά στην εξέλιξη τής Πυρηνικής Φυσικής, γιατί στίς κοσμικές ακτίνες ανακαλύψαμε για πρώτη φορά τό ποζιτρόνιο (Anderson 1932), και πολλά από τά άλλα στοιχειώδη σωματίδια (μύονια, πιόνια, ύπερόνια) πού ήταν άγνωστα ως τότε.

* Τά μύονια και τά πιόνια είναι άσταθή σωματίδια πού αντίστοιχα έχουν μάζα 207 και 270 φορές μεγαλύτερη από τή μάζα του ηλεκτρονίου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

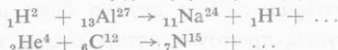
176. 'Ο ατομικός πυρήνας άζώτου ${}^7\text{N}^{14}$, όταν βομβαρδίζεται με νετρόνιο, μεταστοιχειώνεται εκπέμποντας δύο σωματίδια α. Νά γραφεί ή πυρηνική αντίδραση.

177. Νά συμπληρωθούν οι έπόμενες πυρηνικές αντιδράσεις :



178. Οι δύο τεχνητοί ραδιενεργοί πυρήνες ${}_{9}\text{F}^{20}$ και ${}_{29}\text{Ni}^{65}$ μεταστοιχειώνονται με έκπομπή ηλεκτρονίου, ενώ οι δύο τεχνητοί ραδιενεργοί πυρήνες ${}_{7}\text{N}^{13}$ και ${}_{19}\text{K}^{38}$ μεταστοιχειώνονται με έκπομπή ποζιτρονίου. Νά γραφούν οι αντιδράσεις τής μεταστοιχειώσεως.

179. Νά συμπληρωθούν οι έξης πυρηνικές αντιδράσεις :



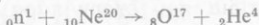
180. Νά βρεθεί πόση ενέργεια σε Joule έλευθερώνεται, όταν συμβαίνει ή έξης πυρηνική αντίδραση :



'Ατομικές μάζες σε amu :



181. Νά βρεθεί πόση έξωτερική ενέργεια σε Joule απορροφάται, όταν συμβαίνει ή έξης πυρηνική αντίδραση :



'Ατομικές μάζες σε amu :



182. Όταν ο πυρήνας λιθίου ${}^7(\text{Li}^7)$ βομβαρδίζεται με πρωτόνιο που έχει κινητική ενέργεια $E_p = 0,25$ MeV, τότε σχηματίζονται δύο σωματίδια α και τό καθένα από αυτά έχει τήν ίδια κινητική ενέργεια. Πόση κινητική ενέργεια E_α έχει τό κάθε σωματίδιο α; $\text{H}^1 = 1,007\ 825$ amu, $\text{Li}^7 = 7,016\ 004$ amu, $\text{He}^4 = 4,002\ 604$ amu

183. Στο σώμα του ανθρώπου υπάρχουν περίπου 0,3 gr ραδιενεργού καλίου ${}_{40}\text{K}^{40}$, δηλαδή $N_0 = 4,5 \cdot 10^{21}$ άτομα καλίου 40. Τό στοιχείο αυτό έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 1,3 \cdot 10^9$ έτη και μεταστοιχειώνεται με έκπομπή ηλεκτρονίου. 1) Νά γραφεί ή εξίσωση τής διασπάσεως. 2) Πόσες διασπάσεις συμβαίνουν κάθε δευτερόλεπτο μέσα στο σώμα του ανθρώπου;

184. Τό ραδιενεργό βρώμιο ${}_{82}(\text{Br}^{82})$ έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 36$ h. Από μία άρχική μάζα βρωμίου έπειτα από πόσο χρονικό διάστημα θά έχει απομείνει τό $1/32$ ή τό $1/2^{10}$ τής άρχικής μάζας m_0 ;

185. 'Ο ραδιενεργός φωσφόρος ${}_{32}(\text{P}^{32})$ μεταστοιχειώνεται με έκπομπή ηλεκτρονίου και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 14$ ήμέρες. Μέ μία κατάλληλη διάταξη (άπαριθμητή Geiger) βρίσκουμε ότι ένα διάλυμα φωσφόρου 32 εκπέμπει 1000 ηλεκτρόνια κατά λεπτό. "Αν έπαναλάβουμε τό πείραμα έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 28$ ήμέρες, πόσα ηλεκτρόνια θά καταμετρηθούν κατά λεπτό;

186. Κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα ουρανίου ^{235}U ελευθερώνεται ενέργεια 200 MeV. Πόση ενέργεια σε κιλοβατώρα ελευθερώνεται, όταν διασπώνται οι πυρήνες που υπάρχουν μέσα σε 1 gr ουρανίου; Πόσος είναι ο συντελεστής αποδόσεως σ' αυτή την περίπτωση; Πυρήνες ουρανίου $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr.

