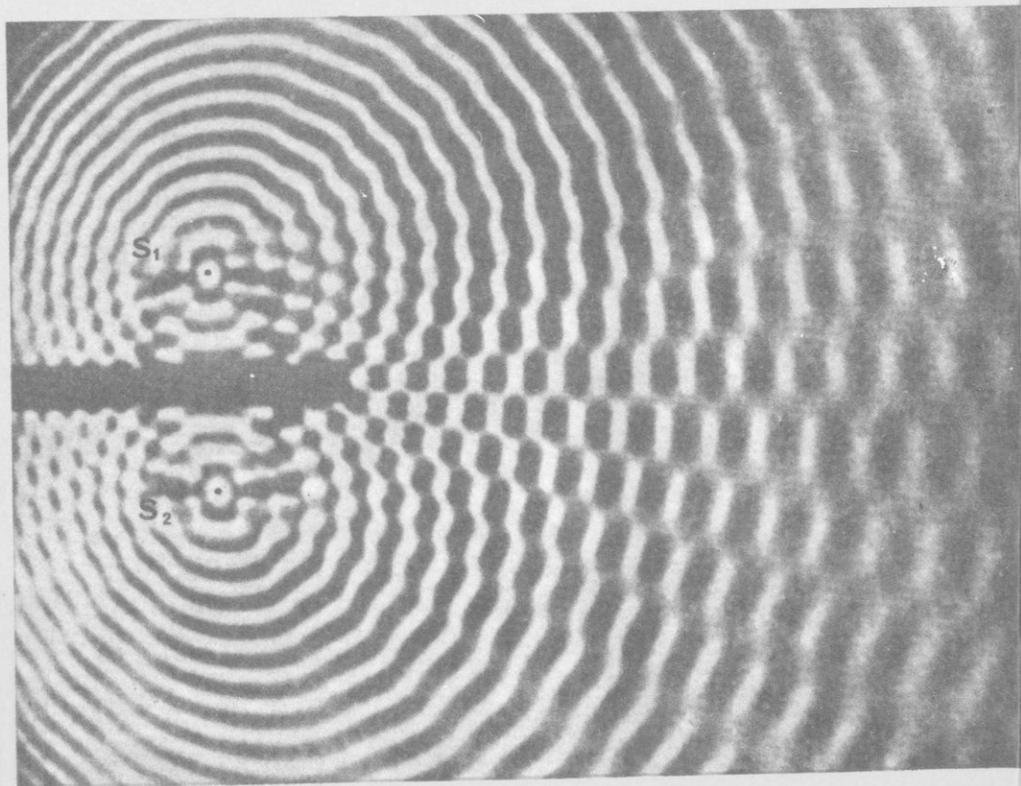


ΑΛΚΙΝΟΟΥ Ε. ΜΑΖΗ

ΦΥΣΙΚΗ

Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ ΑΘΗΝΑ 1978

Handwritten notes and a circular stamp at the top of the page.

ΦΥΣΙΚΗ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Τ. ΛΥΚΕΙΟΥ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1978

~~Handwritten signature or scribble~~

Με απόφαση της Ελληνικής Κυβερνήσεως τα δι-
δακτικά βιβλία του Δημοτικού, Γυμνασίου και Λυ-
κείου ταξινομήθηκαν από τον Οργανισμό Εκδόσεως
Διδακτικών Βιβλίων και μορφοποιήθηκαν ΔΩΡΕΑΝ.

Αρμονική ταλάντωση

1. Αρμονική ταλάντωση μεταλλικής σφαίρας

ΦΥΣΙΚΗ

Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

Μία μεταλλική σφαίρα είναι κρεμασμένη από τον κεντρικό άξονα του επιτροχίλιου και μπορεί να μετακινηθεί από τη 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 εθδόμεμη κίνηση, που ονομάζεται αρμονική ταλάντωση. Η σφαίρα απομακρύνεται συμμετρικά από τη θέση της ισορροπίας της. Η μέγιστη απομάκρυνση της σφαίρας από τη θέση ισορροπίας ονομάζεται πλάτος της ταλάντωσης ($AB = AG = a$). Απτή η κίνηση της σφαίρας οφείλεται στη συνισταμένη F του βάρους της σφαίρας και της τάσης του ελατηρίου. Σε κάθε στιγμή η δύναμη F είναι να επαναφέρει τη σφαίρα στη θέση ισορροπίας της.

2. Μελέτη της αρμονικής ταλάντωσης

⊙ Ορισμός: Η αρμονική ταλάντωση είναι μία κίνηση ειδικής μορφής, που προκύπτει από την ομαλή κυκλική κίνηση ως εξής: Όταν ένα υλικό σημείο M (σχ. 2) κινείται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα (ω) πάνω σε περιφέρεια κύκλου που έχει ακτίνα a , τότε η προβολή A του κινητού M πάνω στη διάμετρο $\Delta\Delta$ εκτελεί αρμονική ταλάντωση, που έχει πλάτος a και περίοδο T , ίση με την περίοδο της κίνησης του κινητού M .



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΘΗΝΑ 1978

ΑΛΚΙΝΟΥ Ε. ΜΑΣΗ

ΦΥΣΙΚΗ

Τ. ΛΥΚΕΙΟΥ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ
ΑΘΗΝΑ 1978

Μηχανική

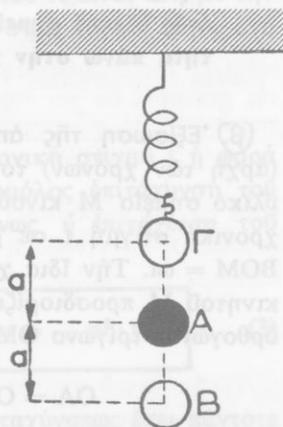
Άρμονική ταλάντωση

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 τό βάρος της σφαίρας. Φέρνουμε τη σφαίρα στη θέση Β και την αφήνουμε ελεύθερη. Παρατηρούμε ότι η σφαίρα εκτελεί μιά *περιοδική εθθύγραμμη κίνηση*, πού ονομάζεται *άρμονική ταλάντωση*. Η σφαίρα απομακρύνεται συμμετρικά από τη θέση της ισορροπίας της. Η μέγιστη απομάκρυνση της σφαίρας από τη θέση ισορροπίας της Α ονομάζεται *πλάτος της ταλαντώσεως* ($AB = AG = a$). Αυτή η κίνηση της σφαίρας οφείλεται στη συνισταμένη F του βάρους της σφαίρας και της τάσεως του ελατηρίου. Σέ κάθε στιγμή η δύναμη F τείνει νά επαναφέρει τη σφαίρα στη θέση ισορροπίας της.

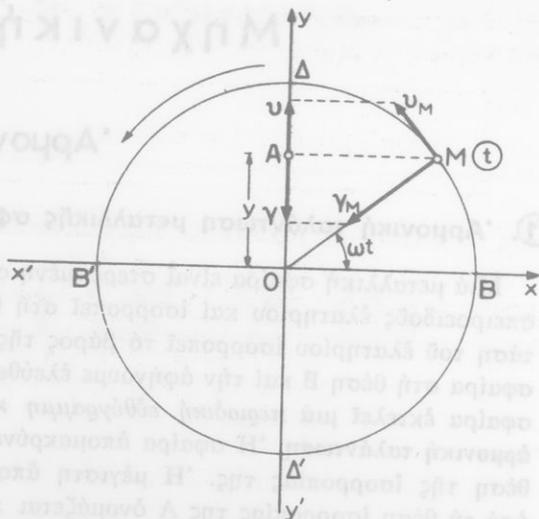
2. Μελέτη της άρμονικής ταλαντώσεως

α. Όρισμός. Η άρμονική ταλάντωση είναι μιά κίνηση ειδικής μορφής, πού προκύπτει από την όμαλή κυκλική κίνηση ως εξής: Όταν ένα ύλικό σημείο M (σχ. 2) κινείται μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα (ω) πάνω σέ περιφέρεια κύκλου πού έχει ακτίνα a , τότε η προβολή A του κινητού M πάνω στη διάμετρο $\Delta\Delta$ εκτελεί *άρμονική ταλάντωση*, πού έχει πλάτος a και περίοδο T , ίση μέ την περίοδο της κινήσεως του κινητού M . Στη διάρκεια μιās περιόδου T τό κινητό A διατρέχει δύο φορές τη διάμετρο $\Delta\Delta$. Ός αρχή των διαστημάτων



Σχ. 1. Η σφαίρα εκτελεί άρμονική ταλάντωση.

παίρνουμε τό σημείο O , δηλαδή τή μέση θέση ισορροπίας του κινητού A . Σέ μιá χρονική στιγμή t ή απόσταση του κινητού A από τό σημείο O είναι $OA = y$. Ἡ απόσταση αὐτή (y) ὀνομάζεται ἀπομάκρυνση του κινητού A κατά τή χρονική στιγμή t . Ἀπό τά παραπάνω ἔχουμε τόν ἑξῆς ὄρισμό:



Σχ. 2. Γιά τήν εὑρεση τῶν ἐξισώσεων τῆς ἁρμονικῆς ταλαντώσεως

Ἄρμονικὴ ταλάντωση ὀνομάζεται ἡ κί-

νηση πού ἐκτελεῖ πάνω στή διάμετρο του κύκλου ἡ προβολή ἑνός ὕλικου σημείου, πού κινεῖται μέ σταθερὴ γωνιακὴ ταχύτητα πάνω στήν περιφέρεια του κύκλου.

(β). Ἐξίσωση τῆς ἀπομακρύνσεως. Στή χρονική στιγμή $t = 0$ (ἀρχὴ τῶν χρόνων) τό ὕλικό σημείο M βρίσκεται στή θέση B . Τό ὕλικό σημείο M κινούμενο μέ γωνιακὴ ταχύτητα ω βρίσκεται τή χρονική στιγμή t σέ μιὰ θέση πού προσδιορίζεται ἀπὸ τὴ γωνία $BOM = \omega t$. Τὴν ἴδια χρονική στιγμή ἡ θέση τῆς προβολῆς A του κινητοῦ M προσδιορίζεται ἀπὸ τὴν ἀπομάκρυνση $OA = y$. Ἀπὸ τό ὀρθογώνιο τρίγωνο OMA βρίσκουμε ὅτι εἶναι :

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

Τό μέγεθος ωt ὀνομάζεται φάση τῆς κινήσεως του κινητοῦ A . Τό μέγεθος ω ὀνομάζεται κυκλικὴ συχνότητα του κινητοῦ A καὶ εἶναι ἴση μέ $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$, ὅπου T καὶ ν εἶναι ἀντίστοιχα ἡ περίοδος

καί ἡ συχνότητα τῆς κινήσεως τοῦ κινητοῦ Α. Ἄρα ἡ ἀπομάκρυνση τοῦ κινητοῦ Α δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

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

Ⓞ. Ἐξίσωση τῆς ταχύτητας. Ἀποδεικνύεται ὅτι σέ κάθε χρονική στιγμή ἡ ταχύτητα (v) τοῦ κινητοῦ Α εἶναι ἴση μέ τήν προβολή τῆς ταχύτητας (v_M) τοῦ ὕλικου σημείου Μ πάνω στή διάμετρο Δ'Δ. Ἄρα εἶναι:

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

Ἐπειδή εἶναι $v_M = a\omega$, βρίσκουμε ὅτι ἡ ταχύτητα τοῦ κινητοῦ Α δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

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

Ⓞ. Ἐξίσωση τῆς ἐπιταχύνσεως. Ἀποδεικνύεται ἐπίσης ὅτι σέ κάθε χρονική στιγμή ἡ ἐπιτάχυνση (γ) τοῦ κινητοῦ Α εἶναι ἴση μέ τήν προβολή τῆς ἐπιταχύνσεως (γ_M) τοῦ ὕλικου σημείου Μ πάνω στή διάμετρο Δ'Δ. Ἄρα εἶναι:

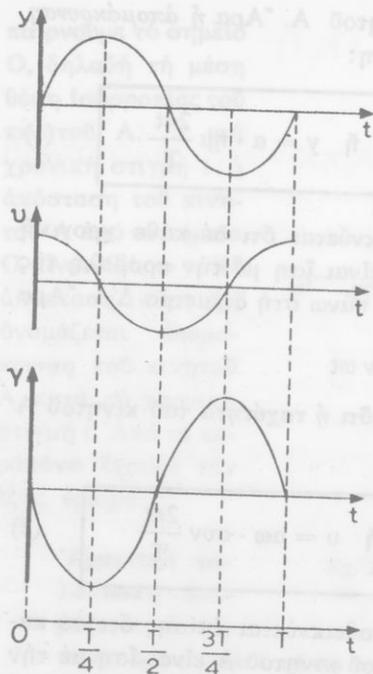
$$\gamma = -\gamma_M \cdot \eta\mu \omega t$$

Τό ἀρνητικό σημεῖο φανερώνει ὅτι τή χρονική στιγμή t ἡ φορά τοῦ ἀνύσματος γ εἶναι ἀρνητική. Ἡ κεντρομόλος ἐπιτάχυνση τοῦ ὕλικου σημείου Μ εἶναι $\gamma_M = a\omega^2$. Ἐπομένως ἡ ἐπιτάχυνση τοῦ κινητοῦ Α δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

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

γιατί εἶναι $y = a \cdot \eta\mu \omega t$. Τό ἀνυσμα $\vec{\gamma}$ τῆς ἐπιταχύνσεως ἔχει πάντοτε φορά πρὸς τή μέση Ο τῆς διαδρομῆς τοῦ κινητοῦ Α.

Ἡ μεταβολή τῆς ἀπομακρύνσεως (y), τῆς ταχύτητας (v) καί τῆς ἐπιταχύνσεως (γ) τοῦ κινητοῦ Α σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο (t) παρι-



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

σπάνονται γραφικά από την αντίστοιχη καμπύλη του σχήματος 3. Παρατηρούμε ότι η μεταβολή της απομάκρυνσης (y) παριστάνεται από μία ήμιτονοειδή καμπύλη (σχ. 3α) και γι' αυτό η άρμονική ταλάντωση ονομάζεται και *ήμιτονοειδής κίνηση*.

Ⓔ. Έξισωση της δύναμης. Το κινητό Α έχει μάζα m και σε κάθε στιγμή έχει επιτάχυνση $\vec{\gamma}$. Άρα κάθε στιγμή στο κινητό Α ενεργεί μία δύναμη \vec{F} που έχει τή διεύθυνση και τή φορά της επιταχύνσεως $\vec{\gamma}$ και μέτρο $F = m \cdot \gamma$. Ωστε στο κινητό Α συνεχώς ενεργεί η δύναμη F , που το μέτρο της δίνεται από την εξίσωση:

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

Τό άνυσμα \vec{F} της δύναμης έχει πάντοτε φορά προς τή μέση Ο τής διαδρομής του κινητού Α και ονομάζεται *δύναμη επαναφοράς*, γιατί σε κάθε στιγμή προσπαθεί νά ξαναφέρει τό κινητό Α στη θέση ισορροπίας Ο. Τό γινόμενο $m \cdot \omega^2$ είναι σταθερό και πάντοτε θετικό. Αν λάβουμε $f = m \cdot \omega^2$, τότε η εξίσωση (4) γράφεται και ως εξής:

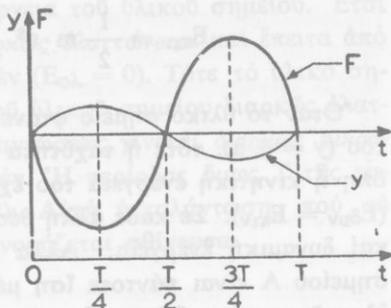
$$F = -f \cdot y \quad (5)$$

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 τής κινήσεως κατ' απόλυτη τιμή είναι ίση με τό πηλίκο $f = F/y$, ονομάζεται *σταθερή επαναφοράς* και εκφράζει τή δύναμη που ενεργεί στο κινητό, όταν η 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 η περίοδος τής αρμονικής ταλαντώσεως του κινητού A δίνεται από τήν εξίσωση:

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



Σχ. 4. Ήμιτονοειδής μεταβολή τής δυνάμεως επαναφορής F σε συνάρτηση με τό χρόνο. Σε κάθε στιγμή ή δύναμη F και ή απομάκρυνση y είναι έτερόσημες.

Ⓒ Διερεύνηση τών εξισώσεων τής αρμονικής ταλαντώσεως. *Ας θεωρήσουμε τīs χρονικές στιγμές $0, T/4, T/2, 3T/4$ και T . *Αν στίς εξισώσεις τής αρμονικής ταλαντώσεως αντικαταστήσουμε τό t με τīs παραπάνω τιμές του χρόνου, τότε εύκολα σχηματίζουμε έναν πίνακα πού δείχνει ποιά είναι ή μέγιστη τιμή πού λαβαίνει τό κάθε μέγεθος και μέσα σε ποιά όρια μεταβάλλεται τό κάθε μέγεθος στή διάρκεια μιās περιόδου. *Ο πίνακας πού σχηματίζουμε είναι ό εξής:

Χρόνος t	Φάση ωt	*Απομάκρυνση y	Ταχύτητα v	*Επιτάχυνση γ	Δύναμη F
0	0	0	$a\omega$	0	0
$T/4$	$\pi/2$	a	0	$-a\omega^2$	$-ma\omega^2$
$T/2$	π	0	$-a\omega$	0	0
$3T/4$	$3\pi/2$	$-a$	0	$a\omega^2$	$ma\omega^2$
T	2π	0	$a\omega$	0	0

η. *Ενέργεια του ύλικου σημείου. *Όταν τό ύλικό σημείο A περνάει από τή θέση τής Ισοροπίας του ($y = 0$), τότε ή ταχύτητά του έχει τή μέγιστη απόλυτη τιμή $v = a\omega$ (βλ. πίνακα). *Εκείνη τή στιγμή τό ύλικό σημείο A έχει τή μέγιστη κινητική ενέργεια:

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

Όταν τὸ ὄλικό σημεῖο φτάνει στὶς ἀκραίες θέσεις τῆς διαδρομῆς του ($y = \pm a$), τότε ἡ ταχύτητά του εἶναι ἴση μὲ μηδέν ($v = 0$) καὶ ὅλη ἡ κινητικὴ ἐνέργειά του ἔχει μετατραπῆ σὲ *δυναμικὴ ἐνέργεια* ($E_{\text{δυν}} = E_{\text{κιν}}$). Σὲ κάθε ἄλλη θέση τὸ ὄλικό σημεῖο Α ἔχει κινητικὴ καὶ δυναμικὴ ἐνέργεια. Ἀλλὰ ἡ *ὄλική ἐνέργεια* ($E_{\text{ολ}}$) τοῦ ὄλικοῦ σημείου Α εἶναι πάντοτε ἴση μὲ τὴ μέγιστη κινητικὴ ἐνέργεια τοῦ ὄλικοῦ σημείου. Ὡστε εἶναι:

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

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

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

Ἀπὸ τὰ παραπάνω καταλήγουμε στὸ ἀκόλουθο συμπέρασμα:

Ἡ ὄλική ἐνέργεια ἑνὸς ὄλικοῦ σημείου ποῦ ἐκτελεῖ ἄρμονικὴ ταλάντωση διατηρεῖται σταθερὴ σὲ ὅλη τὴ διαδρομὴ τοῦ ὄλικοῦ σημείου καὶ εἶναι ἀνάλογη μὲ τὴ σταθερὴ ἐπιτάχυνση (f) καὶ μὲ τὸ τετράγωνο τοῦ πλάτους (a) τῆς ταλαντώσεως.

③ Ἀμείωτη καὶ φθίνουσα ταλάντωση

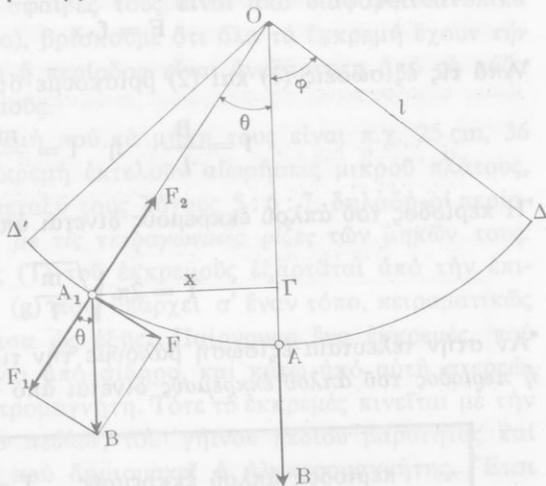
Όταν ἓνα ὄλικό σημεῖο ἐκτελεῖ ἄρμονικὴ ταλάντωση ποῦ ἔχει πλάτος a καὶ περίοδο T , τότε ἡ ὄλική ἐνέργειά του διατηρεῖται *σταθερὴ* καὶ ἴση μὲ $E_{\text{ολ}} = \frac{1}{2} f \cdot a^2$. Τὸ πλάτος a τῆς ταλαντώσεως διατηρεῖται *σταθερό* καὶ γι' αὐτὸ ἡ ταλάντωση ὀνομάζεται τότε *ἀμείωτη*. Ἀλλὰ στὴν πραγματικότητα κατὰ τὴν κίνηση τοῦ ὄλικοῦ σημείου ἐνεργοῦν διάφορες ἀντιστάσεις, ποῦ στὴ διάρκειά μιᾶς περιόδου

ἀπορροφούν ένα μέρος από την ενέργεια του υλικού σημείου. Έτσι η ενέργεια του υλικού σημείου *διαρκώς* ελαττώνεται και έπειτα από ορισμένο χρόνο γίνεται ίση με μηδέν ($E_{ολ} = 0$). Τότε το υλικό σημείο σταματά. Έπειδή η ενέργεια του υλικού σημείου *διαρκώς* ελαττώνεται, γι' αυτό το πλάτος της ταλαντώσεως γίνεται *διαρκώς* μικρότερο και τελικά γίνεται ίσο με μηδέν. Η περίοδος όμως T της ταλαντώσεως διατηρείται *σταθερή* (*). Αυτή η ταλάντωση, που το πλάτος της *διαρκώς* ελαττώνεται, ονομάζεται **φθίνουσα**.

④. Άπλο έκκρεμές

Το *άπλο έκκρεμές* είναι μία ιδανική διάταξη και αποτελείται από μία μικρή σφαίρα (υλικό σημείο) δεμένη στην άκρη ενός νήματος. Η άλλη άκρη του νήματος είναι έτσι στερεωμένη, ώστε το νήμα μπορεί να στρέφεται χωρίς τριβή γύρω από οριζόντιο άξονα O (σχ. 5). Το νήμα έχει ασημαντή μάζα σχετικά με τη μάζα m της σφαίρας. Το μήκος $OA = l$ ονομάζεται *μήκος* του έκκρεμοϋς. Απομακρύνουμε το έκκρεμές από τη θέση ισορροπίας κατά γωνία φ και το αφήνουμε ελεύθερο. Το έκκρεμές εκτελεί μία σειρά *αιωρήσεων*. Η γωνία φ ονομάζεται *πλάτος* της αιωρήσεως.

Σε μία οποιαδήποτε θέση αναλύουμε το βάρος $B = m \cdot g$ της σφαίρας στις δύο συνιστώσες F και F_1 . Από αυτές η συνιστώσα F_1 είναι αντίθετη με την τάση F_2 του νήματος, ενώ η συνιστώσα F , που έχει τη διεύθυνση της εφαπτομένης της



Σχ. 5. Άπλο έκκρεμές

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

τροχιᾶς, κινεῖ τὸ ὑλικὸ σημεῖο καὶ προσπαθεῖ νὰ τὸ ξαναφέρει στὴ θέση ἰσορροπίας του, δηλαδή εἶναι *δύναμη ἐπαναφορᾶς*. Ἀπὸ τὰ ὅμοια τρίγωνα $OA_1\Gamma$ καὶ A_1BF βρίσκουμε τὴ 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 μικρὴ* (2° ὡς 3°), τότε μπορούμε νὰ θεωρήσουμε ὅτι ἡ ἀπόσταση x καὶ τὸ τόξο A_1A συμπίπτουν. Σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση ἡ ἐξίσωση (1) δείχνει ὅτι ἡ δύναμη ἐπαναφορᾶς F εἶναι ἀνάλογη μὲ τὴν ἀπομάκρυνση x τοῦ ὑλικοῦ σημείου ἀπὸ τὴ θέση ἰσορροπίας του A . Ἔτσι καταλήγουμε στὸ ἀκόλουθο συμπέρασμα:

Ὅταν τὸ πλάτος αἰωρήσεως τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς εἶναι πολύ μικρὸ, τότε ἡ κίνηση τοῦ ἐκκρεμοῦς εἶναι κατὰ μεγάλη προσέγγιση ἄρμονικὴ ταλάντωση.

Ἐπομένως ἡ δύναμη ἐπαναφορᾶς (F) κατ' ἀπόλυτη τιμὴ δίνεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

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

Ἀπὸ τὶς ἐξισώσεις (1) καὶ (2) βρίσκουμε ὅτι εἶναι:

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

Ἡ περίοδος τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς δίνεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

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

Ἄν στὴν τελευταία ἐξίσωση βάλουμε τὴν τιμὴ τοῦ f , βρίσκουμε ὅτι ἡ περίοδος τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς δίνεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

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

α. Νόμος τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς. Ἀπὸ τὴν ἐξίσωση (3) συνάγεται ὁ ἐξῆς νόμος τοῦ ἐκκρεμοῦς:

Όταν τὸ πλάτος αἰωρήσεως εἶναι μικρὸ, τότε ἡ περίοδος (T) τοῦ ἔκκρεμοῦς: α) εἶναι σταθερὴ καὶ ἀνεξάρτητη ἀπὸ τῆς μάζας καὶ τὸ ὕλικό τοῦ ἔκκρεμοῦς καὶ β) εἶναι ἀνάλογη μὲ τὴν τετραγωνικὴ ρίζα τοῦ μήκους (l) τοῦ ἔκκρεμοῦς καὶ ἀντιστρόφως ἀνάλογη μὲ τὴν τετραγωνικὴ ρίζα τῆς ἐπιταχύνσεως τῆς βαρύτητας (g).

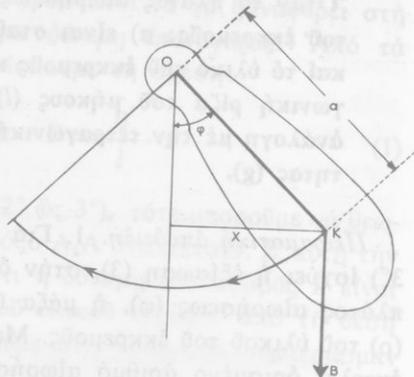
Πειραματικὴ ἀπόδειξη. 1. Γιά τίς αἰωρήσεις μικροῦ πλάτους (ὡς 3°) ἰσχύει ἡ ἐξίσωση (3), στήν ὁποία βλέπουμε ὅτι δέν ὑπάρχει τὸ πλάτος αἰωρήσεως (φ), ἡ μάζα (m) τοῦ ἔκκρεμοῦς ἢ ἡ πυκνότητα (ρ) τοῦ ὕλικοῦ τοῦ ἔκκρεμοῦς. Μετράμε σέ πόσο χρόνο τὸ ἔκκρεμὸς ἐκτελεῖ ὀρισμένο ἀριθμὸ αἰωρήσεων (π.χ. 10 αἰωρήσεις), ὅταν τὸ πλάτος εἶναι 3° καὶ βρίσκουμε τὴ διάρκεια (T) μιᾶς αἰωρήσεως. Ἐπαναλάβουμε τὸ πείραμα, ὅταν τὸ πλάτος αἰωρήσεως εἶναι 2° ἢ 1°, βρίσκουμε ὅτι ἡ περίοδος (T) τοῦ ἔκκρεμοῦς εἶναι σταθερὴ καὶ ἀνεξάρτητη ἀπὸ τὸ πλάτος αἰωρήσεως.

2. Ἐάν χρησιμοποιήσουμε πολλὰ ἔκκρεμῆ, πού ἔχουν τὸ ἴδιο μήκος (l), ἀλλὰ οἱ μικρὲς σφαῖρες τους εἶναι ἀπὸ διαφορετικὰ ὕλικά (π.χ. μολύβι, χαλκὸ, ξύλο), βρίσκουμε ὅτι ὅλα τὰ ἔκκρεμῆ ἔχουν τὴν ἴδια περίοδο (T), δηλαδή ἡ περίοδος εἶναι ἀνεξάρτητη ἀπὸ τῆς μάζας καὶ τὸ ὕλικό τοῦ ἔκκρεμοῦς.

3. Ἐχομε τρία ἔκκρεμῆ πού τὰ μήκη τους εἶναι π.χ. 25 cm, 36 cm, 49 cm. Ὅταν τὰ ἔκκρεμῆ ἐκτελοῦν αἰωρήσεις μικροῦ πλάτους, οἱ περίοδοί τους ἔχουν μεταξύ τους λόγους 5 : 6 : 7, δηλαδή οἱ περίοδοί τους εἶναι ἀνάλογες μὲ τίς τετραγωνικὲς ρίζες τῶν μηκῶν τους.

4. Τὸ ὅτι ἡ περίοδος (T) τοῦ ἔκκρεμοῦς ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν ἐπιτάχυνση τῆς βαρύτητας (g) πού ὑπάρχει σ' ἕναν τόπο, πειραματικῶς τὸ ἐπιβεβαιώνουμε ἔμμεσα ὡς ἑξῆς: Παίρνουμε ἕνα ἔκκρεμὸς, πού ἡ μικρὴ σφαῖρα του εἶναι ἀπὸ σίδηρο, καὶ κάτω ἀπὸ αὐτὴ στερεώνουμε ἕναν ἰσχυρὸ ἠλεκτρομαγνήτη. Τότε τὸ ἔκκρεμὸς κινεῖται μὲ τὴν ἐπίδραση δύο δυναμικῶν πεδίων, τοῦ γήινου πεδίου βαρύτητας καὶ τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου πού δημιουργεῖ ὁ ἠλεκτρομαγνήτης. Ἐτσι προκαλοῦμε μιὰ «φαινομενικὴ αὔξηση» τοῦ βάρους (B) τῆς σφαίρας. Αὐτὴ ἡ αὔξηση ἰσοδυναμεῖ μὲ «φαινομενικὴ αὔξηση» τῆς τιμῆς τοῦ g. Μὲ αὐτὸ τὸν τρόπο ἐπαληθεύουμε πειραματικῶς τὴ σχέση πού ὑπάρχει μεταξύ τῶν μεγεθῶν T καὶ g, σύμφωνα μὲ τὴν ἐξίσωση τῆς

περιόδου του έκκρεμοϋς. Ἀλλά ἡ σχέση αὐτή ἐπαληθεύεται καί ἀπό τό γεγονός ὅτι τό ἴδιο ἐκκρεμές, ὅταν μεταφέρεται ἀπό τόν ἕναν τόπο στόν ἄλλο, ἡ περίοδος του (T) μεταβάλλεται, γιατί ἡ ἐπιτάχυνση τῆς βαρύτητας (g) δέν εἶναι ἡ ἴδια σέ ὁλοὺς τοὺς τόπους.



5) Φυσικό ἐκκρεμές

Ὄνομάζεται *φυσικό ἐκκρεμές* κάθε στερεό σῶμα πού μπορεῖ νά στρέφεται γύρω ἀπό ὀριζόντιο ἄξονα πού δέν περνάει ἀπό τό κέντρο βάρους τοῦ σώματος (σχ. 6). Ἀπομακρύνουμε τό σῶμα ἀπό τή θέση ἰσορροπίας του καί ἔπειτα τό ἀφήνουμε ἐλεύθερο. Τότε τό βάρος B τοῦ σώματος δημιουργεῖ *ροπή ἐπαναφορᾶς* ($M = B \cdot x$) καί τό σῶμα ἀρχίζει νά ἐκτελεῖ αἰωρήσεις. Αὐτή ἡ κίνηση τοῦ στερεοῦ σώματος ὀνομάζεται *στροφική ταλάντωση*. Ἡ ροπή ἐπαναφορᾶς (M) μεταβάλλεται περιοδικά σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο (*).

Σχ. 6. Φυσικό ἐκκρεμές

Τό σῶμα ἔχει μάζα m , ροπή ἀδράνειας Θ ὡς πρός τόν ἄξονα περιστροφῆς καί ἡ ἀπόσταση τοῦ κέντρου βάρους τοῦ σώματος ἀπό τόν ἄξονα περιστροφῆς εἶναι a . Ἀποδεικνύεται ὅτι ἡ *περίοδος* (T) τοῦ *φυσικοῦ ἐκκρεμοῦς* δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

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

Ⓐ Ἰσόχρονο ἀπλό ἐκκρεμές. Τά ἐκκρεμή πού χρησιμοποιοῦμε εἶναι φυσικά ἐκκρεμή, πού εὐκόλα ὅμως ἀνάγονται σέ ἀπλά ἐκκρεμή. Ἐνα φυσικό ἐκκρεμές ἔχει περίοδο T , πού ὀρίζεται ἀπό τήν ἐξίσωση

(*) Εἶναι $M = B \cdot x$ ἢ $M = B \cdot a \cdot \eta \mu \varphi$, ὅπου ἡ γωνία φ μεταβάλλεται περιοδικά σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο.

(1). Ένα άπλο εκκρεμές που έχει τήν ίδια περίοδο T με τό φυσικό εκκρεμές έχει μήκος l και ισχύει ή εξίσωση:

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

Άπό τίς εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε ότι τό μήκος l του άπλου εκκρεμοϋς που είναι ισόχρονο με τό φυσικό εκκρεμές είναι:

$$\text{μήκος ισόχρονου άπλου εκκρεμοϋς} \quad l = \frac{\Theta}{m \cdot a}$$

β. Έφαρμογές του εκκρεμοϋς. Έπειδή οι αιωρήσεις μικροϋ πλάτους είναι ισόχρονες, γι' αυτό χρησιμοποιούμε τό εκκρεμές γιά τή μέτρηση του χρόνου (ρολόγια με εκκρεμή). Έξαιτίας των αντίστάσεων τό πλάτος τής αιωρήσεως διαρκώς ελαττώνεται (φθίνουσα ταλάντωση) και έπειτα από λίγο χρόνο τό εκκρεμές σταματά. Γιά νά διατηρήσουμε σταθερό τό πλάτος τής αιωρήσεως, φροντίζουμε με έναν κατάλληλο μηχανισμό (συνήθως με ελατήριο) νά δίνουμε στό εκκρεμές τήν ενέργεια που χάνει μέσα σε κάθε περίοδο εξαιτίας των αντίστάσεων.

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

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

Μόνο με αυτή τή μέθοδο βρίσκουμε τήν ακριβή 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

$$g = 9,83 \text{ m/sec}^2$$

Παρατήρηση. Στα συνηθισμένα χρονόμετρα (ρολόγια) υπάρχει ειδικό σύστημα, που ονομάζεται αιωρητής και εκτελεί στροφική ταλάντωση (σχ. 7). Σε ένα ισχυρό σπειροειδές ελατήριο αποταμιεύεται με τό κούρδισμα δυναμική ενέργεια, που

προσφέρεται ρυθμικά στον αιώρητή, για να διατηρεί σταθερό τό πλάτος τής ταλαντώσεώς του. Στα παλιά χρονόμετρα μέ εκκρεμές, για τή διατήρηση τών αιωρήσεων του εκκρεμοῦς, ὑπῆρχε ἕνα σῶμα πού ρυθμικά ἔπεφε λίγο πιό κάτω (σχ. 8). Ἔτσι ἡ ἀποταμιευμένη στό σῶμα δυναμική ἐνέργεια ἀναπλήρωνε τήν ἐνέργεια πού ἔχανε τό εκκρεμές ἔξαιτίας τών ἀντιστάσεων.



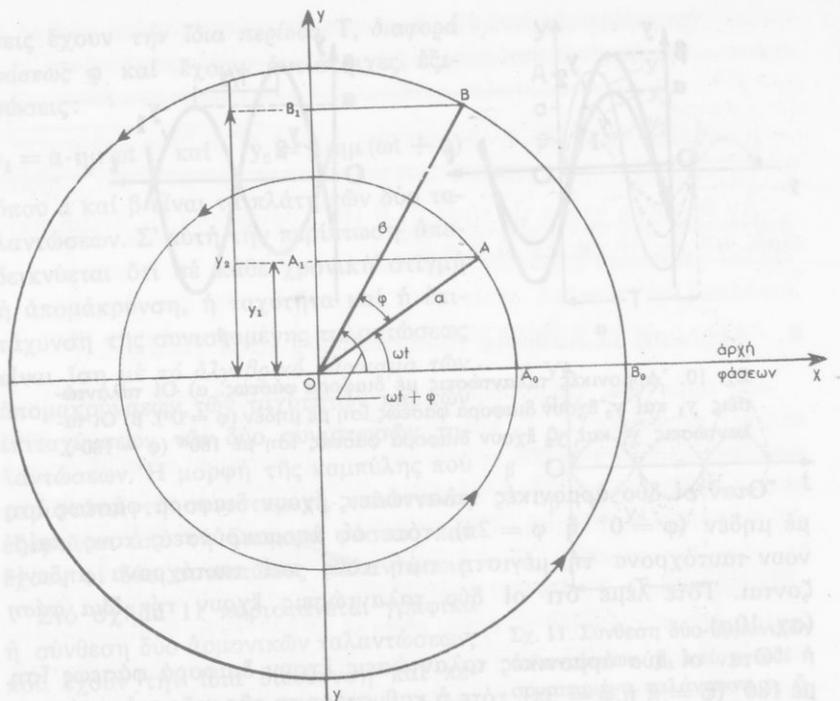
Σχ. 7. Ὁ αιώρητής του ρολογιού ἔκτελεϊ στροφική ταλάντωση.



Σχ. 8. Τό βάρος κατεβαίνει ρυθμικά μέσα σέ κάθε περίοδο καί ἔτσι δίνει ἐνέργεια στό εκκρεμές.

6 Διαφορά φάσεως μεταξύ δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων

Θεωροῦμε δύο ὑλικά σημεῖα A καί B (σχ. 9) πού κινοῦνται μέ τήν ἴδια σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω πάνω σέ δύο ὁμόκεντρες περιφέρειες, πού οἱ ἀκτίνες τους ἀντίστοιχα εἶναι α καί β . Ἐπομένως ἡ κίνηση τῶν δύο ὑλικῶν σημεῖων A καί B ἔχει τήν ἴδια περίοδο T (γιατί εἶναι $\omega = 2\pi/T$). Τότε οἱ προβολές A_1 καί B_1 τῶν δύο ὑλικῶν σημεῖων A καί B πάνω στόν ἄξονα $y'y$ ἔκτελοῦν ἄρμονική ταλάντωση μέ ἀντίστοιχο πλάτος α καί β , ἀλλά μέ τήν ἴδια περίοδο T . Θεωροῦμε ὅτι τή χρονική στιγμή $t = 0$ πρῶτο ξεκινάει ἀπό τή θέση B_0 τό ὑλικό σημεῖο B καί ἔπειτα ἀπό ὀρισμένο χρόνο ξεκινάει ἀπό τή θέση A_0 τό ὑλικό σημεῖο A. Σέ μιά χρονική στιγμή t ἡ θέση τοῦ ὑλικοῦ σημεῖου A πάνω στήν τροχιά του προσδιορίζεται ἀπό τή γωνία $\angle A_0OA = \omega t$ καί τοῦ ὑλικοῦ σημεῖου B ἀπό τή γωνία $\angle B_0OB = \omega t + \varphi$. Ἡ γωνία φ ὀνομάζεται **διαφορά φάσεως** τῶν δύο κινήσεων καί διατηρεῖται σταθερή. Τήν ἴδια χρονική στιγμή t οἱ ἀπομακρύνσεις τῶν δύο ἄρμονι-

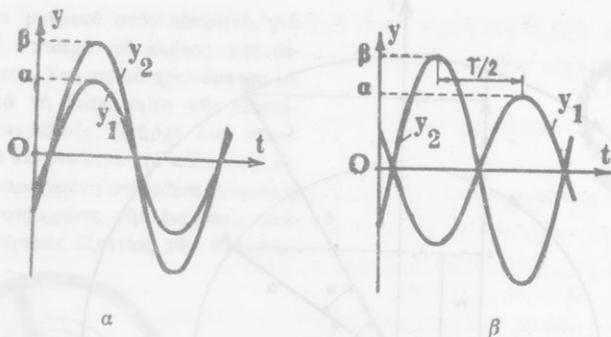


Σχ. 9. Οι κινήσεις των υλικών σημείων A και B έχουν διαφορά φάσεως φ . Ίδια διαφορά φάσεως έχουν και οι κινήσεις των υλικών σημείων A_1 και B_1 .

κών ταλαντώσεων πάνω στον άξονα $y'y$ βρίσκονται εύκολα από τα αντίστοιχα ορθογώνια τρίγωνα (OAA_1 και OBB_1) και προσδιορίζονται από τις εξισώσεις:

$$y_1 = a \cdot \eta\mu \omega t \quad (1) \quad y_2 = \beta \cdot \eta\mu (\omega t + \varphi) \quad (2)$$

όπου φ είναι η διαφορά φάσεως μεταξύ των δύο αρμονικών ταλαντώσεων. Η διαφορά φάσεως φ φανερώνει ότι, αν στή μιá ταλάντωση ή απομάκρυνση παίρνει τή μέγιστη τιμή της $y_2 = \beta$, στήν άλλη ταλάντωση ή απομάκρυνση παίρνει τή μέγιστη τιμή της $y_1 = a$ μέ καθυστέρηση ίση μέ τό χρόνο τ , πού χρειάζεται τό υλικό σημείο A για νά διατρέξει τό τόξο πού αντιστοιχεί στή γωνία φ (δηλαδή είναι $\tau = \varphi/\omega$).



Σχ. 10. Ἄρμονικες ταλαντώσεις με διαφορά φάσεως. α) Οἱ ταλαντώσεις y_1 καὶ y_2 ἔχουν διαφορά φάσεως ἴση με μηδέν ($\varphi = 0^\circ$). β) Οἱ ταλαντώσεις y_1 καὶ y_2 ἔχουν διαφορά φάσεως ἴση με 180° ($\varphi = 180^\circ$).

Ὄταν οἱ δύο ἄρμονικες ταλαντώσεις ἔχουν διαφορά φάσεως ἴση με μηδέν ($\varphi = 0^\circ$ ἢ $\varphi = 2\pi$), τότε οἱ ἀπομακρύνσεις τους παίρνουν ταυτόχρονα τὴ μέγιστη τιμὴ τους καὶ ταυτόχρονα μηδενίζονται. Τότε λέμε ὅτι οἱ δύο ταλαντώσεις ἔχουν τὴν ἴδια φάση (σχ. 10α).

Ὄταν οἱ δύο ἄρμονικες ταλαντώσεις ἔχουν διαφορά φάσεως ἴση με 180° ($\varphi = \pi$ ἢ $\varphi = 3\pi$), τότε ἡ καθυστέρηση τῆς μιᾶς ταλαντώσεως σχετικά με τὴν ἄλλη εἶναι ἴση με μισή περίοδο ($\tau = T/2$). Τότε λέμε ὅτι οἱ δύο ταλαντώσεις ἔχουν ἀντίθετη φάση, γιατί ἡ ἀπομάκρυνση τῆς μιᾶς ταλαντώσεως παίρνει τὴ μέγιστη τιμὴ της, ὅταν ἡ ἀπομάκρυνση τῆς ἄλλης ταλαντώσεως παίρνει τὴν ἐλάχιστη τιμὴ της καὶ ἀντίστροφα. Οἱ δύο ὁμως ἀπομακρύνσεις ταυτόχρονα μηδενίζονται (σχ. 10β).

7) Σύνθεση δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων με τὴν ἴδια περίοδο

Σε πολλές περιπτώσεις ἓνα ὑλικό σημεῖο με τὴν ἐπίδραση δύο ἢ περισσότερων αἰτιῶν ἀναγκάζεται νὰ ἐκτελέσει ταυτόχρονα δύο ἢ περισσότερες ἄρμονικες ταλαντώσεις. Τότε τὸ ὑλικό σημεῖο ἐκτελεῖ μιὰ *συνισταμένη κίνηση*. Θὰ ἐξετάσουμε τὴν πιὸ ἀπλή περίπτωση, δηλαδή ὅταν ἓνα ὑλικό σημεῖο ἐκτελεῖ ταυτόχρονα δύο ἄρμονικες ταλαντώσεις πάνω στὴν ἴδια εὐθεῖα καὶ οἱ δύο συνιστώσες ταλαντώ-

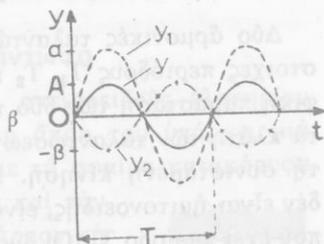
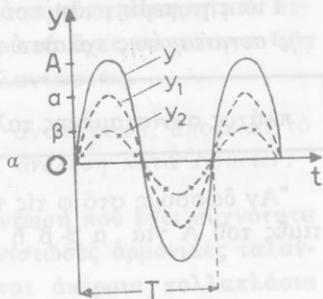
σεις έχουν την ίδια περίοδο T , διαφορά φάσεως φ και έχουν αντίστοιχες εξισώσεις:

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

όπου a και β είναι τά πλάτη των δύο ταλαντώσεων. Σ' αυτή την περίπτωση αποδεικνύεται ότι σε κάθε χρονική στιγμή ή απομάκρυνση, ή ταχύτητα και ή επιτάχυνση της συνισταμένης ταλαντώσεως είναι ίση με τό αλγεβρικό άθροισμα των απομακρύνσεων, των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων των δύο συνιστωσών ταλαντώσεων. Η μορφή της καμπύλης που παριστάνει τή συνισταμένη ταλάντωση εξαρτάται από τή διαφορά φάσεως που έχουν οι δύο συνιστώσες ταλαντώσεις.

Στό σχήμα 11 παριστάνεται γραφικά ή σύνθεση δύο άρμονικων ταλαντώσεων, που έχουν τήν ίδια διεύθυνση και περίοδο (T). Η συνισταμένη κίνηση είναι και αυτή άρμονική ταλάντωση με τήν ίδια περίοδο (T). Τό πλάτος A τής συνισταμένης άρμονικής ταλάντωσης εξαρτάται από τά πλάτη a και β των συνιστωσών ταλαντώσεων και από τή διαφορά φάσεως φ . Όταν είναι $\varphi = 0^\circ$, τότε τό πλάτος A είναι $A = a + \beta$, και όταν είναι $\varphi = 180^\circ$, τότε τό πλάτος A είναι: $A = a - \beta$. Αν τά πλάτη των συνιστωσών ταλαντώσεων είναι ίσα, τότε για $\varphi = 0^\circ$ τό πλάτος A είναι $A = 2a$ και για $\varphi = 180^\circ$ τό πλάτος A είναι $A = 0$. Στήν τελευταία περίπτωση ($\varphi = 180^\circ$) τό ύλικό σημείο μένει ακίνητο. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στό ακόλουθο συμπέρασμα:

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



Σχ. 11. Σύνθεση δύο άρμονικων ταλαντώσεων y_1 και y_2 και ή συνισταμένη ταλάντωση y , όταν είναι α) $\varphi = 0$ και β) $\varphi = \pi$.

Γιά τήν περίπτωση πού εξετάσαμε αποδεικνύεται ότι τό πλάτος A τής συνισταμένης ταλαντώσεως δίνεται από τήν εξίσωση:

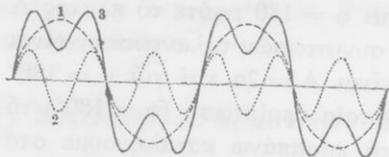
$$\text{πλάτος συνισταμένης ταλαντώσεως } A = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + 2\alpha\beta \cdot \text{συν } \varphi}$$

*Αν δώσουμε στό φ τίς τιμές 0° ή 180° , βρίσκουμε τίς αντίστοιχες τιμές του A γιά $\alpha > \beta$ ή $\alpha = \beta$.

8. 'Ανάλυση περιοδικής ταλαντώσεως κατά Fourier

Δύο ἄρμονικές ταλαντώσεις (μέ τήν ἴδια διεύθυνση) ἔχουν ἀντίστοιχες περιόδους T_1, T_2 καί εἶναι $T_1 = 2T_2$ (σχ. 12). *Αν στή γραφική παράσταση τῶν δύο ταλαντώσεων προσθέσουμε σέ κάθε στιγμή τά πλάτη τῶν ταλαντώσεων, βρίσκουμε τήν καμπύλη πού παριστάνει τή συνισταμένη κίνηση. Παρατηροῦμε ὅτι ἡ συνισταμένη κίνηση δέν εἶναι ἡμιτονοειδής, εἶναι ὁμως μία *περιοδική κίνηση* (ταλάντωση) πού ἔχει περίοδο T_1 . Οἱ δύο συνιστώσες ἄρμονικές ταλαντώσεις ἔχουν ἀντίστοιχα συχνότητες ν_1, ν_2 καί εἶναι $\nu_2 = 2\nu_1$. *Ὡστε ἡ συνισταμένη περιοδική κίνηση ἔχει συχνότητα ν_1 , δηλαδή *τή μικρότερη* ἀπό τίς συχνότητες τῶν συνιστωσῶν ἄρμονικῶν ταλαντώσεων.