187. Κατά τη διάσπαση του πυρήνα ουρανίου ^{235}U σχηματίζονται δύο νέοι πυρήνες που ο καθένας έχει ατομικό αριθμό $Z = 92/2$ και ακτίνα $6 \cdot 10^{-15}$ m. Για μία στιγμή οι δύο νέοι πυρήνες βρίσκονται σε έπαφή. Πόση είναι τότε η άπωση που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο νέων πυρήνων;

188. Από τη διάσπαση του πυρήνα ουρανίου ^{235}U μπορεί να σχηματιστούν άμεσα δύο σταθεροί πυρήνες, σύμφωνα με την αντίδραση :



1) Πόση ενέργεια σε MeV ελευθερώνεται, όταν συμβαίνει αυτή η αντίδραση;
2) Πόση ενέργεια σε Joule ελευθερώνεται κατά γραμμάριο ουρανίου;
 $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr.

Ατομικές μάζες σε amu :

$$n^1 = 1,009 \quad \text{U}^{235} = 235,044 \quad \text{Mo}^{98} = 97,905 \quad \text{Xe}^{136} = 135,917.$$

189. Κατά την έκρηξη μιας βόμβας ουρανίου ^{235}U ένας από τους νέους πυρήνες είναι ο ραδιενεργός πυρήνας ξένου $^{143}_{54}\text{Xe}$. Αυτός ο πυρήνας με διαδοχικές εκπομπές ενός ηλεκτρονίου μεταστοιχείωνται τελικά σε σταθερό πυρήνα νεοδύμιου $^{143}_{60}\text{Nd}$. Νά γραφεί παραστατικά ή σειρά των διαδοχικών μεταστοιχειώσεων του αρχικού πυρήνα ${}^{143}_{54}\text{Xe}$.

190. Βρέθηκε ότι κατά την έκρηξη μιας βόμβας ουρανίου ^{235}U διασπώνται $n = 5 \cdot 10^{23}$ πυρήνες ουρανίου μέσα σε χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,001$ sec. 1) Πόση ενέργεια σε Joule ελευθερώνεται κατά την έκρηξη, αν από κάθε έναν πυρήνα ουρανίου ελευθερώνεται ενέργεια 200 MeV; 2) Πόση είναι κατά μέσο όρο η ισχύς που ελευθερώνεται;

191. Μία μηχανή σιδηρόδρομου αναπτύσσει σταθερή ισχύ $P = 1200$ kW επί 10 ώρες. Η μηχανή κινείται με πυρηνικό αντιδραστήρα, που τροφοδοτείται με ούρανο ^{235}U και έχει συντελεστή αποδόσεως $\eta = 0,20$. Πόση μάζα ουρανίου θα καταναλωθεί γι' αυτή τη διαδρομή; Πυρήνες ουρανίου $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr. Ενέργεια που ελευθερώνεται 180 MeV/πυρήνα.

192. Σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα τά 8/10 000 της μάζας του ουρανίου ^{235}U μετατρέπονται σε ισοδύναμη ενέργεια. Αν κάθε ημέρα ο αντιδραστήρας καταναλώνει 24 gr ουρανίου ^{235}U , πόση είναι η ισχύς του αντιδραστήρα.

193. Σε 1 gr ραδίου υπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες και η σταθερή διασπάσεως του ραδίου είναι :

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \quad \eta \quad \lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

Πόσες διασπάσεις τό δευτερόλεπτο συμβαίνουν μέσα στη μάζα 1 gr ραδίου; Ποιά σχέση έχουν αυτές οι διασπάσεις με τη μονάδα έντασεως ραδιενέργειας 1 κιουρί (1 Ci);

194. Τό ραδιενεργό κοβάλτιο $^{58}_{27}\text{Co}$ έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 72$ ημέρες. Πόση μάζα m από αυτό τό ραδιοϊσότοπο έχει ένταση ραδιενέργειας ίση με 1 μιλικιουρί (1 mCi); $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ άτομα/gr - atom.