*Αν ἔχουμε πολλές ἄρμονικές ταλαντώσεις, πού οἱ συχνότητές τους εἶναι *ἀκέραια πολλαπλάσια* μιᾶς συχνότητας, δηλαδή ἂν εἶναι $\nu, 2\nu, 3\nu, 4\nu, \dots$ τότε ἡ ταλάντωση μέ *τή μικρότερη* συχνότητα ν ὀνομάζεται *θεμελιώδης* (ἢ *πρώτη ἄρμονική*), ἐνῶ αἱ ταλαντώσεις μέ τίς συχνότητες $2\nu, 3\nu, \dots$ ὀνομάζονται ἀντίστοιχα *δύετη ἄρμονική, τρίτη ἄρμονική* κλπ.



Σχ. 12. Ἡ συνισταμένη κίνηση 3 τῶν δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων 1 καί 2 εἶναι περιοδική, ἀλλά ὄχι ἡμιτονοειδής.

Τό ἀποτέλεσμα πού βρήκαμε ἀπό τή σύνθεση τῶν δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων μέ τίς συχνότητες ν_1 καί $2\nu_1$ εἶναι γενικό καί διατυπώνεται ὡς ἑξῆς:

**Ἀπό τή σύνθεση ἄρμονικῶν ταλαντώσεων, πού οἱ συχνότητές τους εἶναι ἀκέραια πολλαπλάσια τής συχνότητας μιᾶς θεμελιώ-*

δους ταλαντώσεως, προκύπτει ως συνισταμένη κίνηση μιά περιοδική μή ήμιτονοειδής ταλάντωση, πού έχει συχνότητα ίση μέ τή συχνότητα τής θεμελιώδους ταλαντώσεως.

Τό συμπέρασμα αυτό άν διατυπωθεί αντίστροφα, αποτελεί τό *θεώρημα του Fourier*, πού ονομάζεται καί *ανάλυση κατά Fourier*:

Μιά περιοδική μή ήμιτονοειδής ταλάντωση πού έχει συχνότητα ν , μπορεί νά αναλυθεί sé πολλές συνιστώσες άρμονικές ταλαντώσεις, πού οί συχνότητές τους είναι άκέραια πολλαπλάσια τής συχνότητας (ν) μιās θεμελιώδους ταλαντώσεως.

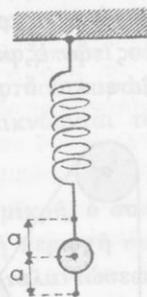
9) Έλεύθερη καί έξαναγκασμένη ταλάντωση

α. Έλεύθερη ταλάντωση. Ή μιά άκρη σπειροειδούς ελατηρίου είναι σταθερά στερεωμένη, ενώ στήν άλλη άκρη του ύπάρχει μιά μεταλλική σφαίρα (σχ. 13). Απομακρύνουμε τή σφαίρα κατακόρυφα πρós τά κάτω από τή θέση ίσορροπίας της καί τήν αφήνουμε έλεύθερη. Ή σφαίρα εκτελεί άρμονική ταλάντωση. Ή συχνότητα ν_0 τής ταλαντώσεως είναι *σταθερή* καί ονομάζεται *ιδιοσυχνότητα* του παλλόμενου συστήματος «σφαίρα - ελατήριο».

Όταν απομακρύνουμε τή σφαίρα από τή θέση ίσορροπίας της, τό παλλόμενο σύστημα αποκτά ένα απόθεμα *δυναμικής ενέργειας*. Τό σύστημα, όταν τό αφήσουμε έλεύθερο, κινείται ώσπου νά έξαντληθεί τό άρχικό απόθεμα τής δυναμικής ενέργειας, εξαιτίας των αντίστίσεων πού δημιουργεί τό έξωτερικό περιβάλλον. Σ' ατή τήν περίπτωση λέμε ότι τό παλλόμενο σύστημα εκτελεί *έλεύθερη ταλάντωση*. Ωστε :

Ένα παλλόμενο σύστημα, όταν πάρει απέξω μιά άρχική ενέργεια, εκτελεί έλεύθερη ταλάντωση μέ τή χαρακτηριστική γιά τό σύστημα αυτό *ιδιοσυχνότητα* (ν_0).

β. Έξαναγκασμένη ταλάντωση. Δένουμε τό ελατήριο στή μιά άκρη νήματος καί τήν άλλη άκρη του νήματος τή στερεώνουμε sé

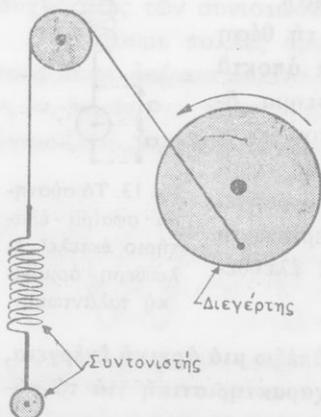


Σχ. 13. Τό σύστημα σφαίρα - ελατήριο εκτελεί έλεύθερη άρμονική ταλάντωση.

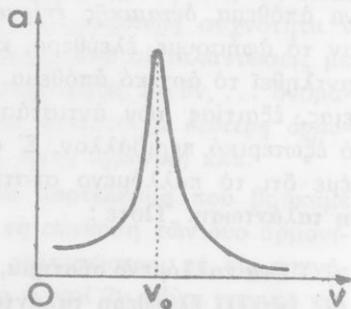
έναν τροχό (σχ. 14). Όταν στρέφουμε τόν τροχό, τότε στό παλλόμενο σύστημα (έλατήριο - σφαίρα) περιοδικά εξασκεΐται μιά *έξωτερική δύναμη* μέ συχνότητα ν πού είναι ίση μέ τή συχνότητα περιστροφής τού τροχού. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι τό παλλόμενο σύστημα έκτελεί *έξαναγκασμένη ταλάντωση*. Ο στρεφόμενος τροχός, πού διεγείρει τό παλλόμενο σύστημα πρός κίνηση, ονομάζεται *διεγέρτης* καί τό σύστημα πού διεγείρεται πρός κίνηση ονομάζεται *συντονιστής*. Ωστε:

Ένα παλλόμενο σύστημα (συντονιστής) πού έχει ιδιοσυχνότητα ν_0 , μπορεί νά έκτελέσει καί *έξαναγκασμένη ταλάντωση* μέ συχνότητα ν ίση μέ τή συχνότητα πού έχει κάθε φορά ό διεγέρτης.

(γ) **Συντονισμός.** Όταν ή συχνότητα ν τού διεγέρτη (στρεφόμενος τροχός) διαφέρει πολύ από τήν ιδιοσυχνότητα ν_0 τού συντονιστή (παλλόμενο σύστημα), τό πλάτος τής *έξαναγκασμένης ταλαντώσεως* είναι *πολύ μικρό*. Αν όμως ή συχνότητα ν τού διεγέρτη συνεχώς πλησιάζει πρός τήν ιδιοσυχνότητα ν_0 τού συντονιστή, τότε τό πλάτος τών *έξαναγκασμένων ταλαντώσεων* τού συντονιστή *συνεχώς αύξάνει* καί όταν ή συχνότητα ν τού διεγέρτη γίνει *ίση μέ τήν ιδιοσυχνότητα* ν_0 τού συντονιστή, τό πλάτος τής *έξαναγκασμένης ταλαντώσεως* τού συντο-



Σχ. 14. Τό σύστημα σφαίρα - έλατήριο έκτελεί *έξαναγκασμένη ταλάντωση*.



Σχ. 15. Μεταβολή τού πλάτους a τής *έξαναγκασμένης ταλαντώσεως* σέ συνάρτηση μέ τή συχνότητα ν .

νιστή γίνεται μέγιστο. Τότε λέμε ότι ο διεγέρτης και ο συντονιστής βρίσκονται σε συντονισμό. Αν η συχνότητα ν του διεγέρτη παίρνει τιμές συνεχώς μεγαλύτερες από την ιδιοσυχνότητα ν_0 του συντονιστή, το πλάτος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης συνεχώς ελαττώνεται. Η μεταβολή του πλάτους (a) της εξαναγκασμένης ταλάντωσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα (ν) του διεγέρτη δείχνεται από την καμπύλη συντονισμού (σχ. 15). Παρατηρούμε ότι η καμπύλη συντονισμού παρουσιάζει αιχμή, όταν υπάρχει συντονισμός ($\nu = \nu_0$). Ωστε:

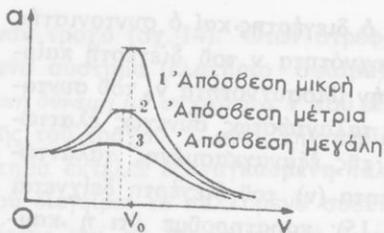
Μεταξύ του διεγέρτη και του συντονιστή υπάρχει συντονισμός, όταν η συχνότητα ν του διεγέρτη είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα ν_0 του συντονιστή. τότε το πλάτος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης του συντονιστή παίρνει τη μέγιστη τιμή του.

Επίδραση της απόσβεσης του συντονιστή. Όταν ο συντονιστής (παλλόμενο σύστημα) εκτελεί την εξαναγκασμένη ταλάντωση, πάντοτε συμβαίνει απόσβεση της ταλάντωσης, που οφείλεται στην απώλεια ενέργειας εξαιτίας των αντιστάσεων. Η απόσβεση μπορεί να συμβαίνει γρήγορα ή αργά, ανάλογα με τις αντιστάσεις που παρουσιάζει το εξωτερικό περιβάλλον. Πειραματικώς αποδεικνύονται τα ακόλουθα:

- I. Όταν η απόσβεση του συντονιστή είναι πολύ μικρή, ο συντονιστής διεγείρεται μόνο από μία πολύ μικρή περιοχή συχνοτήτων και το πλάτος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης είναι πολύ μεγάλο (δξύς συντονισμός).
- II. Όταν η απόσβεση του συντονιστή είναι πολύ μεγάλη, ο συντονιστής διεγείρεται και εκτελεί εξαναγκασμένες ταλαντώσεις μικρού πλάτους, οποιαδήποτε κι' αν είναι η συχνότητα ν του διεγέρτη (σχ. 16).

Εφαρμογές του συντονισμού. Αναφέρουμε μερικά παραδείγματα συντονισμού:

1) Για να διατηρήσει η κούνια μεγάλο πλάτος αιώρησης, δίνουμε περιοδικά στην κούνια ώθήσεις με συχνότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα της κούνιας.



Σχ. 16. Η καμπύλη συντονισμού, δ-
ταν η απόσβεση του συντονιστή εί-
ναι μικρή (1), μέτρια (2) ή μεγάλη (3).

2) Πάνω στις γέφυρες οι πολυάνθρωποι σχηματισμοί (π.χ. στρατός, σχολεία) ποτέ δέν βαδίζουν ρυθμικά, γιατί η γέφυρα έχει όρισμένη ιδιοσυχνότητα και, αν η συχνότητα των ώθησεων που δέχεται η γέφυρα μέ τό ρυθμικό βηματισμό γίνεται ίση μέ τήν ιδιοσυχνότητα τής γέφυρας, τότε τό πλάτος τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως πού έκτελεί η γέφυρα

αυξάνει πολύ και μπορεί να συμβεί καταστροφή τής γέφυρας.

3) Στη ναυπηγική φροντίζουμε η ιδιοσυχνότητα του σκάφους να είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συχνότητα του κυματισμού της θάλασσας, για να αποφεύγεται ο μεγάλος κλυδωνισμός του σκάφους.

4) Στη βιομηχανία για τη μέτρηση συχνοτήτων χρησιμοποιούμε τα *συχρόμετρα*, που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο του συντονισμού.

5) Συντονιστές με πολύ μεγάλη απόσβεση είναι το 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 ταλαντώσεως είναι μικρό, αλλά είναι σχεδόν ανεξάρτητο από τη συχνότητα του διεγέρτη (σχ. 16).

Παρατήρηση. Τα 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*).

δ. Σύζευξη παλλόμενων συστημάτων. Ένα παλλόμενο σύστημα (συντονιστής) μπορεί να έκτελέσει εξαναγκασμένη ταλάντωση, αν ο διεγέρτης δώσει σ' αυτό τό σύστημα τήν απαιτούμενη ενέργεια. Δύο έκκρεμή Α και Β στερεώνονται σε ένα νήμα πού είναι τεντωμένο όριζόντια (σχ. 17). Τά δύο έκκρεμή έχουν τό ίδιο μήκος, επομένως έχουν και τήν ίδια ιδιοσυχνότητα ν_0 . Τά δύο έκκρεμή συνδέονται μεταξύ τους μέ νήμα πού τεντώνεται μέ ένα βάρος. Αν αναγκάσουμε

τό εκκρεμές A να εκτελεί ταλάντωση, τότε τό εκκρεμές αυτό κατά τήν κίνησή του εξασκεί στό άλλο εκκρεμές *δυνάμεις*. Λέμε ότι μεταξύ τών δύο παλλόμενων συστημάτων υπάρχει *σύζευξη*. Παρατηρούμε ότι καί τό εκκρεμές B αρχίζει νά εκτελεί ταλάντωση καί έρχεται μιά στιγμή πού τό πλάτος τού εκκρεμοϋς B γίνεται μέγιστο, ενώ τό εκκρεμές A μένει ακίνητο. Τότε όλη ή ενέργεια τού εκκρεμοϋς A έχει μεταδοθεί στό εκκρεμές B. Έπειτα από ατή τή στιγμή αρχίζει τό αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή τό εκκρεμές B αρχίζει νά παρασύρει σέ κίνηση τό εκκρεμές A κ.ο.κ. Ωστε:



Σχ. 17. Σύζευξη δύο εκκρεμών μέ τήν Γ-δια ιδιοσυχνότητα

Όταν μεταξύ δύο παλλόμενων συστημάτων, πού βρίσκονται σέ συντονισμό, υπάρχει σύζευξη, τότε όλη ή ενέργεια τού ενός συστήματος (τού διεγέρτη) μεταδίνεται στό άλλο σύστημα (τού συντονιστή).

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

α. Αρμονική ταλάντωση

1. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση πού έχει πλάτος 20 cm καί περίοδο 2 sec. Νά βρεθοϋν: 1) ή μέγιστη ταχύτητα πού άποκτá τό ύλικό σημείο· 2) ή άπομάκρυνσή του κατά τή χρονική στιγμή $t = 0,25$ sec καί ή ταχύτητα καί ή επιτάχυνσή του ατή τή στιγμή.

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

3. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση καί σέ μιά στιγμή ή άπομάκρυνσή του είναι 1 m καί ή επιτάχυνση είναι 4 cm/sec². Πόση είναι ή περίοδος;

4. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση πού έχει πλάτος 10 cm καί περίοδο 0,6 sec. Πόση είναι ή ταχύτητά του κατά τή στιγμή $t = 0,525$ sec;

5. Νά βρεθεί ή περίοδος τής άρμονικής ταλαντώσεως ενός ύλικού σημείου πού έχει επιτάχυνση 64 cm/sec^2 , όταν ή άπομάκρυνσή του είναι 16 cm .

6. Νά άποδειχτεί ότι στην άρμονική ταλάντωση ισχύει ή εξίσωση

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

7. Ένα ύλικό σημείο έκτελει άρμονική ταλάντωση πού έχει πλάτος 5 cm και περίοδο 2 sec . Νά γραφούν οι εξισώσεις τής άπομακρύνσεως, τής ταχύτητας και τής επιταχύνσεως.

8. Ένα ύλικό σημείο έκτελει άρμονική ταλάντωση πού έχει εξίσωση $y = 5 \cdot \eta\mu 10t$. Νά βρεθεί ή περίοδος και ή συχνότητα τής ταλαντώσεως.

9. Ένα ύλικό σημείο έχει μάζα $0,1 \text{ kg}$ και έκτελει άρμονική ταλάντωση πού έχει πλάτος $0,05 \text{ m}$ και περίοδο 2 sec . Νά βρεθεί ή δύναμη πού ενεργεί στό ύλικό σημείο, όταν ή άπομάκρυνση είναι $0,02 \text{ m}$.

10. Ένα ύλικό σημείο έχει μάζα $0,002 \text{ kg}$ και έκτελει άρμονική ταλάντωση πού έχει πλάτος $0,05 \text{ m}$ και συχνότητα 10 Hz . Νά βρεθεί ή μέγιστη τιμή πού έχει ή δύναμη έπαναφοράς και πόση είναι κατ' άπόλυτη τιμή ή δύναμη αυτή, όταν ή άπομάκρυνση είναι $0,01 \text{ m}$.

11. Ένα ύλικό σημείο έχει μάζα $2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ και έκτελει άρμονική ταλάντωση πού έχει πλάτος $0,05 \text{ m}$ και συχνότητα 10 Hz . 1) Πόση είναι ή μέγιστη κινητική ενέργεια πού άποκτά τό ύλικό σημείο; 2) Η ταχύτητα σε συνάρτηση με τήν άπομάκρυνση δίνεται άπό τήν εξίσωση $v = \omega \sqrt{a^2 - y^2}$. Πόση είναι ή κινητική και ή δυναμική ενέργεια του ύλικού σημείου, όταν ή άπομάκρυνσή του είναι $0,03 \text{ m}$;

β. Έκκρεμές

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

13. Ένα άπλό έκκρεμές έκτελει 60 αιώρήσεις κατά λεπτό. Κατά πόσα έκατοστόμετρα πρέπει νά έλαττωθεί τό μήκος του, γιά νά έκτελει 90 αιώρήσεις κατά λεπτό;

14. Ένα άπλό έκκρεμές έχει μήκος 98 cm και περίοδο 2 sec . Πόση είναι ή τιμή του g στον τόπο πού βρίσκεται τό έκκρεμές;

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

16. Ένα άπλό εκκρεμές 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 εκκρεμοϋ στον ισημερινό ($g_{\text{ισ}} = 978 \text{ cm/sec}^2$) και στον πόλο ($g_{\text{πολ}} = 983 \text{ cm/sec}^2$);

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

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

19. Μιά όμογενής μεταλλική ράβδος έχει μήκος $L = 90 \text{ cm}$ και αιωρείται ως φυσικό εκκρεμές γύρω από όριζόντιο άξονα που απέχει 15 cm από τήν άνωτερη άκρη τής ράβδου. Η ροπή αδράνειας Θ τής ράβδου ως προς τόν άξονα περιστροφής δίνεται από τήν εξίσωση:

$$\Theta = \frac{1}{12} mL^2 + ma^2, \text{ όπου } m \text{ είναι η μάζα τής ράβδου και } a \text{ η από-}$$

σταση του κέντρου βάρους της από τόν άξονα περιστροφής. 1) Πόση είναι η περίοδος αυτού του φυσικού εκκρεμοϋ; 2) Πόσο είναι τό μήκος του άπλου ισόχρονου εκκρεμοϋ; $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$.

20. Ένα φυσικό εκκρεμές αποτελείται από ισόπλευρο τρίγωνο ΑΒΓ, που έχει άσήμαντη μάζα και πλευρά 10 cm. Τό εκκρεμές αιωρείται γύρω από όριζόντιο άξονα που περνάει από τήν κορυφή Α και είναι κάθετος στο επίπεδο του τριγώνου. Σε καθεμία από τίς άλλες δύο κορυφές του τριγώνου είναι στερεωμένη μία μάζα m . Πόση είναι η περίοδος; Πόσο είναι τό μήκος του ισόχρονου άπλου εκκρεμοϋ;

21. Μιά σφαίρα έχει μάζα m , ακτίνα R και αιωρείται γύρω από όριζόντιο άξονα, που είναι έφαπτόμενος τής σφαίρας. Η ροπή αδράνειας Θ τής σφαίρας ως προς τόν άξονα περιστροφής είναι

$$\Theta = \frac{7}{5} mR^2. \text{ Πόση είναι η περίοδος και πόσο είναι τό μήκος του}$$

ισόχρονου άπλου εκκρεμοϋ;

γ. Σύνθεση ταλαντώσεων

22. Ένα ύλικό σημείο εκτελεί ταυτόχρονα δύο άρμονικές ταλαντώσεις, που έχουν τό ίδιο πλάτος $a = 10 \text{ cm}$, τήν ίδια περίοδο και

διαφορά φάσεως φ . Τό πλάτος A τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση $A = 2a \cdot \sigma\upsilon\upsilon \frac{\varphi}{2}$. 1) Νά βρεθοῦν οἱ τιμές πού

παίρνει τό πλάτος A τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως, ὅταν ἡ διαφορά φάσεως φ παίρνει τίς τιμές $0, \pi/2, 2\pi/3$ καί π . 2) Γιά ποιά τιμή τοῦ φ τό πλάτος A τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως εἶναι ἴσο μέ $a\sqrt{3}$;

23. Δύο ἄρμονικές ταλαντώσεις ἔχουν τήν ἴδια περίοδο καί ἀντίστοιχο πλάτος $\alpha = 2$ cm καί $\beta = 3$ cm. Ἡ διαφορά φάσεως εἶναι $\varphi = 60^\circ$. Πόσο εἶναι τό πλάτος τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως;

24. Δύο ἄρμονικές ταλαντώσεις ἔχουν τήν ἴδια περίοδο καί ἀντίστοιχο πλάτος $\alpha = 3$ cm καί $\beta = 5$ cm. Ἡ συνισταμένη ταλάντωση ἔχει πλάτος $A = 6$ cm. Πόση εἶναι ἡ διαφορά φάσεως μεταξύ τῶν δύο συνιστωσῶν κινήσεως;

25. Ἐνα ἀπλό ἐκκρεμές ἔχει μήκος $l = 60$ cm καί βρίσκεται σέ ἕναν τόπο, ὅπου εἶναι $g = 980$ cm/sec². Πόση εἶναι ἡ συχνότητα πού διεγείρει τό ἐκκρεμές, ὥστε νά ὑπάρχει συντονισμός;

Κύματα

10. Διάδοση ἐνέργειας μέ κύματα

Σέ ἕνα στερεό ἐλαστικό σῶμα ὅλα τά ὑλικά σημεῖα του, δηλαδή τά μόριά του, εἶναι ὅμοια μεταξύ τους καί καθένα ἀπό αὐτά συνδέεται μέ ὅλα τά γύρω του μόρια μέ ἐλαστικές δυνάμεις. Ἄν ἕνα μόριο A τοῦ σώματος ἐκτελεῖ ἄρμονική ταλάντωση μέ συχνότητα ν , τότε, ἐξαιτίας τῶν συνδέσμων πού ὑπάρχουν, ὅλα τά μόρια γύρω ἀπό τό μόριο A ἀναγκάζονται νά ἐκτελέσουν τήν ἴδια ἄρμονική ταλάντωση πού ἐκτελεῖ καί τό μόριο A . Καθένα ἀπό αὐτά τά μόρια ἀναγκάζει τά γειτονικά του μόρια νά κινηθοῦν καί ἔτσι μέσα στό ἐλαστικό σῶμα συμβαίνει διάδοση μιᾶς ταλαντώσεως ἀπό τό ἕνα μόριο, στό ἄλλο. Ἄλλά κατά τή διάδοση αὐτή μεταφέρεται ἐνέργεια ἀπό τό ἕνα στό ἄλλο μόριο τοῦ σώματος. Ὄταν μέσα στό ἐλαστικό μέσο συμβαίνει μετάδοση ἐνέργειας ἀπό τό ἕνα στό ἄλλο μόριο μέ τέτοιο τρόπο, τότε λέμε ὅτι μέσα στό ἐλαστικό σῶμα διαδίδεται κύμα. Ἡ πιό σημαντική κατηγορία κυμάτων εἶναι τά ἄρμονικά ἢ ἡμιτονοειδή κύ-

ματα, στά όποια όλα τά σημεΐα τοΰ έλαστικού μέσου έκτελοΰν άρ-
μονική ταλάντωση συχνότητας ν . Από τά παραπάνω καταλήγουμε
στό έξής συμπέρασμα:

**Κύμα ονομάζουμε τό μηχανισμό διαδόσεως μιΰς ταλαντώσεως
μέσα σέ ένα έλαστικό μέσο και μέ αυτό τόν τρόπο γίνεται μετα-
φορά ενέργειας από τό ένα στό άλλο σημείο τοΰ έλαστικού μέσου.**

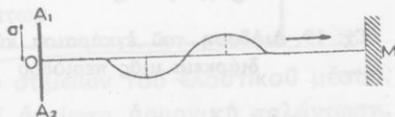
11. Έγκάρσια κύματα

Τή μιΰ άκρη μακριΰς χορδής από καουτσούκ τή στερεώνουμε
σταθερά και τήν άλλη άκρη τήν κρατάμε μέ τό χέρι μας (σχ. 18).

Τεντώνουμε έλαφρά τή χορδή και
γρήγορα αναγκάζουμε τήν άκρη
Ο τής χορδής νά έκτελέσει για μιΰ
μόνο φορά τή διαδρομή OA_1A_2O .

Παρατηρούμε ότι κατά μήκος τής
χορδής διαδίδεται μιΰ κυματοειδής

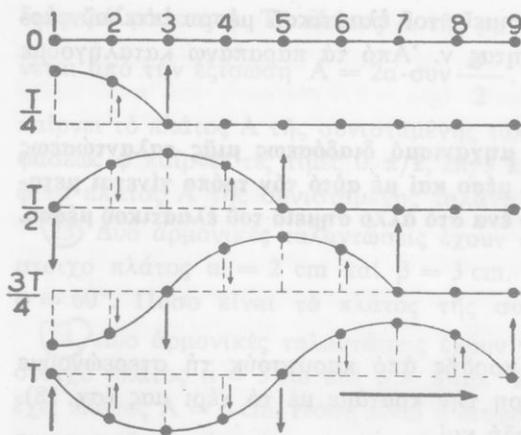
έλαστική παραμόρφωση. Αυτό συμβαίνει, γιατί τά μόρια τής χορδής,
έξαιτίας τών έλαστικών συνδέσεων πού υπάρχουν, αναγκάζονται νά
έκτελέσουν *διαδοχικά* τήν ίδια κίνηση πού έκαμε τό σημείο Ο. Ωστε
κατά μήκος τής χορδής διαδίδεται ένα *κύμα*. Η διατάραξη προχωρεί
κατά μήκος τής χορδής μέ *ορισμένη ταχύτητα* (ν). Κάθε μόριο τής
χορδής κινείται *κάθετα* στή διεύθυνση διαδόσεως τοΰ κύματος. Σ'
αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι κατά μήκος τής χορδής διαδίδεται
έγκάρσιο κύμα. Ωστε:



Σχ. 18. Διάδοση έγκάρσιου κύματος

**Στά έγκάρσια κύματα τά μόρια τοΰ έλαστικού μέσου κινούνται
κάθετα στή διεύθυνση διαδόσεως τοΰ κύματος.**

α) Μήκος κύματος. Θεωρούμε μιΰ σειρά μορίων τοΰ γραμμικού
έλαστικού μέσου, πού άρχικά ίσορροποΰν πάνω σέ μιΰ εϋθεία γραμμή
(σχ. 19). Έπειδή τά μόρια κάθε σώματος έχουν άδράνεια, γι' αυτό
πάντοτε μεσολαβεί ένας ελάχιστος χρόνος, ώσπου νά άρχίσει τήν
κίνησή του τό έπόμενο γειτονικό μόριο. Άς υποθέσουμε ότι στό
έλαστικό μέσο πού πήραμε κάθε μόριο άρχίζει νά κινείται άφού πε-

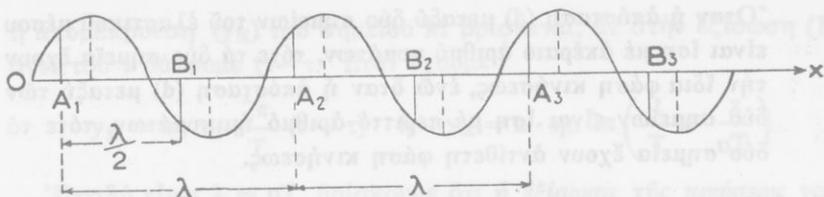


Σχ. 19. Διάδοση του εγκάρσιου κύματος στη διάρκεια μιᾶς περιόδου

δοση τῆς ἁρμονικῆς ταλαντώσεως ἀπὸ τὸ ἓνα μὸριο στὸ ἄλλο κατὰ μῆκος τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου. Στὴ διάρκεια μιᾶς περιόδου T , δηλαδή τῆ χρονικῆ στιγμῆ $t = T$ ἡ διάδοση τῆς ἁρμονικῆς ταλαντώσεως ἔχει φτάσει στὸ μὸριο 9 πού αὐτὴ τῆ στιγμῆ ἀρχίζει νά ἐκτελεεὶ τὴν πρώτη ταλάντωσή του, ἐνῶ τὸ μὸριο 1 ἀρχίζει νά ἐκτελεεὶ τὴν δεύτερη ταλάντωσή του. Ὡστε τῆ χρονικῆ στιγμῆ $t = T$ ὅλα τὰ μὸρια ἀπὸ τὸ 1 ὠς τὸ 9 κινουνται. Ἐκείνη τῆ στιγμῆ τὸ μὸριο 3 ἔχει ἐκτελέσει τὰ τρία τέταρτα τῆς ταλαντώσεως, τὸ μὸριο 5 ἔχει ἐκτελέσει τὴ μισὴ ταλάντωση καὶ τὸ μὸριο 7 ἔχει ἐκτελέσει τὸ ἓνα τέταρτο τῆς ταλαντώσεως. Στὸ σχῆμα 19 τὰ βέλη δείχνουν τὴ φορά τῆς κινήσεως τῶν μορίων καὶ κατὰ προσέγγιση τὸ μέγεθος τῆς ταχύτητάς τους. Παρατηροῦμε ὅτι στὴ διάρκεια μιᾶς περιόδου (T) ἡ ἁρμονικὴ ταλάντωση διαδίδεται μὲ σταθερὴ ταχύτητα (v) σὲ ὀρισμένη ἀπόσταση πού ὀνομάζεται *μῆκος κύματος* (λ). Ἔτσι ἔχουμε τὸν ἑξῆς ὀρισμό:

Μῆκος κύματος (λ) ὀνομάζεται ἡ σταθερὴ ἀπόσταση στὴν ὁποία διαδίδεται ἡ ταλάντωση μέσα σὲ μιὰ περίοδο.

$$\text{μῆκος κύματος } \lambda = v \cdot T$$



Σχ. 20. Τά σημεία A_1 και A_2 έχουν την ίδια φάση, ενώ τα σημεία A_1 και B_1 έχουν αντίθετη φάση.

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

θεμελιώδης εξίσωση των
κυμάτων $v = \nu \cdot \lambda$

β. Διαφορά φάσεως μεταξύ δύο σημείων του ελαστικού μέσου. Όταν η πηγή του κύματος εκτελεί αμείωτη αρμονική ταλάντωση, τότε κατά μήκος του ελαστικού μέσου διαδίδεται συνεχώς ένα εγκάρσιο αρμονικό κύμα, πού τη στιγμή $t = 3T$ έχει τη μορφή πού δείχνει τό σχήμα 20. Έκείνη τη στιγμή τά σημεία A_1, A_2, A_3 του ελαστικού μέσου έχουν την ίδια απομάκρυνση. Έπειτα από όρισμένο χρόνο τά τρία αυτά σημεία θά έχουν άλλη απομάκρυνση, πού θά είναι όμως ή ίδια και γιά τά τρία σημεία. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι τά τρία σημεία A_1, A_2, A_3 έχουν *τήν ίδια φάση*. Καθεμιά από τίς δύο αποστάσεις A_1A_2 και A_2A_3 είναι ίση μέ *ένα μήκος κύματος λ* . Έτσι γιά τό μήκος κύματος μπορούμε νά δώσουμε και *τόν εξής όρισμό*:

Μήκος κύματος (λ) ονομάζεται ή απόσταση μεταξύ των δύο πλησιέστερων σημείων πού έχουν *τήν ίδια φάση*.

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 οι απομακρύνσεις των σημείων A_1 και B_1 είναι ίσες, αλλά έχουν αντίθετη φορά. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι τά δύο αυτά σημεία έχουν *αντίθετη φάση*. Τό ίδιο συμβαίνει και μέ τά σημεία A_2 και B_2 .

Γενικότερα μπορούμε νά διατυπώσουμε τό εξής συμπέρασμα:

Όταν η απόσταση (d) μεταξύ δύο σημείων του ελαστικού μέσου είναι ίση με άκραιο αριθμό κυμάτων, τότε τα δύο σημεία έχουν την ίδια φάση κινήσεως, ενώ όταν η απόσταση (d) μεταξύ των δύο σημείων είναι ίση με περιττό αριθμό ήμικυμάτων, τότε τα δύο σημεία έχουν αντίθετη φάση κινήσεως.

διαφορά φάσεως ίση με 0°
(ίδια φάση)

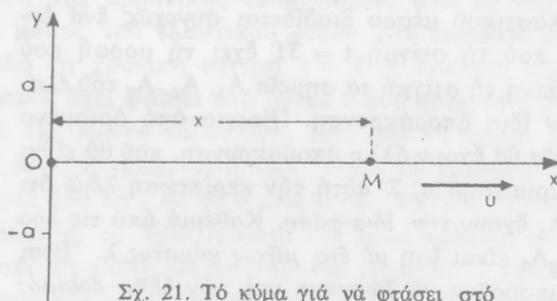
$$d = \kappa \cdot \lambda$$

διαφορά φάσεως ίση με 180°
(αντίθετη φάση)

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

όπου κ είναι άκραιο αριθμός ($0, 1, 2, 3 \dots$).

Υ. Ξίσωση της κινήσεως ενός υλικού σημείου του ελαστικού μέσου. Σε ένα γραμμικό ελαστικό μέσο το σημείο O είναι η πηγή των αρμονικών κυμάτων που διαδίδονται κατά μήκος του ελαστικού



Σχ. 21. Το κύμα για να φτάσει στο σημείο M , χρειάζεται χρόνο $\tau = x/v$.

μέσου με σταθερή ταχύτητα v (σχ. 21). Η πηγή O των κυμάτων αρχίζει να κινείται τη χρονική στιγμή $t = 0$ και έπομένως τη χρονική στιγμή t ή απόμάκρυνση (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 το πλάτος της ταλαντώσεως και T η περίοδος της. Ένα υλικό σημείο M του ελαστικού μέσου βρίσκεται σε απόσταση x από την πηγή O . Για να φτάσει το κύμα από την πηγή O των κυμάτων στο σημείο M , χρειάζεται χρόνο $\tau = x/v$. Τη χρονική στιγμή t ή κίνηση του σημείου M είναι ίδια με την κίνηση που είχε η πηγή O των κυμάτων τη χρονική στιγμή $t - \tau$. Ωστε τη χρονική στιγμή t

ή απομάκρυνση (y_M) του σημείου M βρίσκεται, αν στην εξίσωση (1) αντί του t βάλουμε $t - \tau$. Έτσι έχουμε :

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

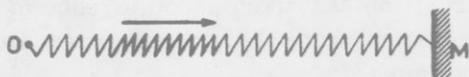
Επειδή είναι $\lambda = vT$, βρίσκουμε ότι η εξίσωση της κινήσεως του ύλικού σημείου M είναι:

$$\text{εξίσωση της κινήσεως ενός ύλικού σημείου M} \quad y_M = a \cdot \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2)$$

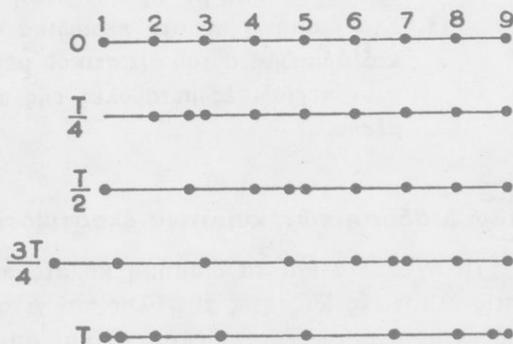
12. Διαμήκη κύματα

Τή μιá άκρη σπειροειδούς ελατηρίου τή στερεώνουμε σταθερά και τήν άλλη άκρη τήν κρατάμε με τό χέρι μας (σχ. 22). Όταν διατηρούμε τό ελατήριο ελαφρά τεντωμένο, προκαλούμε άπότομα συμπίεση και έπειτα άραιωση των πρώτων σπειρών. Παρατηρούμε ότι ή διατάραξη πού προκαλέσαμε στις πρώτες σπείρες διαδίδεται κατά μήκος του ελατηρίου με *ορισμένη ταχύτητα* (v). Καθεμιá σπείρα διαδοχικά πάλλεται *παράλληλα* με τή διεύθυνση διαδόσεως του κύματος. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι κατά μήκος του ελατηρίου διαδίδονται *διαμήκη κύματα*.

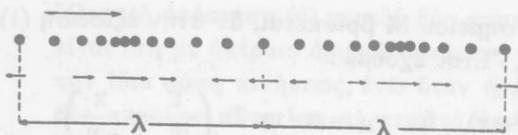
Άς θεωρήσουμε πάλι μιá σειρά μορίων του ελαστικού μέσου (σχ. 23) πού ίσορροπούν πάνω σε μιá ευθεία και συνδέονται μεταξύ τους δπως και στην περίπτωση του σχήματος 19. Τή



Σχ. 22. Στο τεντωμένο ελατήριο διαδίδονται διαμήκη κύματα.



Σχ. 23. Διάδοση του διαμήκους κύματος στη διάρκεια μιáς περιόδου



Σχ. 24. Στά διαμήκη κύματα σχηματίζονται πυκνώματα και αραιώματα.

χρονική στιγμή $t = 0$ το μόριο 1 αρχίζει να εκτελεί αρμονική ταλάντωση κατά τη διεύθυνση της εϋθείας στην οποία ισορροπουν τα μόρια. Τότε

όλα τα μόρια θα εκτελέσουν διαδοχικά την ίδια ακριβώς αρμονική ταλάντωση που έκαμε το μόριο 1. Παρατηρούμε ότι κάθε μόριο του ελαστικού μέσου διαδοχικά πλησιάζει και απομακρύνεται από τα δύο γειτονικά του μόρια. Έτσι δημιουργούνται *πυκνώματα* και *αραιώματα* του ελαστικού μέσου που διαδίδονται κατά μήκος του γραμμικού ελαστικού μέσου. Σ' αυτή την περίπτωση ως *μήκος κύματος* λ θεωρούμε την απόσταση δύο διαδοχικών πυκνωμάτων (ή αραιωμάτων). Το σχήμα 24 δείχνει τη θέση των μορίων του γραμμικού ελαστικού μέσου τη χρονική στιγμή $t = 2T$. Τα βέλη δείχνουν τη φορά της κίνησης των μορίων και κατά προσέγγιση την ταχύτητά τους. Για τη διαφορά φάσεως μεταξύ δύο σημείων και για την κίνηση ενός σημείου του ελαστικού μέσου ισχύουν οι σχέσεις που βρήκαμε στα εγκάρσια κύματα. Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- I. Στά διαμήκη κύματα τα μόρια του ελαστικού μέσου κινούνται παράλληλα με τη διεύθυνση διαδόσεως του κύματος.
- II. Στά διαμήκη κύματα περιοδικά σχηματίζονται πυκνώματα και αραιώματα του ελαστικού μέσου και επομένως συμβαίνουν περιοδικές μεταβολές της πυκνότητας του ελαστικού μέσου.

13. Διάδοση των κυμάτων ελαστικότητας μέσα στην ύλη

Τα εγκάρσια και τα διαμήκη κύματα που εξετάσαμε οφείλονται στις ελαστικές ιδιότητες της ύλης και γι' αυτό τα κύματα αυτά ονομάζονται *κύματα ελαστικότητας* (ή και *μηχανικά κύματα*). Στά διαμήκη κύματα διαδίδονται πυκνώματα και αραιώματα του ελαστικού μέσου και επομένως περιοδικά μεταβάλλεται ο *όγκος* του ελαστικού

σώματος. Άρα τὰ διαμήκη κύματα μπορούν νά διαδίδονται μέσα σέ σώματα πού έχουν *ελαστικότητα όγκου*. Αὐτή τήν ιδιότητα τήν έχουν *όλα τὰ σώματα*, στερεά υγρά καί αέρια. Στά εγκάρσια κύματα περιοδικά μεταβάλλεται *τό σχήμα* τοῦ ελαστικοῦ σώματος καί επομένως τὰ εγκάρσια κύματα μπορούν νά διαδίδονται μόνο μέσα σέ σώματα πού έχουν *ελαστικότητα σχήματος*. Τέτοια σώματα εἶναι μόνο τὰ στερεά, γιατί μόνο αὐτά έχουν *όρισμένο σχήμα*. Ὡστε:

Διαμήκη κύματα ελαστικότητας διαδίδονται μέσα σέ όλα τὰ σώματα, στερεά, υγρά καί αέρια. Ἐγκάρσια κύματα ελαστικότητας διαδίδονται μόνο μέσα στά στερεά σώματα.

14. Ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων

Ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων ελαστικότητας ἐξαρτᾶται ἀπό *τό εἶδος* τῶν κυμάτων (ἐγκάρσια ἢ διαμήκη) καί ἀπό *τή φύση* τοῦ ελαστικοῦ μέσου στό ὁποῖο διαδίδονται τὰ κύματα. Ἀναφέρουμε δύο περιπτώσεις, πού θά συναντήσουμε, ὅταν θά ἐξετάσουμε τή διάδοση τοῦ ἤχου.

α. Ταχύτητα διαδόσεως τοῦ ἐγκάρσιου κύματος κατά μήκος ελαστικῆς χορδῆς. Μιά ελαστική χορδή ἔχει μάζα m , μήκος l καί διατηρεῖται τεντωμένη μέ τήν ἐπίδραση τῆς δυνάμεως F . Τό πηλίκο τῆς μάζας (m) τῆς χορδῆς διά τοῦ μήκους τῆς (l) ὀνομάζεται *γραμμική πυκνότητα* (μ) τῆς χορδῆς, δηλαδή εἶναι $\mu = m/l$. Στήν περίπτωση τῆς τεντωμένης ελαστικῆς χορδῆς ἀποδεικνύεται ὅτι *ἡ ταχύτητα* (v) *διαδόσεως τοῦ ἐγκάρσιου κύματος* κατά μήκος τῆς χορδῆς δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

$$\text{ταχύτητα ἐγκάρσιου κύματος σέ χορδή} \quad v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

β. Ταχύτητα διαδόσεως τοῦ διαμήκου κύματος μέσα σέ αέριο. Στά αέρια διαδίδονται μόνο διαμήκη κύματα καί τότε συμβαίνουν πολύ γρήγορες συμπυκνώσεις καί ἀραιώσεις τοῦ αερίου, πού προκαλοῦν πολύ γρήγορες μεταβολές στήν πίεση (p), τήν πυκνότητα (ρ) καί τή θερμοκρασία (θ) τοῦ αερίου. Ἀποδεικνύεται ὅτι *ἡ ταχύτητα*

(υ) διαδόσεως του διαμήκους κύματος μέσα στο αέριο δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{ταχύτητα διαμήκους κύματος σε αέριο} \quad v = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}$$

όπου γ είναι ο λόγος των δύο ειδικών θερμοτήτων του αερίου ($\gamma = c_p / c_v$).

15. Κύματα στο χώρο και στην επιφάνεια υγρού

α. Κύματα στο χώρο. Ένα υλικό σημείο Α εκτελεί αμείωτη αρμονική ταλάντωση και περιβάλλεται από ένα άπεριοστο ομογενές και ισότροπο ελαστικό μέσο. Τότε το σημείο Α είναι πηγή αρμονικών κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις με σταθερή ταχύτητα v . Στη διάρκεια ορισμένου χρόνου t ή διάδοση της ταλάντωσης (δηλαδή τό κύμα) φτάνει σε όλα τα σημεία του ελαστικού μέσου που βρίσκονται σε απόσταση $R = v \cdot t$. Όλα αυτά τα σημεία έχουν την ίδια φάση και αποτελούν μία σφαιρική επιφάνεια, που ονομάζεται επιφάνεια κύματος*. Η εξωτερική επιφάνεια κύματος αποτελεί τό μέτωπο κύματος. Έτσι στο ελαστικό μέσο σχηματίζονται ομόκεντρες σφαιρικές επιφάνειες και όλα τα σημεία μιάς τέτοιας επιφάνειας κινούνται με την ίδια φάση. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι στο ελαστικό μέσο σχηματίζονται σφαιρικά κύματα. Κάθε ευθεία κάθετη στην επιφάνεια κύματος ονομάζεται ακτίνα. Σε μεγάλη απόσταση από την πηγή των κυμάτων ένα μικρό μέρος της σφαιρικής επιφάνειας κύματος μπορούμε να τό 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 τό σημεία τους έχουν την ίδια φάση, είναι ίση με ένα μήκος κύματος (λ).

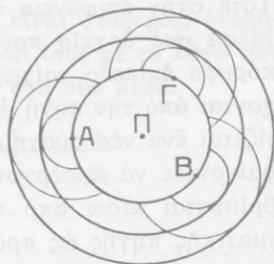
β. Κύματα στην επιφάνεια υγρού. Όταν στην επιφάνεια νερού που ήρεμεί πέσει μία πέτρα, τότε στο σημείο της επιφάνειας που έπεσε ή πέτρα προκαλείται μία διατάραξη της επιφανειακής μάζας

(*) Η επιφάνεια κύματος λέγεται και *ισοφασική επιφάνεια*.

τοῦ νεροῦ καί στήν ἐπιφάνεια τοῦ νεροῦ σχηματίζονται ὁμόκεντρα ὑψώματα καί κοιλώματα πού διαδίδονται πρὸς ὅλες τὶς διευθύνσεις. Τὰ κύματα πού σχηματίζονται στήν ἐπιφάνεια ὑγρῶν πού ἡρεμοῦν ἀποτελοῦν μιά ἰδιαίτερη κατηγορία κυμάτων. Ὅπως ξέρουμε ἡ ἐλεύθερη ἐπιφάνεια ἐνός ὑγροῦ πού ἡρεμεῖ, ἔχει ἰδιότητες ἀνάλογες μέ τὶς ἰδιότητες μιᾶς τεντωμένης ἐλαστικῆς μεμβράνης. Ἔτσι ὀρισμένα ἀπὸ τὰ κύματα πού σχηματίζονται στήν ἐπιφάνεια ὑγρῶν ὀφείλονται στήν ἐπιφανειακὴ τάση (κύματα ἐπιφανειακῆς τάσεως), ἐνῶ ἄλλα κύματα ὀφείλονται στὴ βαρύτητα (κύματα βαρύτητας). Γενικά ὁ σχηματισμὸς τῶν κυμάτων στήν ἐπιφάνεια τῶν ὑγρῶν εἶναι ἓνα πολὺπλοκο πρόβλημα.

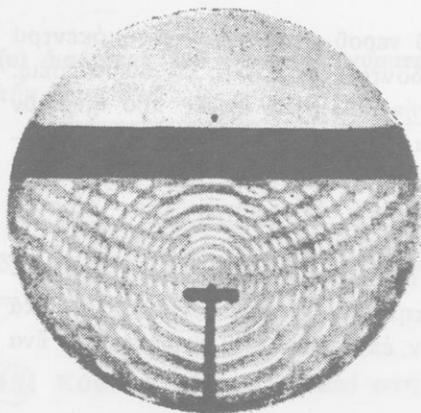
16 Ἀρχὴ τοῦ Huygens

Σὲ ἓνα ὁμογενὲς καί ἰσότροπο ἐλαστικὸ μέσο μιά σημειακὴ πηγὴ Π δημιουργεῖ ἄρμονικὰ κύματα, πού διαδίδονται μέ ταχύτητα v (σχ. 25). Σὲ μιά χρονικὴ στιγμή t τὸ κύμα ἔχει φτάσει σὲ ἀπόσταση $R = v \cdot t$ καί τὰ σημεῖα A, B, Γ, ... τῆς σφαιρικῆς ἐπιφάνειας πού ἔχει ἀκτίνα R, ἀρχίζουν νά κινοῦνται. Ἀποδεικνύεται ὅτι καθένα ἀπὸ αὐτὰ τὰ σημεῖα γίνεται τότε μιά νέα πηγὴ κυμάτων, πού ἔχουν τὴν ἴδια συχνότητα καί διαδίδονται πρὸς ὅλες τὶς διευθύνσεις μέ τὴν ἴδια ταχύτητα. Κάθε στιγμή οἱ σφαιρικὲς ἐπιφάνειες τῶν κυμάτων πού προέρχονται ἀπὸ τὰ σημεῖα A, B, Γ, ... περιβάλλονται ἀπὸ μιά μεγαλύτερη σφαιρικὴ ἐπιφάνεια. Αὐτὴ ἡ ἀντίληψη γιὰ τὴ διάδοση τῶν κυμάτων μᾶς βοηθεῖ νά ἐξηγήσουμε ὀρισμένα κυματικὰ φαινόμενα καί ἀποτελεῖ τὴν ἀκόλουθη ἀρχὴ τοῦ Huygens:

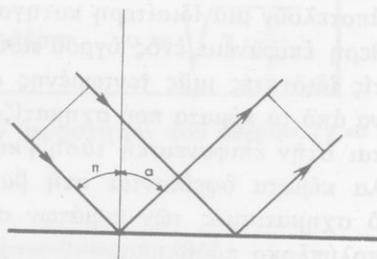


Σχ. 25. Τὰ σημεῖα A, B, Γ γίνονται στοιχειώδεις πηγές κυμάτων.