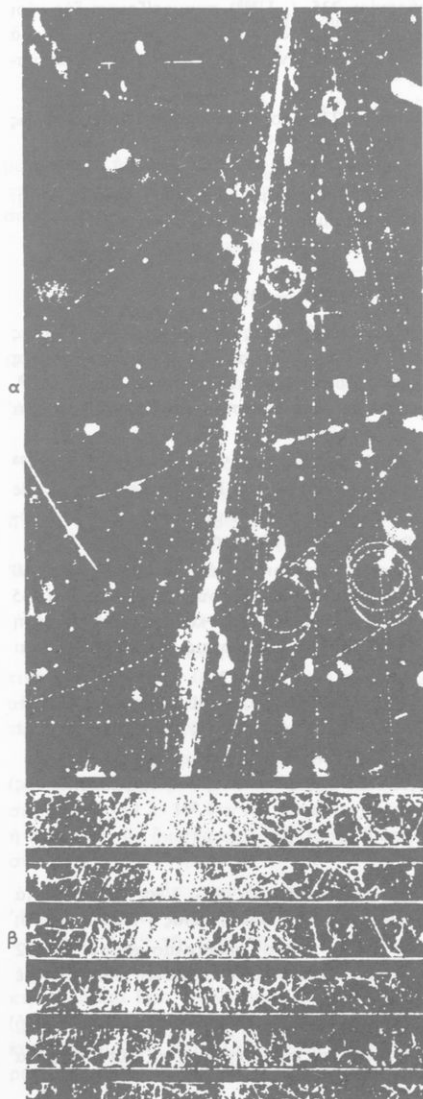
195. Στη διάρκεια ενός δευτερολέπτου μία μάζα ουρανίου ^{238}U εκπέμπει 18 500 σωματίδια α. Πόση είναι σε μικροκιουρί (μCi) ή ένταση ραδιενέργειας γι' αυτή τη μάζα του ουρανίου;

196. Πόση μάζα m από ραδιενεργό κοβάλτιο 55 (${}_{27}\text{Co}^{65}$) έχει ένταση ραδιενέργειας ίση με 10 μιλικιουρί (mCi); Χρόνος υποδιπλασιασμού $T = 18$ h.

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ άτομα/gr-atom.}$$

197. Το αίμα ενός άσθενή έχει όγκο 3500 cm^3 . Στο αίμα αυτού του άσθενή εισά-

γεται μιά ποσότητα ραδιενεργού φωσφόρου 32 (${}_{15}\text{P}^{32}$) ή όποια έχει ένταση ραδιενέργειας $A = 5 \text{ mCi}$. 'Ο φωσφόρος 32 έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 14$ ημέρες. "Αν έπειτα από χρόνο $t = 28$ ημέρες πάρουμε από αυτόν τον άσθενή 1 cm^3 αίματος, πόσες διασπάσεις τό δευτερόλεπτο θά βρούμε ότι συμβαίνουν;



Σχ. 158. Ένα πρωτογενές κοσμικό σωματίδιο με ενέργεια πολλών εκατομμυρίων MeV μπήκε μέσα στον πρώτο θάλαμο Wilson (α) και έπειτα μπήκε σέ δεύτερο θάλαμο Wilson πού είχε πολλές παράλληλες μεταλλικές πλάκες (β). Έκεί τό σωματίδιο διαμελίζοντας πυρήνες τών ατόμων τού μετάλλου δημιούργησε πάρα πολλά σωματίδια και φωτόνια γ μεγάλης ενέργειας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Φυσικές σταθερές

Ταχύτητα φωτός στο κενό	c	$3 \cdot 10^8$ m/sec
Έπιτάχυνση βαρύτητας ($45^\circ, 0$ m)	g	9,80665 m/sec ²
Σταθερή Faraday	F	96 490 Cb/γραμμαίοσοδύναμο
Σταθερή Planck	h	$6,6256 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec
Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο	e	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Cb
Μονάδα ατομικής μάζας	1 amu	$1,6604 \cdot 10^{-27}$ kgr
Ήλεκτρονιοβόλτ	1 eV	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Joule
Άκτινα θεμελιώδους τροχιάς	r_1	$0,529 \cdot 10^{-10}$ m
Μαγνητική διαπερατότητα κενού	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A ²
Διηλεκτρική σταθερή κενού	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Cb ² /(N · m ²)