Κάθε σημεῖο ἐνός μετώπου κύματος ἐνεργεῖ ὡς νέα πηγὴ πού ἐκπέμπει στοιχειώδη κύματα. Σὲ κάθε στιγμή τὸ μέτωπο κύματος εἶναι μιά μεγαλύτερη ἐπιφάνεια πού περιβάλλει τὰ στοιχειώδη μέτωπα κύματος.



Σχ. 26. 'Ανάκλαση επιφανειακών κυμάτων



Σχ. 27. 'Ανάκλαση επίπεδου κύματος

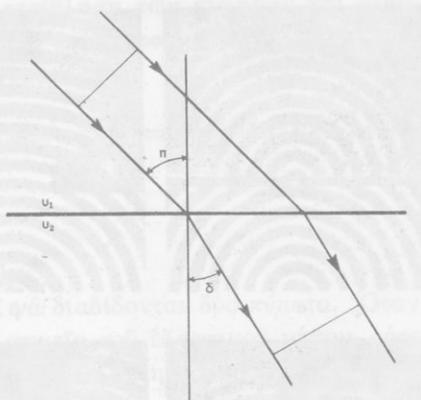
17 'Ανάκλαση τῶν κυμάτων

Στό ένα σκέλος, ὀριζόντιου διαπασῶν στερεώνουμε μιά κατακόρυφη ἀκίδα (σχ. 26). Ἡ ἄκρη τῆς βρίσκεται σέ ἐπαφή μέ τήν ἐπιφάνεια ὕδραργύρου πού ἤρεμεῖ. Τό διαπασῶν διεγείρεται ἀπό ἕναν ἠλεκτρομαγνήτη καί ἐκτελεῖ ἀμείωτη ταλάντωση μέ συχνότητα ν . Τότε στήν ἐπιφάνεια τοῦ ὕδραργύρου παράγονται *κυκλικά κύματα*. Μέσα στό δοχεῖο πού βρίσκεται ὁ ὕδραργυρος ὑπάρχει ἕνα κατακόρυφο ἐπίπεδο τοίχωμα. Παρατηροῦμε ὅτι τά κύματα πού προέρχονται ἀπό τήν πηγή *ἀνακλῶνται* πάνω στό τοίχωμα καί ἔτσι σχηματίζεται ἕνα νέο σύστημα κυκλικῶν κυμάτων. Τά ἀνακλῶμενα κύματα φαίνονται νά προέρχονται ἀπό μιά *φανταστική πηγή* κυμάτων πού βρίσκεται πίσω ἀπό τό τοίχωμα καί εἶναι *συμμετρική* τῆς πραγματικῆς πηγῆς ὡς πρός τό τοίχωμα. Αὐτή ἡ φανταστική πηγή κυμάτων εἶναι τό *εἶδωλο* τῆς πραγματικῆς πηγῆς τῶν κυμάτων. Ἐν ἔφαρμόζοντας τήν ἀρχή τοῦ Huygens ἐξετάσουμε τήν ἀνάκλαση ἑνός ἐπίπεδου κύματος πάνω σέ ἐπίπεδο τοίχωμα (σχ. 27), βρίσκουμε τοῦς ἐξῆς νόμους τῆς ἀνακλάσεως τῶν κυμάτων :

- I. Ἡ προσπίπτουσα καί ἡ ἀνακλῶμενη ἀκτίνα βρίσκονται στό ἴδιο ἐπίπεδο μέ τήν κάθετη στήν ἐπιφάνεια πού προκαλεῖ τήν ἀνάκλαση.
- II. Ἡ γωνία ἀνακλάσεως εἶναι ἴση μέ τή γωνία προσπτώσεως.

18. Διάθλαση τών κυμάτων

Δύο διαφορετικά ελαστικά μέσα 1 και 2 χωρίζονται μεταξύ τους με επίπεδη επιφάνεια (σχ.28). Η ταχύτητα διαδόσεως τών κυμάτων στά δύο αυτά μέσα αντίστοιχα είναι v_1 και v_2 . Ένα επίπεδο κύμα πέφτει πλάγια στην επιφάνεια που χωρίζει τά δύο μέσα. Τό επίπεδο κύμα μπαίνοντας από τό πρώτο στο δεύτερο μέσο διαθλάται και διαδίδεται πρός μιά νέα διεύθυνση. Αν εφαρμόσουμε τήν αρχή του Huygens βρίσκουμε τούς εξής νόμους τής διαθλάσεως τών κυμάτων :



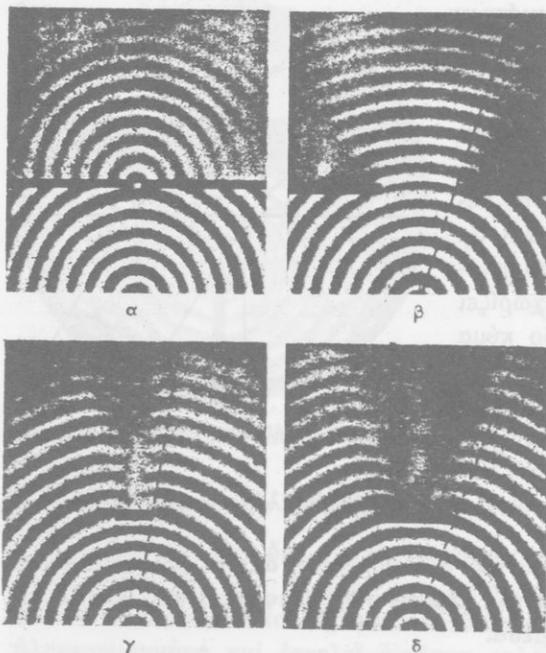
Σχ. 28. Διάθλαση επίπεδου κύματος

- I. Η προσπίπτουσα και ή διαθλώμενη ακτίνα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με τήν κάθετη στην επιφάνεια που χωρίζει τά δύο ελαστικά μέσα.
- II. Ο λόγος του ήμιτόνου τής γωνίας προσπτώσεως (π) πρός τό ήμίτονο τής γωνίας διαθλάσεως (δ) είναι σταθερός, ονομάζεται δείκτης διαθλάσεως (n) και είναι ίσος με τό λόγο τών ταχυτήτων διαδόσεως τών κυμάτων στά δύο μέσα.

$$\text{δείκτης διαθλάσεως } n = \frac{\eta\mu \pi}{\eta\mu \delta} = \frac{v_1}{v_2}$$

19. Περίθλαση τών κυμάτων

Στήν επιφάνεια υδραργύρου δημιουργούμε κυκλικά κύματα με διαπασών που πάλλεται με τή βοήθεια ενός ηλεκτρομαγνήτη. Κάθετα στην επιφάνεια του υδραργύρου υπάρχει διάφραγμα που έχει μιά πολύ λεπτή σχισμή (ή πολύ μικρή τρύπα). Οί διαστάσεις τής σχισμής είναι τής τάξεως του μήκους κύματος (λ) τών κυμάτων. Παρατηρούμε ότι πίσω από τό διάφραγμα σχηματίζονται νέα κυκλικά κύματα που πηγή τους είναι ή σχισμή (σχ. 29α). Τό φαινόμενο αυτό ονομάζεται περίθλαση τών κυμάτων και εξηγείται ως εξής: Σύμ-



Σχ. 29. Περιθλαση κυκλικών κυμάτων που πέφτουν πάνω σε λεπτή σχισμή ή πολύ μικρό αντικείμενο.

μετά του γίνονται νέες πηγές κυμάτων (σχ. 29γ).

Αν οι διαστάσεις της σχισμής ή του αντικειμένου είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος (λ) των κυμάτων, τότε το φαινόμενο της περιθλάσεως των κυμάτων είναι άσημαντο. Σ' αυτή την περίπτωση πίσω από το διάφραγμα ή διάδοση των κυμάτων γίνεται εὐθύγραμμα (σχ. 29β, δ). Από τα παραπάνω συνάγεται ὁ ἀκόλουθος νόμος τῆς περιθλάσεως τῶν κυμάτων:

Όταν τὰ κύματα πέφτουν πάνω σὲ σχισμὴ ἢ ἀντικείμενο πού οἱ διαστάσεις τους εἶναι πολύ μεγαλύτερες ἀπὸ τὸ μήκος κύματος (λ) τῶν κυμάτων, τότε πίσω ἀπὸ τὴ σχισμὴ ἢ τὸ ἀντικείμενο τὰ κύματα διαδίδονται εὐθύγραμμα. Ἀντίθετα, ὅταν οἱ διαστάσεις τῆς σχισμής ἢ τοῦ ἀντικειμένου εἶναι τῆς τάξεως τοῦ μήκους

φωνα μετὴν ἀρχὴ τοῦ Huygens τὰ σημεῖα τῆς σχισμῆς γίνονται νέες πηγές κυμάτων καὶ ἔτσι πίσω ἀπὸ τὸ διάφραγμα διαδίδονται κυκλικά κύματα πού πηγὴ τους εἶναι ἡ σχισμὴ. Τὸ φαινόμενο τῆς περιθλάσεως παρατηρεῖται καὶ ὅταν τὰ κύματα πέφτουν πάνω σὲ πολύ μικρὰ ἀντικείμενα πού οἱ διαστάσεις τους εἶναι τῆς τάξεως τοῦ μήκους κύματος (λ) τῶν κυμάτων. Τότε τὰ κύματα διαδίδονται καὶ πίσω ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο, γιατί τὰ ση-

κύματος (λ), τότε συμβαίνει περίθλαση τῶν κυμάτων καί πίσω ἀπό τή σχισμή ἢ τὸ ἀντικείμενο παρατηροῦνται ἀποκλίσεις ἀπὸ τὴν εὐθύγραμμη διάδοση τῶν κυμάτων.

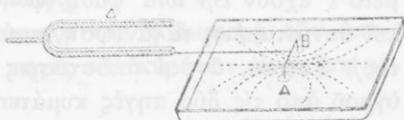
Παρατήρηση. Τὸ φαινόμενο τῆς περιθλάσεως τῶν κυμάτων ἔχει ἰδιαίτερη σημασία στὴν Ὀπτική καί τὴν Ἀκουστική.

20 Συμβολή τῶν κυμάτων

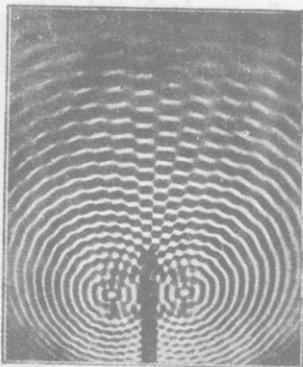
Στὸ ἴδιο ἐλαστικὸ μέσο μπορεῖ νὰ διαδίδονται δύο κύματα. Ὄταν τὰ κύματα φτάσουν σὲ ἓνα ὑλικὸ σημεῖο τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου, τότε τὸ σημεῖο αὐτὸ ἐκτελεῖ μιὰ συνισταμένη κίνηση καί λέμε ὅτι στὸ σημεῖο αὐτὸ τὰ δύο κύματα *συμβάλλουν*. Μὲ τὸ ἀκόλουθο πείραμα μποροῦμε νὰ παρατηρήσουμε τὸ φαινόμενο τῆς συμβολῆς δύο κυμάτων πού διαδίδονται στὴν ἐπιφάνεια ὑγροῦ. Στὸ ἓνα σκέλος διαπασῶν εἶναι στερεωμένο ἓνα στέλεχος ἔτσι, ὥστε οἱ δύο ἄκρες τοῦ Α καί Β νὰ μποροῦν νὰ πάλλονται κατακόρυφα (σχ. 30). Ὄταν τὸ διαπασῶν ἤρεμεῖ, τὰ σημεῖα Α καί Β βρίσκονται σὲ ἐπαφή μὲ τὴν ἐλεύθερη ἐπιφάνεια ὑδραργύρου (ἢ νεροῦ) πού ἤρεμεῖ. Μὲ ἓνα ἠλεκτρομαγνήτη ἀναγκάζουμε τὸ διαπασῶν νὰ πάλλεται. Τότε τὰ σημεῖα Α καί Β ἐκτελοῦν ἀμείωτες ἀρμονικὲς ταλαντώσεις, πού ἔχουν τὴν ἴδια συχνότητα, τὸ ἴδιο πλάτος καί τὴν ἴδια φάση. Ἔτσι τὰ σημεῖα Α καί Β εἶναι δύο σύγχρονες πηγὲς παραγωγῆς κυκλικῶν κυμάτων πού διαδίδονται στὴν ἐπιφάνεια ὑγροῦ. Παρατηροῦμε ὅτι στὴν ἐπιφάνεια τοῦ ὑγροῦ σχηματίζονται τόξα ὑπερβολῶν, πού ἔχουν ὡς ἐστίες τους τὰ σημεῖα Α καί Β. Αὐτὰ τὰ τόξα ὑπερβολῶν ὀνομάζονται *κροσσοί συμβολῆς* (σχ. 31). Ἄν ἐξετάσουμε αὐτὸ τὸ φαινόμενο διαπιστώνουμε τὰ ἑξῆς:

α) ἀπὸ τίς δύο πηγὲς κυμάτων Α καί Β συνεχῶς φεύγουν κυκλικὰ κύματα:

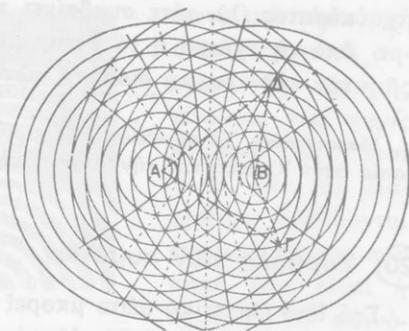
β) ὀρισμένα σημεῖα τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ πού βρίσκονται πάνω σὲ τόξα ὑπερβολῶν ἐκτελοῦν ἀρμονικὴ ταλάντωση, πού ἔχει συχνότητα ἴση μὲ τὴ συχνότητα τῶν δύο πηγῶν Α καί Β.



Σχ. 30. Πειραματικὴ διάταξη γιὰ τὴν παραγωγή τοῦ φαινομένου τῆς συμβολῆς τῶν κυμάτων



Σχ. 31. Οί κροσσοί συμβολής



Σχ. 32. Γιά τήν εξήγηση τής συμβολής δύο κυμάτων

γ) όρισμένα σημεία τής επιφάνειας του ύγρου, πού και αυτά βρίσκονται πάνω σέ τόξα υπερβολών, παραμένουν τελείως ακίνητα.

Εξήγηση του φαινομένου τής συμβολής των κυμάτων. Κάθε σύστημα κυκλικών κυμάτων διαδίδεται ανεξάρτητα από τό άλλο, δηλαδή διαδίδεται σάν νά ήταν μόνο του. Έτσι κάθε υλικό σημείο τής ελεύθερης επιφάνειας του ύγρου εκτελεί ταυτόχρονα δύο κατακόρυφες αρμονικές ταλαντώσεις πού έχουν τήν ίδια διεύθυνση, τήν ίδια συχνότητα (ν) και τό ίδιο πλάτος (α). Όπως ξέρουμε (§ 7), τό πλάτος (A) τής συνισταμένης ταλαντώσεως εξαρτάται από τή διαφορά φάσεως (φ) πού έχουν οί δύο συνιστώσες ταλαντώσεις. Άς πάρουμε ένα σημείο Γ τής επιφάνειας του ύγρου (σχ. 32), πού οί αποστάσεις του από τά σημεία A και B έχουν διαφορά ίση μέ άκέραιο άριθμό κυμάτων, δηλαδή είναι :

$$GA - GB = \kappa \cdot \lambda$$

Έπομένως οί δύο αρμονικές ταλαντώσεις πού φτάνουν στό σημείο Γ έχουν τήν ίδια φάση ($\varphi = 0^\circ$) και γι' αυτό τό σημείο Γ εκτελεί συνισταμένη ταλάντωση, πού έχει πλάτος $A = 2\alpha$ (μέγιστο πλάτος). Γενικά, άν οί αποστάσεις ενός σημείου τής επιφάνειας του ύγρου από τίς δύο πηγές κυμάτων A και B είναι αντίστοιχα d_A και d_B , τότε τό σημείο αυτό πάλλεται μέ μέγιστο πλάτος ($A = 2\alpha$), όταν ισχύει ή εξίσωση:

$$\text{σημεία παλλόμενα μέ μέγιστο πλάτος} \quad d_A - d_B = \kappa \cdot \lambda \quad (1)$$

Γιά $\kappa = 0$ ή εξίσωση (1) αντιστοιχεί στα σημεία που βρίσκονται στην εὐθεία που είναι κάθετη στή μέση τῆς AB. Γιά $\kappa = 1, 2, 3, \dots$ ἡ εξίσωση (1) αντιστοιχεί σέ σημεία που βρίσκονται πάνω σέ τόξα ὑπερβολῶν, που ἔχουν ὡς ἐστίες τίς δύο σύγχρονες πηγές A καί B.

Σέ ἕνα ἄλλο σημείο Δ τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ, που οἱ ἀποστάσεις του ἀπό τά σημεία A καί B ἔχουν διαφορά ἴση μέ περιττό ἀριθμό ἡμικυμάτων, δηλαδή εἶναι :

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

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

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

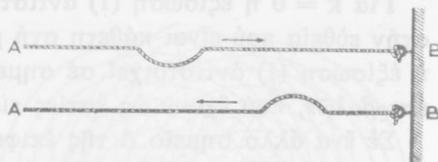
Καί ἡ εξίσωση (2) προσδιορίζει σημεία που βρίσκονται πάνω σέ τόξα ὑπερβολῶν μέ ἐστίες τά σημεία A καί B.

Ἀπό τά παραπάνω καταλήγουμε στά ἀκόλουθα συμπεράσματα:

- I. Ἐνα ὕλικο σημείο, στό ὁποῖο φτάνουν δύο ἄρμονικά κύματα, ἐκτελεῖ συνισταμένη ἄρμονική ταλάντωση που ἔχει τήν ἴδια διεύθυνση καί τήν ἴδια συχνότητα μέ τίς δύο σύγχρονες πηγές τῶν κυμάτων, τό πλάτος ὅμως τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως ἐξαρτᾶται ἀπό τή διαφορά τῶν ἀποστάσεων τοῦ θεωρούμενου σημείου ἀπό τίς δύο πηγές τῶν κυμάτων.
- II. Τό πλάτος τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως:
 - εἶναι μέγιστο στά σημεία που οἱ ἀποστάσεις τους ἀπό τίς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι ἴση μέ μηδέν ἢ εἶναι ἴση μέ ἀκέραιο ἀριθμό μηκῶν κύματος,
 - εἶναι ἴσο μέ μηδέν στά σημεία που ἡ διαφορά τῶν ἀποστάσεων τους ἀπό τίς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι ἴση μέ περιττό ἀριθμό ἡμικυμάτων.
- III. Τά σημεία που πάλλονται μέ μέγιστο πλάτος ἢ μένουν ἀκίνητα διατάσσονται πάνω σέ ἀντίστοιχα τόξα ὑπερβολῶν (κροσσοί συμβολῆς).

21. Στάσιμα κύματα

α. Δύο περιπτώσεις ανάκλασης των κυμάτων. Τή μι άκρη ελαστικής χορδής τή στερεώνουμε σταθερά σέ ένα άκίνητο εμπόδιο (π.χ. σέ τοίχο) και τήν άλλη άκρη τής χορδής

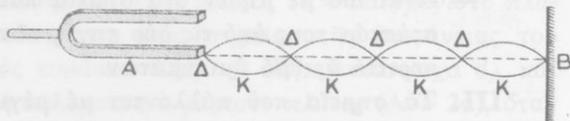


Σχ. 33. Άνάκλαση του κύματος πάνω σέ άκίνητο εμπόδιο

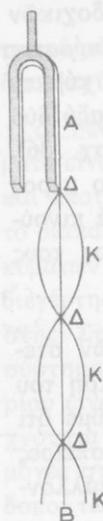
τήν κρατάμε μέ τό χέρι μας (σχ. 33). Τεντώνουμε ελαφρά τή χορδή και άναγκάζουμε τήν άκρη της Α νά εκτελέσει γρήγορα μισή ταλάντωση. Ή διατάραξη πού προκαλέσαμε διαδίδεται κατά μήκος τής χορδής, φτάνει στήν άλλη άκρη Β τής χορδής και εκεί *ανακλάται* και ξαναγυρίζει πρós τήν άκρη Α. Παρατηρούμε ότι *ή προσπίπτουσα* και *ή ανακλώμενη* διατάραξη έχουν *αντίθετη φάση*. Δένουμε τήν άκρη Β τής χορδής σέ ένα σπάγγο, πού ή άλλη άκρη του είναι στερεωμένη στόν τοίχο και κάνουμε πάλι τό ίδιο πείραμα. Τώρα ή *ανάκλαση* τής διαταράξεως γίνεται στό σπάγγο, πού είναι ένα *κινητό εμπόδιο*. Παρατηρούμε ότι *ή προσπίπτουσα* και *ή ανακλώμενη* διατάραξη έχουν *τήν ίδια φάση*. Γενικά, άποδεικνύεται ότι *γιά τήν ανάκλαση των κυμάτων* ισχύει ό *έξής νόμος*:

Όταν ή *ανάκλαση των κυμάτων* γίνεται σέ *άκίνητο εμπόδιο*, ή *προσπίπτουσα* και ή *ανακλώμενη* κίνηση έχουν *αντίθετη φάση*, ενώ όταν ή *ανάκλαση* γίνεται σέ *κινητό εμπόδιο* ή *προσπίπτουσα* και ή *ανακλώμενη* κίνηση έχουν *τήν ίδια φάση*.

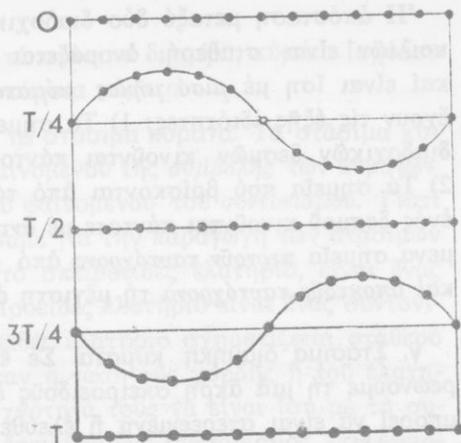
β. Στάσιμα εγκάρσια κύματα. Ή μι άκρη ελαστικής χορδής είναι στερεωμένη σέ *άκίνητο εμπόδιο*, ενώ ή άλλη άκρη της είναι στερεωμένη σέ διαπασών και εκτελεί άμείωτη κατακόρυφη άρμονική ταλάντωση (σχ. 34) συχνότητας ν . Τότε πάνω στή χορδή *συνεχώς διαδίδονται* εγκάρσια κύματα μέ ταχύτητα $υ$ και συχνότητα ν . Έπομένως τό μήκος κύματος είναι $\lambda = υ/\nu$. Τά κύματα *συνεχώς ανακλώνται* στό *άκίνητο εμπόδιο* και *διαδίδονται* κατά τήν



Σχ. 34. Στάσιμα εγκάρσια κύματα (ανάκλαση σέ άκίνητο εμπόδιο)



Σχ. 35. Στάσιμα εγκάρσια κύματα (ανάκλαση σε κινητό εμπόδιο, τόν άερα)



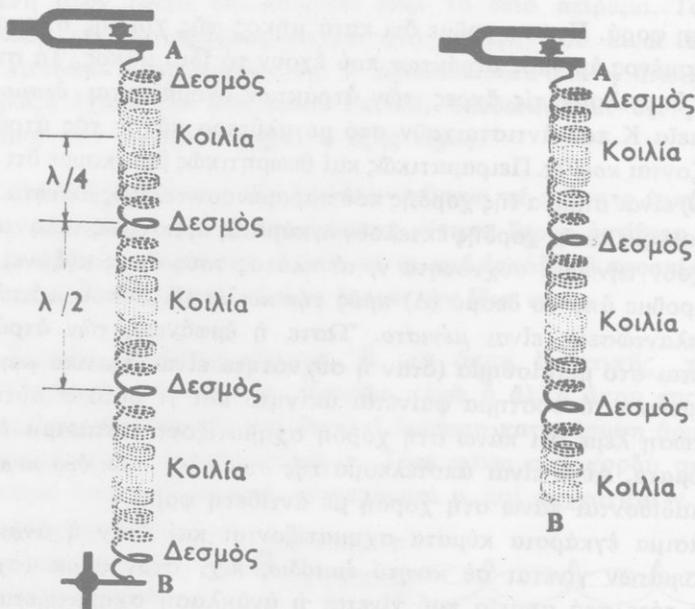
Σχ. 36. Η κίνηση των υλικών σημείων στά στάσιμα εγκάρσια κύματα

αντίθετη φορά. Παρατηρούμε ότι κατά μήκος της χορδής σχηματίζεται ορισμένος αριθμός *ατράκτων* που έχουν τό ίδιο μήκος. Τά σημεία Δ που αποτελούν τίσ άκρες τών ατράκτων ονομάζονται *δεσμοί* καί τά σημεία Κ που αντιστοιχούν στό μεγαλύτερο πάχος τής ατράκτου ονομάζονται *κοιλίες*. Πειραματικώς καί θεωρητικώς βρίσκουμε ότι *οί δεσμοί* (Δ) είναι σημεία τής χορδής που παραμένουν *τελείως άκίνητα*. Όλα τά άλλα σημεία τής χορδής έκτελούν εγκάρσιες άρμονικές ταλαντώσεις που έχουν τήν ίδια συχνότητα ν, τό πλάτος τους όμως αυξάνει, όσο προχωρούμε από τό δεσμό (Δ) πρός τήν *κοιλία* (Κ), όπου τό πλάτος τής ταλαντώσεως είναι *μέγιστο*. Όστε ή εμφάνιση τών ατράκτων οφείλεται στό μεταίσθημα (όταν ή συχνότητα είναι σχετικά μεγάλη). Φαινομενικά τό σύστημα φαίνεται άκίνητο καί γι' αυτό σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι πάνω στή χορδή σχηματίζονται *στάσιμα εγκάρσια κύματα*. Αυτά είναι αποτέλεσμα τής *συμβολής τών δύο κυμάτων*, που διαδίδονται πάνω στή χορδή μέ αντίθετη φορά.

Στάσιμα εγκάρσια κύματα σχηματίζονται καί όταν ή ανάκλαση τών κυμάτων γίνεται σε *κινητό εμπόδιο*, π.χ. στόν άερα (σχ. 35). Άλλά τότε στό σημείο που γίνεται ή ανάκλαση σχηματίζεται *κοιλία*, ενώ όταν ή ανάκλαση γίνεται σε *άκίνητο εμπόδιο*, στό σημείο που γίνεται ή ανάκλαση σχηματίζεται *δεσμός*.

Ἡ ἀπόσταση μεταξύ δύο διαδοχικῶν δεσμῶν ἢ δύο διαδοχικῶν κοιλιῶν εἶναι σταθερή, ὀνομάζεται *μῆκος τοῦ στάσιμου κύματος* καί εἶναι ἴση μέ *μισό μῆκος κύματος* ($\lambda/2$). Τά στάσιμα κύματα ἔχουν τῆς ἐξῆς ιδιότητες: 1) Τά σημεῖα πού βρίσκονται μεταξύ δύο διαδοχικῶν δεσμῶν κινούνται πάντοτε μέ *τήν ἴδια φορά* (σχ. 36). 2) Τά σημεῖα πού βρίσκονται ἀπό τό ἕνα καί ἀπό τό ἄλλο μέρος ἑνός δεσμοῦ κινούνται πάντοτε μέ *ἀντίθετη φορά*. 3) Ὅλα τά κινούμενα σημεῖα *περνοῦν ταυτόχρονα* ἀπό τή θέση τῆς ἰσορροπίας τους καί *ἀποκοῦν ταυτόχρονα* τή μέγιστη ἀπομάκρυνσή τους.

γ. Στάσιμα διαμήκη κύματα. Σέ ἕνα παλλόμενο διαπασῶν στερεώνουμε τή μιᾶ ἄκρη σπειροειδοῦς ἐλατηρίου. Ἡ ἄλλη ἄκρη του μπορεῖ νά εἶναι στερεωμένη ἢ ἐλεύθερη (σχ. 37). Παρατηροῦμε ὅτι σχηματίζονται *στάσιμα διαμήκη κύματα*. Στούς δεσμούς οἱ σπείρες παραμένουν πάντοτε ἀκίνητες, ἐνῶ στίς κοιλίες οἱ σπείρες *πάλλον-*



Σχ. 37. Στάσιμα διαμήκη κύματα (ἀνάκλαση σέ ἀκίνητο καί κινητό ἐμπόδιο)

ται μέγιστο πλάτος. Καί γιά τά στάσιμα διαμήκη κύματα ισχύουν
δύο ισχύουν γιά τά στάσιμα εγκάρσια κύματα.

δ. Γενικές παρατηρήσεις γιά τά στάσιμα κύματα. Τά στάσιμα κύματα είναι μία περίπτωση τοῦ φαινομένου τῆς συμβολῆς τῶν κυμάτων καί ἀποτελοῦν μία ἐφαρμογή τοῦ φαινομένου τοῦ συντονισμοῦ. Γιατί τό διαπασῶν, πού χρησιμοποιήσαμε γιά τήν παραγωγή τῶν στάσιμων κυμάτων πάνω στή χορδή ἢ στό σπειροειδές ἐλατήριο, εἶναι ἕνας διεγέρτης καί ἡ χορδή ἢ τό σπειροειδές ἐλατήριο εἶναι ἕνας συντονιστής. Στή χορδή ἢ στό σπειροειδές ἐλατήριο σχηματίζεται σταθερό σύστημα στάσιμων κυμάτων, ὅταν ἡ τάση τῆς χορδῆς ἢ τοῦ ἐλατηρίου εἶναι τόση, ὥστε ἡ ιδιοσυχνότητά τους νά εἶναι ἴση μέ τήν συχνότητα τοῦ διαπασῶν, δηλαδή ὅταν ὑπάρχει συντονισμός. Στίς ἐφαρμογές στάσιμα κύματα ἐμφανίζονται, ὅταν πάλλονται οἱ ἀπό μετόν δοκοί τῶν οἰκοδομῶν, οἱ γέφυρες, τά βάθρα πού στηρίζονται μηχανές. Ὅταν διαμορφώνουμε ἕνα λιμάνι, λαβαίνουμε ὑπόψη τά ἀποτελέσματα πού θά ἔχει ὁ σχηματισμός στάσιμων κυμάτων μέσα στό λιμάνι. Σημαντική ἐφαρμογή ἔχουν τά στάσιμα κύματα στήν Ἀκουστική καί τόν Ἡλεκτρισμό.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

26. Μιά ταλάντωση πού ἔχει συχνότητα 75 Hz διαδίδεται μέσα σέ ἐλαστικό ὑλικό μέ ταχύτητα 300 m/sec. Πόσο εἶναι τό μήκος κύματος;

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

28. Ἡ ταχύτητα διαδόσεως ἑνός κύματος εἶναι 300 000 km/sec καί τό μήκος κύματος εἶναι 400 m. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα σέ μέγακυκλους τό δευτερόλεπτο;

29. Ἀπό τήν ἄκρη Α μιᾶς εὐθείας ΑΒ μήκους 10 m φεύγει ἕνα 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 ἕνα ἐλαστικό ὑλικό διαδίδεται ἕνα κύμα μέ ταχύτητα 5 000 m/sec καί μέ μήκος κύματος 2 m. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα ν

καί ἡ κυκλική συχνότητα ω τῆς κινήσεως ἑνός μορίου τοῦ ἐλαστικοῦ ὄλικοῦ;

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 μιᾶ στοιχειώδης μάζα τοῦ ἐλατηρίου ἴση μέ $0,016 \text{ gr}$;

32. Ἡ ἄκρη A 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 a , ἡ συχνότητα ν καί ἡ περίοδος T τῆς κινήσεως τῆς ἄκρης τῆς χορδῆς. 2) Ἡ 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 M τῆς χορδῆς, πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση $6,25 \text{ m}$ ἀπό τήν ἄκρη A τῆς χορδῆς.

33. Οἱ δύο ἄκρες μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς AB εἶναι σταθερά στερεωμένες. Ἡ 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 A τῆς χορδῆς.

34. Ἡ ἄκρη A μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς εἶναι σταθερά στερεωμένη, ἐνώ ἡ ἄλλη ἄκρη τῆς B εἶναι ἐλεύθερη. Ἡ 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 A τῆς χορδῆς.

35. Ἐνα διαπασῶν ἐκτελεῖ ταλαντώσεις, πού ἔχουν συχνότητα $\nu = 120 \text{ Hz}$, καί δημιουργεῖ στήν ἐπιφάνεια ἑνός ὑγροῦ δύο σύγχρονες πηγές O_1 καί O_2 ἐγκάρσιων κυμάτων, πού διαδίδονται μέ ταχύτητα $v = 48 \text{ cm/sec}$. Τό πλάτος ταλαντώσεως τῶν μορίων τοῦ ὑγροῦ εἶναι $a = 5 \text{ mm}$ καί ὑποθέτουμε ὅτι δέν ὑπάρχουν ἀπώλειες ἐνέργειας. 1) Πόσο εἶναι τό πλάτος A τῆς ταλαντώσεως σέ ἕνα σημείο B τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ, πού οἱ ἀποστάσεις του ἀπό τίς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι $O_1B = 8 \text{ cm}$ καί $O_2B = 6 \text{ cm}$; 2) Πόσο εἶναι τό πλάτος

Α τής ταλαντώσεως σέ ένα άλλο σημείο Γ, πού οί απόστάσεις του από τίς δύο πηγές τών κυμάτων είναι $O_1Γ = 10 \text{ cm}$ καί $O_2Γ = 7 \text{ cm}$;

36. Στίς δύο άκρες ενός γραμμικού έλαστικού μέσου, πού έχει μήκος 6 m, δύο πηγές O_1 καί O_2 κατά τή χρονική στιγμή $t = 0$ αρχίζουν νά εκτελούν ταλαντώσεις μέ συχνότητα $\nu = 5 \text{ Hz}$ καί πλάτος $a = 3 \text{ mm}$. 1) Σέ ποιές χρονικές στιγμές t_1 καί t_2 φτάνουν τά δύο εγκάρσια κύματα σέ ένα σημείο Β, πού ή απόστασή του από τήν πηγή O_1 είναι $O_1Β = 80 \text{ cm}$; 2) Πόσο είναι τό πλάτος τής ταλαντώσεως στό σημείο Β καί πόσο σέ ένα άλλο σημείο Γ, πού ή απόστασή του από τήν πηγή O_1 είναι $O_1Γ = 2,50 \text{ m}$; *Η ταχύτητα διαδόσεως τών κυμάτων είναι $c = 2 \text{ m/sec}$ (*).

(*) *Η ταχύτητα διαδόσεως τών κυμάτων συμβολίζεται καί μέ τό γράμμα c , αλλά συνήθως τό σύμβολο αυτό τό χρησιμοποιούμε ειδικότερα γιά τήν ταχύτητα διαδόσεως τών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τά όποια δέν είναι κύματα έλαστικότητας.

Ἀκουστική

Ἡχητικά κύματα

22. Παραγωγή τοῦ ἤχου

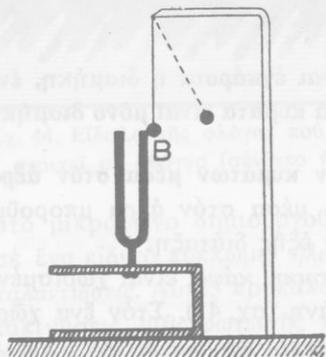
Τό φυσικό αἶτιο πού διεγείρει τό αἰσθητήριο ὄργανο τῆς ἀκοῆς μας τό ὀνομάζουμε γενικά *ἤχο*. Μιά μικρή σφαῖρα ἀπό χάλυβα κρέμεται μέ νῆμα ἀπό σταθερό σημεῖο καί βρίσκεται σέ ἐπαφή μέ διαπασῶν πού ἡρεμεῖ (σχ. 38). Ἄν χτυπήσουμε ἐλαφρά τό διαπασῶν, τότε ἀκοῦμε ἤχο καί ταυτόχρονα βλέπουμε ὅτι ἡ σφαῖρα ἀναπηδᾷ κάθε φορά πού ἔρχεται σέ ἐπαφή μέ τό διαπασῶν. Ὡστε, ὅταν τό διαπασῶν ἐκτελεῖ *ταλάντωση*, τότε τό διαπασῶν *παράγει ἤχο*. 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.

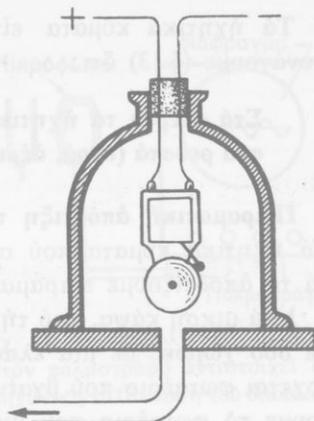
Μιά ἡχητική πηγὴ παράγει *ἀκουστό ἤχο*, ὅταν ἡ συχνότητα καί τό πλάτος τῆς ταλαντώσεως τῆς πηγῆς βρίσκονται μέσα σέ *ὀρισμένα ὄρια* πού τά καθορίζει ἡ φυσιολογική λειτουργία τοῦ αὐτιοῦ μας.

23. Διάδοση τοῦ ἤχου

Ὁ ἤχος ὀφείλει τή γένεσή του *στήν ταλάντωση* πού ἐκτελεῖ μία ἡχητική πηγὴ. Ἡ μετάδοση ὅμως ἐνέργειας ἀπό τήν ἡχητική πηγὴ στό αὐτί μας ὀφείλεται στή διάδοση τῆς ταλαντώσεως διαμέσου ἑνός *ἐλαστικοῦ ὑλικοῦ* πού πρέπει νά ὑπάρχει μεταξύ τῆς ἡχητικῆς πηγῆς καί τοῦ αὐτιοῦ μας. Αὐτό ἀποδεικνύεται μέ τό ἀπλό πείραμα πού δείχνει τό σχῆμα 39. Ὄταν μέσα στό δοχεῖο ὑπάρχει ἀέρας, ἀκοῦμε τόν ἤχο πού παράγει τό κουδούνι. Ἄν ὅμως μέ τήν ἀεραντλία ἀφαιρέσουμε ἀπό τό δοχεῖο τόν ἀέρα, τότε δέν ἀκοῦμε ἤχο, ἂν καί βλέπουμε ὅτι τό σφαιρίδιο τοῦ κουδουνιοῦ ἐξακολουθεῖ νά κινεῖται κανονικά καί νά χτυπάει πάνω στήν καμπάνα. Ὡστε:



Σχ. 38. Τό παλλόμενο διαπασών παράγει ήχο.



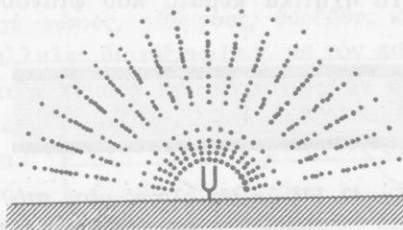
Σχ. 39. 'Ο ήχος δέ διαδίδεται μέσα στο κενό.

‘Ο ήχος διαδίδεται μόνο μέσα στα υλικά σώματα (στερεά, υγρά, αέρια). Στο κενό ο ήχος δέ διαδίδεται.

Ήχητικά κύματα. Ξέρουμε (§ 10) ότι ή διάδοση μιᾶς ἀρμονικῆς ταλαντώσεως σέ ἕνα ἐλαστικό μέσο εἶναι *μετάδοση ἐνέργειας* ἀπό τό ἕνα μόριο στό ἄλλο. Αὐτή ἡ διάδοση ἐνέργειας διαμέσου ἑνός ἐλαστικοῦ υλικοῦ γίνεται μέ *ἐγκάρσια* ἢ *διαμήκη κύματα*.

Όταν ἕνα διαπασών πάλλεται μέσα στόν ἀέρα, τότε τό διαπασών ἐξασκεῖ στά γειτονικά του μόρια μιᾶ ὄθηση καί τά ἀναγκάζει νά ἐκτελέσουν καί αὐτά *ἀρμονική ταλάντωση* τῆς ἴδιας συχνότητος μέ τή συχνότητα τοῦ διαπασών. Ἡ μηχανική ἐνέργεια πού δόθηκε ἀπό τό διαπασών στά πρῶτα μόρια τοῦ ἀέρα διαδίδεται ἀπό αὐτά πρὸς ὄλες τίς διευθύνσεις (σχ. 40). Ἔτσι γύρω ἀπό τό διαπασών σχηματίζονται *σφαιρικά ἤχητικά κύματα*. Αὐτά εἶναι *διαμήκη κύματα* καί ἀποτελοῦνται ἀπό διαδοχικά πυκνώματα καί ἀραιώματα.

Σχ. 40. Τό παλλόμενο διαπασών δίνει ἐνέργεια στά μόρια τοῦ ἀέρα πού βρῖσκονται σέ ἐπαφή μαζί του.

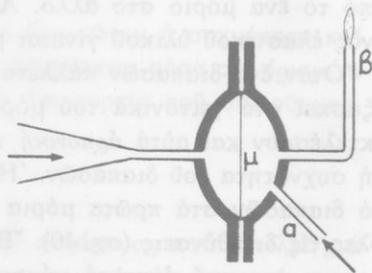


Τά ήχητικά κύματα είναι κύματα ελαστικότητας και επομένως συνάγουμε (§ 13) ότι:

Στά στερεά τά ήχητικά κύματα είναι εγκάρσια ή διαμήκη, ενώ στα ρευστά (υγρά, αέρια) τά ήχητικά κύματα είναι μόνο διαμήκη.

Πειραματική απόδειξη των ήχητικῶν κυμάτων μέσα στον αέρα.
Τά ήχητικά κύματα πού σχηματίζονται μέσα στον αέρα μπορούμε νά τά αποδείξουμε πειραματικῶς μέ τήν ἐξῆς διάταξη:

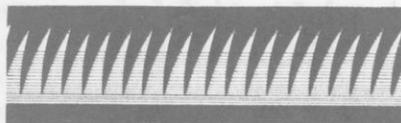
Μιά μικρή κάψα, πού τή λέμε *μανομετρική κάψα*, εἶναι χωρισμένη σέ δύο χώρους μέ μιá ἐλαστική μεμβράνη (σχ. 41). Στόν ἕνα χώρο ἔρχεται φωταέριο πού βγαίνει ἀπό ἕνα λεπτό σωλήνα β. Ἐάν ἀναφλέξουμε τό φωταέριο πού βγαίνει ἀπό τό σωλήνα, σχηματίζεται μιá κατακόρυφη φλόγα καί παρατηροῦμε τό εἶδωλο τῆς φλόγας μέσα σέ στρεφόμενο ἐπίπεδο κάτοπτρο. Βλέπουμε τότε μιá ὀριζόντια φωτεινή ταινία (σχ. 42). Ἐάν ὅμως στή μεμβράνη τῆς κάψας φτάνει ὁ ἦχος πού παράγεται ἀπό μιá ἠχητική πηγῆ, π.χ. ἀπό ἕνα διαπασῶν, τότε ἡ φωτεινή ταινία παρουσιάζει διαδοχικά ὑψώματα καί κοιλώματα (σχ. 43). Αὐτά ἀντιστοιχοῦν στά διαδοχικά *πυκνώματα* καί *ἀραιώματα* πού φτάνουν στή μεμβράνη τῆς κάψας. Ἐάν στήν κάψα φτάνει ὁ ἦχος πού παράγεται ἀπό ἕνα μουσικό ὄργανο (π.χ. ἀπό μιá χορδῆ κιθάρας), τότε τό εἶδωλο τῆς φλόγας ἔχει πολύπλοκη μορφή, παρουσιάζει ὅμως *περιοδικότητα* (σχ. 44). Σήμερα γιά τή μελέτη τῶν ἠχητικῶν κυμάτων χρησιμοποιοῦμε τόν *ἠλεκτρονικό παλμογράφο* (τή λειτουργία του θά τή μάθουμε στόν Ἡλεκτρισμό). Τά ἠχητικά κύματα πού φτάνουν



Σχ. 41. Μανομετρική κάψα



Σχ. 42. Εἶδωλο τῆς φλόγας μέσα στό στρεφόμενο κάτοπτρο



Σχ. 43. Εἶδωλο τῆς φλόγας πού ἀντιστοιχεῖ σέ ἀπλό ἦχο



Σχ. 44. Είδωλο της φλόγας που αντιστοιχεί σε φθόγγο (σύνθετο ήχο)

στο μικρόφωνο δημιουργούν μέσα σε ένα ειδικό κύκλωμα ηλεκτρικές ταλαντώσεις. Αυτές προκαλούν μετακινήσεις μιάς φωτεινής κηλίδας πάνω στο διάφραγμα (όθόνη) του παλμογράφου και τότε βλέπουμε μιά καμπύλη γραμμή που έχει *τήν ίδια μορφή, τήν ίδια περίοδο και πλάτος ανάλογο* με τή μηχανική ταλάντωση που δημιουργούν στο μικρόφωνο τά ήχητικά κύματα που φτάνουν σ' αυτό (σχ. 45).

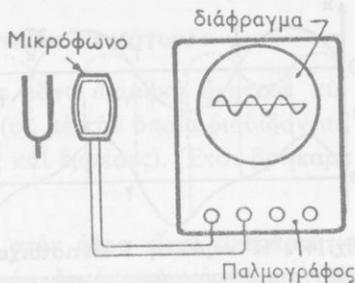
β. Όρισμός του ήχου. Από όσα αναφέραμε παραπάνω μπορούμε νά δώσουμε για τόν ήχο τόν εξής *όρισμό*:

Ο ήχος είναι μιά ύποκειμενική έντύπωση που δημιουργείται στο αυτί μας από τίσ μεταβολές πιέσεως που προκαλεί μιά μηχανική ταλάντωση, ή όποια διαδίδεται μέσα σε ελαστικό υλικό και ή συχνότητα και τό πλάτος της βρίσκονται μέσα σε όρισμένα όρια.

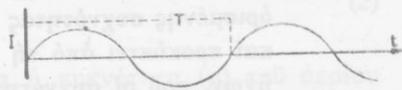
Γιά τούς ήχους με τή συνηθισμένη ένταση οί διακυμάνσεις τής πιέσεως του άερα είναι πολύ μικρές (10^{-6} ως 10^{-7} at).

24. Είδη ήχων

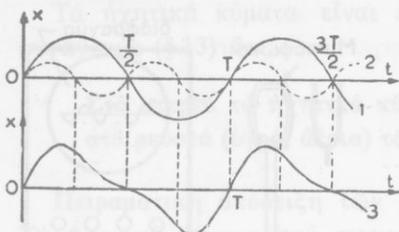
Οί ήχοι που άκούμε δέ μäs προκαλούν πάντοτε τήν ίδια έντύπωση. Οί άκουστοί ήχοι διακρίνονται σε *τόνους, φθόγγους, θορύβους* και *κρότους*. Στά έργαστήρια με κατάλληλες διατάξεις (π.χ. με τόν παλμογράφο) καταγράφουμε τά ήχητικά κύματα που αντιστοιχούν στο κάθε είδος ήχου. Έτσι, βρήκαμε ότι ό ήχος που παράγεται από ένα διαπασών αντιστοιχεί σε *άρμοικά ήχητικά κύματα* (σχ. 46). Αυτός



Σχ. 45. Η καμπύλη που βλέπουμε στον παλμογράφο αντιστοιχεί στη μηχανική ταλάντωση του διαπασών.



Σχ. 46. Καταγραφή ενός άπλου ήχου



Σχ. 47. Ἡ καμπύλη 3 ἀντιστοιχεί σέ φθόγγο καί παριστάνει τή συνισταμένη κίνηση δύο ἀπλῶν ἀρμονικῶν ταλαντώσεων 1 καί 2.



Σχ. 48. Καταγραφή θορύβου (α) καί κρότου (β)

ὁ ἦχος ὀφείλεται σέ *ἀρμονική ταλάντωση* τῆς ἠχητικῆς πηγῆς καί ὀνομάζεται *τόνος* ἢ *ἀπλός ἦχος*. Τέτοιους ἦχους παράγουν μόνο ὀρισμένα ἐργαστηριακά ὄργανα, π.χ. τὰ διαπασῶν. Οἱ ἦχοι πού παράγονται ἀπό τὰ συνηθισμένα μουσικά ὄργανα ἀντιστοιχοῦν σέ *περιοδική κίνηση*, ἡ ὁποία ὅμως δέν εἶναι *ἀρμονική ταλάντωση*. Αὐτοί οἱ ἦχοι ὀνομάζονται *φθόγγοι*. Στό σχῆμα 47 ἡ καμπύλη 3 ἀντιστοιχεῖ σέ φθόγγο. Ὅπως ὅμως ξέρομε (§ 8), μιά περιοδική μὴ ἡμιτονοειδῆς ταλάντωση εἶναι συνισταμένη ἀρμονικῶν ταλαντώσεων ν , 2ν , 3ν , ... Ἐτσι ἡ ταλάντωση 3 στό σχῆμα εἶναι συνισταμένη τῶν δύο ἀρμονικῶν ταλαντώσεων 1 καί 2, πού οἱ συχνότητές τους ἀντίστοιχα εἶναι ν_1 καί $\nu_2 = 2\nu_1$. Ὡστε, ὁ φθόγγος εἶναι *σύνθετος ἦχος*.

Ὁ *θόρυβος* ἀντιστοιχεῖ σέ *ἀκανόνιστα ἠχητικά κύματα* πού δέν παρουσιάζουν καμιά περιοδικότητα (σχ. 48α). Τέλος ὁ *κρότος* ἀντιστοιχεῖ σέ μιά ἀπότομη καί ἰσχυρή *δόνηση* τοῦ ἀέρα ὅπως π.χ. συμβαίνει, ὅταν ἓνα ὄπλο ἐκπυρσοκροτεῖ (σχ. 48β).