Μάζες ήρεμίας στοιχειωδών σωματιδίων

Ήλεκτρόνιο m_e	Πρωτόνιο m_p	Νετρόνιο m_n
0,000 548 amu	1,007 825 amu	1,008 665 amu
$9,109 \cdot 10^{-31}$ kgr	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kgr	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ kgr
0,511 MeV	938,26 MeV	939,55 MeV

21	Κόπρος	Cr	51 52 53 54 55 56 57
22	Βανάσιο	V	50 51 52 53 54 55 56
23	Μαγγάνιο	Mn	55 56 57 58 59 60 61
24	Χρυσός	Au	79 80 81 82 83 84 85
25	Σίδηρος	Fe	54 55 56 57 58 59 60
26	Κόβάλτιο	Co	58 59 60 61 62 63 64
27	Νικέλιο	Ni	58 59 60 61 62 63 64
28	Χαλκός	Cu	63 64 65 66 67 68 69
29	Ζαρκότιο	Zn	65 66 67 68 69 70 71
30	Γαλιόβιο	Ga	69 70 71 72 73 74 75

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Οί κυριότερες μονάδες του συστήματος MKSA

Μέγεθος	Μονάδα	
Μήκος	1 μέτρο	1 m
Μάζα	1 χιλιόγραμμα	1 kgr
Χρόνος	1 δευτερόλεπτο	1 sec
Ένταση ρεύματος	1 Ampère	1 A
Δύναμη	1 Newton	1 N = 1 kgr · m/sec ²
Ενέργεια	1 Joule	1 J = 1 N · m
Ίσχύς	1 Watt	1 W = 1 J/sec
Ηλεκτρικό φορτίο	1 Coulomb	1 Cb = 1 A · sec
Δυναμικό	1 Volt	1 V = 1 J/Cb
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου	1 Newton/Cb	1 N/Cb = 1 V/m
Χωρητικότητα	1 Farad	1 F = 1 Cb/V = 1 Cb ² /J
Αντίσταση άγωγού	1 Ohm	1 Ω = 1 V/A
Συντελεστής ατέπαγωγής	1 Henry	1 H = 1 V · sec/A = = 1 J/A ² = 1 Ω · sec
Ποσότητα μαγνητισμού	1 Ampère · m	1 A · m
Μαγνητική ροή	1 Weber	1 Wb = 1 V · sec = 1 J/A
Μαγνητική έπαγωγή	1 Tesla	1 T = 1 N/(A · m) = = 1 Wb/m ²
Μαγνητική ροπή	1 Ampère · m ²	1 A · m ²

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Τά ισότοπα τών 30 πρώτων φυσικῶν στοιχείων

("Όσα σημειώνονται μέ μαῦρα στοιχεῖα εἶναι φυσικά ἢ τεχνητά ραδιοϊσότοπα)

Z	Στοιχεῖο		Μαζικός ἀριθμός A
1	Ύδρογόνο	H	1 2 3
2	Ἡλιο	He	3 4 5 6
3	Λίθιο	Li	6 7 8 9
4	Βηρύλλιο	Be	7 8 9 10
5	Βόριο	B	9 10 11 12
6	Ἀνθρακας	C	10 11 12 13 14
7	Ἀζωτο	N	12 13 14 15 16 17
8	Ὄξυγόνο	O	14 15 16 17 18 19
9	Φθόριο	F	17 18 19 20
10	Νέο	Ne	19 20 21 22 23
11	Νάτριο	Na	21 22 23 24 25
12	Μαγνήσιο	Mg	23 24 25 26 27
13	Ἀργίλιο	Al	25 26 27 28 29
14	Πυρίτιο	Si	27 28 29 30 31
15	Φωσφόρος	P	29 30 31 32 33
16	Θεῖο	S	31 32 33 34 35 36 37
17	Χλώριο	Cl	33 34 35 36 37 38 39
18	Ἀργό	A	35 36 37 38 39 40 41
19	Κάλιο	K	37 38 39 40 41 42 43 44
20	Ἀσβέστιο	Ca	39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49
21	Σκάνδιο	Sc	40 41 43 44 45 46 47 48 49
22	Τιτάνιο	Ti	43 44 45 46 47 48 49 50 51
23	Βανάδιο	V	46 47 48 49 50 51 52
24	Χρόμιο	Cr	49 50 51 52 53 54 55
25	Μαγγάνιο	Mn	50 51 52 53 54 55 56 57
26	Σίδηρος	Fe	52 53 54 55 56 57 58 59
27	Κοβάλτιο	Co	54 55 56 57 58 59 60 61 62
28	Νικέλιο	Ni	57 58 59 60 61 63 63 64 65 66
29	Χαλκός	Cu	58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68
30	Ψευδάργυρος	Zn	62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Ἄρμονικὴ ταλάντωση