Ἀπό τὰ παραπάνω καταλήγουμε στά ἐξῆς:

- I. Οἱ ἦχοι πού μᾶς ἐνδιαφέρουν περισσότερο εἶναι ὁ *τόνος* καί ὁ *φθόγγος*.
- II. Ὁ *τόνος* ἢ *ἀπλός ἦχος* ὀφείλεται σέ *ἀρμονική ταλάντωση* ὀρισμένης συχνότητας (ν). Ὁ *φθόγγος* εἶναι *σύνθετος ἦχος* καί προκύπτει ἀπό τή σύνθεση δύο ἢ περισσότερων ἀπλῶν ἠχων, πού οἱ συχνότητές τους εἶναι ἀκέραια πολλαπλάσια μιᾶς θεμελιώδους συχνότητας (ν).

25. Ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων

(α) Στόν ἀέρα. Στόν ἀέρα διαδίδονται μόνο *διαμήκη ἠχητικά* κύματα καί γιά τή μέτρηση τῆς ταχύτητας (v), μέ τήν ὁποία διαδίδονται, ἐφαρμόζουμε διάφορες μεθόδους (ἄμεσες καί ἔμμεσες). Ἔτσι βρήκαμε ὅτι:

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

Ἀπό τίς μετρήσεις βρίσκουμε ὅτι εἶναι:

ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα	σέ 0°C σέ 15°C	$v_0 \approx 331 \text{ m/sec}$ $v \approx 340 \text{ m/sec}$
--------------------------------	---	--

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

ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα σέ $T^{\circ}\text{K}$	$v = v_0 \sqrt{\frac{T}{273}}$	(1)
---	--------------------------------	-----

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

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

Ἀπόδειξη τῆς ἐξισώσεως (1). Ὅπως ξέρουμε (§ 14) στά ἀέρια τά διαμήκη κύματα διαδίδονται μέ ταχύτητα (v) πού δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

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

Ἐπειδή σέ ὀρισμένη θερμοκρασία ἡ πυκνότητα (ρ) τοῦ ἀερίου εἶναι ἀνάλογη μέ τήν πίεσή του (p), ἀπό τήν ἐξίσωση (2) συμπεραίνουμε ὅτι ἡ ταχύτητα (v) διαδόσεως τοῦ ἤχου στόν ἀέρα εἶναι ἀνεξάρ-

τητη από τήν πίεση. *Αν ο άερας 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 ή ταχύτητα (v_0) του ήχου στον άερα δίνεται από τήν εξίσωση:

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

*Από τήν εξίσωση (3) βρίσκουμε $v_0 \simeq 331 \text{ m/sec}$. *Η πυκνότητα ρ του άερα σε θερμοκρασία T και πίεση p δίνεται από τήν 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 τήν εξίσωση (4), έχουμε:

$$v = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \frac{T}{273}} \quad \text{άρα} \quad v = v_0 \sqrt{\frac{T}{273}}$$

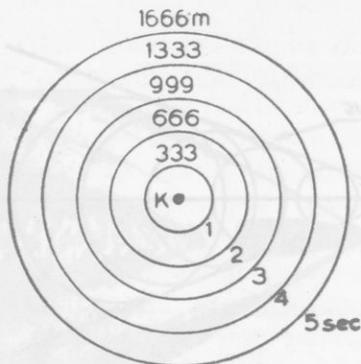
*** Ταχύτητα του ήχου στά άλλα αέρια.** *Ενα αέριο (υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα κλπ.) έχει σχετική πυκνότητα δ ως προς τόν άερα και τήν ίδια θερμοκρασία (T) μέ τόν άερα. *Αποδεικνύεται ότι ή ταχύτητα του ήχου στό αέριο δίνεται από τήν εξίσωση:

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

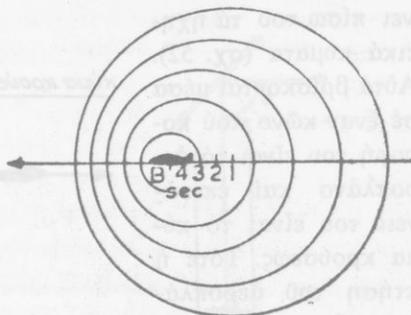
β. Στά υγρά και στά στερεά. *Αποδεικνύεται (πειραματικώς και θεωρητικώς) ότι:

*Η ταχύτητα του ήχου στά υγρά είναι μεγαλύτερη από τήν ταχύτητα του ήχου στά αέρια και στά στερεά είναι μεγαλύτερη από τήν ταχύτητα του ήχου στά υγρά.

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



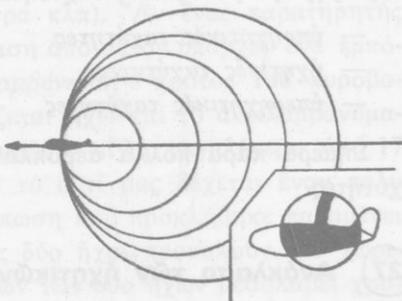
Σχ. 49. Διάδοση των ήχητικών κυμάτων μέσα στον αέρα (ή πηγή Κ των κυμάτων ακίνητη)



Σχ. 50. Τά ήχητικά κύματα προηγούνται από τό αεροπλάνο ($v_A < v_H$).

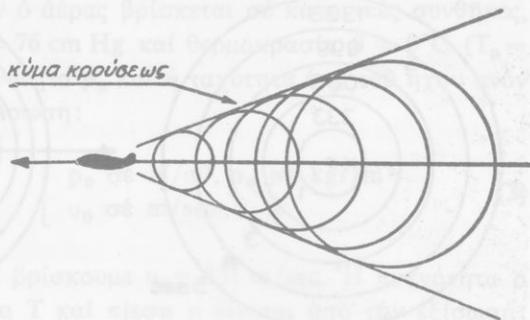
26 Υπερηχητικές ταχύτητες

Τό αεροπλάνο, όταν κινείται, είναι μιά τεράστια πηγή διαταράξεως του αέρα καί επομένως παράγει γύρω του ήχητικά κύματα (σχ. 49) πού διαδίδονται μέ τήν ταχύτητα του ήχου ($v_H = 1200 \text{ km/h}$). Αν ή ταχύτητα (v_A) του αεροπλάνου είναι μικρότερη από τήν ταχύτητα (v_H) του ήχου, τότε τό αεροπλάνο δέν επηρεάζεται από τά ήχητικά κύματα, γιατί αυτά πάντοτε προηγούνται από τό αεροπλάνο (σχ. 50). Αν όμως ή ταχύτητα (v_A) του αεροπλάνου είναι ίση μέ τήν ταχύτητα (v_H) του ήχου, τότε στην εμπρόσθια άκρη του αεροπλάνου δημιουργείται μιά *πύκνωση* των ήχητικών κυμάτων πού ονομάζεται *κύμα κρούσεως* (σχ. 51). Αυτό είναι ένα στρώμα αέρα στό οποιο συμβαίνουν σημαντικές μεταβολές της πίεσεως του αέρα, πού έχουν μεγάλη επίδραση στην πτήση του αεροπλάνου. Τέλος, αν ή ταχύτητα (v_A) του αεροπλάνου είναι μεγαλύτερη από τήν ταχύτητα (v_H) του ήχου, τότε τό αεροπλάνο αφή-



Σχ. 51. Στην εμπρόσθια άκρη του αεροπλάνου δημιουργείται τό κύμα κρούσεως ($v_A = v_H$).

νει πίσω του τά ήχη-
 τικά κύματα (σχ. 52).
 Αδτά βρίσκονται μέσα
 σέ έναν κώνο πού κο-
 ρυφή του είναι τό αε-
 ροπλάνο καί επιφά-
 νειά του είναι τό κύ-
 μα κρούσεως. Τότε ή
 πτήση του αεροπλά-
 νου είναι κανονική.
 Τό κύμα κρούσεως έ-
 χει πυκνότητα μεγα-
 λύτερη από τήν πυ-
 κνότητα του υπόλοιπου άέρα καί γι' αυτό μπορούμε νά τό φωτο-
 γραφίσουμε (σχ. 53).



Σχ. 52. Τό αεροπλάνο προηγείται από τά ήχη-
 τικά κύματα ($v_A > v_H$).

Η αεροδυναμική αποδεικνύει ότι ή κίνηση ενός σώματος (αερο-
 πλάνο, βλήμα) μέσα στον άέρα εξαρτάται από ένα φυσικό μέγεθος,
 πού ονομάζεται **άριθμός του Mach (M)** καί είναι ο λόγος τής ταχύτη-
 τας του σώματος προς τήν ταχύτητα του ήχου στον άέρα.

$$\text{άριθμός του Mach} = \frac{\text{ταχύτητα σώματος}}{\text{ταχύτητα ήχου}} \quad M = \frac{v_{\text{σώματος}}}{v_{\text{ήχου}}}$$

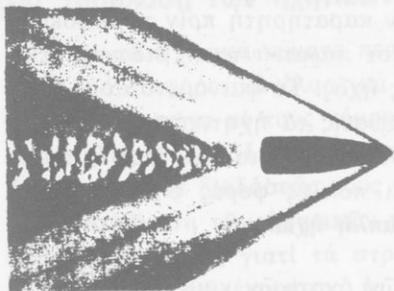
Έτσι γιά τά σώματα πού κινούνται μέσα στον άέρα διακρίνουμε
 τής εξής τρεις κλίμακες ταχυτήτων:

- ύποηχητικές ταχύτητες $M < 0,8$
- ήχητικές ταχύτητες $0,8 < M < 1,2$
- ύπερηχητικές ταχύτητες $M > 1,2$

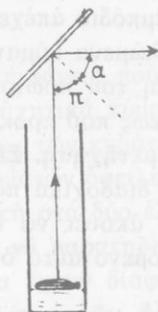
Σήμερα πάρα πολλά αεροπλάνα κινούνται μέ ύπερηχητικές τα-
 χύτητες.

27. Άνάκλαση τών ήχητικών κυμάτων

Τά ήχητικά κύματα έχουν γενικά όλες τής γνωστές ιδιότητες τών
 κυμάτων ελαστικότητας. Όταν λοιπόν πέσουν πάνω σέ κατάλληλα
 έμπόδια, τά ήχητικά κύματα *ανακλώνται* σύμφωνα μέ τούς νόμους



Σχ. 53. Φωτογράφιση του κύματος κρούσεως (ταχύτητα βλήματος 800 m/sec)



Σχ. 54. 'Ανάκλαση των ήχητικῶν κυμάτων πάνω σέ γυάλινη πλάκα

τῆς ἀνακλάσεως τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας (§ 17). Πειραματικῶς ἡ ἀνάκλαση τῶν ἡχητικῶν κυμάτων δείχεται μέ τό ἐξῆς πείραμα: Στόν πυθμένα ἑνός κυλινδρικοῦ δοχείου βάζουμε βαμβάκι καί πάνω του τοποθετοῦμε ἕνα συνηθισμένο ρολόγι (σχ. 54). Ἄν στό στόμιο τοῦ δοχείου φέρουμε πλάγια μιά γυάλινη πλάκα, τότε ἀκοῦμε καθαρά τούς χτύπους τοῦ ρολογιοῦ μόνο κατά μιά ὀρισμένη διεύθυνση, γιά τήν ὁποία ἰσχύει ἡ γνωστή σχέση ὅτι ἡ γωνία ἀνακλάσεως εἶναι ἴση μέ τή γωνία προσπτώσεως.

α. Ἥχώ καί μετήχηση. Τά ἡχητικά κύματα ἀνακλῶνται καί ὅταν πέσουν πάνω σέ ἀκανόνιστα ἐμπόδια πού ἔχουν μεγάλες διαστάσεις (τοῖχος, λόφος, συστάδα ἀπό δέντρα κλπ). Ἄν ἕνας παρατηρητής πυροβολήσει καί σέ ἀρκετή ἀπόσταση ἀπό αὐτόν ὑπάρχει ἕνα ἐμπόδιο, τότε αὐτός ἀκοῦει *νά ἐπαναλαμβάνεται* ὁ κρότος τοῦ πυροβολισμοῦ. Τό φαινόμενο αὐτό ὀνομάζεται **ἡχώ** καί τό ἀντιλαμβανόμενο, 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 ἡχοι προκαλοῦν δύο χωριστούς ἐρεθισμούς, ὅταν μεταξύ αὐτῶν τῶν δύο ἡχων 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 πάνε στό ἐμπόδιο καί νά ἐπιστρέψουν στόν παρατηρητή νά εἶναι περίπου 34 m.

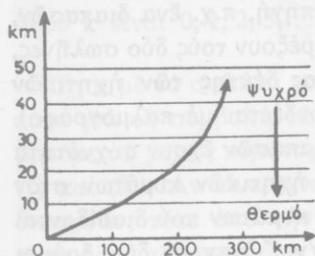
Ἐάν τὸ ἐμπόδιο ἀπέχει ἀπὸ τὸν παρατηρητὴ λιγότερο ἀπὸ 17 m, τότε τὰ ἀνακλώμενα κύματα φτάνουν στὸν παρατηρητὴ πρὶν τελειώσει ἡ ἐντύπωση τοῦ πρώτου ἤχου καὶ ἔτσι παρατείνεται ἡ διάρκεια τῆς ἐντυπώσεως πού προκάλεσε ὁ πρῶτος ἤχος. Τὸ φαινόμενο αὐτὸ ὀνομάζεται **μετήχηση**. Σέ μερικές περιπτώσεις τὰ ἤχητικά κύματα ἀνακλῶνται διαδοχικὰ πάνω σέ περισσότερα ἐμπόδια καὶ τότε ὁ παρατηρητὴς ἀκούει νὰ ἐπαναλαμβάνεται πολλές φορές ὁ ἴδιος ἤχος. Τὸ φαινόμενο αὐτὸ ὀνομάζεται **πολλαπλὴ ἠχώ**.

β. Ἐφαρμογές τῆς ἀνακλάσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων. Τὸ φαινόμενο τῆς ἀνακλάσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων ἰδιαίτερα τὸ ὑπολογίζουμε, ὅταν διαμορφώνουμε μεγάλες αἰθουσες (θεάτρου, κοινοβουλίου, συναυλιῶν, διαλέξεων). Ὅταν μέσα σέ μιὰ μεγάλη αἴθουσα μιὰ ἤχητικὴ πηγὴ παράγει ἤχητικά κύματα, τότε ὁ ἀκροατὴς πού βρίσκεται μέσα στὴν αἴθουσα δέχεται: α) ἤχητικά κύματα μὲ ἀπευθείας διάδοση, β) ἤχητικά κύματα ἀπὸ τὴ διάχυση (δηλ. τὴν ἀκανόνιστὴ ἀνάκλαση) πού προκαλοῦν διάφορα ἀντικείμενα καὶ γ) ἤχητικά κύματα ἀπὸ τὴν «κανονικὴ» ἀνάκλαση, πού γίνεται πάνω σέ διάφορα ἐμπόδια (τοῖχοι, ὀροφὴ, κολῶνες κλπ). Γιὰ νὰ ἔχει ἡ αἴθουσα καλὴ «ἀκουστικὴ», πρέπει τὰ ἤχητικά κύματα πού φτάνουν στὸν ἀκροατὴ μὲ τοὺς δύο τελευταίους τρόπους νὰ ἐνισχύουν τὸν ἤχο πού προκαλοῦν τὰ κύματα πού φτάνουν ἀπευθείας στὸν ἀκροατὴ. Γι' αὐτὸ τὸ σκοπὸ διαμορφώνεται κατάλληλα ἡ αἴθουσα.

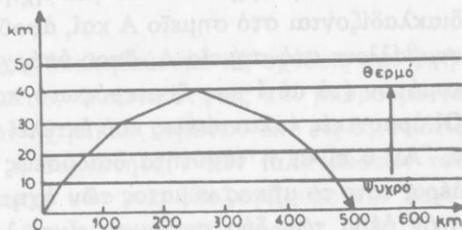
Μιὰ σημαντικὴ ἐφαρμογὴ τῆς ἀνακλάσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων εἶναι τὸ *βυθόμετρο*, πού τὸ χρησιμοποιοῦμε γιὰ νὰ μετράμε τὸ βάθος τῆς θάλασσας. Στὰ ὕφαλα τοῦ σκάφους ὑπάρχει ἕνας πομπὸς ἤχητικῶν κυμάτων μεγάλης συχνότητος (§ 36). Αὐτὸς ἐκπέμπει ἕνα ἤχητικὸ σῆμα, δηλαδὴ ἕνα συρμὸ ἤχητικῶν κυμάτων, πού ἀνακλῶνται πάνω στὸ βυθὸ καὶ ἐπιστρέφουν σέ ἕνα δέκτη, πού βρίσκεται καὶ αὐτὸς στὰ ὕφαλα τοῦ σκάφους. Ἡ ἀναχώρηση τῶν κυμάτων ἀπὸ τὸν πομπὸ καὶ ἡ ἐπιστροφὴ τους στὸ δέκτη καταγράφονται αὐτόματα καὶ ἔτσι εἶναι ἀμέσως γνωστὴ ἡ διάρκεια t τῆς διαδρομῆς τῶν ἤχητικῶν κυμάτων. Ἐάν v εἶναι ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στὴ θάλασσα, τότε τὸ βάθος (s) εἶναι $s = v \cdot t/2$.

28 Διάθλαση τῶν ἤχητικῶν κυμάτων

Όταν τὰ ἤχητικά κύματα περνοῦν ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια πού διαχωρίζει δύο διαφορετικά ἐλαστικά μέσα, τότε τὰ ἤχητικά κύματα διαθλῶνται σύμφωνα μέ τούς νόμους τῆς διαθλάσεως τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας (§ 18). Ἡ διάθλαση τῶν ἤχητικῶν κυμάτων ὀφείλεται στό ὅτι ἡ ταχύτητα διαδόσεώς τους εἶναι διαφορετική στά δύο ἐλαστικά μέσα. Διάθλαση τῶν ἤχητικῶν κυμάτων μπορεῖ νά παρατηρηθεῖ καί στήν ἀτμόσφαιρα, γιατί τὰ στρώματα τοῦ ἀέρα ἔχουν διαφορετική θερμοκρασία καί ἐπομένως ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στά διάφορα στρώματα τοῦ ἀέρα εἶναι διαφορετική (§ 25). Συνήθως τὰ στρώματα τοῦ ἀέρα πού βρίσκονται κοντά στήν ἐπιφάνεια τοῦ ἐδάφους εἶναι θερμότερα ἀπὸ τὰ ἄλλα στρώματα πού βρίσκονται πιό ψηλά. Μιά ἤχητική ἀκτίνα πού διευθύνεται πλάγια πρὸς τὰ πάνω μπαίνει ἀπὸ θερμότερα σέ ψυχρότερα στρώματα ἀέρα, δηλαδή μπαίνει σέ στρώματα ἀέρα στά ὅποια ἡ ταχύτητα τῶν ἤχητικῶν κυμάτων γίνεται διαρκῶς μικρότερη (σχ. 55). Τότε ἡ γωνία διαθλάσεως εἶναι μικρότερη ἀπὸ τὴ γωνία προσπτώσεως. Ἐτσι ἡ ἤχητική ἀκτίνα μεταβάλλεται σέ καμπύλη γραμμῆ. Σέ μερικές ὁμως περιπτώσεις καί κυρίως τὴ νύχτα μπορεῖ τὰ στρώματα τοῦ ἀέρα, πού βρίσκονται κοντά στό ἔδαφος, νά γίνουν ψυχρότερα ἀπὸ τὰ ἄλλα στρώματα πού βρίσκονται πιό ψηλά. Τότε ἡ ἤχητική ἀκτίνα μπαίνει ἀπὸ ψυχρότερα σέ θερμότερα στρώματα καί ἡ γωνία διαθλάσεως εἶναι μεγαλύτερη ἀπὸ τὴ γωνία προσπτώσεως (σχ. 56). Ἡ ἤχητική ἀκτίνα μπορεῖ σέ ὀρισμένο ὕψος νά πάθει ὀλική ἀνάκλαση καί τότε ἀκολουθώντας μιὰ συμμετρική πορεία ξαναγυρίζει στό ἔδαφος. Ἐτσι



Σχ. 55. Καμπύλωση τῆς ἤχητικῆς ἀκτίνας ἐξαιτίας διαδοχικῶν διαθλάσεων



Σχ. 56. Ὅλική ἀνάκλαση τῆς ἤχητικῆς ἀκτίνας

έξηγείται 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 έκρήξεως, ενώ δεν είναι ακουστός σε άλλους τόπους που βρίσκονται πιο κοντά στον τόπο της έκρήξεως.

29 Περιθλάση των ήχητικῶν κυμάτων

Τά φαινόμενα τῆς περιθλάσεως τῶν κυμάτων ελαστικότητας ἐμφανίζονται, ὅταν τά κύματα συναντοῦν ἀντικείμενα ἢ ἀνοίγματα πού οἱ διαστάσεις τους εἶναι τῆς τάξεως τοῦ μήκους κύματος (ἀπό $\lambda/10$ ὡς καί 10 λ). Γιά τήν ὀμίλια καί τή μουσική τό μήκος κύματος τῶν ήχητικῶν κυμάτων εἶναι ἀπό 30 cm ὡς 3 m. Τόσες εἶναι καί οἱ διαστάσεις πού ἔχουν τά ἀντικείμενα καί τά ἀνοίγματα πού στήν καθημερινή ζωή συναντοῦν στό δρόμο τους τά ήχητικά κύματα (πόρτες, παράθυρα, ἐπιπλα, στυλοὶ κλπ). Τό φαινόμενο τῆς περιθλάσεως τῶν ήχητικῶν κυμάτων μᾶς ἐπιτρέπει νά ἀκοῦμε ἀρκετά καθαρά μία ήχητική πηγή, χωρίς νά φτάνουν ἀπευθείας σέ μᾶς οἱ ήχητικές ἀκτίνες πού φεύγουν ἀπό τήν ήχητική πηγή.

30 Συμβολή των ήχητικῶν κυμάτων

Τά ήχητικά κύματα προκαλοῦν φαινόμενα *συμβολῆς*. Θά ἐξετάσουμε αὐτά τά φαινόμενα μέ μία διάταξη, πού ὀνομάζεται *σωλήνας τοῦ König* καί ἀποτελεῖται ἀπό δύο σωλήνες Β καί Γ (σχ. 57). Ἀνψώνοντας τό σωλήνα Γ μεταβάλλουμε τό μήκος του. Τά ήχητικά κύματα πού προέρχονται ἀπό μία ήχητική πηγή, π.χ. ἕνα διαπασῶν, διακλαδίζονται στό σημεῖο Α καί, ἀφοῦ διατρέξουν τοὺς δύο σωλήνες, *συμβάλλουν* στό σημεῖο Δ, ὅπου ὑπάρχει ἕνας δέκτης τῶν ήχητικῶν κυμάτων (τό αὐτί μας ἢ μικρόφωνο πού συνδέεται μέ παλμογράφο). Οἱ ἀρμονικές ταλαντώσεις πού ἐκτελεῖ τό διαπασῶν ἔχουν συχνότητα ν. Ἄν υ εἶναι ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ήχητικῶν κυμάτων στόν ἀέρα, τότε τό μήκος κύματος τῶν ήχητικῶν κυμάτων πού διαδίδονται στόν ἀέρα τῶν δύο σωλήνων εἶναι $\lambda = \nu/\nu$. Ὄταν οἱ δύο δρόμοι ΑΒΔ καί ΑΓΔ τῶν ήχητικῶν κυμάτων, πού διαδίδονται μέσα στοὺς δύο σωλήνες, εἶναι ἴσοι, τότε τά δύο κύματα φτάνουν στό δέκτη μέ

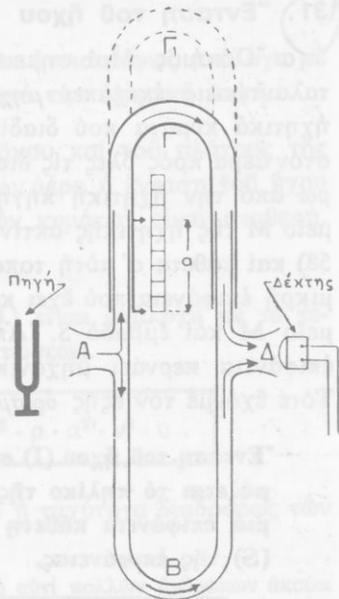
τήν ίδια φάση. Σ' αυτή την περίπτωση τό πλάτος τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως εἶναι μέγιστο καί ἀκοῦμε ἕνα δυνατό ἦχο. Ἀνυψώνοντας σιγά-σιγά τό σωλήνα Γ κάνουμε ἄνισους τοὺς δύο δρόμους πού διατρέχουν τά κύματα μέσα στοὺς δύο σωλήνες. Ὄταν ἡ διαφορά (d) τῶν δύο δρόμων ΑΓΔ — ΑΒΔ γίνει ἴση μέ περιττό ἀριθμό ἡμικυμάτων, τότε τά ἠχητικά κύματα φτάνουν στό δέκτη μέ ἀντίθετη φάση. Σ' αὐτή την περίπτωση τό πλάτος τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως εἶναι ἴσο μέ μηδέν καί συμβαίνει κατάργηση τοῦ ἤχου. Ἄν ἀνυψώνοντας τό σωλήνα Γ κάνουμε τή διαφορά (d) τῶν δρόμων τῶν δύο κυμάτων ἴση μέ ἕνα μήκος κύματος (λ), τότε στό σημεῖο Δ τῆς συμβολῆς τῶν δύο κυμάτων δημιουργεῖται πάλι μέγιστο πλάτος τῆς συνισταμένης ταλαντώσεως, δηλαδή ἀκοῦμε πάλι δυνατό ἦχο. Ὄστε, στό σημεῖο Δ πού συμβάλλουν τά δύο ἠχητικά κύματα ἔχουμε:

$$\text{μέγιστο τοῦ ἤχου,} \quad \text{ὅταν εἶναι} \quad d = \kappa \cdot \lambda \quad (1)$$

$$\text{κατάργηση τοῦ ἤχου,} \quad \text{ὅταν εἶναι} \quad d = (2\kappa + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

ὅπου κ εἶναι 0, 1, 2, 3, ...

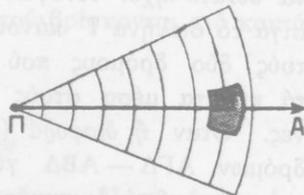
Ἔτσι μέ τό σωλήνα τοῦ König ἐπαληθεύουμε τίς σχέσεις πού βρήκαμε γιά τή συμβολή τῶν κυμάτων ελαστικότητας καί μπορούμε νά βροῦμε τό μήκος κύματος λ τῶν ἠχητικῶν κυμάτων ἀπό τίς ἐξισώσεις (1) καί (2). Ἄν εἶναι γνωστή ἡ συχνότητα ν τῶν ταλαντώσεων τοῦ διαπασῶν, τότε ἀπό τήν ἐξίσωση $v = \nu \cdot \lambda$ ὑπολογίζουμε τήν ταχύτητα (v) διαδόσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων στόν ἀέρα.



Σχ. 57. Σωλήνας τοῦ König

31. Ένταση του ήχου

α. Όρισμός. Μιά σημειακή ήχητική πηγή που εκτελεί αμείωτες ταλαντώσεις εκπέμπει μηχανική ισχύ. Αυτή μεταφέρεται από τα ήχητικά κύματα που διαδίδονται μέσα στον αέρα προς όλες τις διευθύνσεις γύρω από την ήχητική πηγή. Σε ένα σημείο M της ήχητικής ακτίνας PA (σχ. 58) και κάθετα σ' αυτή τοποθετούμε μία μικρή επιφάνεια που έχει κέντρο το σημείο M και έμβαδο S . Από αυτή την επιφάνεια περνάει μηχανική ισχύς P . Τότε έχουμε τον εξής όρισμό :



Σχ. 58. Η ένταση του ήχου στο σημείο M είναι $I = P/S$.

Ένταση του ήχου (I) σε ένα σημείο μιας ήχητικής ακτίνας ονομάζεται το πηλίκο της μηχανικής ισχύος (P), που περνάει από μία επιφάνεια κάθετη στην ήχητική ακτίνα, διά του έμβαδου (S) της επιφάνειας.

ένταση του ήχου $I = \frac{P}{S}$

$$\left\{ \begin{array}{l} P \text{ σε } W, S \text{ σε } m^2 \\ I \text{ σε } W/m^2 \end{array} \right.$$

Στό σύστημα MKS μονάδα έντασεως του ήχου είναι τό $1 \text{ Watt}/m^2$. Στην πράξη ως μονάδα έντασεως του ήχου παίρνουμε συνήθως τό $1 \text{ Watt}/cm^2$.

β. Μεταβολή της έντασεως του ήχου μέ την απόσταση από την ήχητική πηγή. Μιά ήχητική πηγή, που για εύκολία τή θεωρούμε ως ύλικό σημείο, εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις μηχανική ισχύ $P_{ολ}$ και υποθέτουμε ότι ή ισχύς αυτή διαδίδεται μέσα στον αέρα χωρίς καμιά απώλεια. Γύρω από την πηγή σχηματίζονται σφαιρικά κύματα. Σε ένα σημείο M , που βρίσκεται σε απόσταση R από την ήχητική πηγή, ή επιφάνεια κύματος έχει έμβαδο $S = 4\pi R^2$ και επομένως στο σημείο M ή ένταση (I) του ήχου είναι:

$$\text{ένταση του ήχου } I = \frac{P_{ολ}}{4\pi R^2}$$

Παρατηρούμε ότι:

Ἡ ένταση (I) τοῦ ἤχου μεταβάλλεται ἀντιστρόφως ἀνάλογα μέ τό τετράγωνο τῆς ἀποστάσεως (R) ἀπό τήν ἠχητική πηγή.

γ. Σχέση μεταξύ τῆς έντάσεως τοῦ ἤχου καί τοῦ πλάτους τῆς ταλαντώσεως. Σέ ἕνα σημεῖο M μέσα στόν ἀέρα ἡ ένταση τοῦ ἤχου εἶναι I καί ἡ συχνότητα ν τῶν ἠχητικῶν κυμάτων εἶναι σταθερή. Ἀποδεικνύεται ότι:

Ἡ ένταση (I) ἑνός ἤχου (ν = σταθ.) εἶναι ἀνάλογη μέ τό τετράγωνο τοῦ πλάτους (α) τῆς ταλαντώσεως.

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

δπου ρ εἶναι ἡ πυκνότητα τοῦ ἀέρα καί υ ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων.

Παρατήρηση. Στή συχνότητα ν = 3000 Hz τό αὐτί πολλῶν ἀνθρώπων ἀκοῦει ἕναν ἤχο πού ἔχει ἰσχύ $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Ἐάν τό ἠχητικό κύμα διαδίδεται μέσα στόν ἀέρα πού εἶναι σέ κανονικές συνθήκες (0° C, 1 Atm), τότε ἀπό τήν παραπάνω ἐξίσωση βρίσκουμε ότι τό πλάτος τῆς ταλαντώσεως πού διαδίδεται μέ τό ἠχητικό κύμα εἶναι $a = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ cm}$. Αὐτό τό πλάτος εἶναι περίπου τό ἕνα ἑκατοστό τῆς διαμέτρου τοῦ ἀτόμου (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 εἶναι 331 m/sec. Σέ ποιά θερμοκρασία τοῦ ἀέρα ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου εἶναι 350 m/sec;

38. Σέ θερμοκρασία 15° C ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα εἶναι 340 m/sec. Πόση εἶναι ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα, όταν ἡ θερμοκρασία του εἶναι 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 εἶναι 340 m/sec καί στό χάλυβα εἶναι 5000 m/sec. Πόσο εἶναι τό μήκος κύματος μέσα σ' αὐτά τά δύο ὕλικά;

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

41. Γιά τόν ξηρό ἀέρα εἶναι $\gamma = 1,41$. Στή θερμοκρασία $T_0 = 273^\circ \text{ K}$ (δηλαδή 0° C) ἡ πυκνότητα τοῦ ἀέρα εἶναι $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$. Ἡ κανονική πίεση $p_0 = 76 \text{ cm Hg}$ εἶναι $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Πόση εἶναι 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 $0,5 \text{ sec}$ μετά τόν πυροβολισμό καί μιά δεύτερη ἤχώ 1 sec μετά τόν πυροβολισμό. 1) Πόση εἶναι 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 δμίχλης βρίσκεται ἔμπρός ἀπό μιά βραχώδη ἀκτὴ καί ἐκπέμπει πρὸς τὴν ἀκτὴ ἕνα ἠχητικό σῆμα. Ἀπὸ τὴν ἀνάκλαση τοῦ ἤχου πάνω στὴν ἀκτὴ φτάνουν στό πλοῖο δύο ἤχοι πού χρονικά ἀπέχουν μεταξύ τους 13 sec . Ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα εἶναι 340 m/sec καί στή θάλασσα 1440 m/sec . Πόση εἶναι ἡ ἀπόσταση τοῦ πλοίου ἀπὸ τὴν ἀκτὴ;

44. Γιά νά μετρήσουμε τὴν ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα μέ τό σωλήνα τοῦ König, χρησιμοποιοῦμε ἠχητικὴ πηγὴ πού ἔχει συχνότητα $\nu = 262 \text{ Hz}$. Γιά νά ἀντιληφθοῦμε δύο διαδοχικὲς καταργήσεις τοῦ ἤχου, πρέπει νά ἀϋξηθεῖ τό μήκος τοῦ ἑνός σωλήνα κατὰ 130 cm . Πόση εἶναι ἡ ταχύτητα τοῦ ἤχου στόν ἀέρα;

45. Ὁ δίσκος μιᾶς σειρήνας ἔχει 10 τρύπες καί ἐκτελεῖ 26 στροφές τό δευτερόλεπτο. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα τοῦ παραγόμενου ἤχου;

46. Οἱ δίσκοι δύο σειρῆνων A καί B ἔχουν ἀντίστοιχα 50 καί 80 τρύπες. Ὁ δίσκος τῆς σειρήνας A ἐκτελεῖ 8 στροφές τό δευτερόλεπτο. Πόσες στροφές πρέπει νά ἐκτελεῖ ὁ δίσκος τῆς σειρήνας B , ὥστε ὁ ἤχος πού παράγει αὐτὴ ἡ σειρήνα νά εἶναι ὁ δεύτερος ἀρμονικός τοῦ ἤχου πού παράγει ἡ σειρήνα A ;

47. 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 ἀκούμε νά ἔχουν λόγο $3/2$;

48. Ἡ συχνότητα ἑνός φθόγγου εἶναι $\nu_1 = 440 \text{ Hz}$. Πόση εἶναι ἡ

$v = \lambda \nu$ $d = (2x-1) \lambda / 2$

συχνότητα ν_2 ενός άλλου φθόγγου, αν οι συχνότητες των δύο φθόγγων έχουν λόγο $\nu_2/\nu_1 = 1,122$;

49) Μία πολύ μικρή ήχητική πηγή εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις ήχητική ισχύ με σταθερό ρυθμό $P = 1,5 \text{ W}$. Νά βρεθεί ή ένταση του ήχου σε ένα σημείο που απέχει 25 m από την πηγή στις εξής περιπτώσεις: α) όταν δέ συμβαίνει απορρόφηση ήχητικής ενέργειας, και β) όταν κάθε 5 m τά 2% της ήχητικής ενέργειας απορροφούνται.

50) Ήχητική πηγή με μικρές διαστάσεις εκπέμπει ήχητική ισχύ P ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Σε απόσταση 100 m από την πηγή ή ένταση του ήχου είναι $I = 5 \cdot 10^{-8} \text{ W/cm}^2$. Αν δέ συμβαίνει απορρόφηση της ήχητικής ενέργειας, πόση είναι ή ήχητική ισχύς που εκπέμπει ή πηγή; Πόση ήχητική ενέργεια (E) εκπέμπει ή πηγή μέσα σε χρονικό διάστημα $t = 10 \text{ sec}$;

Φυσιολογικά χαρακτηριστικά του ήχου

32. Φυσιολογικά χαρακτηριστικά των μουσικῶν ἤχων

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

Τά ήχητικά κύματα υπάρχουν ανεξάρτητα από τό αυτί μας που είναι ένας *δέκτης* των ήχητικῶν κυμάτων. Στους μουσικούς ήχους που άκοϋμε, διακρίνουμε όρισμένα *χαρακτηριστικά γνωρίσματα*, μέ τά όποια ξεχωρίζουμε τους διάφορους ήχους μεταξύ τους. Αυτά τά γνωρίσματα είναι *υποκειμενικά* και χαρακτηρίζουν τά *αισθήματα* που προκαλούν σε μās οί διάφοροι ήχοι. Έτσι σε κάθε μουσικό ήχο αναγνωρίζουμε τά εξής τρία υποκειμενικά γνωρίσματα: **ύψος, άκουστότητα και χροιά**.

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

Ή *άκουστότητα* ή *ένταση* του *άκουστικού αισθήματος* (*) είναι ένα

(*) Loudness, intensité physiologique, Lautstärke.

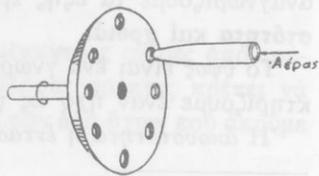
γνώρισμα του ήχου που μᾶς ἐπιτρέπει νά χαρακτηρίζουμε ἕναν ἦχο ὡς *ἰσχυρό* ἢ *ἀσθενή*.

Ἡ *χροιά* εἶναι ἕνα γνώρισμα τοῦ ἦχου που μᾶς ἐπιτρέπει νά διακρίνουμε μεταξύ τους δύο ἦχους που ἔχουν τό ἴδιο ὕψος καί τήν ἴδια ἀκουστότητα, ἀλλά παράγονται ἀπό δύο *διαφορετικές* ἠχητικές πηγές.

Καθένα ἀπό τά τρία *ὑποκειμενικά* γνώρισμα, που τό αὐτί μας ἀναγνωρίζει σέ ἕναν ἦχο, *ἀντιστοιχεῖ* σέ ἕνα *ἀντικειμενικό* γνώρισμα τῶν ἠχητικῶν κυμάτων, που εἶναι ἕνα ὀρισμένο *φυσικό μέγεθος*. Αὐτό τό μέγεθος μπορούμε νά τό μετρήσουμε. Θά ἐξετάσουμε ποιά σχέση ὑπάρχει μεταξύ ἑνός *ὑποκειμενικοῦ* γνωρίσματος τοῦ ἦχου καί τοῦ ἀντίστοιχου *ἀντικειμενικοῦ* γνωρίσματος τῶν ἠχητικῶν κυμάτων.

33 Ὑψος τοῦ ἦχου

Γιά νά βροῦμε σέ ποιό φυσικό μέγεθος ἀντιστοιχεῖ τό ὑποκειμενικό γνώρισμα τοῦ ἦχου, που τό ὀνομάζουμε *ὕψος* τοῦ ἦχου, χρησιμοποιοῦμε τή *σειρήνα* (σχ. 59). Αὐτή ἀποτελεῖται ἀπό ἕνα μεταλλικό δίσκο που ἔχει μικρές τρύπες σέ ἴσες ἀποστάσεις ἀπό τόν ἀξονα περιστροφῆς καί σέ ἴσες ἀποστάσεις μεταξύ τους. Ὁ δίσκος μπορεῖ νά στρέφεται ὀμαλά μέ ἕναν κινητήρα. Ἀπό ἕνα λεπτό σωλήνα που καταλήγει ἔμπρός ἀπό τίς τρύπες διαβιβάζουμε ἰσχυρό ρεῦμα ἀέρα κάθετα στό ἐπίπεδο τοῦ δίσκου. Ὄταν ὁ δίσκος στρέφεται ὀμαλά, ἡ ροή τοῦ ἀέρα μέσα ἀπό τίς τρύπες τοῦ δίσκου καταργεῖται ρυθμικά καί ἔτσι κοντά στό δίσκο προκαλοῦνται *περιοδικές μεταβολές τῆς πίεσεως τοῦ ἀέρα*. Τότε ἡ σειρήνα παράγει ἕνα *μουσικό ἦχο*. Τά ἠχητικά κύματα που δημιουργοῦνται ἔχουν συχνότητα ν , ἴση μέ τόν ἀριθμό τῶν διαταράξεων τοῦ ρεύματος τοῦ ἀέρα κατά δευτερόλεπτο δηλαδή εἶναι τόση, ὅσες εἶναι οἱ τρύπες που περνοῦν κατά δευτερόλεπτο ἔμπρός ἀπό τήν ἄκρη τοῦ λεπτοῦ σωλήνα. Ἄν ὁ δίσκος ἔχει k τρύπες καί ἐκτελεῖ N στροφές στό δευτερόλεπτο, τότε ἡ *συχνότητα* ν τῶν ἠχητικῶν κυμάτων εἶναι $\nu = N \cdot k$. Ἄν αὐξάνουμε τή συχνότη-



Σχ. 59. Σειρήνα

τα N τής περιστροφής του δίσκου, ή *συχνότητα* ν , τών ήχητικῶν κυμάτων αυξάνει καί ὁ ἦχος πού ἀκοῦμε γίνεται διαρκῶς *πιό ψηλός*. Ἀντίθετα, ὅταν ἐλαττώνουμε τή *συχνότητα* N τής περιστροφής του δίσκου, ὁ ἦχος γίνεται διαρκῶς *πιό βαρῦς*. Ἔτσι καταλήγουμε στό ἐξῆς συμπέρασμα:

Τό ὕψος ἑνός ἤχου εἶναι ἀνάλογο μέ τή *συχνότητα* (ν) τής ταλαντώσεως πού παράγει τόν ἦχο.

Ὡστε, ή *συχνότητα* ν τής ταλαντώσεως πού ἐκτελεῖ ή ήχητική πηγή εἶναι τό *ἀντικειμενικό* γνώρισμα πού χαρακτηρίζει τό *ὕψος* τοῦ ἤχου (*ὑποκειμενικό* γνώρισμα). Γι' αὐτό συνήθως τό *ὕψος* τοῦ ἤχου ἐκφράζεται μέ τή *συχνότητα* ν τής ταλαντώσεως τής ήχητικῆς πηγῆς.

α. Ὅρια τῶν ἀκουστῶν ἤχων. Τό αὐτί μας ἀντιλαμβάνεται μόνο τούς ἤχους πού ἔχουν *συχνότητα* ἀπό 16 Hz ὡς 20 000 Hz. Αὐτά ὁμως τά ὅρια τῶν ἀκουστῶν ἤχων διαφέρουν ἀπό τό ἕνα ἄτομο στό ἄλλο. Οἱ ἤχοι πού ἔχουν *συχνότητα* μικρότερη ἀπό 16 Hz ὀνομάζονται *ὑπόηχοι*, ἐνῶ οἱ ἤχοι πού ἔχουν *συχνότητα* μεγαλύτερη ἀπό 20 000 Hz ὀνομάζονται *ὑπέρηχοι* καί ἔχουν σημαντικές ἐφαρμογές, γιατί ἔχουν ὀρισμένες ιδιότητες (§ 36).

β. Ἀρμονικοί ἤχοι. Ἔχουμε μιά σειρά ἀπό ἀπλούς ἤχους, πού ἔχουν *συχνότητες* $\nu, 2\nu, 3\nu, 4\nu, \dots$, δηλαδή οἱ *συχνότητές* τους εἶναι *ἀκέραια πολλαπλάσια* τής *συχνότητας* ν . Ὁ ἦχος μέ τή *συχνότητα* ν ὀνομάζεται *θεμελιώδης ἦχος* ή *πρῶτος ἀρμονικός*, ἐνῶ οἱ ἤχοι μέ τίς *συχνότητες* $2\nu, 3\nu, 4\nu, \dots$ ὀνομάζονται ἀντίστοιχα *δεύτερος, τρίτος, τέταρτος ἀρμονικός* κ.ο.κ.

34. Ἀκουστότητα ή ἔνταση τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος

Ἐναν ἀπλό ἦχο πού ἔχει ὀρισμένη *συχνότητα* (π.χ. $\nu = 1000$ Hz) τόν ἀκοῦμε, ὅταν ή *ένταση* τοῦ ἤχου περιλαμβάνεται μεταξύ μιᾶς *ἐλάχιστης* καί μιᾶς *μέγιστης τιμῆς*. Ἔτσι γιά κάθε *συχνότητα* ὑπάρχει ἕνα *πεδίο ἀκουστότητας* πού ἀρχίζει ἀπό μιά *ἐλάχιστη ένταση* ἤχου, ή ὁποία ὀνομάζεται *κατώφλι ἀκουστότητας*, καί τελειώνει σέ μιά *μέγιστη ένταση* ἤχου, ή ὁποία ὀνομάζεται *ὄριο πόνου*. Ὅταν ή *ένταση* τοῦ ἤχου εἶναι μικρότερη ἀπό τό *κατώφλι ἀκουστότητας*,

τό αὐτί μας δέν ἀκούει τόν ἤχο. Ὄταν ἡ ἔνταση τοῦ ἤχου εἶναι μεγαλύτερη ἀπό τό ἀνώτατο ὄριο ἀκουστότητας, δηλαδή τό ὄριο πόνου, τότε ἡ ἀκρόαση αὐτοῦ τοῦ ἤχου γίνεται ἀφόρητη. Ἡ μεγαλύτερη ἔκταση τοῦ πεδίου ἀκουστότητας ἀντιστοιχεῖ στίς συχνότητες γύρω ἀπό τά 1000 Hz.

Ἡ ἔνταση τοῦ ἤχου εἶναι ἀντικειμενικό γνῶρισμα ἑνός ἤχου, ἐνῶ ἡ ἔνταση τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος πού προκαλεῖ ὁ θεωρούμενος ἤχος εἶναι ὑποκειμενικό γνῶρισμα τοῦ ἤχου, πού ἐξαρτᾶται ἀπό τή φυσιολογική λειτουργία τοῦ αὐτιοῦ. Ὡστε:

Γιά τήν ἴδια ἔνταση ἤχου ἡ ἀκουστότητα ἢ ἔνταση τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος μεταβάλλεται πολύ μέ τή συχνότητα τοῦ ἤχου. Σέ κάθε συχνότητα ἀντιστοιχεῖ ἕνα κατώφλι ἀκουστότητας καί ἕνα ὄριο πόνου (*).

Σχέση μεταξύ τῆς ἐντάσεως τοῦ ἤχου καί τῆς ἐντάσεως τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος. Μεταξύ τῆς ἐντάσεως τοῦ ἤχου (ἀντικειμενικό γνῶρισμα) καί τῆς ἐντάσεως τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος (ὑποκειμενικό γνῶρισμα) ὑπάρχει ὀρισμένη σχέση πού τήν ἐκφράζει ὁ ἐξῆς νόμος *Weber - Fechner*:

Ἡ ἔνταση τοῦ ὑποκειμενικοῦ αἰσθήματος 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* βασιζέται στό νόμο *Weber - Fechner*. Στόν παρακάτω πίνακα ἀναφέρονται μερικά παραδείγματα ἀκουστότητας (σέ decibel).

Κατώφλι ἀκουστότητας	0 dB
Ψίθυρος, κῆπος ἤρεμος	20 dB
Συνηθισμένη ὀμιλία	60 dB
Κομπρεσέρ	100 dB
Ἀπογείωση ἀεριοθούμενου (σέ ἀπόσταση 100 m)	125 dB
Ὄριο πόνου	140 dB

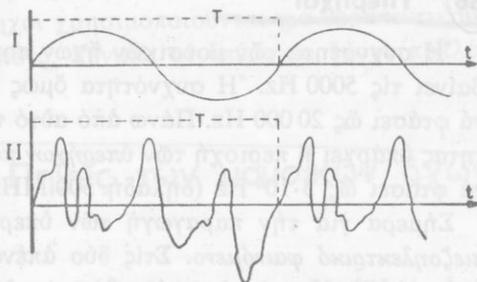
(*) Γιά τή συχνότητα $\nu = 1000$ Hz τό κατώφλι ἀκουστότητας ἀντιστοιχεῖ σέ ἔνταση ἤχου 10^{-16} W/cm² καί τό ὄριο πόνου σέ ἔνταση ἤχου 10^{-4} W/cm².

35. Χροιά του ήχου

Ένα διαπασών παράγει ήχο που έχει όρισμένη συχνότητα ν . Αν εξετάσουμε αυτό τον ήχο με ένα ηλεκτρονικό παλμογράφο, όταν το διαπασών δέκτηται στο άντηχειό του, βλέπουμε μία ήμιτονοειδή καμπύλη (σχ. 60 I). Ο ήχος του διαπασών είναι ένας άπλός ήχος που για το αυτί μας είναι άχρωμος,

ούτε δυσάρεστος, ούτε ευχάριστος. Αυτός ο ήχος οφείλεται σε ήμιτονοειδή κίνηση της ήχητικής πηγής. Αν στηρίξουμε το διαπασών στο άντηχειό του, βλέπουμε στον παλμογράφο μία καμπύλη που αντιστοιχεί σε περιοδική μή ήμιτονοειδή κίνηση (σχ. 60 II). Ο ήχος που παράγει τώρα το σύστημα διαπασών - άντηχειό είναι σύνθετος ήχος, δηλαδή φθόγγος, έχει συχνότητα ν και για το αυτί μας έχει το γνώρισμα της χροιάς. Σύμφωνα με το θεώρημα του Fourier (§ 8) η περιοδική κίνηση της ήχητικής πηγής που παράγει το σύνθετο ήχο είναι συνισταμένη ήμιτονοειδών ταλαντώσεων, που οι συχνότητές τους είναι άκεραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας ν . Επομένως ο σύνθετος ήχος που παράγει το σύστημα διαπασών - άντηχειό προέρχεται από την πρόσθεση όρισμένων άπλων ήχων που είναι αρμονικοί ενός θεμελιώδους ήχου συχνότητας ν . Έτσι για το φυσικό αίτιο στο οποίο οφείλεται η χροιά του ήχου, διατυπώνουμε το εξής συμπέρασμα, που επιβεβαιώνεται με το πείραμα:

Η χροιά ενός σύνθετου ήχου εξαρτάται από τον αριθμό και τη σχετική ένταση των αρμονικών ήχων που προσθέτονται στο θεμελιώδη.



Σχ. 60. Καταγραφή άπλου ήχου (I) και φθόγγου (II). Η περιοδική κίνηση που αντιστοιχεί στο φθόγγο είναι συνισταμένη αρμονικών ταλαντώσεων.

Ἡ συχνότητα τῶν μουσικῶν ἤχων πού ἀκοῦμε συνήθως δέν ὑπερβαίνει τίς 5000 Hz. Ἡ συχνότητα ὁμως τῶν ἀκουστῶν ἤχων μπορεῖ νά φτάσει ὡς 20 000 Hz. Πάνω ἀπό αὐτό τό ὄριο τῆς ἀκουστῆς συχνότητος 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 ἐκμεταλλεῖται τό *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*. Στίς δύο ἀπέναντι ἕδρες ἑνός πλακιδίου ἀπό χαλαζία εἶναι στερεωμένα δύο μεταλλικά πλακίδια (ἤλεκτροδια). Ὄταν στά δύο ἤλεκτροδια ἐφαρμόσουμε ἐναλλασσόμενη τάση συχνότητος ν , τό πλακίδιο διαδοχικά συστέλλεται καί διαστέλλεται, δηλαδή ἐκτελεῖ ἐξαναγκασμένη *μηχανική ταλάντωση* συχνότητος ν καί ἔτσι δημιουργεῖ ἤχητικά κύματα πού ἀντιστοιχοῦν σέ υπερήχους.

Ἰδιότητες καί ἐφαρμογές τῶν υπερήχων. Τά ἤχητικά κύματα πού ἀντιστοιχοῦν σέ υπερήχους μεταφέρουν *μεγάλη μηχανική ἰσχύ*, γιατί ἔχουν πολύ ψηλή συχνότητα (§ 31 γ). Χαρακτηριστική ἰδιότητα τῶν υπερήχων εἶναι τό ὅτι μποροῦν νά σχηματίσουν κατευθυνόμενες δέσμες ἤχητικῶν ἀκτίνων καί ἔτσι ἡ ἤχητική ἐνέργεια ἀκτινοβολεῖται σέ μεγάλες ἀποστάσεις. Σ' αὐτή τήν ἰδιότητα τῶν υπερήχων στηρίζεται ἡ λειτουργία τοῦ βυθομέτρου (§ 27 β). Οἱ υπερήχοι, ἐπειδή μεταφέρουν μεγάλη μηχανική ἰσχύ, προκαλοῦν *μηχανικά, θερμοικά, χημικά καί βιολογικά ἀποτελέσματα*. Ἄν π.χ. μέσα σέ ἕνα 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 ἐκμεταλλεῖται γιά νά παρασκευάζουμε γαλακτώματα (φωτογραφικό φιλμ, φάρμακα, καλλυντικά κλπ.). Οἱ υπερήχοι διώχνουν τά ἀέρια πού ὑπάρχουν μέσα σέ ἕνα ὑγρό. Αὐτή τήν ἰδιότητα τήν ἐκμεταλλεῖται γιά τήν παραγωγή ἀνώτατης ποιότητος γυαλιοῦ γιά τά ὀπτικά ὄργανα καθώς καί γιά τή βελτίωση τῆς ποιότητος πολλῶν ὑλικῶν. Οἱ υπερήχοι προκαλοῦν ὀξειδώσεις, διαχωρίζουν τίς πολυμερεῖς ἐνώσεις, διασποῦν τούς δισακχαρίτες σέ μονοσακχαρίτες.

Οἱ υπερήχοι διαμελίζουν τά κύτταρα τῶν μονοκύτταρων ὀργανισμῶν καί μποροῦν νά προκαλέσουν τό θάνατο ἢ προσωρινή παρά-

λωση σέ μικρούς πολυκύτταρους οργανισμούς (ψάρια, γυρίνοι). Σήμερα στην Ίατρική οί υπέρηχοι χρησιμοποιούνται γιά θεραπευτικούς καί γιά διαγνωστικούς σκοπούς. Γενικά, οί υπέρηχοι έχουν πολλές ένδιαφέρουσες εφαρμογές.

Πηγές τών μουσικῶν ἤχων

37. Μουσικοί ἤχοι

Ξέρουμε (§ 32) ὅτι *μουσικοί ἤχοι* εἶναι οί τόνοι ἢ ἀπλοί ἤχοι πού παράγονται ἀπό τά διαπασῶν καί οί φθόγγοι ἢ σύνθετοι ἤχοι πού παράγονται ἀπό τά μουσικά ὄργανα καί τό φωνητικό σύστημα τοῦ ἀνθρώπου. Ἐνας φθόγγος χαρακτηρίζεται μέ τή συχνότητα τοῦ θεμελιώδους ἤχου. Στή Μουσική δέ χρησιμοποιούνται ὅλοι οί ἀκουστοί ἤχοι, ἀλλά μόνο μιὰ σειρά φθόγγων πού ὀνομάζεται **μουσική κλίμακα**. Οί συχνότητες τῶν φθόγγων τῆς κλίμακας ἀξάνονται, 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 τους ἔχει ὀρισμένες τιμές. Ὁ λόγος τῶν συχνοτήτων τῶν δύο φθόγγων ὀνομάζεται *μουσικό διάστημα*.

* Συγκεκριμένη μουσική κλίμακα. Ὅταν ὁ λόγος τῶν συχνοτήτων δύο φθόγγων εἶναι ἴσος μέ 2, τότε λέμε ὅτι τό διάστημα αὐτῶν τῶν δύο φθόγγων εἶναι μιὰ *ὀγδὴ*. Στή Μουσική χρησιμοποιεῖται συνήθως ἡ *συγκεκριμένη κλίμακα*. Οί συχνότητες τῶν φθόγγων τῆς κλίμακας ὀρίζονται μέ βάση τή συχνότητα τοῦ φθόγγου la_3 , πού εἶναι ἴση μέ 440 Hz. Στόν ἐπόμενο πίνακα ἀναφέρονται οί φθόγγοι τῆς κλίμακας, οἱ συχνοτήτες τους καί τά ἀντίστοιχα διαστήματα.

Συγκεκριμένη κλίμακα

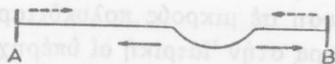
φθόγγοι	do_3	re_3	mi_3	fa_3	sol_3	la_3	si_3	do_4	re_4
συχνότητες (σέ Hz)	261,6	293,7	329,6	349,2	392	440	493,9	523,2	587,4
διαστήματα	1,121		1,121	1,059	1,121	1,121	1,121	1,059	1,121

38. Χορδές

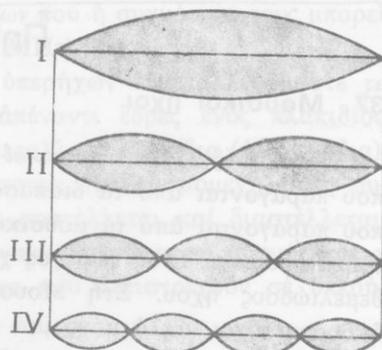
Στήν Ἀκουστική ονομάζουμε *χορδή* ένα κυλινδρικό καί ἐλαστικό στερεό σῶμα πού ἡ διάμετρος του εἶναι πολύ μικρή σχετικά μέ τό μήκος του. Οἱ δύο ἄκρες τῆς χορδῆς εἶναι σταθερά στερεωμένες καί ἡ χορδή διατηρεῖται πολύ τεντωμένη. Οἱ χορδές πού χρησιμοποιοῦμε στά μουσικά ὄργανα εἶναι μεταλλικές ἢ ἔχουν ζωϊκή προέλευση. Ἄν ἀπομακρύνουμε ἀπό τή θέση ἰσορροπίας του ἕνα σημεῖο τῆς χορδῆς, τότε αὐτό τό σημεῖο ἐκτελεῖ φθίνουσα ταλάντωση, γιατί οἱ ἐλαστικές δυνάμεις δημιουργοῦν *δύναμη ἐπαναφορᾶς* πού προσπαθεῖ νά ξαναφέρει τό σημεῖο στή θέση ἰσορροπίας του. Πάνω στή χορδή διαδίδονται τότε κατ' ἀντίθετη φορά δύο *ἐγκάρσια κύματα* πού ἀνακλῶνται στίς δύο σταθερές ἄκρες τῆς χορδῆς (σχ. 61). Ὄταν ἡ δύναμη (F) πού τείνει τή χορδή ἔχει μιά κατάλληλη τιμή, τά δύο κύματα πού διαδίδονται πάνω στή χορδή συμβάλλουν καί ἔτσι δημιουργοῦνται *στάσιμα ἐγκάρσια κύματα* (σχ. 62). Οἱ δύο σταθερές ἄκρες τῆς χορδῆς εἶναι πάντοτε δεσμοί. Ἐπειδή ἡ ἀπόσταση μεταξύ δύο διαδοχικῶν δεσμῶν εἶναι ἴση μέ μισό μήκος κύματος ($\lambda/2$), συνάγεται ὅτι σέ μιά χορδή πού ἔχει μήκος l σχηματίζεται πάντοτε *ἀκέραιος ἀριθμός (k) στάσιμων κυμάτων* καί ἰσχύει ἡ σχέση:

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

Παραγωγή ἤχου ἀπό τή χορδή. Ἡ παλλόμενη χορδή χτυπάει περιοδικά τόν ἀέρα πού βρίσκεται σέ ἐπαφή μαζί της καί ἔτσι δημιουργοῦνται στόν ἀέρα ἠχητικά κύματα. Αὐτά ἀντιστοιχοῦν σέ ἕναν ἤχο, πού ἔχει *συχνότητα* ν ἴση μέ τή *συχνότητα ταλαντώσεως* ν τῆς χορδῆς. Ἄν ἡ χορδή ἔχει μάζα m , ἡ γραμμική πυκνότητά της



Σχ. 61. Διάδοση δύο ἐγκάρσιων κυμάτων πάνω στή χορδή



Σχ. 62. Ἡ χορδή δίνει ὅλους τοῦς ἄρμονικούς τοῦ θεμελιώδους ἤχου.

είναι $\mu = m/l$. Αποδεικνύεται ότι για τον παραγόμενο ήχο ισχύουν οι εξής νόμοι των χορδών:

I. Η συχνότητα (ν_1) του θεμελιώδους ήχου που παράγει η χορδή είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος (l) της χορδής, ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της δυνάμεως (F) που τεντώνει τη χορδή και αντιστρόφως ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της γραμμικής πυκνότητας (μ) της χορδής.

$$\text{συχνότητα θεμελιώδους ήχου} \quad \nu_1 = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \left\{ \begin{array}{l} l \text{ σε m, } F \text{ σε N} \\ \mu \text{ σε kg/m} \\ \nu_1 \text{ σε Hz} \end{array} \right. \quad (2)$$

II. Μία χορδή μπορεί να δώσει όλη τη σειρά των αρμονικών του θεμελιώδους ήχου ($\nu = 2\nu_1, 3\nu_1, \dots$).

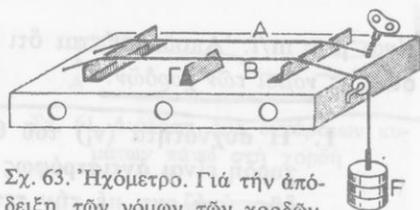
$$\text{συχνότητα αρμονικών ήχων} \quad \nu = \frac{k}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (3)$$

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 άρμονικό). Για $k = 2$ σχηματίζονται δύο στάσιμα κύματα και η χορδή παράγει το δεύτερο άρμονικό κ.ο.κ. Ωστε ο άκεραιος αριθμός k φανερώνει πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται στη χορδή και τη σειρά του άρμονικού 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:

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

* Πειραματική απόδειξη των νόμων των χορδών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τη διάταξη που δείχνει το σχήμα 63 (ήχομετρο). Πάνω σε κατάλληλο ξύλινο κιβώτιο (άντηχεϊο) είναι τεντωμένες δύο (ή περισσότερες) παράλληλες χορδές, που στηρίζονται σε δύο σταθερά στηρίγματα (ίππεις), που προσδιορίζουν το μήκος l της χορδής.

Ἡ μιά χορδή (A) πού χρησιμεύει γιά σύγκριση, τεντώνεται μέ τή βοήθεια κοχλίας, ἐνῶ ἡ χορδή (B) πού ἐξετάζουμε τεντώνεται ἀπό δύναμη F. Ὄταν δύο ἡχητικές πηγές παράγουν δύο ἤχους πού ἔχουν τό ἴδιο ὕψος (δηλαδή τήν ἴδια συχνότητα), λέμε ὅτι οἱ δύο πηγές βρίσκονται σέ ὁμοφωνία. Στά πειράματα πού ἐκτελοῦμε φροντίζουμε οἱ δύο χορδές νά εἶναι ἀρχικά σέ ὁμοφωνία.



Σχ. 63. Ἡχώμετρο. Γιά τήν ἀπόδειξη τῶν νόμων τῶν χορδῶν

1. Διατηρώντας σταθερά τά μεγέθη F καί μ κάνουμε μέ ἓνα βοηθητικό ἱππέα τό παλλόμενο μήκος τῆς χορδῆς $l/2$, $l/3$, $l/4$. Βρίσκουμε ὅτι οἱ παραγόμενοι ἤχοι εἶναι ἀντίστοιχα ὁ δεύτερος, ὁ τρίτος, ὁ τέταρτος ἄρμονικός τοῦ θεμελιώδους ἤχου.
2. Διατηρώντας σταθερά τά μεγέθη l καί μ , κάνουμε τή δύναμη $4F$, $9F$, $16F$. Βρίσκουμε ὅτι ὁ παραγόμενος ἤχος εἶναι ἀντίστοιχα ὁ δεύτερος, ὁ τρίτος, ὁ τέταρτος ἄρμονικός τοῦ θεμελιώδους.
3. Ἀπό τέσσερις ὅμοιες χορδές πού ἔχουν τό ἴδιο μήκος l σχηματίζουμε (στρίβοντάς τες) μιά χορδή, πού ἔχει γραμμική πυκνότητα 4μ . Ἐφαρμόζουμε σ' αὐτή τή χορδή δύναμη F. Ὁ παραγόμενος ἤχος ἔχει συχνότητα ἴση μέ τό $1/2$ τῆς συχνότητας τοῦ θεμελιώδους.

* **Εὔρεση τῆς ἐξίσωσης (3).** Ξέρομε ὅτι ἡ ταχύτητα v διαδόσεως τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας πάνω στή χορδή δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

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

Ἀπό τήν ἐξίσωση $v = v \cdot \lambda$ καί τήν ἐξίσωση (1) βρίσκουμε:

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

Ἀπό τίς ἐξισώσεις (4) καί (5) ἔχουμε:

$$v = \frac{k}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Παρατήρηση. Όλα τὰ συνηθισμένα μουσικά ὄργανα παράγουν σύνθετους ἤχους (φθόγγους). Ὡς συχνότητα ν τοῦ ἤχου πού παράγει ἓνα μουσικό ὄργανο θεωροῦμε τὴ συχνότητα τοῦ θεμελιώδους πού ἀντιστοιχεῖ σ' αὐτόν τὸ σύνθετο ἤχο.

39. Συντονισμός δύο ἡχητικῶν πηγῶν. Ἄντηχεῖα

Δύο ὁμοια διαπασῶν Α καί Β ἔχουν τὴν ἴδια ἰδιοσυχνότητα (ν_0) καί, ἐπομένως, παράγουν τόν ἴδιο ἀπλό ἤχο (π.χ. τὸ la_3). Τὰ δύο διαπασῶν εἶναι τὸ ἓνα λίγο μακρύτερα ἀπὸ τὸ ἄλλο. Ἄν χτυπήσουμε ἑλαφρά τὸ διαπασῶν Α, αὐτὸ παράγει ἤχο. Τότε καί τὸ διαπασῶν Β διεγείρεται καί παράγει τόν ἴδιο ἤχο, γιατί μεταξύ τῶν δύο διαπασῶν ὑπάρχει *συντονισμός*. Ἄν ἀκουμπήσουμε τὸ δάχτυλό μας στὸ διαπασῶν Α, αὐτὸ παύει νά πάλλεται καί ἀκοῦμε μόνο τόν ἤχο πού παράγει τὸ διαπασῶν Β.

Στὸ φαινόμενο τοῦ συντονισμοῦ στηρίζεται ἡ χρήση τῶν ἀντηχειῶν. Αὐτὰ εἶναι κιβώτια (ἀπὸ ξύλο ἢ μέταλλο) πού σχηματίζουν κοιλότητες γεμάτες μὲ ἀέρα. Ὅλα τὰ ἐγχορδα ὄργανα ἔχουν εἰδικὰ ἀντηχεῖα, πού συντονίζονται μὲ τίς παλλόμενες χορδές καί παράγουν ἤχο πού ἔχει χαρακτηριστικὴ χροιά.

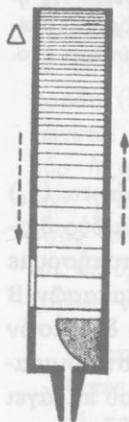
40 Ἡχητικοὶ σωλήνες

Στὴν Ἀκουστικὴ ὀνομάζουμε *ἡχητικὸ σωλήνα* ἓναν κυλινδρικό ἢ πρισματικὸ σωλήνα (ἀπὸ ξύλο ἢ μέταλλο) πού περιέχει μιά *στήλη ἀέρα*. Μέσα σ' αὐτὸ τόν ἀέρα μποροῦν νά διαδοθοῦν ἡχητικὰ κύματα. Τὰ τοιχώματα τοῦ σωλήνα ἔχουν ἀρκετὸ πάχος, γιὰ νά μὴ πάλλονται.

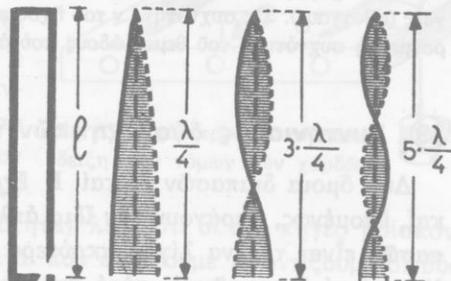
Ἡ διέγερση τῆς στήλης τοῦ ἀέρα γίνεται μὲ μιά εἰδικὴ διάταξη, πού κοντὰ στὴ μιά ἄκρη τοῦ σωλήνα προκαλεῖ περιοδικές μεταβολές τῆς πιέσεως τοῦ ἀέρα. Συνήθως ἡ διέγερση τοῦ ἡχητικοῦ σωλήνα γίνεται μὲ *στόμιο* (σχ. 64). Τὸ ρεῦμα τοῦ ἀέρα πού διοχετεύουμε στὸ στόμιο σπάζει πάνω σὲ μιά λεπτὴ αἰχμὴ καί τότε σχηματίζονται δύο συστήματα *στροβίλων* τοῦ ἀέρα. Τὸ σύστημα πού σχηματίζεται



Σχ. 64. Διέγερση ἡχητικοῦ σωλήνα μὲ στόμιο



Σχ. 65. Μέσα στο σωλήνα σχηματίζονται διαμήκη κύματα. Στην κλειστή άκρη σχηματίζεται δεσμός.



Σχ. 66. Στάσιμα διαμήκη κύματα μέσα στον κλειστό ήχητικό σωλήνα

μέσα στο σωλήνα δημιουργεί *διαμήκη κύματα*, που διαδίδονται μέσα στη στήλη του αέρα. Η άκρη του σωλήνα που είναι απέναντι από το στόμιο είναι κλειστή ή ανοιχτή. Έτσι οι ήχητικοί σωλήνες διακρίνονται σε *κλειστούς* και *ανοιχτούς* σωλήνες.

α. Κλειστοί ήχητικοί σωλήνες. Μέσα στον αέρα του σωλήνα δημιουργούνται διαμήκη κύματα που *ανακλώνται* στην κλειστή άκρη του σωλήνα (άκίνητο εμπόδιο). Όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες (μήκος του σωλήνα, συχνότητα διεγέρσεως), τότε από τη συμβολή των δύο κυμάτων που διαδίδονται με αντίθετη φορά, σχηματίζονται μέσα στο σωλήνα *στάσιμα διαμήκη κύματα* (σχ. 65). Στην κλειστή άκρη του σωλήνα σχηματίζεται *δεσμός*, ενώ κοντά στο στόμιο του σωλήνα σχηματίζεται *κοιλία* (σχ. 66). Όταν αυξάνει ή ταχύτητα του ρεύματος του αέρα που διοχετεύουμε στο στόμιο, αυξάνει ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων. Τό 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 v είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και ν η συχνότητα του ήχου που παράγει ο σωλήνας, τότε από την εξίσωση $v = \nu \cdot \lambda$ και την εξίσωση (1) βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{4l}{(2k-1)} \quad \text{\u0391\u03c1\u03b1} \quad \boxed{v = (2k-1) \cdot \frac{v}{4l}} \quad (2)$$

Γ\u03b9\u03ac $k = 1$ \u03cc \u03ba\u03bb\u03b5\u03b9\u03c3\u03c4\u03cc\u03c2 \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2 \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1\u03c2 \u03b4\u03b9\u03bd\u03b5\u03b9 \u03c4\u03cc \u03b8\u03b5\u03bc\u03b5\u03bb\u03b9\u03ce\u03b4\u03b7 \u03b7\u03c7\u03cc (\u03b7 \u03c0\u03c1\u03ce\u03c4\u03cc \u03b1\u03c1\u03bc\u03cc\u03bd\u03b9\u03ba\u03cc) \u03c0\u03cc\u03c5 \u03b5\u03c7\u03b5\u03b9 \u03c3\u03c7\u03bd\u03cc\u03c4\u03b7\u03c4\u03b1:

$$\boxed{\text{\u03c3\u03c7\u03bd\u03cc\u03c4\u03b7\u03c4\u03b1 \u03b8\u03b5\u03bc\u03b5\u03bb\u03b9\u03ce\u03b4\u03cc\u03c5 \u03b7\u03c7\u03cc} \quad \nu_1 = \frac{v}{4l}} \quad (3)$$

Γ\u03b9\u03ac $k = 2, k = 3$ \u03cc \u03ba\u03bb\u03b5\u03b9\u03c3\u03c4\u03cc\u03c2 \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2 \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1\u03c2 \u03b4\u03b9\u03bd\u03b5\u03b9 \u03b1\u03bd\u03c4\u03b9\u03c3\u03c4\u03cc\u03b9\u03c7\u03b1 \u03c4\u03cc\u03bd \u03c4\u03c1\u03b9\u03c4\u03cc \u03b1\u03c1\u03bc\u03cc\u03bd\u03b9\u03ba\u03cc (ν_3), \u03c4\u03cc\u03bd \u03c0\u03b5\u03bc\u03c0\u03c4\u03cc \u03b1\u03c1\u03bc\u03cc\u03bd\u03b9\u03ba\u03cc (ν_5):

$$\text{\u03c4\u03c1\u03b9\u03c4\u03cc\u03c2 \u03b1\u03c1\u03bc\u03cc\u03bd\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2} \quad \nu_3 = 3 \cdot \frac{v}{4l} \quad \u03b7 \quad \nu_3 = 3\nu_1$$

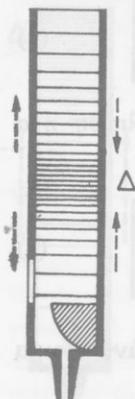
$$\text{\u03c0\u03b5\u03bc\u03c0\u03c4\u03cc\u03c2 \u03b1\u03c1\u03bc\u03cc\u03bd\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2} \quad \nu_5 = 5 \cdot \frac{v}{4l} \quad \u03b7 \quad \nu_5 = 5\nu_1$$

Ο\u03b9 \u03b5\u03be\u03b9\u03c3\u03c9\u03c3\u03b5\u03b9\u03c2 (2) \u03ba\u03b1\u03b9 (3) \u03b4\u03b5\u03b9\u03c7\u03bd\u03cc\u03bd \u03cc\u03c4\u03b9 \u03b9\u03c3\u03c7\u03cc\u03c5\u03bd \u03cc\u03b9 \u03b5\u03be\u03b9\u03c2 \u03bd\u03cc\u03bc\u03cc \u03c4\u03cc\u03bd \u03ba\u03bb\u03b5\u03b9\u03c3\u03c4\u03cc\u03bd \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03bd \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03cc\u03bd:

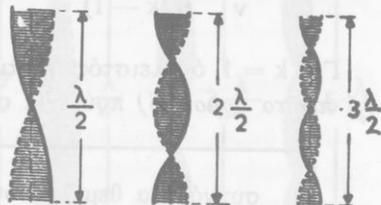
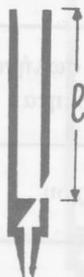
I. \u0397 \u03c3\u03c7\u03bd\u03cc\u03c4\u03b7\u03c4\u03b1 (ν_1) \u03c4\u03cc\u03bd \u03b8\u03b5\u03bc\u03b5\u03bb\u03b9\u03ce\u03b4\u03cc\u03c5 \u03b7\u03c7\u03cc \u03c0\u03cc\u03c5 \u03c0\u03b1\u03c1\u03ac\u03b3\u03b5\u03b9 \u03b5\u03bd\u03b1\u03c2 \u03ba\u03bb\u03b5\u03b9\u03c3\u03c4\u03cc\u03c2 \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2 \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1\u03c2 \u03b5\u03b9\u03bd\u03b1\u03b9 \u03b1\u03bd\u03ac\u03bb\u03cc\u03b3\u03b7 \u03bc\u03b5 \u03c4\u03b7\u03bd \u03c4\u03b1\u03c7\u03c5\u03c4\u03b7\u03c4\u03b1 (v) \u03c4\u03cc\u03bd \u03b7\u03c7\u03cc \u03c3\u03c4\u03cc\u03bd \u03b1\u03b5\u03c1\u03b1 \u03ba\u03b1\u03b9 \u03b1\u03bd\u03c4\u03b9\u03c3\u03c4\u03c1\u03cc\u03c6\u03c9\u03c2 \u03b1\u03bd\u03ac\u03bb\u03cc\u03b3\u03b7 \u03bc\u03b5 \u03c4\u03cc \u03bc\u03b7\u03ba\u03cc\u03c2 (l) \u03c4\u03cc\u03bd \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1.

II. \u0395\u03bd\u03b1\u03c2 \u03ba\u03bb\u03b5\u03b9\u03c3\u03c4\u03cc\u03c2 \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2 \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1\u03c2 \u03bc\u03c0\u03cc\u03c1\u03b5\u03b9 \u03bd\u03ac \u03b4\u03cc\u03b4\u03cc\u03c3\u03b5\u03b9 \u03bc\u03cc\u03bd\u03cc \u03c4\u03cc\u03bd\u03c2 \u03b1\u03c1\u03bc\u03cc\u03bd\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2 \u03c4\u03cc\u03bd \u03b8\u03b5\u03bc\u03b5\u03bb\u03b9\u03ce\u03b4\u03cc\u03c5 \u03b7\u03c7\u03cc, \u03c0\u03cc\u03c5 \u03cc\u03b9 \u03c3\u03c7\u03bd\u03cc\u03c4\u03b7\u03c4\u03b5\u03c2 \u03c4\u03cc\u03bd\u03c2 \u03b5\u03b9\u03bd\u03b1\u03b9 \u03c0\u03b5\u03c1\u03b9\u03c4\u03c4\u03cc \u03c0\u03cc\u03bb\u03bb\u03b1\u03c0\u03bb\u03ac\u03c3\u03b9\u03cc \u03c4\u03b7\u03c2 \u03c3\u03c7\u03bd\u03cc\u03c4\u03b7\u03c4\u03b1\u03c2 \u03c4\u03cc\u03bd \u03b8\u03b5\u03bc\u03b5\u03bb\u03b9\u03ce\u03b4\u03cc\u03c5 ($\nu = 3\nu_1, 5\nu_1, 7\nu_1, \dots$).

\u0392. \u0391\u03bd\u03cc\u03b9\u03c7\u03c4\u03cc\u03b9 \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03b9 \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b5\u03c2. \u0397 \u03c3\u03c4\u03b7\u03bb\u03b7 \u03c4\u03cc\u03bd \u03b1\u03b5\u03c1\u03b1 \u03c0\u03cc\u03c5 \u03b5\u03b9\u03bd\u03b1\u03b9 \u03bc\u03b5\u03c3\u03b1 \u03c3\u03c4\u03cc\u03bd\u03c2 \u03b1\u03bd\u03cc\u03b9\u03c7\u03c4\u03cc\u03c2 \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03c2 \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b5\u03c2 \u03c3\u03c5\u03b3\u03ba\u03cc\u03b9\u03bd\u03c9\u03bd\u03b5\u03b9 \u03b5\u03bb\u03b5\u03c5\u03b8\u03b5\u03c1\u03b1 \u03bc\u03b5 \u03c4\u03b7\u03bd \u03b1\u03c4\u03bc\u03cc\u03c3\u03c6\u03b1\u03b9\u03c1\u03b1 \u03ba\u03b1\u03b9 \u03b7 \u03b1\u03bd\u03ac\u03ba\u03bb\u03b1\u03c3\u03b7 \u03c4\u03cc\u03bd \u03ba\u03c5\u03bc\u03ac\u03c4\u03c9\u03bd (σχ. 67) \u03b3\u03b9\u03bd\u03b5\u03b9\u03c4\u03b1\u03b9 \u03c3\u03c4\u03b7\u03bd \u03b1\u03bd\u03cc\u03b9\u03c7\u03c4\u03b7 \u03b1\u03ba\u03c1\u03b7 \u03c4\u03cc\u03bd \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1 (\u03ba\u03b9\u03bd\u03b7\u03c4\u03cc \u03b5\u03bc\u03c0\u03cc\u03b4\u03b9\u03cc). \u0395\u03c0\u03cc\u03bc\u03b5\u03bd\u03cc\u03c2 \u03ba\u03b1\u03b9 \u03c3\u03c4\u03b9\u03c2 \u03b4\u03cc\u03bd \u03b1\u03ba\u03c1\u03b5\u03c2 \u03c4\u03cc\u03bd \u03b1\u03bd\u03cc\u03b9\u03c7\u03c4\u03cc\u03bd \u03b7\u03c7\u03b7\u03c4\u03b9\u03ba\u03cc\u03bd \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1 \u03c3\u03c7\u03b7\u03bc\u03b1\u03c4\u03b9\u03b6\u03cc\u03bd\u03b1\u03b9 \u03b4\u03cc\u03bd \u03ba\u03cc\u03b9\u03bb\u03b5\u03b9\u03c2 (σχ. 68). \u039c\u03cc \u03bc\u03b7\u03ba\u03cc\u03c2 \u03c4\u03cc\u03bd \u03c3\u03c9\u03bb\u03b7\u03bd\u03b1 \u03b5\u03b9\u03bd\u03b1\u03b9 l \u03ba\u03b1\u03b9 \u03c4\u03cc \u03bc\u03b7\u03ba\u03cc\u03c2 \u03b5\u03bd\u03cc\u03c2 \u03c3\u03c4\u03ac\u03c3\u03b9\u03bc\u03cc \u03ba\u03c5\u03bc\u03ac\u03c4\u03cc\u03c2



Σχ. 67. Στις δύο άκρες του άνοιχτού ήχητικού σωλήνα σχηματίζονται κοιλιές.



Σχ. 68. Στάσιμα διαμήκη κύματα μέσα στον άνοιχτό ήχητικό σωλήνα

είναι $\lambda/2$. Άρα, όταν σχηματίζονται στάσιμα κύματα μέσα σε έναν άνοιχτό σωλήνα, ισχύει η σχέση:

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

Από την εξίσωση $v = v \cdot \lambda$ και την εξίσωση (4) βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{v}{k} = \frac{2l}{k} \quad \text{Άρα } \boxed{v = k \cdot \frac{v}{2l}} \quad (5)$$

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

$$\boxed{\text{συχνότητα θεμελιώδους ήχου } v_1 = \frac{v}{2l}} \quad (6)$$

Για $k = 2, k = 3$ ο άνοιχτός ήχητικός σωλήνας δίνει αντίστοιχα το δεύτερο αρμονικό (v_2), τον τρίτο αρμονικό (v_3):

$$\text{δεύτερος αρμονικός } v_2 = 2 \cdot \frac{v}{2l} \quad \text{ή } v_2 = 2v_1$$

$$\text{τρίτος αρμονικός } v_3 = 3 \cdot \frac{v}{2l} \quad \text{ή } v_3 = 3v_1$$

Οι εξισώσεις (5) και (6) δείχνουν ότι ισχύουν οι εξής νόμοι των άνοιχτων ήχητικών σωλήνων:

- I. Ἡ συχνότητα (ν_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἀνοιχτός ἠχητικός σωλήνας εἶναι ἀνάλογη μέ τήν ταχύτητα (v) τοῦ ἤχου στόν ἀέρα καί ἀντιστρόφως ἀνάλογη μέ τό μήκος (l) τοῦ σωλήνα.
- II. Ἐνας ἀνοιχτός ἠχητικός σωλήνας μπορεῖ νά δώσει ὅλη τή σειρά τῶν ἀρμονικῶν τοῦ θεμελιώδους ἤχου ($\nu = 2\nu_1, 3\nu_1, 4\nu_1, \dots$).

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

51. Μιά χορδή ἔχει μήκος 1 m, μάζα $8 \cdot 10^{-3}$ kg καί τείνεται ἀπό δύναμη 500 N. 1) Πόση εἶναι ἡ συχνότητα (ν_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἡ χορδή; 2) Μέ πόση δύναμη πρέπει νά τείνεται ἡ χορδή, γιά νά δώσει ὡς θεμελιώδη τόν τέταρτο ἀρμονικό ($\nu_4 = 4\nu_1$);

52. Μιά χορδή ἔχει μήκος 2 m, μάζα $2 \cdot 10^{-2}$ kg καί τείνεται ἀπό δύναμη 1600 N. 1) Μέ πόση ταχύτητα διαδίδονται τά ἐγκάρσια κύματα πάνω στή χορδή; 2) Μέ πόση δύναμη πρέπει νά τείνεται ἡ χορδή, γιά νά διαπλασιαστεῖ ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων; 3) Ὑπάρχει σχέση μεταξύ τῆς συχνότητας τοῦ ἤχου πού παράγει ἡ χορδή καί τῆς ταχύτητας διαδόσεως τῶν κυμάτων πάνω στή χορδή;

53. Μιά χορδή ἔχει μήκος 1 m, μάζα 5 gr καί πάλλεται ἔτσι, ὥστε σχηματίζεται ἓνα στάσιμο κύμα. Ὁ παραγόμενος ἤχος ἔχει συχνότητα 130,5 Hz. Μέ πόση δύναμη τείνεται ἡ χορδή;

54. Μιά χορδή ἔχει μήκος 80 cm, μάζα 4 gr καί δίνει τόν τέταρτο ἀρμονικό, πού ἔχει συχνότητα 400 Hz. 1) Πόσοι δεσμοί καί πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται πάνω στή χορδή; 2) Μέ πόση δύναμη τείνεται ἡ χορδή;

55. Μιά χορδή ἔχει μήκος 1 m, διάμετρο 1 mm, πυκνότητα $8 \cdot 10^3$ kg/m³ καί τείνεται ἀπό δύναμη 500 N. Πόση εἶναι ἡ συχνότητα τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἡ χορδή;

56. Μιά χορδή Α ἔχει μήκος l , γραμμική πυκνότητα μ καί δταν τείνεται ἀπό μιὰ δύναμη F , παράγει τό θεμελιώδη ἤχο πού ἔχει συχνότητα $\nu_1 = 440$ Hz. Γιά νά φέρουμε τή χορδή Α σέ ὁμοφωνία μέ μιὰ ἄλλη χορδή Β, ἀξάνουμε τή δύναμη F κατά 9/4 φορές καί ἐλαττώνουμε τό μήκος της στό μισό. Νά βρεθεῖ ἡ συχνότητα ν_2 τοῦ ἤχου πού παράγουν οἱ δύο χορδές.

57. Σέ ένα μουσικό όργανο δύο χορδές Α και Β έχουν τό ίδιο μήκος l , είναι από τό ίδιο ύλικό, τείνεται από τήν ίδια δύναμη F και δίνουν τούς θεμελιώδεις ήχους, πού οί συχνότητές τους είναι αντίστοιχα ν_1 και ν_2 και έχουν λόγο $\nu_1/\nu_2 = 3/2$. 1) *Αν ή διάμετρος τής χορδής Α είναι $\delta_1 = 0,4$ mm, πόση είναι ή διάμετρος δ_2 τής χορδής Β; 2) *Αν είναι $\nu_1 = 440$ Hz, πόση είναι ή συχνότητα ν_2 ;

58. Σέ ένα βιολί μιά χορδή του έχει μήκος $l_1 = 33$ cm και δίνει τό θεμελιώδη ήχο συχνότητας $\nu_1 = 440$ Hz (τό la_3). Σέ πόση απόσταση από τήν άνωτερη άκρη τής χορδής πρέπει ό βιολιστής νά πιέσει μέ τό δάχτυλό του τή χορδή, ώστε τό ύπόλοιπο τμήμα τής χορδής νά δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_2 και νά 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 νά γίνει τό μήκος του σωλήνα, ώστε ό θεμελιώδης ήχος πού παράγεται νά έχει συχνότητα ν_2 και νά ισχύει ή σχέση $\nu_1/\nu_2 = 3/2$;

60. *Ενας κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει θεμελιώδη ήχο πού έχει συχνότητα $\nu_0 = 400$ Hz, όταν μέσα στό σωλήνα ύπάρχει άερας μέ θερμοκρασία 0° C. Πόση είναι ή συχνότητα ν_1 του θεμελιώδους ήχου, όταν ό άερας πού είναι μέσα στό σωλήνα έχει θερμοκρασία 37° C; Τό μήκος του σωλήνα δέ μεταβάλλεται.

61. *Ενας κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_5 , όταν ή θερμοκρασία του άέρα είναι 5° C. Πόση πρέπει νά είναι ή ύψωση $\Delta\theta$ τής θερμοκρασίας, ώστε ό σωλήνας νά δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_0 και νά ισχύει ή σχέση $\nu_0/\nu_5 = 1,059$; Τό μήκος του σωλήνα διατηρείται σταθερό.

62. *Ενας μακρός γυάλινος σωλήνας διατηρείται κατακόρυφος και ή μιά άκρη του είναι βυθισμένη μέσα σέ νερό. *Εμπρός από τήν άλλη άκρη του σωλήνα πάλλεται ένα διαπασών πού παράγει ήχο συχνότητας 512 Hz. Παρατηρούμε ότι ύπάρχει συντονισμός του ήχητικού σωλήνα μέ τό διαπασών, όταν τό τμήμα του σωλήνα πού είναι έξω από τό νερό έχει μήκος 51 cm και έπειτα όταν έχει μήκος 85 cm. Σέ καμιά άλλη ένδιάμεση τιμή του μήκους του σωλήνα δέν παρατηρείται συντονισμός. Νά βρεθεί ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα.

63. Νά βρεθεί τό μήκος l_K ενός κλειστού και l_A ενός άνοιχτού

σωλήνα, οι όποιοι παράγουν τον ίδιο θεμελιώδη ήχο συχνότητας $\nu = 174 \text{ Hz}$, όταν ο αέρας μέσα στους δύο σωλήνες έχει θερμοκρασία 0°C και η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 331 m/sec .

64. Ένας ανοιχτός και ένας κλειστός σωλήνας έχουν το ίδιο μήκος $l = 85 \text{ cm}$ και παράγουν το θεμελιώδη ήχο, όταν η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 340 m/sec . 1) Αν ν_K και ν_A είναι οι συχνότητες των δύο ήχων, να βρεθεί ο λόγος ν_K/ν_A . Ποιό γενικό συμπέρασμα βγαίνει για τους κλειστούς και τους ανοιχτούς σωλήνες; 2) Πόσο πρέπει να είναι το μήκος l_K του κλειστού σωλήνα, ώστε αυτός να δίνει τον ίδιο θεμελιώδη ήχο που δίνει και ο ανοιχτός σωλήνας;

65. Ένας κλειστός ήχητικός σωλήνας έχει μήκος $1,5 \text{ m}$ και παράγει τον πέμπτο αρμονικό, όταν η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 342 m/sec . 1) Να βρεθούν οι αποστάσεις των κοιλιών από την κλειστή άκρη του σωλήνα. 2) Να εξεταστεί το ίδιο θέμα, αν ο σωλήνας είναι ανοιχτός και έχει το ίδιο μήκος με τον κλειστό σωλήνα.

66. Ένας μακρύς σωλήνας ΒΓ είναι κλειστός στη μία άκρη του Γ και περιέχει ένα αέριο, στο οποίο η ταχύτητα του ήχου είναι 547 m/sec . Στην άλλη άκρη Β του σωλήνα υπάρχει μία ήχητική πηγή που παράγει ήχο συχνότητας ν . Μέσα στο σωλήνα σχηματίζονται στάσιμα κύματα και η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών είναι $14/3 \text{ m}$. 1) Πόση είναι η συχνότητα ν του ήχου; 2) Το πλάτος της ταλαντώσεως της ήχητικής πηγής είναι $a = 5 \text{ mm}$. Πόσο είναι το πλάτος A της ταλαντώσεως ενός λεπτού στρώματος αερίου που βρίσκεται σε απόσταση d από την κλειστή άκρη του σωλήνα ίση με $d = 0 \text{ m}$, $7/3 \text{ m}$ και $14/3 \text{ m}$; 3) Πόση είναι η μέγιστη κινητική ενέργεια που έχει μιά μάζα $m = 1 \text{ gr}$ του αερίου που βρίσκεται σε απόσταση $d = \lambda/4$ από την κλειστή άκρη του σωλήνα;

Φυσική Όπτική

Κυματική φύση του φωτός

41. Φυσική Όπτική

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

42. Θεωρία τής έκπομπής

Ή θεωρία τής έκπομπής διατυπώθηκε από τό Νεύτωνα (1669), ό όποιος δέχτηκε ότι τό φώς πού εκπέμπει μία φωτεινή πηγή άποτελείται από μικρότατα σωματίδια, πού είναι τελείως έλαστικά και διαδίδονται εθύγραμμα. Όταν ένα τέτοιο σωματίδιο πέσει πάνω σε μία κατοπτρική επιφάνεια, τότε τό σωματίδιο αυτό ανακλάται, όπως συμβαίνει και μέ μία τελείως έλαστική 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) και εξηγεί τήν εθύγραμμη διάδοση, τήν ανάκλαση, τή διάθλαση και τήν άνάλυση του λευκού φωτός.

II. Ή θεωρία τής έκπομπής άποδεικνύει ότι ή ταχύτητα (c) του φωτός στά όπτικώς πυκνότερα διαφανή μέσα (νερό, γυαλί) είναι μεγαλύτερη από τήν ταχύτητα (c_0) του φωτός στό κενό ή στόν άέρα (δηλαδή είναι $c > c_0$).

43. Θεωρία των κυμάτων έλαστικότητας

Ή Huygens (1677) σχεδόν ταυτόχρονα μέ τό Νεύτωνα διατύπωσε ότι τό φώς είναι κύματα έλαστικότητας πού διαδίδονται διά μέσου

του αἰθέρα. Σύμφωνα με τή θεωρία του Huygens ὁ αἰθέρας εἶναι ἕνα χωρίς βάρος διαφανές μέσο, ἀπόλυτα ἐλαστικό πού γεμίζει ὅλο τό χῶρο του Σύμπαντος καί τό χῶρο πού ὑπάρχει μεταξύ τῶν μορίων τῶν σωμάτων. Γενικά γιά τήν κυματική θεωρία του Huygens συνάγονται τά ἐξῆς συμπεράσματα:

I. Ἡ θεωρία του Huygens δέχεται ὅτι τό φῶς εἶναι κύματα ἐλαστικότητας, πού διαδίδονται σέ ἕνα ὑποθετικό ἐλαστικό μέσο, τόν αἰθέρα. Ἡ θεωρία αὐτή ἐξηγεῖ ὅλα τά ὀπτικά φαινόμενα πού ἐξηγεῖ καί ἡ θεωρία τῆς ἐκπομπῆς, ἀλλά ἐξηγεῖ καί τά φαινόμενα τῆς συμβολῆς καί τῆς περιθλάσεως τοῦ φωτός.

II. Ἡ κυματική θεωρία τοῦ φωτός ἀποδεικνύει ὅτι ἡ ταχύτητα (c) τοῦ φωτός στά ὀπτικῶς πυκνότερα διαφανή μέσα (νερό, γυαλί) εἶναι μικρότερη ἀπό τήν ταχύτητα (c_0) τοῦ φωτός στό κενό ἢ στόν ἀέρα (δηλαδή εἶναι $c < c_0$).

Πειραματικῶς ἐπιβεβαιώνεται ὅτι ἡ ταχύτητα (c) τοῦ φωτός π.χ. στό νερό εἶναι μικρότερη ἀπό τήν ταχύτητα (c_0) τοῦ φωτός στόν ἀέρα καί ἐπομένως ἐπαληθεύεται ἡ θεωρία του Huygens. Ἀλλά ἡ θεωρία αὐτή προϋποθέτει ὅτι τό ἀστρικό διάστημα εἶναι γεμάτο μέ τόν αἰθέρα. Μέ ἀκριβή πειράματα ἀποδείχτηκε ὅτι ὁ αἰθέρας δέν ὑπάρχει.

44. Ἡ φύση τοῦ φωτός

α. Κυματική φύση τοῦ φωτός. Ὁ Νεύτων διατύπωσε τή θεωρία ὅτι τό φῶς ἀποτελεῖται ἀπό *σωματίδια*, ἐνῶ ἀντίθετα ὁ Huygens διατύπωσε τή θεωρία ὅτι τό φῶς εἶναι *κύματα*, πού διαδίδονται στό ὑποθετικό ἐλαστικό μέσο, πού ὀνομάστηκε αἰθέρας. Πολλά φαινόμενα (ὅπως ἡ συμβολή, ἡ περίθλαση, ἡ πόλωση τοῦ φωτός) ἀπέδειξαν ὀριστικά ὅτι τό φῶς εἶναι *ἐγκάρσια κύματα* καί βοήθησαν ὥστε ἀπό τή γενική ἐξίσωση τῶν κυμάτων $c = v \cdot \lambda$ νά ὑπολογιστεῖ τό μήκος κύματος λ τῶν ὄρατῶν ἀκτινοβολιῶν. Ἀργότερα ὁ Maxwell (1865) ἀπέδειξε ὅτι τό φῶς εἶναι *ἠλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία*, δηλαδή εἶναι διάδοση ἠλεκτρομαγνητικοῦ πεδίου, ἡ ὁποία δέν ἔχει ἀνάγκη ἀπό τόν παράδοξο ὑποθετικό αἰθέρα. Ἔτσι ἀποδείχτηκε ὅτι:

Τό φῶς εἶναι ἐγκάρσια ἠλεκτρομαγνητικά κύματα (κυματική φύση τοῦ φωτός).

β. Θεωρία τῶν κβάντα. Τό φῶς ἐκπέμπεται καί ἀπορροφᾶται ἀπό τά ἄτομα τῆς ὕλης. Ἀπό τήν παρατήρηση καταλήγουμε στό συμπέρασμα ὅτι τά ἄτομα ἐκπέμπουν καί ἀπορροφῶν τίς ἀκτινοβολίες *συνεχῶς*. Αὐτή ὁμῶς 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 τά παραπάνω φαινόμενα διατύπωσε τή **θεωρία τῶν κβάντα**, τήν ὁποία ἀργότερα γενίκευσαν ὁ Einstein, ὁ Bohr καί ἄλλοι. Ἡ θεωρία τῶν κβάντα ἀποδείχτηκε ὅτι εἶναι μιά ἀπό τίς ὠραιότερες 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 (*κυματοσυσκοί*), πού καθεμιά ἀπό αὐτές ἀποτελεῖ *ένα φωτόνιο* καί κλείνει μέσα της ὀρισμένη ἐνέργεια E . Ὄταν ἡ φωτεινή ἀκτινοβολία πσφτει πάνω στήν ὕλη, τό κάθε ἄτομο *ἀπορροφᾷ ἀσυνεχῶς* τήν ἀκτινοβολία, δηλαδή ἀπορροφᾷ ξεχωριστά φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιάς 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 διατύπώσαμε παραπάνω καί ἐρμηνεύει πῶς τά ἄτομα τῆς

ύλης εκπέμπουν και απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ωστε:

- I. Η θεωρία των κβάντα απέδειξε ότι τα άτομα της ύλης εκπέμπουν και απορροφούν την ακτινοβολία με τη μορφή φωτονίων.
- II. Κάθε φωτόνιο είναι μία ομάδα κυμάτων που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.
- III. Το φωτόνιο μιās μονοχρωματικής ακτινοβολίας μεταφέρει ενέργεια (E) ανάλογη με τη συχνότητα (ν) της ακτινοβολίας και ίση με $E = h \cdot \nu$.