Ἄρμονικὴ ταλάντωση μεταλλικῆς σφαίρας. — Μελέτῃ τῆς ἄρμονικῆς ταλαντώσεως. — Ἄπλὸ ἐκκρεμές. — Ἀμείωτῃ καὶ φθίνουσα ταλάντωση. — Προβολὴ πάνω σὲ σταθερὸ ἄξονα ἀνύσματος στρεφόμενου ὀμαλά. — Διαφορά φάσεως μεταξύ δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων. — Ἐλεύθερη καὶ ἐξαναγκασμένη ταλάντωση. — Φυσικὸ ἐκκρεμές.	Σελ. 5
---	-----------

Κύματα

Διάδοση ἐνέργειας μέ κύματα. — Ἐγκάρσια καὶ διαμήκη κύματα. — Μῆκος κύματος καὶ ἐξίσωση τῶν κυμάτων. — Διάδοση τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας μέσα στὴν ὕλη. — Κύματα στό χῶρο καὶ στὴν ἐπιφάνεια ὑγροῦ. — Ἀνάκλαση καὶ διάθλαση τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας. Συμβολὴ τῶν κυμάτων. — Περίθλαση τῶν κυμάτων. — Στάσιμα κύματα.	25
---	----

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Ἡχητικὰ κύματα

Παραγωγή τοῦ ἤχου. — Διάδοση τοῦ ἤχου. — Εἶδη ἤχων. — Ἀνάκλαση τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Διάθλαση τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Περίθλαση τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Συμβολὴ τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Ἔνταση τοῦ ἤχου.	43
---	----

Φυσιολογικὰ χαρακτηριστικὰ τοῦ ἤχου

Φυσιολογικὰ χαρακτηριστικὰ τῶν μουσικῶν ἤχων. — Ὑψος τοῦ ἤχου. — Ἀκουστότητα ἢ ἔνταση τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος. — Χροιά τοῦ ἤχου. — Ὑπέρηχοι.	56
---	----

Πηγές τῶν μουσικῶν ἤχων

Μουσικοὶ ἤχοι. — Χορδές. — Συντονισμός δύο ἠχητικῶν πηγῶν. — Ἀντηχεῖα. — Ἡχητικοὶ σωλήνες.	61
---	----

ΟΠΤΙΚΗ

Κυματικὴ φύση τοῦ φωτός

Φυσικὴ Ὀπτικὴ. — Θεωρία τῆς ἐκπομπῆς. — Θεωρία τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας. — Ἡ φύση τοῦ φωτός. — Συμβολὴ τοῦ φωτός. — Περί-	
--	--

θλαση του φωτός. — Πόλωση του φωτός. 70

Φάσματα έκπομπής και απορροφήσεως

Φάσματα έκπομπής. — Φάσματα απορροφήσεως. — Φωταύγεια. — Τό χρώμα του ουρανού. 82

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Ἐπαγωγικά ρεύματα

Ἐπαγωγή. — Ἐπαγωγικά ρεύματα. — Ἐνταση τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος. — Ἀμοιβαία ἐπαγωγή. — Αὐτεπαγωγή. — Ἐπαγωγικό πηνίο. 89

Ἐναλλασσόμενο ρεύμα

Ἐξισώσεις τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἀποτελέσματα τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἐνεργός ἐνταση ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἐνεργός τάση. — Ὁ νόμος τοῦ Ohm σέ κύκλωμα μέ ὀμική ἀντίσταση. — Μέση ἰσχύς τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Τριφασικό ρεύμα. — Ἡ μεταφορά τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. — Μετασχηματιστής. — Ἀνόρθωση τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἡλεκτρικές μηχανές. 102

Ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων

Ἡ ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων. — Ἡλεκτρικές ἐκκενώσεις μέσα σέ ἀραιωμένα ἀέρια. — Καθοδικές ἀκτίνες. — Θετικές ἀκτίνες. 129

Ἀγωγιμότητα στό κενό

Ἡ ἀγωγιμότητα στό κενό. — Σωλήνας Brawn. — Ἀκτίνες Röntgen. — Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. — Ἡχητικός κινηματογράφος. 140