Στά οπτικά φαινόμενα που θα εξετάσουμε παρακάτω θεωρούμε μόνο ότι το φώς είναι *εγκάρσια κύματα*. Τα φωτόνια θα τα συναντήσουμε σε άλλα φαινόμενα (*).

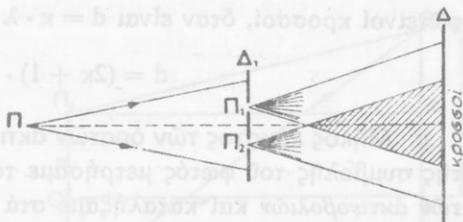
Παράδειγμα. Η έρυθρή ακτινοβολία έχει συχνότητα $\nu = 4 \cdot 10^{14}$ Hz. Άρα κάθε φωτόνιο αυτής της ακτινοβολίας μεταφέρει ενέργεια:

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

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

45. Συμβολή του φωτός

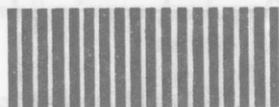
Τό φαινόμενο της συμβολής του φωτός τό παρατηρούμε με τη διάταξη που δείχνει τό σχήμα 69. Τό μονοχρωματικό φώς μιās ισχυρής φωτεινής πηγής περνάει από μία λεπτή σχισμή Π και πέφτει πάνω σ' ένα διάφραγμα Δ₁. Αυτό έχει δύο πολύ λεπτές σχισμές Π₁ και Π₂ που είναι παράλληλες με τη σχισμή Π. Η απόσταση μεταξύ των δύο σχισμών



Σχ. 69. Διάταξη για την παραγωγή του φαινομένου της συμβολής του φωτός

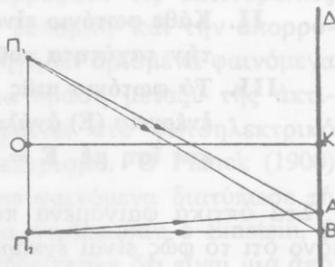
(*) Συμπληρώνοντας τις αντιλήψεις μας για τη φύση του φωτός αναφέρουμε εδώ και τα φωτόνια, ώστε να είναι γνωστά κατά την εξέταση άλλων φαινομένων (ακτίνες Röntgen, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο).

Π_1 και Π_2 είναι πολύ μικρή. Τότε οι σχισμές Π_1 και Π_2 είναι δύο σύγχρονες φωτεινές πηγές, δηλαδή είναι δύο σύγχρονα κέντρα παραγωγής φωτεινών κυμάτων. Τα δύο κύματα φτάνουν στο διάφραγμα Δ και από τη συμβολή τους σχηματίζονται πάνω στο διάφραγμα κροσσοί συμβολής, δηλαδή διαδοχικές φωτεινές και σκοτεινές ραβδώσεις (σχ. 70).



Σχ. 70. Κροσσοί συμβολής

Ο σχηματισμός των κροσσών συμβολής εξηγείται εύκολα (σχ. 71). Σέ δσα σημεία του διαφράγματος (όπως π.χ. τό σημείο A) ή διαφορά δρόμου των δύο κυμάτων ($d = \Pi_1A - \Pi_2A$) είναι ίση μέ *άκέραιο αριθμό κυμάτων*, οι δύο ταλαντώσεις φτάνουν μέ *τήν ίδια φάση* και έπομένως ή συνισταμένη ταλάντωση έχει μέγιστο πλάτος.



Σχ. 71. Ο σχηματισμός φωτεινού ή σκοτεινού κροσσού εξαρτάται από τη διαφορά των δρόμων των δύο κυμάτων.

Άρα σ' αυτά τά σημεία σχηματίζονται *φωτεινοί κροσσοί*. Αντίθετα σέ δσα σημεία του διαφράγματος (όπως π.χ. τό σημείο B) ή διαφορά δρόμου των δύο κυμάτων ($d = \Pi_1B - \Pi_2B$) είναι ίση μέ *περιττό αριθμό ήμικυμάτων*, οι δύο ταλαντώσεις φτάνουν μέ *άντιθετη φάση* και έπομένως ή συνισταμένη ταλάντωση έχει πλάτος ίσο μέ μηδέν. Άρα σ' αυτά τά σημεία σχηματίζονται *σκοτεινοί κροσσοί*. Ωστε σχηματίζονται : φωτεινοί κροσσοί, όταν είναι $d = \kappa \cdot \lambda$ σκοτεινοί κροσσοί, όταν είναι

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

α. Μήκος κύματος των όρατων ακτινοβολιών. Από τό φαινόμενο τής συμβολής του φωτός μετρήσαμε τό μήκος κύματος (λ) των άρατων ακτινοβολιών και καταλήξαμε στά εξής συμπεράσματα:

- I. Τό μήκος κύματος (λ) των όρατων ακτινοβολιών του φάσματος του λευκού φωτός ελαττώνεται συνεχώς, όσο προχωρούμε από τήν έρυθρή πρός τήν ίώδη ακτινοβολία.
- II. Τό μήκος κύματος των όρατων ακτινοβολιών περιλαμβάνεται μεταξύ $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ και $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

ή διαφορά δρόμου (d) τῶν δύο κυμάτων εἶναι ἴση μέ ἀκέραιο ἀριθμό κ κυμάτων, δηλαδή εἶναι:

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

Ἀπό τὰ ὀρθογώνια τρίγωνα $\Pi_2 A_2 B$ καί $\Pi_1 A_1 B$ βρίσκουμε ὅτι εἶναι:

$$(\Pi_2 B)^2 = (\Pi_2 A_2)^2 + (A_2 B)^2 \quad \text{ἢ} \quad (\Pi_2 B)^2 = \delta^2 + (x + a)^2 \quad (2)$$

$$(\Pi_1 B)^2 = (\Pi_1 A_1)^2 + (A_1 B)^2 \quad \text{ἢ} \quad (\Pi_1 B)^2 = \delta^2 + (x - a)^2 \quad (3)$$

Ἄν ἀφαιρέσουμε κατά μέλη τίς ἐξισώσεις (2) καί (3), ἔχουμε:

$$(\Pi_2 B)^2 - (\Pi_1 B)^2 = 4a \cdot x \quad \text{ἢ} \quad (\Pi_2 B + \Pi_1 B) \cdot (\Pi_2 B - \Pi_1 B) = 4a \cdot x \quad (4)$$

Ἐπειδή ἡ ἀπόσταση $OK = \delta$ εἶναι πολύ μεγάλη σχετικά μέ τήν ἀπόσταση $KA_2 = a$, μπορούμε νά λάβουμε $\Pi_2 B + \Pi_1 B = 2\delta$ καί ἐπομένως ἡ ἐξίσωση (4) γράφεται:

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

Ἀπό τίς ἐξισώσεις (1) καί (5) βρίσκουμε ὅτι τό μήκος κύματος (λ) τῆς μονοχρωματικῆς ἀκτινοβολίας εἶναι:

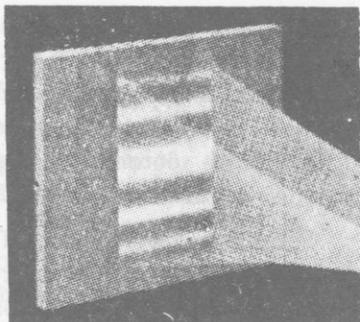
$$\text{μήκος κύματος} \quad \lambda = \frac{2a \cdot x}{\kappa \cdot \delta} \quad (6)$$

Τό κ φανερώνει τόν αὐξοντα ἀριθμό τοῦ φωτεινοῦ κροσσοῦ (στόν κεντρικό φωτεινό κροσσό ἀντιστοιχεῖ $\kappa = 0$) καί τό x φανερώνει τήν ἀπόσταση τοῦ κ τάξεως φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπό τόν κεντρικό φωτεινό κροσσό. Ὡστε τὰ μεγέθη πού εἶναι στό δεύτερο μέλος τῆς ἐξισώσεως (6) μποροῦν νά μετρηθοῦν μέ ἀκρίβεια καί ἔτσι μπορούμε νά ὑπολογίσουμε τό μήκος κύματος λ .

46. Περίθλαση τοῦ φωτός

Ἄφου τό φῶς εἶναι κύματα, πρέπει νά παρουσιάζεται καί τό φαινόμενο τῆς *περιθλάσεως τῶν φωτεινῶν κυμάτων*. Τό φαινόμενο αὐτό τό παρατηροῦμε μέ τό ἐξῆς πείραμα: Πάνω σέ μιὰ πολύ λεπτή σχισμή πέφτει δέσμη ἀπό παράλληλες ἀκτίνες *μονοχρωματικῆς ἀκτι-*

νοβολίας (σχ. 73). Τότε στο διάφραγμα σχηματίζεται ένα κεντρικό φωτεινό είδωλο της σχισμής και από τη μία και την άλλη μεριά αυτού του είδωλου σχηματίζονται συμμετρικά φωτεινές και σκοτεινές ραβδώσεις. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην περίθλαση των φωτεινών κυμάτων που πέφτουν πάνω στη λεπτή σχισμή. Φαινόμενα περιθλάσεως παρατηρούμε και όταν τό φῶς πέφτει πάνω σέ πολύ μικρά αντικείμενα ή πολύ λεπτές άκμές.



Σχ. 73. 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 τά φάσματα τά ονομάζουμε φάσματα από περίθλαση, για νά τά διακρίνουμε από τά φάσματα που παίρνουμε με τά πρίσματα. Ωστε για την περίθλαση των φωτεινών κυμάτων καταλήγουμε στά εξής συμπεράσματα:

I. Περίθλαση του φωτός συμβαίνει, όταν τό φῶς πέφτει πάνω σέ άνοιγματα ή αντικείμενα που οί διαστάσεις τους είναι της τάξεως του μήκους κύματος του φωτός.

II. Τό λευκό φῶς εξαιτίας της περιθλάσεως αναλύεται στίς άκτινοβολίες του φάσματος και τότε σχηματίζεται φάσμα από περίθλαση.

Αποτελέσματα της περιθλάσεως του φωτός. Πολλές φορές γύρω από τό δίσκο του Ήλιου ή της Σελήνης βλέπουμε ότι σχηματίζονται όμόκεντροι έγχρωμοι δακτύλιοι. Αυτό τό φαινόμενο ονομάζεται άλωσ και οφείλεται στην περίθλαση που συμβαίνει, όταν τό ήλιακό ή τό σεληνιακό φῶς πέφτει πάνω σέ ένα στρώμα από μικρές σταγόνες νερού ή μικρούς κρυστάλλους πάγου.

Τό φαινόμενο της περιθλάσεως του φωτός έχει επίδραση στίς πα-

ρατηρήσεις πού κάνουμε μέ τά διάφορα ὀπτικά ὄργανα. Ἀποδεικνύεται ὅτι εἶναι ἀδύνατο νά παρατηρήσουμε ὡς ξεχωριστά δύο σημεῖα, ὅταν ἡ μεταξύ τους ἀπόσταση εἶναι *μικρότερη* ἀπό τό μήκος κύματος τοῦ φωτός πού χρησιμοποιοῦμε γιά τήν παρατήρηση. Ἔτσι ἡ περίθλαση τοῦ φωτός καθορίζει ἕνα ὄριο *στή διαχωριστική ικανότητα* τῶν ὀπτικῶν ὀργάνων.

Φράγματα περιθλάσεως. Τά εἶδωλα τῆς σχισμῆς πού σχηματίζονται ἀπό τήν περίθλαση τοῦ φωτός εἶναι πολύ φωτεινότερα, ἄν ἀντί γιά μιά σχισμή χρησιμοποιήσουμε σύστημα ἀπό πολλές ὅμοιες σχισμές πού βρίσκονται στό ἴδιο ἐπίπεδο καί σέ πολύ μικρές καί ἴσες μεταξύ τους ἀποστάσεις. Αὐτό τό σύστημα ὀνομάζεται *φράγμα περιθλάσεως* καί χρησιμοποιεῖται πολύ στήν Ὀπτική. Τέτοιο φράγμα περιθλάσεως σχηματίζεται, ἄν πάνω σέ μιά γυάλινη πλάκα χαραξοῦμε μέ διαμάντι λεπτές παράλληλες γραμμές σέ ἴσες ἀποστάσεις (500 ὡς 1000 γραμμές κατά ἑκατοστόμετρο).

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

(67) Στόν ἀέρα 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_{Γ} αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μέσα στό γυαλί, ἄν ὁ δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιοῦ γι' αὐτή τήν ἀκτινοβολία εἶναι $n = 1,747$;

(68) Μιά ἀκτινοβολία ἔχει στόν ἀέρα μήκος κύματος $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Νά μετρηθεῖ σέ μήκη κύματος αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μήκος 1 m μέσα στόν ἀέρα καί μήκος 1 m μέσα στό γυαλί, ἄν ὁ δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιοῦ ὡς πρός τόν ἀέρα 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 :

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

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 k τάξεως φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπό τόν κεντρικό

φωτεινό κροσσό Κ. Σέ ένα τέτοιο πείραμα είναι $2a = 4 \text{ mm}$ και $d = 60 \text{ cm}$. 1) Ἡ ἐρυθρή ἀκτινοβολία πού χρησιμοποιοῦμε ἔχει μήκος κύματος $\lambda_E = 4 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$. Πόση είναι ἡ ἀπόσταση x_E τοῦ πρώτου φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπό τόν κεντρικό φωτεινό κροσσό Κ; 2) Πόση είναι 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 ένα πείραμα μέ τίς σχισμές τοῦ Young είναι $2a = 2 \text{ mm}$ καί $d = 1 \text{ m}$. Ἡ ἀπόσταση δύο διαδοχικῶν φωτεινῶν κροσσῶν είναι $e = 0,34 \text{ mm}$. Πόσο είναι τό μήκος κύματος λ τῆς ἀκτινοβολίας;

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

72. Τό φωτόνιο μιᾶς ὑπεριώδους ἀκτινοβολίας μεταφέρει ἐνέργεια $E = 198,6 \cdot 10^{-20} \text{ Joule}$. Πόσο είναι τό μήκος κύματος τῆς ἀκτινοβολίας; $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$.

73. Τό κάθε φωτόνιο μιᾶς ἰώδους ἀκτινοβολίας μεταφέρει ἐνέργεια $E_I = 5 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$. Πόσα φωτόνια αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μεταφέρουν τήν ἐνέργεια E , πού χρειάζεται γιά νά ἀνυψοθεῖ μιά μάζα $m = 10^{-3} \text{ gr}$ σέ ὕψος $h = 1 \text{ mm}$; $g = 10 \text{ m/sec}^2$.

Φάσματα ἐκπομπῆς καί ἀπορροφήσεως

47. Φάσματα ἐκπομπῆς

Μέ τό φασματοσκόπιο ἐξετάζουμε τό φάσμα τοῦ φωτός πού ἐκπέμπουν οἱ διάφορες φωτεινές πηγές. Τά φάσματα αὐτά ὀνομάζονται *φάσματα ἐκπομπῆς*. Ἐτσι βρίσκουμε ὅτι τό φῶς πού ἐκπέμπει ένα *διάπυρο στερεό ἢ ὑγρό σῶμα* σχηματίζει ένα *συνεχές φάσμα* πού ἀποτελεῖται ἀπό μιά συνεχῆ σειρά ὀρατῶν ἀκτινοβολιῶν χωρίς καμιά διακοπή. Τέτοιο φάσμα δίνουν π.χ. τό διάπυρο σύρμα τοῦ ἡλεκτρικοῦ λαμπτήρα, τό ἡλεκτρικό τόξο, ἡ φλόγα ἑνός κεριοῦ κλπ. (βλ. ἐγχρωμη εἰκόνα ἐκτός κειμένου). Γιά νά πάρουμε τό φάσμα ἐκπομπῆς πού δίνουν οἱ *διάπυροι ἄτμοι* τῶν μετάλλων, βάζουμε μέσα στή φλόγα τοῦ λύχνου Bunsen ένα μικρό κομμάτι ἀπό τό μέταλλο ἢ ἀπό ένα ἄλας αὐτοῦ τοῦ μετάλλου. Ἐτσι π.χ. βρίσκουμε ὅτι οἱ διάπυροι ἄτμοι

νατρίου δίνουν ένα φάσμα έκπομπής που αποτελείται μόνο από δύο κίτρινες γραμμές, που είναι ή μία πολύ κοντά στην άλλη και αντιστοιχούν σε δύο ακτινοβολίες που έχουν όρισμένο μήκος κύματος. Αυτό το φάσμα έκπομπής είναι *χαρακτηριστικό* των διαπυρών ατμών νατρίου.

Τά σώματα που στή συνθησιμένη θερμοκρασία είναι αέρια (π.χ. τό υδρογόνο, τό δευγόνο, τό ήλιο) τά αναγκάζουμε νά γίνουν φωτεινές πηγές μέ τό σωλήνα Geissler (σχ. 74). Αὐτός είναι γυάλινος σωλήνας, που στίς δύο άκρες του έχει δύο ήλεκτροδία καί περιέχει αέριο μέ μικρή πίεση. Όταν μέσα στό σωλήνα παράγονται ήλεκτρικές έκκενώσεις, τότε τό αέριο εκπέμπει φώς καί ιδιαίτερα φωτοβολεί τό αέριο που είναι στό στενότερο τμήμα του σωλήνα. Έτσι βρίσκουμε ότι τό φάσμα έκπομπής του υδρογόνου αποτελείται μόνο από τέσσερις φωτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν σε τέσσερις όρισμένες ακτινοβολίες (*). Αὐτό τό φάσμα έκπομπής είναι *χαρακτηριστικό* του υδρογόνου. Παρατηρούμε ότι τό φάσμα έκπομπής των άτμων καί των αέριων αποτελείται μόνο από όρισμένες γραμμές, δηλαδή είναι *άσυνεχές φάσμα* ή *άλλιώς γραμμικό φάσμα*. Από τά παραπάνω καταλήγουμε *στά έξής συμπεράσματα* για τά φάσματα έκπομπής:



Σχ. 74. Σωλήνας Geissler για τή διεγερση τής φωτοβολίας αέριων

- I. Τά φάσματα έκπομπής διακρίνονται σε συνεχή φάσματα καί γραμμικά φάσματα.
- II. Τά διάπυρα στερεά καί υγρά σώματα δίνουν συνεχή φάσματα καί επομένως τό φώς που εκπέμπουν αυτά τά σώματα αποτελείται από ακτινοβολίες, που αντιστοιχούν σε όλα τά μήκη κύματος των όρατων ακτινοβολιών.
- III. Τά αέρια καί οι άτμοί, όταν φωτοβολούν, δίνουν γραμμικά φάσματα καί επομένως τό φώς που εκπέμπουν αποτελείται μόνο από όρισμένες ακτινοβολίες, που είναι *χαρακτηριστικές* για τό άτομο του καθενός στοιχείου.

(*) Τά μήκη κύματος των τεσσάρων ακτινοβολιών που υπάρχουν στό φάσμα έκπομπής του υδρογόνου είναι:

0,658 μm 0,486 μm 0,434 μm 0,410 μm

48. Φάσματα άπορροφήσεως

Μόνο τό κενό είναι τελείως διαφανές καί έπομένως τό φώς διαδίδεται μέσα στό κενό χωρίς καμιά άπορρόφηση. Άντίθετα, όλα τά διαφανή ύλικά πάντοτε άπορροφούν όρισμένες άκτινοβολίες. Εύκολα μπορούμε νά δοϋμε ποιές άκτινοβολίες άπορροφά ένα διαφανές ύλικό. Μέ τό φασματοσκόπιο παρατηρούμε τό συνεχές φάσμα του λευκού φωτός πού έκπέμπει τό ήλεκτρικό τόξο. Άν αυτό τό λευκό φώς, πρίν μπει στό φασματοσκόπιο, περάσει μέσα από μιά γυάλινη πλάκα μέ βαθύ κόκκινο χρώμα, παρατηρούμε ότι από τό προηγούμενο συνεχές φάσμα άπομένει μόνο τό τμήμα μέ τό βαθύ κόκκινο χρώμα. Όλο τό υπόλοιπο τμήμα του συνεχούς φάσματος λείπει, γιατί όλες οι αντίστοιχες άκτινοβολίες άπορροφήθηκαν από τό γυαλί. Σ' αυτή τήν περίπτωση τό φάσμα πού παρατηρούμε είναι ένα φάσμα άπορροφήσεως. Άπό τή μελέτη τών φασμάτων άπορροφήσεως καταλήξαμε στό έξής συμπέρασμα:

Στή συνηθισμένη θερμοκρασία κάθε διαφανές ύλικό άπορροφά όρισμένες άκτινοβολίες, πού είναι χαρακτηριστικές γιά τό κάθε διαφανές ύλικό.

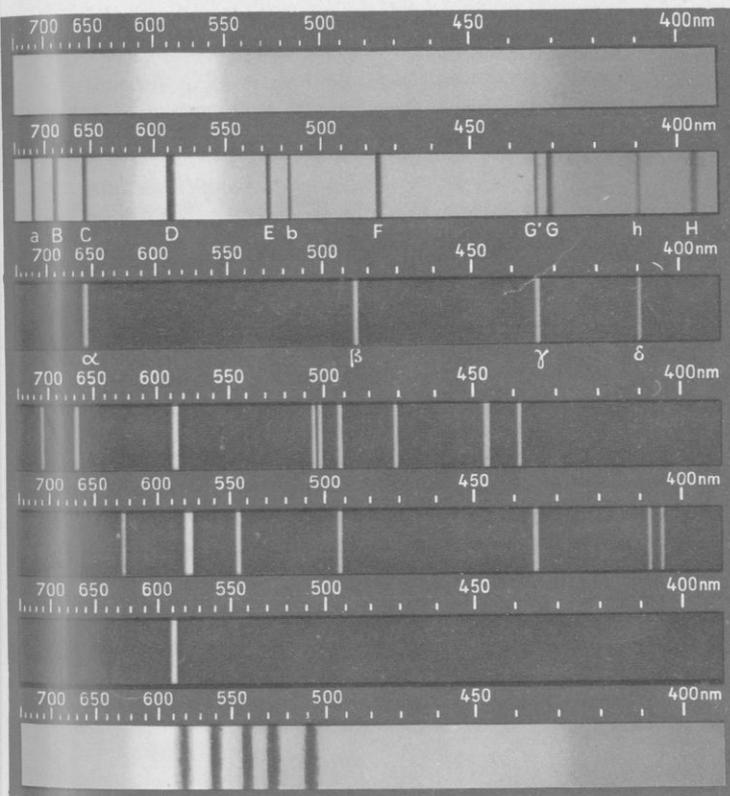
α. Νόμος του Kirchhoff. Μέ τό φασματοσκόπιο παρατηρούμε πάλι τό συνεχές φάσμα του λευκού φωτός πού έκπέμπει τό ήλεκτρικό τόξο. Στην πορεία του λευκού φωτός βάζουμε μιά μή φωτεινή φλόγα φωταερίου, καί μέσα σ' αυτή τή φλόγα εισάγουμε ένα κομμάτι από άλας του νατρίου. Η φλόγα άποκτά τό ζωηρό κίτρινο χρώμα τών άτμών του νατρίου. Τώρα τό λευκό φώς του ήλεκτρικού τόξου, πρίν μπει στό φασματοσκόπιο, περνάει μέσα από τούς διάπυρους άτμούς νατρίου. Παρατηρούμε ότι στό συνεχές φάσμα εμφανίζονται δύο λεπτές σκοτεινές γραμμές στην ίδια ακριβώς θέση πού πρέπει νά σχηματίζονται οι δύο χαρακτηριστικές κίτρινες γραμμές τών άτμών του νατρίου. Τό φαινόμενο αυτό είναι γενικό καί όνομάζεται *άντιστροφή τών φασματικών γραμμών*. Τό φάσμα πού παρατηρούμε σ' αυτή τήν περίπτωση είναι ένα φάσμα άπορροφήσεως, πού είναι χαρακτηριστικό γιά τούς άτμούς του νατρίου. Άποδεικνύεται ότι γενικά ισχύει ό έξής 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 *άσυννεχές φάσμα* στο οποίο υπάρχουν πάρα πολλές *σκοτεινές γραμμές* (βλ. *έγχρωμη εικόνα* εκτός κειμένου). Όστε το ήλιακό φάσμα είναι ένα *φάσμα απορροφήσεως*. Μερικές από τις σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος οφείλονται στο ότι *η ατμόσφαιρα της Γης* απορροφά ορισμένες ακτινοβολίες του ήλιακού φωτός. Αυτές οι σκοτεινές γραμμές είναι *ζωηρότερες*, όταν ο Ήλιος βρίσκεται στον *ορίζοντα* και *έξασθενίζουν*, όσο ο Ήλιος *πλησιάζει* προς το *ζενίθ*. Τις ίδιες σκοτεινές γραμμές παρατηρούμε και στο φάσμα του φωτός που εκπέμπει ένας φάρος που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από μας.

Οι περισσότερες όμως σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος διατηρούν σταθερή ένταση, ανεξάρτητα από την τροχιά που διατρέχει το ήλιακό φως μέσα στην ατμόσφαιρα της 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 ορισμένα διάπυρα αέρια. Έτσι π.χ. στο ήλιακό φάσμα υπάρχουν δύο σκοτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν στις δύο ακτινοβολίες που εκπέμπουν οι διάπυροι ατμοί νατρίου. Επίσης υπάρχουν τέσσερις σκοτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν στο φάσμα εκπομπής του υδρογόνου. Από τη μελέτη του ήλιακού φάσματος κατέληξαν 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 *δλητή 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

Α. Φάσμα πού δίνει τό πρίσμα



Λαμπτήρας
πυρακτώσεως

Ήλιακό φάσμα

Υδρογόνο
H

Ήλιο
He

Υδράργυρος
Hg

Νάτριο
Na

Φάσμα απορροφή-
σεως από υπερμαγ-
νανικό κάλιο

Φάσματα έκπομπής καί απορροφήσεως.

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

τίς απορροφούν τά άτομα τῶν στοιχείων πού βρίσκονται στή χρωμόσφαιρα. Ἔτσι στό φάσμα τοῦ ἡλιακοῦ φωτός πού φτάνει σέ μᾶς, ἐμφανίζονται σκοτεινές γραμμές. Ἐπειδή στό ἡλιακό φάσμα ἀναγνωρίζουμε τό χαρακτηριστικό φάσμα ἀπορροφήσεως ἑνός στοιχείου (π.χ. τοῦ νατρίου ἢ τοῦ ὑδρογόνου), συμπεραίνουμε ὅτι στή χρωμόσφαιρα ὑπάρχουν άτομα αὐτοῦ τοῦ στοιχείου. Ἔτσι ἀπό τή συστηματική μελέτη τοῦ ἡλιακοῦ φάσματος βρήκαμε ὅτι στή χρωμόσφαιρα τοῦ Ἡλίου ὑπάρχουν μέ τή μορφή ἐλεύθερων ἀτόμων ὅλα τά γνωστά μας στοιχεία. Καί μάλιστα μερικά στοιχεία, ὅπως π.χ. τό ἥλιο, πρῶτα ἀνακαλύψαμε ἀπό τό χαρακτηριστικό τους φάσμα ἀπορροφήσεως ὅτι ὑπάρχουν στόν Ἡλιο καί ἔπειτα βρήκαμε ὅτι ὑπάρχουν καί στή Γῆ. Ὡστε:

Τό ἡλιακό φάσμα εἶναι ἕνα φάσμα ἀπορροφήσεως, στό ὁποῖο ὑπάρχουν τά χαρακτηριστικά φάσματα ἀπορροφήσεως πού ἀντιστοιχοῦν στά άτομα ὅλων τῶν γνωστῶν στοιχείων.

49. Ἡ φασματοσκοπική ἔρευνα

Τά φάσματα ἐκπομπῆς καί ἀπορροφήσεως προσφέρουν μεγάλες ὑπηρεσίες. Ἡ χημική ἀνάλυση, γιά νά προσδιορίσει τήν παρουσία ἑνός στοιχείου, χρησιμοποιεῖ πολλές φορές τή φασματοσκοπική ἀνάλυση, πού εἶναι πολύ πιό εὐαίσθητη ἀπό τίς χημικές μεθόδους. Γιά νά ἐμφανιστεῖ π.χ. ἡ διπλή κίτρινη γραμμή τοῦ νατρίου ἀρκεῖ μιά μάζα νατρίου μικρότερη ἀπό τό δισεκατομμυριοστό τοῦ γραμμαρίου.

Ἡ μελέτη τῶν φασμάτων μᾶς ἀνοίξε τό δρόμο πρὸς τήν Ἀτομική Φυσική καί τήν Ἀστροφυσική.

Φωταύγεια. Χρῶμα τοῦ οὐρανοῦ

50. Τρόποι παραγωγῆς φωτός

Ἀπό τήν καθημερινή ζωή ξέρουμε ὅτι οἱ συνηθισμένες φωτεινές πηγές εἶναι σώματα πού ἔχουν ψηλή θερμοκρασία. Τό φῶς πού ἐκπέμπουν αὐτές οἱ φωτεινές πηγές προέρχεται ἀπό τή μετατροπή θερμικῆς ἐνέργειας σέ φωτεινὴ ἐνέργεια. Ἡ παραγωγή φωτός μέ αὐτό

τόν τρόπο ονομάζεται *θερμική παραγωγή φωτός*. "Αν ή θερμοκρασία του σώματος διατηρείται σταθερή, τό σῶμα αδιάκοπα εκπέμπει φῶς. Σέ ὀρισμένες ὁμως περιπτώσεις μερικά σώματα εκπέμπουν φῶς, γιατί μιὰ ἄλλη μορφή ἐνέργειας, διαφορετική ἀπό τή θερμότητα, μετατρέπεται σέ φωτεινή ἐνέργεια. Αὐτός ὁ τρόπος παραγωγῆς φωτός ονομάζεται *φωταύγεια*. "Ωστε:

Ἐπάρχουν δύο τρόποι παραγωγῆς φωτός, ἡ θερμική παραγωγή φωτός καί ἡ φωταύγεια.

51. Φθορισμός

Μέσα σέ ἓνα γυάλινο δοχεῖο ὑπάρχει νερό. Ρίχνουμε στό νερό λίγες σταγόνες ἀπό ἓνα διάλυμα θεικῆς κινίνης. Τό διάλυμα πού ὑπάρχει στό δοχεῖο εἶναι ἄχρωμο. "Αν ὁμως φωτίσουμε τό διάλυμα μέ τό λευκό φῶς μιᾶς ἰσχυρῆς φωτεινῆς πηγῆς, τότε τό διάλυμα *εκπέμπει φῶς* πού ἔχει ἀνοιχτό κυανό χρῶμα. Μόλις διακόψουμε τό φωτισμό τοῦ διαλύματος, ἀμέσως τό διάλυμα *παύει νά εκπέμπει* τό κυανό φῶς. Αὐτή ἡ ἰδιότητα πού ἔχει τό διάλυμα τῆς θεικῆς κινίνης ονομάζεται **φθορισμός**. Ἐκτός ἀπό τή θεική κινίνη καί ἄλλα σώματα ἔχουν τήν ἰδιότητα νά *φθορίζουν*, ὅπως π.χ. τό φθοριοῦχο ἀσβέστιο, ὁ κυανιοῦχος βαριολευκόχρυσος, τά πετρέλαια κ.ἄ. Τό *χρῶμα* τοῦ φωτός πού ἐκπέμπουν τά φθορίζοντα σώματα ἐξαρτᾶται ἀπό τή φύση κάθε σώματος.

Ἐο φθορισμός πού παρουσιάζουν ὀρισμένα σώματα διεγείρεται καί ἀπό *ἀόρατες ἀκτινοβολίες*. Αὐτές μπορεῖ νά εἶναι *ἠλεκτρομαγνητικές ἀκτινοβολίες* (π.χ. ὑπεριώδεις ἀκτινοβολίες, ἀκτίνες Röntgen, ἀκτίνες γ) ἢ *σωματιδιακές ἀκτινοβολίες* (π.χ. καθοδικές καί θετικές ἀκτίνες). Σέ πολλές ἐφαρμογές ἐκμεταλλευόμαστε τό φαινόμενο τοῦ φθορισμοῦ, π.χ. στούς ἠλεκτρικούς λαμπτήρες φθορισμοῦ, στά φθοροσκόπια τῶν ἀκτινολόγων, στίς μικρές θήνες πού ἔχουν οἱ δέκτες τῆς τηλεοράσεως, στό ραντάρ, στόν παλμογράφο, στό ἠλεκτρονικό μικροσκόπιο κ.ἄ. Ἀπό τή μελέτη τοῦ φαινομένου τοῦ φθορισμοῦ καταλήξαμε στά ἐξῆς συμπεράσματα:

I. Φθορισμός εἶναι ἡ ἰδιότητα πού ἔχουν πολλά σώματα νά εκπέμπουν χαρακτηριστικές ἀκτινοβολίες, ὅταν πάνω σ' αὐ-

τά τά σώματα πέφτουν ηλεκτρομαγνητικές ή σωματιδιακές ακτινοβολίες.

II. Όταν πάνω σέ ένα σώμα πού φθορίζει πέφτει μιá μονοχρωματική ακτινοβολία, τότε οι ακτινοβολίες πού εκπέμπει αυτό τό σώμα έχουν μήκη κύματος μεγαλύτερα από τό μήκος κύματος τής ακτινοβολίας πού διεγείρει τό φθορισμό.

52. Φωσφορισμός

Τή μιá επιφάνεια διαφράγματος τή σκεπάζουμε μέ ένα στρώμα από θειούχο ψευδάργυρο καί γιά λίγο χρόνο αφήνουμε νά πέσει πάνω σ' αυτό τό στρώμα τό ήλιακό φώς ή τό λευκό φώς μιās ισχυρής φωτεινής πηγής. Έπειτα φέρνουμε τό διάφραγμα μέσα σέ σκοτεινό χώρο. Παρατηρούμε ότι τό στρώμα του θειούχου ψευδαργύρου *εκπέμπει* ζωηρό πρασινωπό φώς. Όταν πάψει νά πέφτει φώς πάνω στό θειούχο ψευδάργυρο, αυτός εξακολουθει νά εκπέμπει τό δικό του φώς γιά άρκετό χρονικό διάστημα. Αυτή ή ιδιότητα πού έχει ο θειούχος ψευδάργυρος ονομάζεται **φωσφορισμός**. Έκτός από τό θειούχο ψευδάργυρο καί άλλα σώματα έχουν τήν ιδιότητα νά *φωσφορίζουν*, όπως π.χ. τό διαμάντι, τά θειούχα άλατα του βαρίου, του στροντίου κ.ά. Ο φωσφορισμός παρατηρείται πάντοτε σέ *στερεά σώματα*. Τό *χρώμα* του φωτός πού εκπέμπουν τά φωσφορίζοντα σώματα καί ή *διάρκεια* του φωσφορισμού εξαρτώνται από τή φύση του σώματος. Από τή μελέτη του φαινομένου του φωσφορισμού καταλήξαμε στά εξής συμπεράσματα:

I. Φωσφορισμός είναι ή ιδιότητα πού έχουν μερικά στερεά σώματα νά εκπέμπουν χαρακτηριστικές όρατές ακτινοβολίες γιά άρκετό χρόνο μετά τή διακοπή του φωτισμού τους.

II. Όταν πάνω σέ ένα σώμα πού φωσφορίζει πέφτει μιá μονοχρωματική ακτινοβολία, τότε οι ακτινοβολίες πού εκπέμπει αυτό τό σώμα έχουν μήκη κύματος μεγαλύτερα από τό μήκος κύματος τής ακτινοβολίας πού διεγείρει τό φωσφορισμό.

53. Φωτοφωταύγεια

Ο φθορισμός και ο φωσφορισμός είναι δύο περιπτώσεις του φαινομένου που ονομάζεται **φωτοφωταύγεια**. Για να προκληθεί ο φθορισμός ή ο φωσφορισμός, πρέπει να πέσουν πάνω στο σώμα ακτινοβολίες που μεταφέρουν *ενέργεια*. Ένα μέρος από αυτή την ενέργεια το σώμα την εκπέμπει με τη μορφή *φωτεινής ενέργειας*. Γενικά για τη φωτοφωταύγεια ισχύει ο *έξῃς νόμος του Stokes*:

Οι ακτινοβολίες που σε ένα σώμα διεγείρουν τη φωτοφωταύγεια μετατρέπονται από το σώμα σε ακτινοβολίες με μεγαλύτερο μήκος κύματος.

Φωταύγεια. Η *φωτοφωταύγεια* είναι μία μορφή του γενικότερου φαινομένου που ονομάζεται **φωταύγεια** και *εμφανίζεται* με διάφορες μορφές. Όταν συντρίβονται όρισμένα σώματα (π.χ. ή ζάχαρη) εμφανίζεται η *τριβοφωταύγεια*, στη διάρκεια μερικών χημικών αντιδράσεων (π.χ. κατά την οξείδωση του φωσφόρου) εμφανίζεται η *χημικοφωταύγεια*. Η ηλεκτρική εκκένωση μέσα σε αέριο συνοδεύεται από *ηλεκτροφωταύγεια*. Σε όρισμένους οργανισμούς (π.χ. στην πυγολαμπίδα, σε άβυσσικούς οργανισμούς) εμφανίζεται η *βιοφωταύγεια*.

54. Τό χρώμα του ούρανοῦ

Όλα τὰ ἑτερόφωτα σώματα εκπέμπουν φῶς, μόνο όταν πέσει πάνω τους τό φῶς μιᾶς φωτεινῆς πηγῆς. Τότε κάθε σημεῖο τῆς ἐπιφάνειας τοῦ σώματος εκπέμπει πρὸς ὄλες τίς διευθύνσεις ἕνα μέρος τοῦ φωτός που ἔλαβε καί ἔτσι τό ἑτερόφωτο σώμα γίνεται μιᾶ δευτερεύουσα φωτεινή πηγή. Αὐτό τό φαινόμενο ονομάζεται *διάχυση* τοῦ φωτός.

Διάχυση τοῦ φωτός προκαλοῦν καί τὰ μόρια τῶν ἀερίων καί γενικότερα τὰ μικρότατα ἄχρωμα σωματίδια που εἶναι ἄτακτα διασκορπισμένα μέσα σε ἕνα διαφανές ὑλικό, π.χ. μέσα στόν ἀτμοσφαιρικό ἀέρα. Πειραματικῶς βρήκαμε ὅτι σ' αὐτή τήν περίπτωσι ἰσχύει ὁ *έξῃς νόμος τοῦ Rayleigh*:

Ἡ ἔντασι (I) τοῦ φωτός που διαχέεται ἀπό μικρότατα αἰωρούμενα σωματίδια εἶναι ἀντιστρόφως ἀνάλογη μέ τήν τέταρτη δύ-

ναμη του μήκους κύματος (λ) της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στα σωματίδια.

$$\text{νόμος του Rayleigh} \quad I = A \cdot \frac{1}{\lambda^4}$$

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

Τό *κvanό χρῶμα* του ούρανοῦ ὀφείλεται στή διάχυση του ἡλιακοῦ φωτός, που τήν προκαλοῦν τά μόρια των συστατικῶν τῆς ἀτμόσφαιρας καί τά μικρότατα ἄχρωμα σωματίδια που αἰωροῦνται μέσα σ' αὐτή. Ὄταν ὁ Ἥλιος βρίσκεται ψηλά σχετικά μέ τόν ὀρίζοντα, τότε ἡ ἔνταση των ἀκτινοβολιῶν που διαχέονται εἶναι πολύ μεγαλύτερη γιά τίς ἀκτινοβολίες που ἔχουν τά μικρότερα μήκη κύματος, δηλαδή γιά τίς κvanές καί τίς ἰώδεις ἀκτινοβολίες. Ἔτσι στό φῶς που διαχέεται ἀπό τήν ἀτμόσφαιρα ἐπικρατεῖ τό *κvanό χρῶμα*. Κατά τήν ἀνατολή καί τή δύση του Ἥλιου τό ἡλιακό φῶς γιά νά φτάσει σέ μᾶς διατρέχει μεγαλύτερο διάστημα μέσα στό κατώτερο στρώμα τῆς ἀτμόσφαιρας που εἶναι τό πυκνότερο καί πλουσιότερο σέ αἰωρούμενα σωματίδια. Τό ἡλιακό φῶς περνώντας μέσα ἀπό αὐτό τό στρώμα χάνει, ἐξαιτίας τῆς διαχύσεως, τό μεγαλύτερο μέρος ἀπό τίς κvanές καί τίς ἰώδεις ἀκτινοβολίες του. Ἔτσι τό φῶς που φτάνει σέ μᾶς ἔχει ἕνα *ερυθροκίτρινο χρῶμα*, που ὀφείλεται στήν ἀνάμιξη των ὑπόλοιπων ἀκτινοβολιῶν του ἡλιακοῦ φωτός. Ὄστε:

Τό κvanό χρῶμα του ούρανοῦ κατά τήν ἡμέρα καί οἱ ἐρυθροκίτρινες ἀποχρώσεις του ούρανοῦ κατά τήν ἀνατολή καί τή δύση του Ἥλιου ὀφείλονται στήν ἰσχυρότερη διάχυση που παθαίνουν μέσα στήν ἀτμόσφαιρα οἱ κvanές καί οἱ ἰώδεις ἀκτινοβολίες του ἡλιακοῦ φωτός, γιατί ἔχουν τά μικρότερα μήκη κύματος.

Ήλεκτρισμός

Επαγωγή φαίνεται το φαινόμενο κατά το οποίο, παρά μεταβολής τη μαγνητικής ροής, τη διεκπεραίωσης

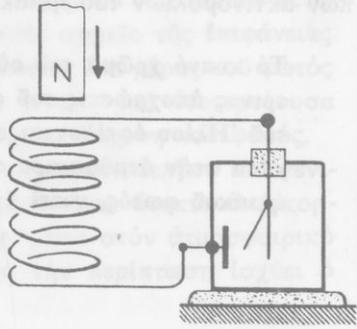
Επαγωγικά ρεύματα δια ένος πηνίου έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ηλεκτρικής δύναμης ουσιαστικά είναι το πηνίο με όποια κατεύθυνση ηλεκτρομαγνητική δύναμη ή επαγωγή

(55) Έπαγωγή

Τις δύο άκρες ενός πηνίου με πολλές σπείρες τις συνδέουμε με ευαίσθητο ήλεκτρόμετρο (σχ. 75). Έτσι σχηματίζεται ένα ανοιχτό κύκλωμα. Πλησιάζουμε γρήγορα προς το πηνίο το βόρειο πόλο ενός μαγνήτη. Παρατηρούμε ότι το ήλεκτρόμετρο δείχνει μία διαφορά δυναμικού, που εξαφανίζεται, μόλις σταματήσει ή κίνηση του μαγνήτη. Τό ίδιο φαινόμενο παρατηρούμε, αν απομακρύνουμε γρήγορα το μαγνήτη από το πηνίο. Η ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού στις άκρες ενός άγωγού με τόν τρόπο που εξετάσαμε παραπάνω ονομάζεται **έπαγωγή**.

α. Εξήγηση του φαινομένου της έπαγωγής. Είναι φανερό ότι αίτια του φαινομένου της έπαγωγής είναι η κίνηση του μαγνήτη σχετικά με το πηνίο. Τότε μεταβάλλεται η μαγνητική ροή (Φ) που περνάει από τις σπείρες του πηνίου. Σ' αυτή τήν περίπτωση αποδεικνύεται ότι το μετακινούμενο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσει σε κάθε ελεύθερο ήλεκτρόνιο του άγωγού μία ηλεκτρομαγνητική δύναμη (F), που φέρνει το ήλεκτρόνιο στή μία άκρη του άγωγού. Έτσι τά ελεύθερα ηλεκτρόνια του άγωγού συγκεντρώνονται στή μία άκρη του και έπομένως στις δύο άκρες του άγωγού εμφανίζεται διαφορά δυναμικού από έπαγωγή ($U_{επαγ}$) ή άλλιως έπαγωγική τάση.

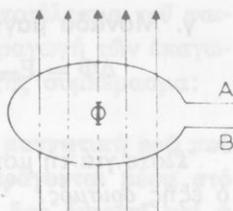
Όσο χρόνο διαρκεί ή μεταβολή της μαγνητικής ροής, τό πηνίο συμπεριφέρεται σαν γεννήτρια. Αδτή δέ δίνει ρεύμα στο κύκλωμα, αλλά διατηρεί μεταξύ των δύο πόλων της μιά διαφορά δυναμικού ($U_{επαγ}$), που εί-



Σχ. 75. Στις άκρες του πηνίου αναπτύσσεται ΗΕΔ από έπαγωγή.

ναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής ($E_{επαγ}$), ή όποια χαρακτηρίζει αυτή τη γεννήτρια. Ωστε :

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



Σχ. 76. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής δημιουργεί ΗΕΔ από επαγωγή.

β. Νόμος της επαγωγής. Άς θεωρήσουμε έναν άγωγό που δέν είναι κλειστός (σχ. 76). Στη διάρκεια του ελάχιστου χρόνου Δt ή μαγνητική ροή που περνάει από τον άγωγό μεταβάλλεται κατά $\Delta\Phi$. Σε όλη τη διάρκεια του χρόνου Δt στις δύο άκρες του άγωγού αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής ($E_{επαγ}$), για την όποια ισχύει ό εξής νόμος της επαγωγής:

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής, ή όποια αναπτύσσεται στις άκρες άγωγού που άποτελεί μία σπειρά, είναι άνάλογη 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. Άν ένα πηνίο έχει n σπείρες, τότε ό 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 παραλείπουμε.

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

$$\Delta\Phi = E_{επαγ} \cdot \Delta t \quad \text{άρα } 1 \text{ Weber} = 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ sec}$$

$$\text{ή } 1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{sec}$$

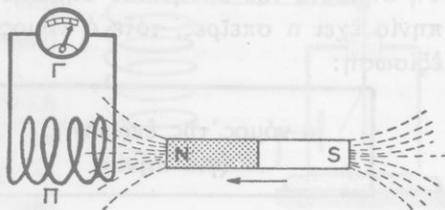
Ωστε για τη μονάδα μαγνητικής ροής στο σύστημα MKSA ισχύει ο εξής ορισμός:

1 Weber είναι η μαγνητική ροή η οποία, όταν περνάει από μία σπείρα και μέσα σε 1 δευτερόλεπτο ελαττώνεται ομοιόμορφα ως την τιμή μηδέν, αναπτύσσει ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής ίση με 1 Volt.

56) Έπαγωγικά ρεύματα

Τίς δύο άκρες ενός πηνίου τις συνδέουμε με ένα ευπαθές γαλβανόμετρο (σχ. 77). Έτσι σχηματίζεται ένα κλειστό κύκλωμα, αλλά στο κύκλωμα αυτό δεν υπάρχει γεννήτρια. Στη μία άκρη του πηνίου πλησιάζουμε γρήγορα το βόρειο πόλο ευθύγραμμου μαγνήτη. Παρατηρούμε ότι το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, που διαρκεί όσο διαρκεί και η κίνηση του μαγνήτη. Αν τώρα απομακρύνουμε γρήγορα το βόρειο πόλο του μαγνήτη από το πηνίο, το κύκλωμα διαρρέεται πάλι από ρεύμα, που έχει μικρή διάρκεια και φορά αντίθετη με τη φορά που είχε το προηγούμενο ρεύμα. Τα ρεύματα που παράγονται με αυτό τον τρόπο μέσα σε ένα κλειστό κύκλωμα ονομάζονται **επαγωγικά ρεύματα**.

α) Αιτία παραγωγής των επαγωγικών ρευμάτων. Όταν ο μαγνήτης πλησιάζει στο πηνίο ή απομακρύνεται από αυτό, τότε μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που περνάει από τις σπείρες του πηνίου και, επομένως, στις άκρες του πηνίου αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή ($E_{επαγ}$). Επειδή το κύκλωμα είναι κλειστό, γι' αυτό μέσα στο κύκλωμα κυκλοφορεί ένα επα-



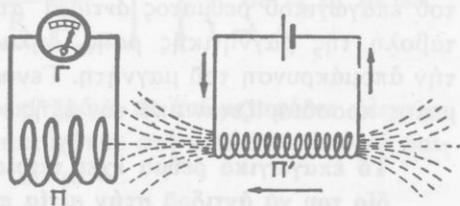
Σχ. 77. Παραγωγή επαγωγικού ρεύματος στο κλειστό κύκλωμα.