Ἡλεκτρομαγνητικά κύματα

Ἡλεκτρικές ταλαντώσεις. — Παραγωγή ἠλεκτρικῶν ταλαντώσεων. — Παλλόμενο ἠλεκτρικό δίπολο. — Ἐκπομπή ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. — Ἡλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία. — Ραδιοτηλεπικοινωνίες. — Πομπές ἔρτζιανῶν κυμάτων. — Δέκτης ἔρτζιανῶν κυμάτων. — Διάδοση τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. — Τηλεόραση. 158

ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Εἰσαγωγή

Ἡ θεωρία τῶν κβάντα. — Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας. 177

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ**Τά ηλεκτρόνια του ατόμου**

Ἄτομικὴ θεωρία τοῦ Δημόκριτου. — Μονάδα ατομικῆς μάζας. — Τὸ ἄτομο καὶ ὁ πυρήνας του. — Δομὴ τοῦ ατόμου. 181

Συνθήκες τοῦ Bohr

Στοιχειώδης μελέτη τοῦ ατόμου ὑδρογόνου. — Ἄτομα μὲ πολλά ἠλεκτρόνια. — Περιοδικὸ σύστημα τῶν στοιχείων. 190

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ**Ὁ ατομικὸς πυρήνας**

Πυρηνικὴ Φυσικὴ. — Ἴσότοποι καὶ ἰσοβαρεῖς πυρήνες. — Ἐλλείμμα μάζας καὶ ἐνέργεια συνδέσεως. 198

Φυσικὴ ραδιενέργεια

Ραδιενέργεια. — Φύση τῆς ἀκτινοβολίας τῶν ραδιενεργῶν στοιχείων. — Φυσικὴ μεταστοιχείωση. — Τὸ ποζιτρόνιο. — Ἐξήγηση τῆς ἐκπομπῆς τῶν ἀκτινοβολιῶν. — Νόμος τῆς ραδιενέργειας. — Βιολογικὰ ἀποτελέσματα τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν. — Οἱ σειρές τῶν φυσικῶν ραδιενεργῶν στοιχείων. — Ἡ μελέτη τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν. 202

Πυρηνικὲς ἀντιδράσεις

Πυρηνικὲς ἀντιδράσεις. — Τὰ ὑπερουράνια στοιχεία. — Σχάση τῶν βαριῶν πυρήνων. — Σχάση τοῦ πυρήνα οὐρανίου 235. — Ἀλυσιδωτὴ ἀντίδραση. — Πυρηνικὸς ἀντιδραστήρας. — Ἐφαρμογές τῶν τεχνητῶν ραδιοϊσοτόπων. — Κοσμικὲς ἀκτίνες. 215

Πίνακες

1. Φυσικὲς σταθερές. — 2. Οἱ κυριότερες μονάδες τοῦ συστήματος MKSA. — 3. Τὰ ἰσότοπα τῶν 30 πρώτων φυσικῶν στοιχείων. 233

Αντικείμενο της έρευνας είναι η μελέτη της επίδρασης της αλλαγής του περιβάλλοντος στην ανάπτυξη των μαθητών. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δύο ομάδες μαθητών, μια ομάδα που μετέβη σε ένα νέο περιβάλλον και μια ομάδα που παρέμεινε στο παλιό περιβάλλον. Η έρευνα διήρκεσε έξι μήνες και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.



ΕΡΕΥΝΑ - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ - ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ - ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ - ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

«Τά αντίτυπα τοῦ βιβλίου φέρουν τό κάτωθι βιβλιόσημο γιά ἀπόδειξη τῆς γνησιότητος αὐτῶν.

Ἐπίσημο στερούμενο τοῦ βιβλιοσήμου τοῦτου θεωρεῖται κλεψίτυπο. Ὁ διαθέτων, πωλῶν ἢ χρησιμοποιοῦν αὐτό διώκεται κατά τίς διατάξεις τοῦ ἄρθρου 7 τοῦ Νόμου 1129 τῆς 15/21 Μαρτίου 1946 (Ἐφ. Κυβ. 1946, Α' 108)».



024000019668

ΕΚΔΟΣΗ Κ', ΚΑ', 1980 (VI) - ΑΝΤΙΤΥΠΑ 100.000 ΣΥΜΒΑΣΗ 3430/23.5.80

ΕΚΤΥΠΩΣΗ - ΒΙΒΛΙΟΔΕΣΙΑ: «ΤΥΠΟΕΚΔΟΤΙΚΗ» Ε.Π.Ε.