γωγικό ρεύμα. Ωστε το επαγωγικό ρεύμα είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της επαγωγής. Σχετικά λοιπόν με την παραγωγή των επαγωγικών ρευμάτων μπορούμε νά διατυπώσουμε τό εξής συμπέρασμα:

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

β) Τρόποι παραγωγής επαγωγικών ρευμάτων. Η μαγνητική ροή πού περνάει από τίς σπείρες του πηνίου Π (σχ. 77) μπορεί νά μεταβληθεί μέ τούς εξής τρόπους:

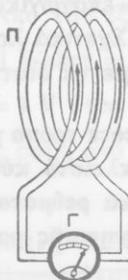
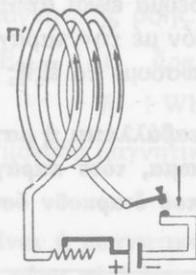
1. Πλησιάζουμε στό πηνίο Π ή άπομακρύνουμε από αυτό έναν εϋθύγραμμο μαγνήτη ή ένα άλλο πηνίο Π' πού διαρρέεται από ρεύμα (σχ. 78). Τό πηνίο Π' ίσοδυναμεί μέ εϋθύγραμμο μαγνήτη. Καί στίς δύο περιπτώσεις μέσα στό κύκλωμα του πηνίου Π παράγονται επαγωγικά ρεύματα.
2. Τά δύο πηνία Π καί Π' είναι ακίνητα καί τό ένα κοντά στό άλλο. Τότε τό πηνίο Π βρίσκεται μέσα στό μαγνητικό πεδίο πού δημιουργεί τό πηνίο Π', επειδή αυτό τό πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I. Κάθε μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος στό πηνίο Π' προκαλεί μεταβολή τής μαγνητικής επαγωγής (B) του μαγνητικού πεδίου καί, επομένως, προκαλεί μεταβολή τής μαγνητικής ροής πού περνάει από τό πηνίο Π. Έτσι κάθε μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος στό πηνίο Π' δημιουργεί επαγωγικό ρεύμα στό κύκλωμα του πηνίου Π.
3. Διατηρούμε ακίνητο τό πηνίο Π (σχ. 77) καί περιστρέφουμε τόν εϋθύγραμμο μαγνήτη γύρω από έναν άξονα πού είναι κάθετος στόν άξονα του μαγνήτη καί περνάει από τό κέντρο του μαγνήτη. Τότε ή μαγνητική ροή



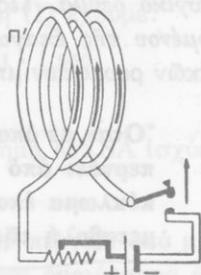
Σχ. 78. Μετακίνηση του πηνίου Π' σχετικά μέ τό πηνίο Π ή μεταβολή τής έντάσεως του ρεύματος στό πηνίο Π' δημιουργεί επαγωγικό ρεύμα στό άλλο κύκλωμα.



Σχ. 79. Ἀποκατάσταση ἢ αἴξηση τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος δημιουργεῖ ἀντίρροπο ἐπαγωγικό ρεῦμα.



Σχ. 80. Διακοπή ἢ ἐλάττωση τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος δημιουργεῖ ὁμόρροπο ἐπαγωγικό ρεῦμα.



πού περνάει ἀπό τό πηνίο Π μεταβάλλεται διαδοχικά μεταξύ μιᾶς μέγιστης τιμῆς καί τῆς τιμῆς μηδέν.

(γ) Φορά τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος. Στή μιὰ ἄκρη τοῦ πηνίου Π (σχ. 77) πλησιάζουμε τό βόρειο πόλο (N) τοῦ μαγνήτη. Τότε τό ἐπαγωγικό ρεῦμα μέσα στό πηνίο Π ἔχει τέτοια φορά, ὥστε σ' αὐτή τήν ἄκρη τοῦ πηνίου ἐμφανίζεται βόρειος πόλος. Ἀντίθετα, ὅταν ἀπομακρύνουμε τό βόρειο πόλο (N) τοῦ μαγνήτη, τό ἐπαγωγικό ρεῦμα ἔχει τέτοια φορά, ὥστε σ' αὐτή τήν ἄκρη τοῦ πηνίου ἐμφανίζεται νότιος πόλος. Στήν πρώτη περίπτωση ὁ βόρειος πόλος τοῦ πηνίου ἀπωθεῖ τό βόρειο πόλο (N) τοῦ μαγνήτη καί τόν ἐμποδίζει νά πλησιάσει στό πηνίο. Στή δεύτερη περίπτωση ὁ νότιος πόλος τοῦ πηνίου ἔλκει τό βόρειο πόλο (N) τοῦ μαγνήτη καί τόν ἐμποδίζει νά ἀπομακρυνθεῖ ἀπό τό πηνίο. Καί στίς δύο περιπτώσεις τό μαγνητικό πεδίο τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος ἀντιδρᾷ στήν αἰτία πού προκαλεῖ τή μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ροῆς, δηλαδή ἀντιδρᾷ στό πλησίασμα ἢ τήν ἀπομάκρυνση τοῦ μαγνήτη. Γενικά ἡ φορά τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος προσδιορίζεται ἀπό τόν ἐξῆς νόμο τοῦ Lenz:

Τό ἐπαγωγικό ρεῦμα ἔχει τέτοια φορά, ὥστε τό μαγνητικό πεδίο του νά ἀντιδρᾷ στήν αἰτία πού προκαλεῖ τήν παραγωγή τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος.

Σύμφωνα μέ τό νόμο τοῦ Lenz, ὅταν κλείνουμε τό κύκλωμα τοῦ πηνίου Π' (σχ. 79) ἢ ὅταν αἰξάνουμε τήν ἐνταση I τοῦ ρεύματος πού

διαρρέει αυτό το κύκλωμα, τότε στο γειτονικό κύκλωμα του πηνίου Π παράγεται επαγωγικό ρεύμα *αντίρροπο*, προς το ρεύμα του πηνίου Π'. Αντίθετα, όταν ανοίγουμε το κύκλωμα του πηνίου Π' (σχ. 80) ή όταν ελαττώνουμε την ένταση I του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα, τότε στο κύκλωμα του πηνίου Π παράγεται επαγωγικό ρεύμα *μόρροπο* προς το ρεύμα του πηνίου Π'.

Παρατήρηση. Στην εξίσωση $E_{επαγ} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ το αρνητικό σημείο φανερώνει

ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής δημιουργεί στο κύκλωμα ρεύμα που έχει τέτοια φορά, ώστε το μαγνητικό πεδίο του να αντιδρά στην αιτία που προκαλεί την παραγωγή του επαγωγικού ρεύματος.

57 Ένταση του επαγωγικού ρεύματος

Ένα κλειστό κύκλωμα, π.χ. το κύκλωμα του πηνίου Π στο σχήμα 80, έχει αντίσταση R. Στη διάρκεια του χρόνου Δt ή μαγνητική ροή που περνάει από το πηνίο μεταβάλλεται κατά $\Delta\Phi$. Τότε σ' αυτό το κύκλωμα αναπτύσσεται *ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής* που κατ' άπολυτη τιμή έχει μέτρο

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

Σύμφωνα με το νόμο του Ohm ή ένταση I του ρεύματος είναι:

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

Το ρεύμα διαρρέει το κύκλωμα επί χρόνο Δt και μεταφέρει *ηλεκτρικό φορτίο* Q. Αυτό το φορτίο αναπτύχθηκε στο κύκλωμα από το φαινόμενο της επαγωγής και είναι ίσο με

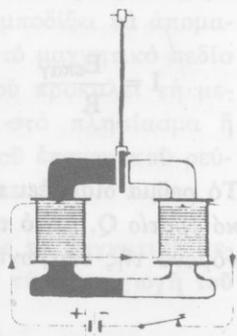
$$Q = I \cdot \Delta t = \frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t} \cdot \Delta t \quad \text{άρα} \quad Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ σε Wb} \\ R \text{ σε } \Omega \\ Q \text{ σε Cb} \end{array} \right.$$

Ἡ ἐξίσωση πού βρήκαμε ἐκφράζει τόν ἐξῆς νόμο τοῦ *Neumann* :

Τό ἠλεκτρικό φορτίο πού ἀναπτύσσεται κατά μιὰ ὀρισμένη μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ροῆς εἶναι ἀνεξάρτητο ἀπό τό χρόνο πού διαρκεῖ αὐτή ἢ μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ροῆς.

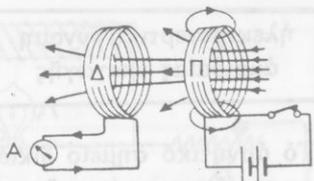
58. Ρεύματα Foucault

Ὄταν μιὰ μάζα μετάλλου κινεῖται μέσα σέ μαγνητικό πεδίο, τότε μέσα στό μέταλλο ἀναπτύσσονται ἐπαγωγικά ρεύματα πού κυκλοφοροῦν πάνω σέ κλειστές τροχιές. Αὐτά τά ἐπαγωγικά ρεύματα ὀνομάζονται *ρεύματα Foucault* καί προκαλοῦν ἰσχυρή *θέρμανση* τοῦ μετάλλου. Σύμφωνα μέ τό νόμο τοῦ *Lenz* τά ρεύματα *Foucault* δημιουργοῦν μαγνητικά πεδία πού ἀντιδροῦν στή μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ροῆς, δηλαδή ἀντιδροῦν στήν κίνηση τῆς μάζας τοῦ μετάλλου. Ἔτσι τά ρεύματα *Foucault* ἐνεργοῦν πάνω στή μάζα τοῦ μετάλλου *σάν φρένο* καί προσπαθοῦν νά σταματήσουν τήν κίνηση. Αὐτό φαίνεται μέ τό ἐξῆς πείραμα: Μεταξύ τῶν πόλων ἑνός ἰσχυροῦ ἠλεκτρομαγνήτη μπορεῖ νά αἰωρεῖται ἐλεύθερα μιὰ μεταλλική πλάκα πού ἔχει ἄρκετό πάχος (σχ. 81). Ὄταν ὁ ἠλεκτρομαγνήτης δέ διαρρέεται ἀπό ρεῦμα, ἡ πλάκα μπορεῖ νά αἰωρεῖται γιά ἄρκετό χρονικό διάστημα. Ὄταν ὅμως ὁ ἠλεκτρομαγνήτης διαρρέεται ἀπό ρεῦμα, τότε ἡ πλάκα κινεῖται μέσα σέ μαγνητικό πεδίο καί παρατηροῦμε ὅτι κινεῖται πολύ ἄργά καί γρήγορα σταματᾷ. Ἐπίσης διαπιστώνουμε ὅτι ἡ πλάκα ἔχει θερμανθεῖ. Σέ μερικές περιπτώσεις ἐκμεταλλεῦμαστε τά ρεύματα *Foucault*, π.χ. στά *ἠλεκτρομαγνητικά φρένα* καί στούς *ἐπαγωγικούς φούρνους*, μέ τούς ὁποίους πετυχαίνουμε πολύ γρήγορη τήξη μετάλλων. Ἀλλά σέ πολλές σημαντικές ἐφαρμογές (γεννήτριες, ἠλεκτροκινητήρες, μετασχηματιστές) τά ρεύματα *Foucault* θεωροῦνται *ἐπιζήμια*, γιατί ἡ θερμότητα πού ἀναπτύσσουν αὐτά τά ρεύματα εἶναι μιὰ ἀπώλεια ἐνέργειας, καί ἂν αὐτή ἡ θερμότητα ξεπεράσει ἓνα ὄριο, μπορεῖ νά προκαλέσει



Σχ. 81. Γιά τήν ἀπόδειξη τῶν ρευμάτων *Foucault*

καταστροφή τής μηχανής. Σ' αυτές τις περιπτώσεις φροντίζουμε, νά περιορίσουμε τά άποτελέσματα τών ρευμάτων Foucault.



Σχ. 82. Πειραματική απόδειξη τής άμοιβαίας επαγωγής

89. Άμοιβαία επαγωγή

α. Τό φαινόμενο τής άμοιβαίας επαγωγής. Έχουμε δύο γειτονικά κυκλώματα (σχ. 82). Τό κύκλωμα τού πηνίου Π διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I, ενώ στό κύκλωμα τού πηνίου Δ δέν ύπάρχει γεννήτρια. Άν στό πηνίο Π μεταβληθεί ή ένταση τού ρεύματος κατά ΔI, μεταβάλλεται καί ή μαγνητική επαγωγή (B) τού μαγνητικού πεδίου τού πηνίου Π. Τότε στό πηνίο Δ μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή κατά ΔΦ καί έπομένως στίς άκρες τού πηνίου Δ αναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής (E_{επαγ}). Αυτό τό φαινόμενο όνομάζεται **άμοιβαία επαγωγή**. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μεταξύ τών δύο πηνίων (Π καί Δ) ύπάρχει **επαγωγική σύζευξη**.

β. Ήλεκτρεγερτική δύναμη άμοιβαίας επαγωγής. Ή μεταβολή ΔΦ τής μαγνητικής ροής στό πηνίο Δ είναι **άνάλογη** μέ τή μεταβολή ΔI τής έντάσεως τού ρεύματος στό πηνίο Π, δηλαδή ισχύει ή σχέση:

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

όπου M είναι ένας συντελεστής άναλογίας, πού όνομάζεται **συντελεστής άμοιβαίας επαγωγής** καί έξαρτάται από τό σχήμα καί τή σχετική θέση τών δύο κυκλωμάτων καθώς καί από τή μαγνητική διαπερατότητα τού περιβάλλοντος. Ο συντελεστής M μετριέται μέ τή μονάδα Henry (1 H), μέ τήν όποία μετριέται καί ο συντελεστής άυτεπαραγωγής L ενός άγωγού. Στίς άκρες τού πηνίου Δ αναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής πού είναι :

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

Άπό τίς εξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε:

ήλεκτρεγερτική δύναμη
άμοιβαίας επαγωγής

$$E_{επαγ} = -M \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\begin{cases} \Delta I \text{ σε A, } \Delta t \text{ σε sec} \\ M \text{ σε H} \\ E \text{ σε V} \end{cases} \quad (3)$$

Τό άρνητικό σημεϊο δικαιολογείται από τό νόμο του Lenz. 'Η εξίσωση (3) φανερώνει ότι:

"Όταν μεταξύ δύο πηνίων ύπάρχει σύζευξη, ή ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής πού άναπτύσσεται στό ένα πηνίο είναι ανάλογη μέ τήν ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος στό άλλο πηνίο και ανάλογη μέ τό συντελεστή άμοιβαίας επαγωγής (M).

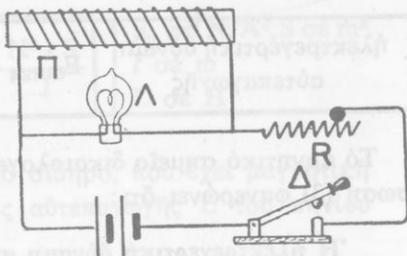
Παρατήρηση. "Αν στην εξίσωση (3) είναι $\Delta I = 1 \text{ A}$ και $\Delta t = 1 \text{ sec}$, τότε έχουμε $|E_{επαγ}| = M$. "Αρα ό συντελεστής άμοιβαίας επαγωγής M εκφράζει τήν ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής πού άναπτύσσεται στις άκρες του πηνίου Δ, όταν στό άλλο πηνίο Π ή ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος είναι 1 A/sec .

60. Αύτεπαγωγή

α. Τό φαινόμενο τής αύτεπαγωγής. "Ένας κυκλικός άγωγός άποτελεί μιά σπείρα και διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I. Γύρω από τόν άγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο και από τήν επιφάνεια του άγωγού περνάει μαγνητική ροή Φ, πού όφείλεται στό μαγνητικό πεδίο του ρεύματος. "Αν μεταβληθεί ή ένταση του ρεύματος κατά ΔI, τότε μεταβάλλεται ή μαγνητική επαγωγή (B) του μαγνητικού πεδίου και, έπομένως, ή μαγνητική ροή πού περνάει από τήν επιφάνεια του άγωγού μεταβάλλεται κατά ΔΦ. "Έτσι μέσα στον ίδιο τόν άγωγό άναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής. Αυτό τό φαινόμενο ονομάζεται αύτεπαγωγή. "Εξαιτίας τής αύτεπαγωγής δημιουργούνται μέσα στον άγωγό ρεύματα, πού ονομάζονται **ρεύματα αύτεπαγωγής** και διαρκούν όσο διαρκεί ή μεταβολή τής έντάσεως του ρεύματος πού διαρρέει τόν άγωγό. Σύμφωνα μέ τό νόμο του Lenz, όταν αυξάνει ή ένταση του ρεύματος, τό ρεύμα αύτεπαγωγής είναι αντίρροπο μέ τό κύριο ρεύμα και προσπαθεί νά έμποδίσει τήν αύξηση τής έντάσεως του κύριου ρεύματος. "Αντίθετα, όταν ελάττώνεται ή ένταση του ρεύματος, τό ρεύμα αύτεπαγωγής είναι όμορ-

ροσο με τό κύριο ρεύμα και προσπαθεί νά ἐμποδίσει τήν ἐλάττωση τῆς ἐντάσεως τοῦ κύριου ρεύματος.

Πειραματική ἀπόδειξη τῆς αὐτεπαγωγῆς. Μὲ τή διάταξη πού δείχνει τό σχῆμα 83 μπορούμε νά ἀποδείξουμε πειραματικῶς τό φαινόμενο τῆς αὐτεπαγωγῆς. Τό πηνίο ἔχει πυρήνα ἀπό μαλακό σίδηρο. Παράλληλα μὲ τό πηνίο συνδέεται ἕνας ἠλεκτρικός λαμπτήρας πού ἔχει μεγάλη ἀντίσταση σχετικά μὲ τήν ἀντίσταση τοῦ πηνίου. Μὲ ἕνα ροοστάτη ρυθμίζουμε τήν ἀντίσταση τοῦ κυκλώματος ἔτσι, ὥστε ὁ λαμπτήρας μόλις νά φωτοβολεῖ. Ἄν διακόψουμε ἀπτότομα τό ρεύμα, ὁ λαμπτήρας γιά ἐλάχιστο χρονικό διάστημα φωτοβολεῖ πολύ δυνατά. Αὐτό συμβαίνει, γιατί ἡ διακοπή τοῦ ρεύματος προκαλεῖ ἀπτότομη μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ροῆς πού περνάει ἀπό τό πηνίο. Ἔτσι στό κύκλωμα πού ἀποτελοῦν τό πηνίο καί ὁ λαμπτήρας ἀναπτύσσεται *ἠλεκτρεγερτική δύναμη αὐτεπαγωγῆς*, πού γιά ἐλάχιστο χρόνο δημιουργεῖ ἕνα ἰσχυρό ρεῦμα αὐτεπαγωγῆς, ὁμόρροπο μὲ τό ρεῦμα πού διακόψαμε.



Σχ. 83. Πειραματική ἀπόδειξη τῆς αὐτεπαγωγῆς

β. Ἡλεκτρεγερτική δύναμη αὐτεπαγωγῆς. Ἡ μεταβολή $\Delta\Phi$ τῆς μαγνητικῆς ροῆς πού περνάει ἀπό τήν ἐπιφάνεια τοῦ ἀγωγοῦ εἶναι *ἀνάλογη* μὲ τή μεταβολή ΔI τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος, δηλαδή ἰσχύει ἡ σχέση:

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

ὅπου L εἶναι ἕνας συντελεστής ἀναλογίας, πού ὀνομάζεται *συντελεστής αὐτεπαγωγῆς* τοῦ ἀγωγοῦ καί ἐξαρτᾶται ἀπό τό *σχῆμα* τοῦ ἀγωγοῦ καί τῆ *μαγνητική διαπερατότητα* τοῦ περιβάλλοντος. Στις ἄκρες τοῦ ἀγωγοῦ ἀναπτύσσεται ἠλεκτρεγερτική δύναμη πού εἶναι:

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

*Από τίς ἐξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε:

ήλεκτρεγερτική 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 ήλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής πού αναπτύσσεται στις άκρες άγωγού είναι ανάλογη μέ τήν ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος πού διαρρέει τόν άγωγό καί ανάλογη μέ τό συντελεστή αυτεπαγωγής (L) του άγωγού.

Παρατήρηση. Άν στην εξίσωση (3) είναι $\Delta I = 1 \text{ A}$ καί $\Delta t = 1 \text{ sec}$, έχουμε $|E_{\text{αυτεπ}}| = L$. Άρα ό συντελεστής αυτεπαγωγής L του άγωγού εκφράζει τήν ήλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής πού 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) καί όρίζεται από τήν εξίσωση (3):

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

Έτσι έχουμε τόν εξής όρισμό:

1 Henry (1 H) είναι ό συντελεστής αυτεπαγωγής άγωγού, στόν όποιο αναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική 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 millihenry: $1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$ καί 1 microhenry: $1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$

Μέ τή μονάδα Henry μετριέται καί ό συντελεστής άμοιβαίας έπαγωγής M.

δ. Συντελεστής αυτεπαγωγής πηνίου. Ένα πηνίο έχει μήκος l καί άποτελείται από N σπείρες, πού καθεμιά έχει έμβασό S. Άποδεικνύεται ότι ό συντελεστής αυτεπαγωγής L_0 του πηνίου δίνεται από τήν εξίσωση:

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 $L = \mu \cdot L_0$.

Τὸ φαινόμενο τῆς αὐτεπαγωγῆς εἶναι ἰδιαίτερα ἔντονο στὴν περίπτωση πηνίου, γιατί αὐτὸ ἔχει πολλές σπείρες 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.

ε. Ἐνέργεια τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου. Στὸ πείραμα πού ἐκτελοῦμε μὲ τὸ πηνίο καὶ τὸ λαμπτήρα (σχ. 83) παρατηροῦμε ὅτι, μόλις διακόψουμε τὸ ρεῦμα, στὸ κύκλωμα πηνίο-λαμπτήρας κυκλοφορεῖ γιὰ ἐλάχιστο χρόνο ἓνα ἐπαγωγικὸ ρεῦμα πού μεταφέρει ὀρισμένη ἐνέργεια. Αὐτὴ ἡ ἐνέργεια δὲν προέρχεται ἐκεῖνη τῆ στιγμὴ ἀπὸ τῆ γεννήτρια, γιατί τὸ ρεῦμα ἔχει διακοπεῖ. Ἡ ἐνέργεια τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος εἶναι ἡ ἐνέργεια πού ἦταν ἀποταμιευμένη στὸ μαγνητικὸ πεδίο τοῦ πηνίου καὶ ἡ ὁποία διατηρεῖται μέσα στὸ μαγνητικὸ πεδίο τοῦ πηνίου, ὅσο χρόνο τὸ πηνίο διαρρέεται ἀπὸ ρεῦμα. Μόλις διακόψουμε τὸ ρεῦμα, ἡ ἐνέργεια τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τοῦ πηνίου μετατρέπεται σὲ ἠλεκτρικὴ ἐνέργεια τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος. Ἀποδεικνύεται ὅτι:

Ἡ ἐνέργεια ($E_{\text{μαγν}}$) πού ἀποταμιεύεται στὸ μαγνητικὸ πεδίο τοῦ πηνίου εἶναι ἀνάλογη μὲ τὸ συντελεστὴ αὐτεπαγωγῆς (L) τοῦ πηνίου καὶ ἀνάλογη μὲ τὸ τετράγωνο τῆς ἐντάσεως (I) τοῦ ρεύματος πού κυκλοφορεῖ στὸ πηνίο.

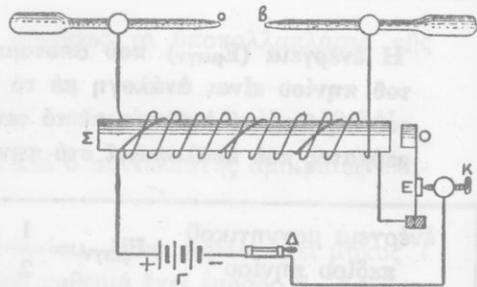
ἐνέργεια μαγνητικοῦ
πεδίου πηνίου

$$E_{\text{μαγν}} = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L \text{ σέ } H, I \text{ σέ } A \\ E \text{ σέ } \text{Joule} \end{array} \right.$$

61) Έπαγωγικό πηνίο

Τό *έπαγωγικό πηνίο* ή *πηνίο του Ruhmkorff* (σχ. 84) αποτελείται από έναν πυρήνα μαλακού σιδήρου γύρω από τον οποίο είναι τυλιγμένες οι λίγες σπείρες ενός πηνίου Π (πρωτεύον πηνίο). Αυτό τό πηνίο Π βρίσκεται μέσα σέ ένα άλλο πηνίο Δ (δευτερεύον πηνίο) πού αποτελείται από πολλές σπείρες ενός λεπτού σύρματος. Οι δύο άκρες του πηνίου Δ καταλήγουν στά σημεία α και β δύο άγωγών. Στο κύκλωμα υπάρχει ένας διακόπτης (Ε), πού λειτουργεί όπως ο διακόπτης πού υπάρχει στό ηλεκτρικό κουδούνι. Έτσι στό κύκλωμα του πηνίου Π γίνονται διαδοχικές διακοπές και αποκαταστάσεις του ρεύματος, πού δημιουργούν στό άλλο πηνίο Δ αντίστοιχα *έπαγωγικά ρεύματα*. Όταν συμβαίνει διακοπή του ρεύματος στό πηνίο Π, τότε στό πηνίο Δ δημιουργείται έπαγωγικό ρεύμα *όμοροπο* μέ τό ρεύμα του πηνίου Π. Καί αντίθετα, όταν συμβαίνει αποκατάσταση του ρεύματος στό πηνίο Π, τότε στό πηνίο Δ δημιουργείται έπαγωγικό ρεύμα *αντίροπο* μέ τό ρεύμα του πηνίου Π. Έτσι στις άκρες α και β του πηνίου Δ αναπτύσσεται *έναλλασσόμενη τάση*, πού μπορεί νά φτάσει σέ πολλές χιλιάδες βόλτ, γιατί οι σπείρες του πηνίου Δ είναι πολύ περισσότερες από τίς σπείρες του πηνίου Π καί έπομένως ή μεταβολή ($\Delta\Phi$) τής μαγνητικής ροής στό πηνίο Δ πολλαπλασιάζεται. Μεταξύ των σημείων α και β σχηματίζονται τότε *έναλλασσόμενοι* ηλεκτρικοί σπινθήρες, πού φανερώουν ότι ή τάση στά σημεία α και β είναι τόσο μεγάλη, ώστε τό ρεύμα πού κυκλοφορεί στό πηνίο Δ μπορεί νά περάσει καί μέσα από ένα στρώμα άέρα. Η συχνότητα των *έναλλαγών* του ρεύματος στό κύκλωμα του πηνίου Δ είναι ίση μέ τόν αριθμό των διακοπών του ρεύματος στό κύκλωμα του πηνίου Π. Για νά αύξησουμε τή συχνότητα, χρησιμοποιούμε ειδικούς διακόπτες πού προκαλούν χιλιάδες διακοπές κατά δευ-



Σχ. 84. Έπαγωγικό πηνίο (σηματική παράσταση)

τερόλεπτο. Ἐάν ἡ ἀπόσταση τῶν σημείων α καὶ β γίνει μεγαλύτερη ἀπὸ ἓνα ὄριο, οἱ σπινθῆρες σχηματίζονται μόνο κατὰ τὴ μιά φορά καὶ ἀντιστοιχοῦν στίς διακοπές τοῦ ρεύματος, πού εἶναι πολὺ ἀπότομες. Τότε ἡ ταχύτητα μεταβολῆς τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος εἶναι πολὺ μεγάλη καὶ ἐπομένως ἡ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη ἐπαγωγῆς πού ἀντιστοιχεῖ στὴ διακοπὴ εἶναι πολὺ μεγάλη.

Τὸ ἐπαγωγικὸ πηνίο τὸ χρησιμοποιοῦσαν γιὰ νὰ παράγουν ψηλές τάσεις. Σήμερα ἡ χρῆση του εἶναι περιορισμένη. Μιά μορφή ἐπαγωγικοῦ πηνίου εἶναι ὁ *πολλαπλασιαστής*, πού χρησιμοποιοῦμε στό αὐτοκίνητο γιὰ τὴν παραγωγή τοῦ ἠλεκτρικοῦ σπινθῆρα στό βενζινοκίνητῆρα.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

74. Ἐνα κυκλικὸ πλαίσιο ἀποτελεῖται ἀπὸ $n = 5$ σπεῖρες, πού καθεμιά ἔχει ἐμβαδὸ $S = 20 \text{ cm}^2$. Τὸ πλαίσιο ἔχει ἀντίσταση $R = 0,2 \Omega$, καὶ εἶναι κάθετο στίς δυναμικὲς γραμμὲς ὁμογενοῦς μαγνητικοῦ πεδίου, πού ἔχει μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ $B = 4 \text{ T}$. Μέσα σέ χρόνο $\Delta t = 0,02 \text{ sec}$ τὸ πλαίσιο στρέφεται κατὰ 90° γύρω ἀπὸ μιά διάμετρό του κάθετη στίς δυναμικὲς γραμμὲς τοῦ πεδίου. 1) Πόση εἶναι ἡ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη ἀπὸ ἐπαγωγὴ πού ἀναπτύσσεται στίς ἄκρες τοῦ πλαισίου; 2) Πόση εἶναι ἡ ἐνταση τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος καὶ τὸ ἠλεκτρικὸ φορτίο πού ἀναπτύσσεται ἀπὸ ἐπαγωγῆ;

75. Ἐνα κυκλικὸ πλαίσιο ἀποτελεῖται ἀπὸ $n = 10$ σπεῖρες, πού ἔχουν διάμετρο 20 cm . Τὸ πλαίσιο εἶναι κάθετο στίς δυναμικὲς γραμμὲς ὁμογενοῦς μαγνητικοῦ πεδίου, πού ἔχει μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ $B = 1,6 \text{ T}$. Μέσα σέ χρόνο $\Delta t = 0,004 \text{ sec}$ τὸ πλαίσιο στρέφεται κατὰ 60° γύρω ἀπὸ μιά διάμετρό του κάθετη στίς δυναμικὲς γραμμὲς τοῦ πεδίου. Πόση εἶναι ἡ ἠλεκτρεγερτικὴ δύναμη πού ἀναπτύσσεται ἀπὸ ἐπαγωγὴ στίς ἄκρες τοῦ πλαισίου;

76. Ἐνα πηνίο ἀποτελεῖται ἀπὸ $n = 1000$ σπεῖρες, πού καθεμιά ἔχει ἐμβαδὸ $S = 50 \text{ cm}^2$. Οἱ σπεῖρες εἶναι κάθετες στίς δυναμικὲς γραμμὲς μαγνητικοῦ πεδίου πού ἔχει μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ $B = 2,8 \text{ T}$. Στὴ διάρκεια ἑνὸς χρόνου $\Delta t = 0,04 \text{ sec}$ βάζουμε μέσα στό πηνίο μιά ράβδο μαλακοῦ σιδήρου, πού ἔχει μαγνητικὴ διαπερατότητα $\mu =$

= 1240. 1) Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του πηνίου; 2) Το 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 εμβαδό $S = 4 \text{ cm}^2$. 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 έντασεως 10 A . Στη μέση του πηνίου υπάρχει ένας κυκλικός άγωγός που έχει εμβαδό $S = 25 \pi^2 \text{ cm}^2$ 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 άγωγού; $\pi^2 \approx 10$.

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 μεσημβρινοῦ. Απότομα στρέφουμε το πλαίσιο κατά 180° . Πόσο ηλεκτρικό φορτίο αναπτύχθηκε από επαγωγή μέσα 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 το κεντρικό τμήμα του πηνίου Π_1 υπάρχει ένα άλλο πηνίο Π_2 που αποτελείται από $N_2 = 20$ σπείρες, με διάμετρο 10 cm . Το πηνίο Π_2 έχει αντίσταση $R_2 = 12 \Omega$. Πόσο ηλεκτρικό φορτίο αναπτύσσεται από επαγωγή μέσα στο πηνίο Π_2 , όταν διακοπεί το ρεύμα στο πηνίο Π_1 ;

81. Ένα κυκλικό πλαίσιο αποτελείται από 100 σπείρες, που καθεμιά έχει εμβαδό $S = 1 \text{ m}^2$. Το 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 άπότομα τό πλαίσιο κατά 90° , ώστε τό επίπεδό του νά γίνει παράλληλο μέ τίς δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Τότε άπό τό γαλβανόμετρο περνάει ηλεκτρικό φορτίο $1/2500 \text{ Cb}$. 1) Πόση είναι ή μαγνητική έπαγωγή B του γήινου μαγνητικού πεδίου; 2) Πόση είναι ή ένταση H του γήινου μαγνητικού πεδίου;

82. Οι δύο παράλληλες ράβδοι μιάς όριζόντιας και εϑύγραμμης σιδηροδρομικής γραμμής στή μιά άκρη τους συνδέονται μεταξύ τους μέ άλλη μεταλλική ράβδο. Η άπόσταση των δύο ράβδων τής γραμμής είναι 144 cm . Πάνω στή γραμμή κινείται μιά σιδηροδρομική μηχανή μέ ταχύτητα 100 km/h . Νά βρεθεί ή ηλεκτρεγερτική δύναμη άπό έπαγωγή που αναπτύσσεται στις δύο άκρες ενός άξονα των τροχών τής μηχανής. Κατακόρυφη συνιστώσα τής μαγνητικής έπαγωγής του γήινου μαγνητικού πεδίου $B_K = 5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$.

83. Ένα ρεύμα έντάσεως 12 A διαρρέει πηνίο που έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $0,2 \text{ H}$. Μέσα σε χρόνο $0,04 \text{ sec}$ ή ένταση του ρεύματος έλαττώνεται σε 3 A . 1) Πόση είναι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται άπό άυτεπαγωγή στις άκρες του πηνίου; 2) Πόσο πρέπει νά μεταβληθεί ή ένταση του ρεύματος, για νά είναι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη άπό άυτεπαγωγή ίση μέ 30 V ;

84. Ένα πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $0,063 \text{ H}$ και διαρρέεται άπό ρεύμα έντάσεως 2 A . 1) Πόση ενέργεια είναι άποταμειωμένη στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου; 2) Άν τό ρεύμα διακοπεί μέσα σε χρόνο $\Delta t = 0,02 \text{ sec}$, πόση ηλεκτρεγερτική δύναμη άπό άυτεπαγωγή αναπτύσσεται στις άκρες του πηνίου;

85. Μεταξύ δύο κυκλωμάτων ύπάρχει έπαγωγική σύζευξη. Όταν στο πρώτο κύκλωμα ή ένταση του ρεύματος μεταβάλλεται άπό $I_1 = 1000 \text{ A}$ σε $I_2 = 200 \text{ A}$ μέσα σε χρόνο $\Delta t = 1 \text{ sec}$, τότε στο δεύτερο κύκλωμα αναπτύσσεται άπό έπαγωγή ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 5 \text{ V}$. 1) Πόσος είναι ό συντελεστής άμοιβαίας έπαγωγής M των δύο κυκλωμάτων; 2) Σε πόσο χρόνο πρέπει νά γίνει ή ίδια μεταβολή τής έντάσεως του ρεύματος, αν θέλουμε νά είναι $E = 100 \text{ V}$;

86. Ένα πηνίο έχει μήκος $l = 1 \text{ m}$ και άποτελείται άπό $n = 100$

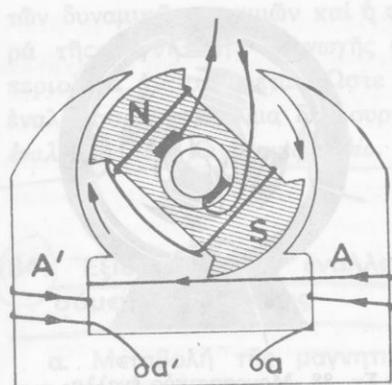
σπειρες/cm. Κάθε σπείρα έχει ακτίνα $r = 6 \text{ cm}$. 1) Πόσος είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής L του πηνίου; 2) Το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντασεως $I = 10 \text{ A}$. Πόση ενέργεια είναι αποταμιευμένη στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου; 3) Αν τό ρεύμα διακοπεί μέσα σε χρόνο $\Delta t = 0,5 \text{ sec}$, πόση ηλεκτρεγερτική δύναμη αναπτύσσεται από αυτεπαγωγή στις άκρες του πηνίου; 4) Αν μέσα στο πηνίο βάλουμε πυρήνα μαλακού σιδήρου, πού έχει μαγνητική διαπερατότητα $\mu = 1000$, πόσος γίνεται ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου; Πόση ενέργεια είναι τότε αποταμιευμένη στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου και πόση είναι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη πού αναπτύσσεται από αυτεπαγωγή, όταν τό ρεύμα έντασεως 10 A καταργείται μέσα σε $0,5 \text{ sec}$;

87) Ένα πηνίο έχει αντίσταση $R = 11 \Omega$, συντελεστή αυτεπαγωγής $L = 0,1 \text{ H}$ και στις άκρες του εφαρμόζεται τάση $U = 110 \text{ V}$. 1) Πόση είναι τελικά ή ένταση I_0 του ρεύματος; 2) Η ένταση του ρεύματος συνεχώς αυξάνει από 0 ως I_0 . Όταν ή ένταση έχει φτάσει την τιμή $I = 3 \text{ A}$, πόση είναι ή πτώση τάσεως αποκλειστικά πάνω στην αντίσταση R ; 3) Πόση είναι τότε ή ταχύτητα μεταβολής τής έντασεως του ρεύματος;

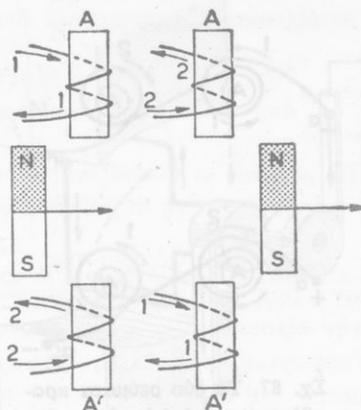
Έναλλασσόμενο ρεύμα

62. Παραγωγή έναλλασσόμενου ρεύματος

Σήμερα στις εφαρμογές χρησιμοποιούμε τό έναλλασσόμενο ρεύμα, πού ή φορά του αλλάζει περιοδικά. Οί γεννήτριες πού παράγουν τό έναλλασσόμενο ρεύμα ονομάζονται **έναλλακτήρες** και ή λειτουργία τους στηρίζεται στην εξής αρχή: Ένας ηλεκτρομαγνήτης (έπαγωγέας) περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα πού παράγει μιά γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (σχ. 85). Ένα σύστημα πηνίων A και A' (έπαγωγίμο) έχουν κοινό πυρήνα από μαλακό σίδηρο. Τό σύρμα στά δύο πηνία είναι τυλιγμένο αντίθετα και οί δύο άκρες του σύρματος καταλήγουν στους άκροδέκτες a και a' . Όταν ο ηλεκτρομαγνήτης περιστρέφεται, μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή στά δύο πηνία. Σε μιά στιγμή ο βόρειος πόλος (N) του ηλεκτρομαγνήτη πλησιάζει προς τό πηνίο A (σχ. 86) και τότε τό



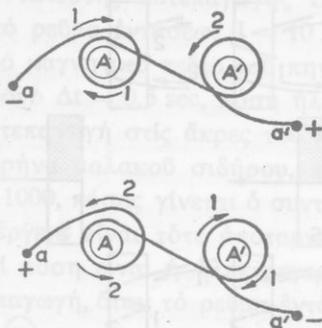
Σχ. 85. Σχηματική παράσταση του μονοφασικού έναλλακτήρα



Σχ. 86. Μέσα στά πηνία A και A' τά ρεύματα έχουν πάντοτε αντίθετη φορά.

έπαγωγικό ρεύμα στό πηνίο A έχει τή φορά 1. Σέ λίγο ό βόρειος πόλος (N) άπομακρύνεται άπό τό πηνίο A και τότε τό έπαγωγικό ρεύμα σ' αυτό τό πηνίο έχει τήν αντίθετη φορά 2. Τά ίδια συμβαίνουν και στό πηνίο A' μέ τή διαφορά ότι σέ κάθε στιγμή τά δύο πηνία A και A' διαρρέονται άπό έπαγωγικά ρεύματα πού έχουν αντίθετη φορά. Έπειδή όμως τό τύλιγμα του σύρματος στά δύο πηνία έχει γίνει αντίθετα, γι' αυτό σέ κάθε στιγμή τά δύο αντίθετα έπαγωγικά, ρεύματα προσθέτονται (σχ. 87) και έτσι οι άκροδέκτες α και α' περιοδικά γίνονται θετικός και άρνητικός πόλος τής γεννήτριας. Άν συνδέσουμε τους άκροδέκτες μέ ένα έξωτερικό άγωγό (σύρμα), τότε τό ρεύμα πού διαρρέει αυτό τόν άγωγό περιοδικά αλλάζει φορά, δηλαδή είναι ένα έναλλασσόμενο ρεύμα. Στήν πράξη ό έπαγωγέας άποτελείται άπό ζεύγη μαγνητικών πόλων και τό έπαγωγίμο άποτελείται άπό τόσα πηνία, όσοι είναι οι μαγνητικοί πόλοι του έπαγωγέα (σχ. 88). Αυτοί οι έναλλακτήρες ονομάζονται μονοφασικοί και τό έναλλασσόμενο ρεύμα πού παράγουν ονομάζεται μονοφασικό.

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



Σχ. 87. Τά δύο ρεύματα προσθέτονται και αποτελούν ένα ρεύμα.



Σχ. 88. Μονοφασικός έναλλακτήρας

63. Αποτελέσματα του έναλλασσόμενου ρεύματος

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

α. Όταν ένας άγωγός διαρρέεται από ήλεκτρικό ρεύμα, τότε πάνω σ' αυτό τόν άγωγό άναπτύσσεται θερμότητα εξαιτίας του φαινομένου Joule, πού είναι άνεξάρτητο από τή φορά του ρεύματος. Ωστε στό έναλλασσόμενο ρεύμα έμφανίζεται τό φαινόμενο Joule, όπως συμβαίνει και στό συνεχές ρεύμα.

β. Σέ ένα βολτάμετρο ύπάρχει άραιό διάλυμα θειικού όξέος. Αν συνδέσουμε τά δύο ήλεκτρόδια του βολταμέτρου μέ τούς πόλους ενός έναλλακτήρα, τότε κάθε ήλεκτρόδιο γίνεται διαδοχικά άνοδος και κάθοδος, δηλαδή περιοδικά αλλάζει ή πολικότητα του ήλεκτροδίου. Έτσι δέν μπορούμε νά μαζέψουμε χωριστά τά προϊόντα τής ήλεκτρολύσεως (δηλαδή τό ύδρογόνο και τό όξυγόνο). Ωστε τό έναλλασσόμενο ρεύμα προκαλεί τό φαινόμενο τής ήλεκτρολύσεως, αλλά ή πολικότητα των ήλεκτροδίων του βολταμέτρου μεταβάλλεται περιοδικά.

γ. Ένας εϋθύγραμμος άγωγός πού διαρρέεται από έναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο, όπως συμβαίνει και όταν διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, μέ τή διαφορά όμως ότι ή φορά

των δυναμικών γραμμών και ή φορά της μαγνητικής επαγωγής (B) περιοδικά αντιστρέφεται. Ωστε τό έναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί έναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.

64. Έξιώσεις του έναλλασσόμενου ρεύματος

α. Μεταβολή της μαγνητικής ροής. Ένα όρθογώνιο πλαίσιο από χάλκινο σύρμα, πού ή επιφάνειά του έχει έμβασό S, στρέφεται μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο, πού έχει μαγνητική επαγωγή B (σχ. 89). Ό άξονας περιστροφής του πλαισίου είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Όταν τό πλαίσιο στρέφεται, ή μαγνητική ροή πού περνάει από τό πλαίσιο συνεχώς μεταβάλλεται και σέ κάθε στιγμή ισχύει ή έξιωση:

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

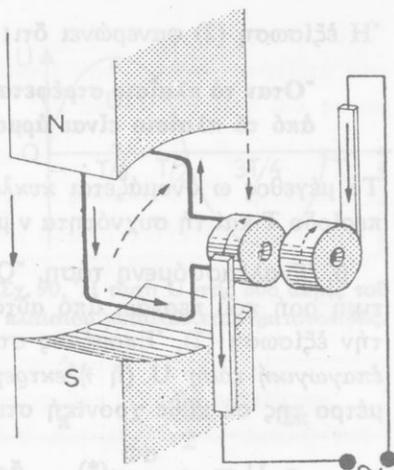
όπου α είναι ή γωνία πού σχηματίζει ή διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής B μέ την κάθετη στην επιφάνεια του πλαισίου. Όταν τό πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου ($\alpha = 0$, $\alpha = \pi$), τότε ή μαγνητική ροή έχει τή μέγιστη απόλυτη τιμή:

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

Και όταν τό πλαίσιο είναι παράλληλο μέ τις δυναμικές γραμμές του πεδίου ($\alpha = \pi/2$, $\alpha = 3\pi/2$), τότε ή μαγνητική ροή είναι ίση μέ μηδέν ($\Phi = 0$). Σέ κάθε χρονική στιγμή t ή γωνία α είναι ίση μέ $\alpha = \omega t$. Έπομένως ή έξιωση (1) γράφεται:

μεταβολή της
μαγνητικής ροής $\Phi = B \cdot S \cdot \sigma\upsilon\upsilon \omega t$

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



Σχ. 89. Η μαγνητική ροή Φ διαρκώς μεταβάλλεται.

Ἡ ἐξίσωση (2) φανερώνει ὅτι:

Ὄταν τὸ πλαίσιο στρέφεται ὁμαλά, ἡ μαγνητικὴ ροὴ πού περνάει ἀπὸ τὸ πλαίσιο εἶναι ἀρμονικὴ συνάρτηση τοῦ χρόνου.

Τὸ μέγεθος ω ὀνομάζεται *κυκλικὴ συχνότητα* καὶ συνδέεται μὲ τὴν περίοδο T καὶ τὴ συχνότητα ν μὲ τὴ γνωστὴ σχέση $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$.

β. Ἐναλλασσόμενη τάση. Ὄταν τὸ πλαίσιο στρέφεται, ἡ μαγνητικὴ ροὴ πού περνάει ἀπὸ αὐτὸ συνεχῶς μεταβάλλεται σύμφωνα μὲ τὴν ἐξίσωση (2). Ἐπομένως στὶς ἄκρες τοῦ πλαισίου ἀναπτύσσεται *ἐπαγωγικὴ τάση* U (ἢ *ἠλεκτρογενετικὴ δύναμη ἐπαγωγῆς*), πού τὸ μέτρο της σὲ κάθε χρονικὴ στιγμή δίνεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} (*) \quad \text{ἄρα} \quad U = \omega \cdot B \cdot S \cdot \eta\mu \omega t \quad (3)$$

Ὄταν γίνεται $\eta\mu \omega t = \pm 1$, τότε ἡ ἐπαγωγικὴ τάση ἀποκτᾶ τὴ *μέγιστη* ἀπόλυτη τιμὴ U_0 , πού ὀνομάζεται *πλάτος τῆς τάσεως* καὶ ἔχει μέτρο ἴσο μὲ:

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

Ἄρα ὡστε ἡ ἐξίσωση (3) πού δίνει τὴ στιγμιαία τάση γράφεται:

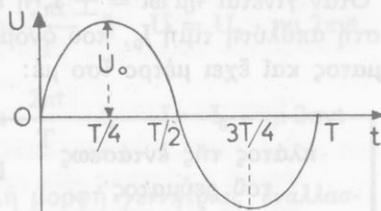
στιγμιαία τάση $U = U_0 \cdot \eta\mu \omega t$	(4)
---	-----

Ἡ ἐξίσωση (4) φανερώνει ὅτι:

Ὄταν ἓνα συρματένιο πλαίσιο στρέφεται ὁμαλά μέσα σὲ ὁμογενές μαγνητικὸ πεδίο, τότε στὶς δύο ἄκρες τοῦ πλαισίου ἀναπτύσσεται ἐπαγωγικὴ τάση, πού τὸ μέτρο της εἶναι ἡμιτονοειδῆς συνάρτηση τοῦ χρόνου.

(*) Ἀπὸ τὰ Μαθηματικὰ ξέρουμε ὅτι ἡ συνάρτηση $y = a \cdot \sin \omega x$ ἔχει παράγωγο $\frac{dy}{dx} = a \cdot \omega \cdot \cos \omega x$ ὅπου a εἶναι σταθερὸς παράγοντας.

Αυτή ή επαγωγική τάση ονομάζεται *ήμιτονοειδής εναλλασσομένη τάση* ή και απλά *εναλλασσόμενη τάση*. Γενικά τέτοιες τάσεις χρησιμοποιούμε στις εφαρμογές. Η μεταβολή της τάσεως U σε συνάρτηση με το χρόνο t φαίνεται από την ήμιτονοειδή καμπύλη του σχήματος 90. Από τις εξισώσεις (2) και (4) σχηματίζουμε τον εξής πίνακα:



Σχ. 90. 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

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 στο έξωτερικό κύκλωμα. Οι άκρες του πλαισίου συνδέονται με δύο μονωμένους δακτυλίους πού είναι στερεωμένοι στον άξονα περιστροφής και στρέφονται μαζί με τό πλαίσιο (σχ. 89).

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

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

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

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

Ωστε η εξίσωση (5) γράφεται:

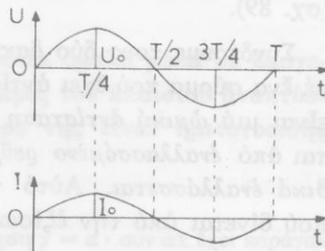
στιγμιαία ένταση του ρεύματος	$I = I_0 \cdot \eta \mu \omega t$	(6)
-------------------------------	-----------------------------------	-----

Η εξίσωση (6) φανερώνει ότι:

Στό εξωτερικό κύκλωμα του στρεφόμενου πλαισίου κυκλοφορεί έναλλασσόμενο ρεύμα, που η έντασή του είναι ήμιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου (ήμιτονοειδές ρεύμα).

Η μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος σε συνάρτηση με τό χρόνο t φαίνεται από τήν ήμιτονοειδή καμπύλη του σχήματος 91. Όταν τό εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R και δέν υπάρχει πηνίο ή πυκνωτής, τότε ή ένταση του ρεύματος λαβάίνει τή μέγιστη και τήν ελάχιστη τιμή τής ταυτόχρονα με τήν τάση, δηλαδή σ' ατή τήν περίπτωση ή τάση (U) και ή ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε τήν ίδια φάση (ωt).

δ. Άλλη μορφή τών εξισώσεων του έναλλασσόμενου ρεύματος. Όταν λέμε έναλλασσόμενο ρεύμα, έννοοϋμε 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 νά λάβουν και τήν εξής μορφή:



Σχ. 91. Η τάση U και ή ένταση I του ρεύματος.

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

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

Τό στρεφόμενο πλαίσιο είναι ή πιό άπλή μορφή *γεννήτριας έναλλασσόμενου ρεύματος (έναλλακτήρας)*. Τά ίδια φαινόμενα παρατηρούμε και όταν ένας μαγνήτης (ή ήλεκτρομαγνήτης) στρέφεται μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα έμπρός από τό άκίνητό πλαίσιο ή άκίνητο πηνίο.

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

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

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

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

ή στιγμιαία ένταση

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

65. Ένεργός ένταση έναλλασσόμενου ρεύματος

Ένα έναλλασσόμενο ρεύμα έχει πλάτος έντάσεως I_0 και έπί χρόνο t διαρρέει μία *ώμική αντίσταση* R . Ξέρουμε ότι τό έναλλασσόμενο ρεύμα παράγει τό φαινόμενο Joule και έπομένως πάνω στην αντίσταση R αναπτύσσεται όρισμένη θερμότητα Q . Ένα συνεχές ρεύμα που διαρρέει τήν ίδια αντίσταση R , αναπτύσσει τήν ίδια θερμότητα Q στον ίδιο χρόνο t , αν ή ένταση του συνεχούς ρεύματος έχει μία όρι-

σμένη τιμή, πού τήν ονομάζουμε **ένεργό ένταση** ($I_{εν}$) τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. Ἔτσι ἔχουμε τόν ἐξῆς **ὄρισμό**:

Ἐνεργός ένταση ($I_{εν}$) τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζεται ἡ ένταση ἑνός συνεχοῦς ρεύματος πού, ὅταν διαρρέει τήν ἴδια ὠμική ἀντίσταση (R), παράγει στόν ἴδιο χρόνο (t) τήν ἴδια θερμότητα (Q) πού παράγει καί τό ἐναλλασσόμενο ρεύμα.

Ἀποδεικνύεται ὅτι:

Ἡ ένεργός ένταση ($I_{εν}$) τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος εἶναι ἴση μέ τό πηλίκο τοῦ πλάτους τῆς έντάσεως (I_0) τοῦ ρεύματος διά τῆς τετραγωνικῆς ρίζας τοῦ 2.

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

Ἡ ένεργός ένταση τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος μετριέται ἀμέσως μέ τά **θερμικά ἀμπερόμετρα**.

66. Ἐνεργός τάση

Ἐνας ἄγωγός (σύρμα) ἔχει μόνο **ὠμική ἀντίσταση** R , πού εἶναι ἡ ἴδια καί στό συνεχές καί στό ἐναλλασσόμενο ρεύμα. Στίς ἄκρες τοῦ ἄγωγοῦ ἐφαρμόζεται ἡ ἐναλλασσόμενη τάση $U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t$ καί ὁ ἄγωγός διαρρέεται ἀπό ἐναλλασσόμενο ρεύμα πού ἔχει ένεργό ένταση $I_{εν}$. Τήν ἴδια ένταση ρεύματος ($I_{εν}$) μπορεῖ νά δημιουργήσει πάνω στήν ἴδια ἀντίσταση R μιά σταθερή τάση, πού ἔχει ὀρισμένη τιμή καί τήν ὀποία ονομάζουμε **ένεργό τάση** ($U_{εν}$) τῆς ἐναλλασσόμενης τάσεως. Ἔτσι ἔχουμε τόν ἐξῆς **ὄρισμό**:

Ἐνεργός τάση ($U_{εν}$) τῆς ἐναλλασσόμενης τάσεως ονομάζεται ἡ σταθερή τάση, ἡ ὀποία, ὅταν ἐφαρμόζεται στίς ἄκρες τῆς ἴδιας ὠμικῆς ἀντιστάσεως (R), παράγει συνεχές ρεύμα, πού ἔχει ένταση ἴση μέ τήν ένεργό ένταση ($I_{εν}$) τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος.

Σύμφωνα με τον παραπάνω όρισμό της ενεργού τάσεως έχουμε την εξίσωση:

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

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

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

Έτσι από τις εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε ότι:

Η ενεργός τάση ($U_{\text{εν}}$) μιās εναλλασσόμενης τάσεως είναι ίση με τό πηλίκο του πλάτους της τάσεως (U_0) διά της τετραγωνικής ρίζας του 2.

ενεργός τάση $U_{\text{εν}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad \text{ή} \quad U_{\text{εν}} = 0,707 U_0$

67. Ο νόμος του Ohm σε κύκλωμα με ωμική αντίσταση

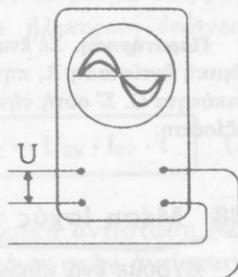
Ένα κύκλωμα αποτελείται μόνο από *ωμική αντίσταση* R και στις άκρες της εφαρμόζεται ή εναλλασσόμενη τάση:

$$U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t \quad (1)$$

Στό εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας ή αντίσταση R συμπεριφέρεται όπως και στό συνεχές ρεύμα, δηλαδή όλη ή ήλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται πάνω στην αντίσταση R σε *θερμότητα*. Η αντίσταση R διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα που ή στιγμιαία ένταση του, σύμφωνα με τό νόμο του Ohm, είναι:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{ή} \quad I = \frac{U_0}{R} \cdot \eta \mu \omega t \quad (2)$$

Οι εξισώσεις (1) και (2) δείχνουν ότι ή τάση (U) και ή ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε *τήν ίδια φάση* (σχ. 92). Από τήν



Σχ. 92. Η τάση U και ή ένταση I του ρεύματος έχουν πάντοτε τήν ίδια φάση ωt (εικόνα στόν παλμογράφο).

έξισωση (2) βρίσκουμε ότι τό πλάτος (I_0) τής έντάσεως του ρεύματος είναι:

$$I_0 = \frac{U_0}{R} \quad (3)$$

Ξέρουμε (§ 65, 66) ότι είναι:

$$I_0 = I_{Εν} \cdot \sqrt{2} \quad \text{καί} \quad U_0 = U_{Εν} \cdot \sqrt{2}$$

Αν βάλουμε αυτές τις τιμές των I_0 και U_0 στην έξισωση (3), βρίσκουμε ότι σ' αυτή τήν περίπτωση ό νόμος του Ohm δίνεται από τήν έξισωση:

$$\text{νόμος του Ohm} \quad I_{Εν} = \frac{U_{Εν}}{R}$$

Από τά παραπάνω συνάγονται τά έξής συμπεράσματα:

- I. Σέ κύκλωμα πού αποτελείται μόνο από όμική αντίσταση R ή τάση (U) και ή ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε τήν ίδια φάση.
- II. Η ένεργός ένταση του ρεύματος ($I_{Εν}$) είναι ίση μέ τό πηλίκο τής ένεργού τάσεως ($U_{Εν}$) διά τής όμικης αντίστάσεως (R) του κυκλώματος.

Παρατήρηση. Σέ ένα κύκλωμα έναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί νά υπάρχουν όμική αντίσταση R, πηνίο μέ συντελεστή αυτεπαγωγής L και πυκνωτής μέ χωρητικότητα C. Σ' αυτή τήν περίπτωση ό νόμος του Ohm εκφράζεται μέ διαφορετική έξισωση.

68. Μέση ισχύς του έναλλασσόμενου ρεύματος

Έχουμε ένα κύκλωμα πού αποτελείται μόνο από *όμική 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 το κύκλωμα διαρρέεται από ένα αλλασσόμενο ρεύμα που έχει στιγμιαία ένταση $I = I_0 \cdot \eta \mu \omega t$. Επομένως στη διάρκεια μιας περιόδου T ή ισχύς $P = U \cdot I$ του αλλασσόμενου ρεύματος συνεχώς μεταβάλλεται. Στη διάρκεια μιας περιόδου T το κύκλωμα παίρνει από τη γεννήτρια ενέργεια E_T . Άρα στη διάρκεια μιας περιόδου T ή μέση ισχύς P_M του αλλασσόμενου ρεύματος είναι:

$$\text{μέση ισχύς } P_M = \frac{E_T}{T}$$

*Αποδεικνύεται ότι:

Σέ κύκλωμα που αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση (R) ή μέση ισχύς (P_M) του αλλασσόμενου ρεύματος είναι ανάλογη με την ενεργό τάση ($U_{Εν}$) και την ενεργό ένταση ($I_{Εν}$) του ρεύματος.

μέση ισχύς αλλασσόμενου
ρεύματος

$$P_M = U_{Εν} \cdot I_{Εν}$$

$$\begin{cases} U_{Εν} \text{ σε } V \\ I_{Εν} \text{ σε } A \\ P_M \text{ σε } W \end{cases} \quad (1)$$

*Ενέργεια του αλλασσόμενου ρεύματος. Στίς άκρες ενός κυκλώματος που αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_{Εν}$. Τότε το αλλασσόμενο 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), όλη αυτή 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:

$$P_M = I_{Εν}^2 \cdot R \quad \text{και} \quad E_{ηλεκ} = I_{Εν}^2 \cdot R \cdot t$$

* Παρατήρηση. Όταν το κύκλωμα αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση (R), η τάση (U) και η ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε *τήν ίδια φάση*. Αν όμως στο κύκλωμα υπάρχει και πηνίο ή πυκνωτής ή και τὰ δύο, τότε μεταξύ τῆς τάσεως και τῆς έντάσεως του ρεύματος υπάρχει *διαφορά φάσεως* φ και ἡ μέση ισχύς του ἐναλλασσόμενου ρεύματος εἶναι:

$$P_M = U_{\text{εν}} \cdot I_{\text{εν}} \cdot \text{συν } \varphi$$

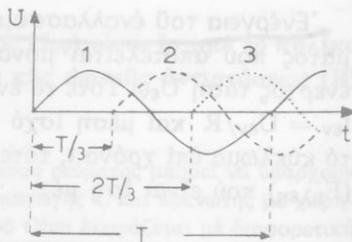
Ὁ παράγοντας $\text{συν } \varphi$ ὀνομάζεται *συντελεστής ισχύος* του κυκλώματος και μπορεί νά λάβει τίς τιμές ἀπό -1 ὄς +1.

69. Τριφασικό ρεύμα

α. Ὅρισμός. Οἱ μονοφασικοί ἐναλλακτῆρες παράγουν ἐναλλασσόμενο ρεύμα, πού ὀνομάζεται *μονοφασικό ρεύμα*. Αν τὸ ἐξωτερικό κύκλωμα ἀποτελεῖται μόνο ἀπό ὠμική αντίσταση (R), τότε οἱ ἐξισώσεις του ἐναλλασσόμενου ρεύματος εἶναι:

$$U = U_0 \cdot \eta\mu \omega t \quad \text{καί} \quad I = I_0 \cdot \eta\mu \omega t$$

Ἄς θεωρήσουμε *τρία μονοφασικά ρεύματα* πού ἔχουν τήν ἴδια περίοδο T, τὸ ἴδιο πλάτος τάσεως U_0 , τὸ ἴδιο πλάτος έντάσεως ρεύματος I_0 , ἀλλά παρουσιάζουν μεταξύ τους *διαφορά φάσεως* 120° . Αὐτό σημαίνει ὅτι σέ καθένα ἀπό αὐτά τὰ τρία ρεύματα ἢ τάση (U) καί ἢ ένταση (I) του ρεύματος ἀποκτοῦν τή μέγιστη τιμή τους (U_0 καί I_0) μέ καθυστέρηση ἴση μέ *ένα τρίτο τῆς περιόδου* ($T/3$) σχετικά μέ τὸ προηγούμενο (σχ. 93). Τότε γι' αὐτά τὰ τρία ρεύματα θά ἰσχύουν ἀντίστοιχα οἱ ἐξισώσεις:



Σχ. 93. Τὰ τρία ὁμοία ρεύματα ἔχουν τὸ ἓνα μέ τὸ ἄλλο *διαφορά φάσεως* 120° ἢ $T/3$.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_0 \cdot \eta\mu \omega t \\ U_2 &= U_0 \cdot \eta\mu (\omega t + 120^\circ) \\ U_3 &= U_0 \cdot \eta\mu (\omega t + 240^\circ) \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 \cdot \eta\mu \omega t \\ I_2 &= I_0 \cdot \eta\mu (\omega t + 120^\circ) \\ I_3 &= I_0 \cdot \eta\mu (\omega t + 240^\circ) \end{aligned} \right\} (2)$$

Αὐτὸ τὸ σύστημα τῶν τριῶν ρευμάτων ὀνομάζεται *τριφασικό ρεύμα*. Ὡστε:

Τριφασικό ρεύμα είναι ένα σύστημα από τρία έναλλασσόμενα ρεύματα, που έχουν τό ίδιο πλάτος τάσεως (U_0) και έντάσεως ρεύματος (I_0) και τήν ίδια περίοδο (T), αλλά τό καθένα παρουσιάζει διαφορά φάσεως 120° σχετικά μέ καθένα από τά άλλα δύο, δηλαδή παρουσιάζει μιά χρονική διαφορά ίση μέ $T/3$.

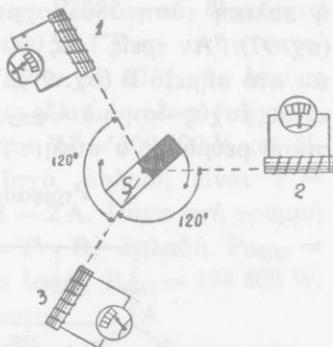
β. Παραγωγή του τριφασικού ρεύματος. Γιά τήν παραγωγή του τριφασικού ρεύματος χρησιμοποιούμε τόν *τριφασικό έναλλακτήρα*, που ή λειτουργία του στηρίζεται στην εξής άρχή: Τρία όμοια πηνία (έπαγωγίμο) τοποθετούνται πάνω σε όριζόντιο επίπεδο έτσι, ώστε οί άξονές τους νά σχηματίζουν μεταξύ τους γωνίες 120° (σχ. 94). Πάνω στό ίδιο επίπεδο περιστρέφεται μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα εὐθύγραμμος μαγνήτης ή ηλεκτρομαγνήτης (*έπαγωγέας*). Τότε στίς άκρες κάθε πηνίου αναπτύσσεται έναλλασσόμενη τάση. Όταν όμως ή τάση άποκτᾶ τή μέγιστη τιμή της (U_0) στό πηνίο 1, τότε στό επόμενο πηνίο 2 ή τάση άποκτᾶ τή μέγιστη τιμή της μέ καθυστέρηση ίση μέ $T/3$, δηλαδή ή τάση στό πηνίο 2 παρουσιάζει διαφορά φάσεως 120° σχετικά μέ τήν τάση στό πηνίο 1. Τό ίδιο συμβαίνει μεταξύ τών πηνίων 2 καί 3. Έτσι σε μιά χρονική στιγμή t ή στιγμιαία τάση στίς άκρες τών τριών πηνίων είναι U_1, U_2, U_3 καί εκφράζονται από τίς εξισώσεις (1). Αν οί άκρες τών τριών πηνίων συνδεθούν μέ *τρεις ίσες ώμικές αντίστάσεις* (R), τότε σχηματίζονται τρία κυκλώματα, στά όποια κυκλοφορούν *τρία έναλλασσόμενα ρεύματα* που άποτελούν τό *τριφασικό ρεύμα*. Στή χρονική στιγμή t ή στιγμιαία ένταση τών τριών ρευμάτων είναι I_1, I_2, I_3 καί εκφράζονται από τίς εξισώσεις (2).

Αν προσθέσουμε κατά μέλη τίς εξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε:

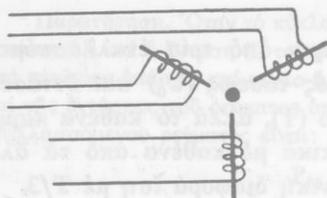
$$U_1 + U_2 + U_3 = 0 \quad \text{καί}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

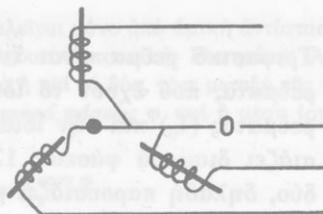
Αρα στό τριφασικό ρεύμα τό ἄθροισμα τών στιγμιαίων τάσεων καθώς καί



Σχ. 94. Σχηματική παράσταση τριφασικού έναλλακτήρα



Σχ. 95. Για τή μεταφορά τῶν τριῶν ρευμάτων χρειάζονται ἕξι ἄγωγοί.



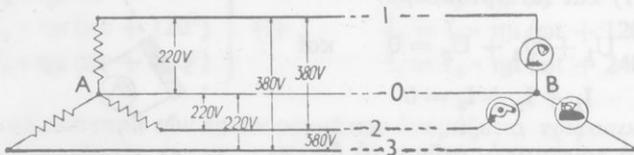
Σχ. 96. Ἐντὶ γιὰ τοὺς τρεῖς ἀγωγούς ἔχουμε τόν οὐδέτερο ἀγωγό (0).

τὸ ἄθροισμα τῶν στιγμιαίων ἐντάσεων τῶν τριῶν ρευμάτων εἶναι κάθε στιγμή ἴσο μὲ μηδέν.

γ. Μεταφορά τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος. Γιὰ τή μεταφορά τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος φαίνεται ὅτι χρειάζονται ἕξι ἄγωγοί (σχ. 95). Ἄν ὅμως ἢ μιὰ ἄκρη κάθε πηνίου συνδεθεῖ μὲ τόν ἴδιο ἄγωγό, πού ὀνομάζεται οὐδέτερος ἀγωγός (0), τότε γιὰ τή μεταφορά τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος χρειάζονται μόνο τέσσερις ἄγωγοί (σχ. 96). Ἡ ὀλική ἐνταση τοῦ ρεύματος στὸν οὐδέτερο ἀγωγό εἶναι ἴση μὲ μηδέν ($I_1 + I_2 + I_3 = 0$). Οἱ ἄλλοι τρεῖς ἄγωγοί ὀνομάζονται φάσεις (1, 2, 3).

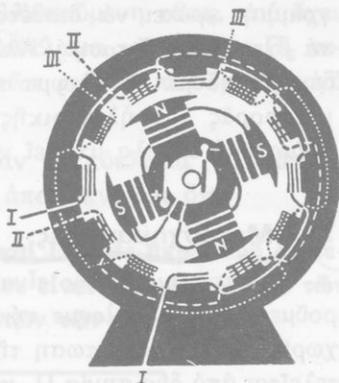
Ἡ ἐνεργὸς τάση μεταξύ μιᾶς φάσεως καὶ τοῦ οὐδέτερου ἀγωγοῦ ὀνομάζεται φασική τάση ($U_{\text{φασ}}$) καὶ εἶναι ἴση μὲ 220 V. Ἐνῶ ἡ ἐνεργὸς τάση μεταξύ δύο φάσεων ὀνομάζεται πολική τάση ($U_{\text{πολ}}$) καὶ εἶναι ἴση μὲ 380 V. Ἔτσι φέρνουμε στὴν κατανάλωση δύο τάσεις. Ἡ φασική τάση 220 V χρησιμοποιεῖται στὶς οἰκιακές ἐφαρμογές, ἐνῶ ἡ πολική τάση 380 V χρησιμοποιεῖται σὲ τεχνικές ἐγκαταστάσεις (σχ. 97). Ἄν τρεῖς ἴσες ὰμικές ἀντιστάσεις συνδέονται ὅπως φαίνεται στὸ σημεῖο Β (σχ. 97), τότε πάνω σὲ κάθε ἀντίσταση καταναλώνεται ἰσχύς ἴση μὲ $U_{\text{φασ}} \cdot I_{\text{εν}}$. Ἐπομένως ἡ μέση ἰσχύς τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση εἶναι :

$$P_{\text{τριφασικό}} = 3 \cdot U_{\text{φασική}} \cdot I_{\text{εν}}$$



Σχ. 97. Πῶς χρησιμοποιοῦμε τὸ τριφασικὸ ρεῦμα (σχηματικὴ παράσταση).

Στις γεννήτριες τριφασικού ρεύματος, που χρησιμοποιεί ή βιομηχανία, ο αριθμός των πηνίων (έπαγωγμο) είναι *τριπλάσιος* από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων (έπαγωγέας). Στο σχήμα 98 φαίνεται ή αρχή τής λειτουργίας μιās τριφασικής γεννήτριας (I, I — II, II — III, III είναι οι άκρες του συστήματος των τριών κυκλωμάτων του έπαγωγμο).



Σχ. 98. Τριφασικός έναλλακτήρας (ή τριφασική γεννήτρια)

δ. Κινητήρες έναλλασσόμενου ρεύματος. Ο κινητήρας του συνεχούς ρεύματος μπορεί να λειτουργήσει και με μονοφασικό έναλλασσόμενο ρεύμα. Σήμερα όμως χρησιμοποιούμε κυρίως τους τριφασικούς κινητήρες, που λειτουργούν με τριφασικό ρεύμα.

70. Η μεταφορά τής ηλεκτρικής ενέργειας

Μιά γεννήτρια συνεχούς ρεύματος έχει στους πόλους της σταθερή τάση $U = 10\ 000\ \text{V}$. Το ρεύμα έχει ένταση $I = 20\ \text{A}$ και μεταφέρεται στον τόπο τής καταναλώσεως με γραμμή που έχει αντίσταση $R = 300\ \Omega$. Η γεννήτρια δίνει στο έξωτερικό κύκλωμα ισχύ $P = U \cdot I$, άρα $P = 200\ 000\ \text{W}$. Πάνω στή γραμμή μετατρέπεται σε θερμότητα ισχύς $P_{\text{θερ}} = I^2 \cdot R$, δηλαδή $P_{\text{θερ}} = 120\ 000\ \text{W}$. Έτσι στην κατανάλωση φτάνει ισχύς $P_{\text{κατ}} = 80\ 000\ \text{W}$. Ωστε τά 60% τής ισχύος που δίνει ή γεννήτρια στο έξωτερικό κύκλωμα είναι *άπώλεια ενέργειας*. Αν ή γεννήτρια έχει στους πόλους της τάση $U = 100\ 000\ \text{V}$ και δίνει στο έξωτερικό κύκλωμα τήν ίδια ισχύ, δηλαδή είναι $P = 200\ 000\ \text{W}$, τότε το ρεύμα έχει ένταση $I = 2\ \text{A}$. Πάνω στή γραμμή μετατρέπεται σε θερμότητα ισχύς $P_{\text{θερμ}} = I^2 \cdot R$, δηλαδή $P_{\text{θερμ}} = 1200\ \text{W}$. Τώρα στην κατανάλωση φτάνει ισχύς $P_{\text{κατ}} = 198\ 800\ \text{W}$. Η *άπώλεια ενέργειας* είναι σχεδόν *άσήμαντη*.

Από τό παράδειγμα αυτό φαίνεται δι για να μεταφέρουμε σε μεγάλη απόσταση μιιά μεγάλη ηλεκτρική ισχύ με μικρές *άπώλεις* στή

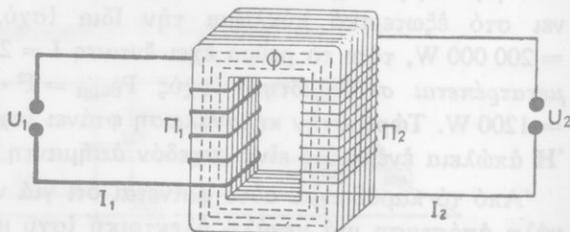
γραμμή, πρέπει να διαθέτουμε πολύ μεγάλη τάση, ώστε το ρεύμα να έχει μικρή ένταση. Άλλα με τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος δεν μπορούμε να έχουμε πολύ μεγάλες τάσεις. Το πρόβλημα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας το έλυσε το *εναλλασσόμενο ρεύμα* που εύκολα μπορεί να αποκτήσει πολύ μεγάλες τάσεις.

71. Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής είναι μία διάταξη με την οποία εύκολα μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος, χωρίς αισθητή ελάττωση της ισχύος του. Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία Π_1 και Π_2 που είναι τυλιγμένα στις δύο πλευρές ενός πλαισίου από μαλακό σίδηρο (σχ. 99). Το πηνίο Π_1 ονομάζεται *πηνίο χαμηλής τάσεως* ή *πρωτεύον πηνίο* και αποτελείται από λίγες σπείρες χοντρού σύρματος. Το πηνίο Π_1 έχει n_1 σπείρες και συνδέεται με τον εναλλακτήρα. Το κύκλωμα του πηνίου Π_1 το ονομάζουμε *πρωτεύον κύκλωμα*. Το πηνίο Π_2 ονομάζεται *πηνίο υψηλής τάσεως* ή *δευτερεύον πηνίο* και αποτελείται από πολλές σπείρες λεπτού σύρματος. Το πηνίο Π_2 έχει n_2 σπείρες και οι άκρες του συνδέονται με ένα κύκλωμα (*δευτερεύον κύκλωμα*).

Λειτουργία του μετασχηματιστή. Το ρεύμα που κυκλοφορεί στο κύκλωμα του πηνίου Π_1 (*πρωτεύον ρεύμα*) έχει συχνότητα ν , ενεργό τάση U_1 , ενεργό ένταση I_1 , και ισχύ $P_1 = U_1 \cdot I_1$. Τότε μέσα στον πυρήνα του μαλακού σιδήρου σχηματίζεται *εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο*, που οι δυναμικές γραμμές του μένουν μέσα στο μαλακό σίδηρο σχηματίζοντας ένα *μαγνητικό κύκλωμα*. Η συνεχής μεταβολή του μαγνητικού πεδίου προκαλεί συνεχή μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει από τις σπείρες του πηνίου Π_2 . Έτσι στις

Σχ. 99. Σχηματική παράσταση του μετασχηματιστή



Άκρες του πηνίου Π_2 αναπτύσσεται εναλλασσόμενη τάση, που έχει συχνότητα ν και ενεργό τάση U_2 . Στο κύκλωμα του πηνίου Π_2 κυκλοφορεί εναλλασσόμενο ρεύμα (δευτερεύον ρεύμα), που έχει ενεργό ένταση I_2 και ισχύ $P_2 = U_2 \cdot I_2$.

Έξισώσεις του μετασχηματιστή. Όταν το κύκλωμα του δευτερεύοντος πηνίου Π_2 είναι κλειστό, τότε αποδεικνύεται ότι:

Ο λόγος των ενεργών τάσεων U_2 και U_1 στις άκρες του δευτερεύοντος και του πρωτεύοντος πηνίου είναι ίσος με το λόγο των αριθμών n_2 και n_1 των σπειρών αυτών των δύο πηνίων.

$$\text{λόγος των τάσεων} \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

Ο λόγος $\frac{n_2}{n_1}$ ονομάζεται *λόγος μετασχηματισμού*. Όταν είναι $n_2 > n_1$, τότε είναι και $U_2 > U_1$. Κατά μεγάλη προσέγγιση μπορούμε να δεχτούμε ότι στο μετασχηματιστή οι απώλειες ενέργειας είναι *άσημαντες*. Τότε, σύμφωνα με την αρχή της διατηρήσεως της ενέργειας, ισχύει η εξίσωση $P_1 = P_2$. Ωστε:

Η ισχύς του ρεύματος στα δύο κυκλώματα του μετασχηματιστή έχει την ίδια τιμή.

$$\text{διατήρηση της ισχύος} \quad U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (2)$$

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

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) φανερώνει ότι ο λόγος των ενεργών εντάσεων I_1 και I_2 των ρευμάτων στα δύο κυκλώματα του μετασχηματιστή διατηρείται σταθερός.

Παράδειγμα. Σε ένα μετασχηματιστή είναι $n_1 = 10$ σπείρες, $n_2 =$

= 500 σπειρές, $U_1 = 1000 \text{ V}$ και $I_1 = 500 \text{ A}$. Τότε για τό δευτερεύον ρεύμα είναι

ένεργός τάση:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} = 1000 \text{ V} \cdot \frac{500 \text{ σπειρές}}{10 \text{ σπειρές}} \quad \text{και} \quad U_2 = 50\,000 \text{ V}$$

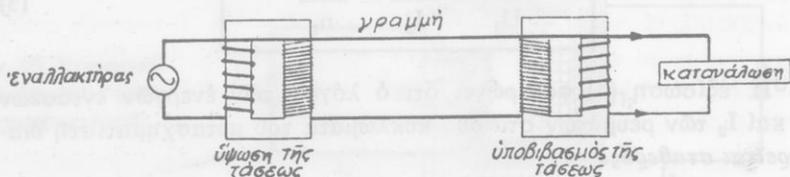
ένεργός ένταση του ρεύματος:

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} = 500 \text{ A} \cdot \frac{10}{500} \quad \text{και} \quad I_2 = 10 \text{ A}$$

Αυτός ο μετασχηματιστής λειτουργεί ως μετασχηματιστής *ύψωσης* της τάσεως.

Έφαρμογές των μετασχηματιστών. Οί μετασχηματιστές έχουν πολύ σημαντικές εφαρμογές. Στην πράξη έχουμε κυκλώματα *εναλλασσόμενου ρεύματος*, στά όποια χρειαζόμαστε *ψηλές τάσεις* και άλλα κυκλώματα, στά όποια χρειαζόμαστε *μεγάλες έντάσεις ρεύματος*. Οί μετασχηματιστές μās επιτρέπουν νά κάνουμε στό *εναλλασσόμενο ρεύμα* τούς μετασχηματισμούς πού θέλουμε, Π.χ. για τή λειτουργία τών σωλήνων πού παράγουν τίς ακτίνες Röntgen χρειαζόμαστε τάσεις πού μετριούνται σέ δεκάδες χιλιάδες βόλτ και τότε χρησιμοποιούμε μετασχηματιστές πού *ύψωνουν τήν τάση* του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας (220 V).

Ίδιαίτερη όμως σημασία έχει ή παραγωγή ψηλών τάσεων για τή μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Σέ κάθε εργοστάσιο ήλεκτροπαραγωγής (θερμοηλεκτρικό ή υδροηλεκτρικό) υπάρχει ένας μετασχηματιστής πού *ύψώνει τήν τάση* σέ εκατοντάδες χιλιάδες βόλτ (ώς 500 000 V). Τό ρεύμα *ψηλής τάσεως* μεταφέρεται στον τόπο καταναλώσεως της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. από τήν Πτολεμαΐδα στην Αθήνα). Στόν τόπο της καταναλώσεως υπάρχουν μετασχηματιστές, πού διαδοχικά *υποβιβάζουν τήν τάση* (σχ. 100). Σέ πολλές άλλες



Σχ. 100. Μεταφορά του εναλλασσόμενου ρεύματος με ψηλή τάση

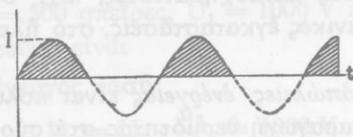
έφαρμογές χρησιμοποιούμε σήμερα τούς μετασχηματιστές, π.χ. σε έπιστημονικά έργαστήρια, σε βιομηχανικές έγκαταστάσεις, στο ήλεκτρικό κουδούνι κ.ά.

Γενικά στους μετασχηματιστές *οι απώλειες ενέργειας* είναι πολύ μικρές (ώς 5%) και όφειλονται στην παραγωγή θερμότητας στα σύρματα τών πηνίων και στον πυρήνα του μαλακού σιδήρου. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής τής ήλεκτρικής ενέργειας έχουν απόδοση που φτάνει στα 99%.

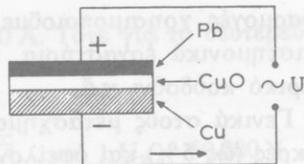
72. Άνορθωση του έναλλασσόμενου ρεύματος

Σε πολλές έφαρμογές (ήλεκτρόλυση, φόρτιση συσσωρευτών κ.ά.) χρειαζόμαστε συνεχές ρεύμα. Είναι λοιπόν απαραίτητο *νά μετατρέπουμε* τό έναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα. Αυτή ή μετατροπή όνομάζεται *άνορθωση* του έναλλασσόμενου ρεύματος και γίνεται με ειδικές διατάξεις, που όνομάζονται *άνορθωτές*. Γενικά ό άνορθωτής είναι μία διάταξη που, όταν είναι στό κύκλωμα έναλλασσόμενου ρεύματος, έπιτρέπει στό ρεύμα *νά περνάει μόνο κατά τή μία φορά (άγωγιμη φορά)*, ενώ δέν έπιτρέπει κατά τήν αντίθετη φορά (*άνασταλτική φορά*). Έτσι από τόν άνορθωτή περνάει τό ρεύμα μόνο κατά τή μία ήμιπερίοδο (σχ. 101). Τό ρεύμα που διαρρέει τότε μία αντίσταση R έχει *σταθερή φορά*, αλλά παρουσιάζει περιοδικές διακοπές, που καθεμιά διαρκεί μισή περίοδο (*ήμιάνορθωση*). Με κατάλληλες διατάξεις μπορούμε *νά έκμεταλλευόμαστε* με τή μορφή συνεχούς ρεύματος και τίς δύο ήμιπεριόδους του έναλλασσόμενου ρεύματος (*πλήρης άνορθωση*).

Ξηροί άνορθωτές ή κρυσταλλοδιόδους. Οι άνορθωτικές διατάξεις που συνήθως χρησιμοποιούμε όνομάζονται *ξηροί άνορθωτές* (ή *κρυσταλλοδιόδους*). Η λειτουργία τους στηρίζεται στις ιδιότητες *τών ήμιαγωγών* (γερμάνιο, πυρίτιο, σελήνιο, διάφορα όξειδια). Ένας άπλος άνορθωτής είναι *ό άνορθωτής όξειδίου του χαλκού* (σχ. 102). Αυτός αποτελείται από μία πλάκα χαλκού, που ή μία έπιφάνειά της σκεπάζεται με ένα στρώμα όξειδίου του χαλκού και πάνω σ' αυτό τό στρώμα στηρίζεται μία πλάκα μολύβδου. Τό ρεύμα περνάει από αυτό τό σύστημα, όταν ή πλάκα του χαλκού είναι άρνητικό ήλεκτρόδιο.



Σχ. 101. Ήμιανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος



Σχ. 102. Ξηρός άνορθωτής

Έκτός από τούς ξηρούς άνορθωτές υπάρχουν καί άλλοι τύποι άνορθωτών, όπως είναι ή *δίοδη ήλεκτρονική λυχνία* καί ο *άνορθωτής μέ άτμούς ύδραργύρου*.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

88. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα έχει πλάτος τάσεως $U_0 = 100 \text{ V}$ καί πλάτος έντάσεως $I_0 = 20 \text{ A}$. 1) Πόση είναι ή ένεργός τάση καί ή ένεργός ένταση του ρεύματος; 2) Πόση είναι ή τάση U καί ή ένταση I τή στιγμή πού ή φάση (ωt) παίρνει τίς τιμές 30° , 60° καί 150° ;

89. Η στιγμιαία ένταση ενός εναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται από τήν εξίσωση $I = 10 \cdot \eta\mu 314 t$. Νά βρεθεί τό πλάτος τής έντάσεως I_0 , ή περίοδος T , ή συχνότητα ν , ή κυκλική συχνότητα ω καί ή ένεργός ένταση του ρεύματος.

90. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει μιάν ώμική αντίσταση $R = 5 \Omega$, πού είναι βυθισμένη μέσα σέ θερμιδόμετρο. Αυτό έχει θερμοχωρητικότητα 1000 cal/grad καί μέσα σέ 1 λεπτό ή θερμοκρασία του ύψώνεται κατά 10° C . Πόση είναι ή ένεργός ένταση του ρεύματος;

91. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα έχει συχνότητα $\nu = 50 \text{ Hz}$, ένεργό τάση $U_{\text{εν}} = 30 \text{ V}$ καί ένεργό ένταση $I_{\text{εν}} = 5 \text{ A}$. Νά γραφούν οί εξισώσεις πού δίνουν τή στιγμιαία τάση U καί τή στιγμιαία ένταση ρεύματος I .

92. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει μιάν ώμική αντίσταση $R = 12,26 \Omega$ καί μέσα σέ κάθε λεπτό άναπτύσσει πάνω τής θερμότητα $Q_{\text{θερμ}} = 2816 \text{ cal}$. Πόσο είναι τό πλάτος τής έντάσεως του ρεύματος; $J = 4,18 \text{ Joule/cal}$.

93. Στη μιά άκρη A ενός σύρματος AB φτάνει ένα συνεχές ρεύμα

πού έχει σταθερή ένταση $I_{\Sigma} = 3 \text{ A}$ και ένα εναλλασσόμενο ρεύμα πού έχει ενεργό ένταση $I_E = 4 \text{ A}$. Πόση είναι η ενεργός ένταση του ρεύματος πού σχηματίζεται από την πρόσθεση των δύο ρευμάτων;

94. Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως έχει ισχύ 25 cd , αντίσταση $R = 440 \Omega$ και τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα, πού έχει ενεργό τάση $U_{Εν} = 220 \text{ V}$. 1) Πόσο είναι τό πλάτος U_0 τής τάσεως και τό πλάτος I_0 τής εντάσεως του ρεύματος; 2) Πόση μέση ισχύς καταναλώνεται κατά candela;

95. Στίς άκρες μιās άμικής αντίστασεως $R = 12 \Omega$ εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_{Εν} = 120 \text{ V}$ και η συχνότητα του ρεύματος είναι $\nu = 50 \text{ Hz}$. 1) Πόση μέση ισχύς P καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση R ; 2) Ποιά μεταβολή παθαίνει αυτή η ισχύς P , αν με μία κατάλληλη διάταξη (άνορθωτή) καταργηθεί η μία από τις δύο εναλλαγές του ρεύματος ή αν άνορθωθεί και η δεύτερη εναλλαγή;

96. Σέ ένα ύδροηλεκτρικό έργοστάσιο πέφτουν στόν ύδροστρόβιλο 150 m^3 νερό τό λεπτό από ύψος 120 m . Ο ύδροστρόβιλος έχει απόδοση 78% και τροφοδοτεί έναν εναλλακτήρα, πού έχει απόδοση 92% και στους πόλους του δημιουργεί εναλλασσόμενη τάση, πού δίνεται από την εξίσωση $U = 2828 \cdot \eta\mu 314t$. 1) Νά βρεθούν σε κιλοβάτ: α) η ισχύς $P_{\upsilon\delta}$ τήν όποία δίνει η ύδατόπτωση στόν ύδροστρόβιλο· β) η ισχύς $P_{στ}$ τήν όποία δίνει ο ύδροστρόβιλος στόν εναλλακτήρα και γ) η ηλεκτρική ισχύς $P_{\eta\lambda}$ τήν όποία δίνει ο εναλλακτήρας. 2) Νά βρεθεί η συχνότητα ν του ρεύματος και η ενεργός ένταση $I_{Εν}$ του ρεύματος πού μπορεί νά δώσει αυτός ο εναλλακτήρας. $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$.

97. Θέλουμε νά ύποβιβάσουμε τήν ενεργό τάση από $U_1 = 220 \text{ V}$ σέ $U_2 = 5 \text{ V}$. Αν τό πηνίο χαμηλής τάσεως έχει $n_2 = 10$ σπείρες, πόσες σπείρες n_1 πρέπει νά έχει τό πηνίο ψηλής τάσεως;

98. Σέ ένα μετασχηματιστή ύποβιβασμού τής τάσεως στό κύκλωμα ψηλής τάσεως εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_1 = 40\,000 \text{ V}$ και η ενεργός ένταση του ρεύματος είναι $I_1 = 30 \text{ A}$. Η απόδοση του μετασχηματιστή είναι 92% . 1) Πόση είναι η ισχύς στό κύκλωμα χαμηλής τάσεως; 2) Αν η ενεργός τάση είναι $U_2 = 220 \text{ V}$, πόση είναι η ενεργός ένταση I_2 του ρεύματος;

99. Σέ ένα μετασχηματιστή τά δύο πηνία του έχουν $n_1 = 100$ σπείρες και $n_2 = 2000$ σπείρες. Στό κύκλωμα χαμηλής τάσεως, πού

έχει αντίσταση $R_1 = 0,03 \Omega$, διαβιβάζεται ρεύμα πού έχει ενεργό τάση $U_1 = 110 \text{ V}$ και ενεργό ένταση $I_1 = 100 \text{ A}$. 1) Πόση είναι ή απόδοση του μετασχηματιστή και πόση είναι στο 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 απόδοση του μετασχηματιστή είναι 97%. Πόση είναι ή ενεργός ένταση I_1 και I_2 του ρεύματος στο 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 στο κύκλωμα χαμηλής τάσεως όλη ή ισχύς, πού είναι $P = 9 \text{ kW}$, μετατρέπεται σέ θερμότητα πάνω σέ μία αντίσταση R . Η απόδοση του μετασχηματιστή είναι ίση μέ τή μονάδα. Πόση είναι ή ενεργός ένταση I_1 στο κύκλωμα ψηλής τάσεως και πόση είναι ή αντίσταση R ;

102. Μιά ισχύς $P = 110 \text{ kW}$ θά μεταφερθεί από τό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στον τόπο καταναλώσεως μέ σύρμα πού έχει αντίσταση $R = 0,08 \Omega$. 1) Αν ή ισχύς P μεταφερθεί μέ συνεχές ρεύμα και μέ τάση $U_\Sigma = 220 \text{ V}$, πόση είναι ή πτώση τάσεως πάνω στο σύρμα και σέ πόσο τοίς εκατό φτάνει ή απώλεια ισχύος πάνω στο σύρμα; 2) Η ίδια ισχύς P μεταφέρεται μέ εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά στο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής ή ενεργός τάση ύψώνεται από 220 V σέ 22000 V και αντίθετα στον τόπο καταναλώσεως ή τάση υποβιβάζεται πάλι σέ 220 V . Πόση είναι τώρα ή πτώση τάσεως πάνω στο σύρμα και σέ πόσο τοίς εκατό φτάνει ή απώλεια ισχύος πάνω στο σύρμα;

103. Μιά υδατόπτωση τροφοδοτεί έναν υδροστρόβιλο, ό οποίος κινεί έναν εναλλακτήρα. Η απόδοση τής εγκαταστάσεως είναι 80%. Οί πόλοι του εναλλακτήρα συνδέονται μέ τό πηνίο ψηλής τάσεως ενός μετασχηματιστή τό όποιο έχει $n_1 = 3600$ σπείρες. Τό πηνίο χαμηλής τάσεως έχει $n_2 = 180$ σπείρες και οί πόλοι του συνδέονται μέ μία εγκατάσταση ηλεκτροφωτισμού, πού αποτελείται από 1000 λαμπτήρες. Κάθε λαμπτήρας έχει ισχύ 30 W και λειτουργεί μέ ενεργό ένταση ρεύματος $0,25 \text{ A}$. Οί απώλειες πάνω στή γραμμή μεταφοράς

είναι άσήμαντες. 1) Πόση είναι ή ένεργός τάση στις άκρες του πηνίου χαμηλής τάσεως και πόση στους πόλους του έναλλακτήρα; Πόση είναι ή ένεργός ένταση I_1 του ρεύματος που δίνει ό έναλλακτήρας; 2) Πόση είναι ή ισχύς τής ύδατοπτώσεως; Η άπόδοση του μετασχηματιστή είναι ίση μέ τή μονάδα.

Αγωγιμότητα τών στερεών

73. Ηλεκτρονική άγωγιμότητα τών στερεών

Ξέρουμε ότι άπό τά στερεά σώματα άγωγοί είναι κυρίως τά μέταλλα και ότι μέσα σέ κάθε μέταλλο ύπάρχουν τά *ελεύθερα ηλεκτρόνια* που είναι ηλεκτρόνια σθένους και κινούνται σύμφωνα μέ τους νόμους τής κινητικής θεωρίας τών άερίων. Ό άριθμός τών ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι τεράστιος (πάνω άπό 10^{20} ηλεκτρόνια κατά κυβικό έκατοστόμετρο). Άν 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*. Άν στις άκρες του σύρματος, που έχει μόνο ώμική αντίσταση, εφαρμόσουμε *έναλλασσόμενη τάση* $U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t$, τότε μέσα στό σύρμα δημιουργείται έναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, που άναγκάζει κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο του μετάλλου νά εκτελεί *άρμονική ταλάντωση* που έχει τή συχνότητα ν τής τάσεως και κέντρο μιά μέση θέση ίσοροπίας του ηλεκτρονίου. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μέσα στό σύρμα σχηματίζεται *έναλλασσόμενο ρεύμα*. Τά ηλεκτρόνια και στό συνεχές και στό έναλλασσόμενο ρεύμα άποκτούν κινητική ένέργεια εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου. Άν τό ρεύμα διαρρέει μόνο ώμική αντίσταση, όλη ή κινητική ένέργεια τών ηλεκτρονίων μετατρέπεται σέ θερμότητα κατά τις συγκρούσεις τών ηλεκτρονίων μέ τά θετικά ίόντα του μετάλλου (*φαινόμενο Joule*).

Η άγωγιμότητα τών στερεών όνομάζεται *ηλεκτρονική άγωγιμότητα* και έρμηνεύεται σέ γενικές γραμμές άπό τή θεωρία τών ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτή όμως ή θεωρία δέν μπορεί νά εξηγήσει όρι-

σμένες ιδιότητες των μετάλλων ούτε να δικαιολογήσει γιατί τὰ στερεά διακρίνονται σέ *αγωγούς, μονωτές και ήμιαγωγούς*.

Νεώτερες αντίληψεις γιά τήν ηλεκτρονική αγωγιμότητα τῶν στερεῶν. Ὅλα τὰ στερεά σώματα εἶναι *κρυσταλλικά σώματα* καί ἐπομένως ἡ ηλεκτρική αγωγιμότητα ἑνός στερεοῦ συνδέεται μέ τήν ἐσωτερική δομή τῶν κρυστάλλων του. Τά τελευταῖα χρόνια διαμορφώθηκε ἡ *θεωρία τῶν στερεῶν* πού ἐρμηνεύει τίς μηχανικές, θερμικές, ὀπτικές καί ηλεκτρικές ιδιότητες τῶν στερεῶν. Αὐτή ἡ νεώτερη θεωρία ἀποδεικνύει πότε εἶναι δυνατή ἡ *κίνηση τῶν ηλεκτρονίων σθένους μέσα σέ ἕνα κρυστάλλο*, δηλαδή πότε τὰ ηλεκτρόνια σθένους τῶν ἀτόμων ἑνός στερεοῦ μποροῦν νά γίνουν *ἐλεύθερα ηλεκτρόνια*.

Οἱ τρεῖς κατηγορίες στερεῶν. Τό ἀντίστροφο τῆς εἰδικῆς ἀντίστασως ρ ἑνός στερεοῦ ὀνομάζεται *ηλεκτρική αγωγιμότητα* ($1/\rho$) τοῦ στερεοῦ. Τά στερεά, σύμφωνα μέ τήν ηλεκτρική αγωγιμότητά τους, διακρίνονται σέ τρεῖς κατηγορίες, σέ *αγωγούς, μονωτές και ήμιαγωγούς*.

α. Ἄγωγοί εἶναι τὰ μέταλλα πού ἔχουν μικρή εἰδική ἀντίσταση, ἡ ὁποία *αὐξάνει* μέ τή θερμοκρασία.

β. Οἱ *μονωτές* ἢ *διηλεκτρικά* ἔχουν πολύ μεγάλη εἰδική ἀντίσταση πού *ἐλαττώνεται* μέ τή θερμοκρασία.

γ. Οἱ *ήμιαγωγοί* ἔχουν σημαντική εἰδική ἀντίσταση πού *ἐλαττώνεται* μέ τή θερμοκρασία, ὅπως συμβαίνει καί στούς μονωτές. Ὡστε :

Στούς *αγωγούς (μέταλλα)* ἡ *μικρή εἰδική ἀντίστασή τους αὐξάνει* μέ τή θερμοκρασία, ἐνῶ ἀντίθετα στούς *μονωτές* καί στούς *ήμιαγωγούς* ἡ *μεγάλη εἰδική ἀντίστασή τους ἐλαττώνεται* μέ τή θερμοκρασία.

74. Ἄγωγοί, μονωτές, ήμιαγωγοί

Θά ἐξετάσουμε πολύ ἀπλά τή διάκριση τῶν στερεῶν στίς παραπάνω τρεῖς κατηγορίες.

α. **Οἱ ἀγωγοί.** Στούς *αγωγούς*, δηλαδή στά μέταλλα, τὰ ηλεκτρόνια σθένους εἶναι *εὐκίνητα* (ἐλεύθερα ηλεκτρόνια). Μέ τήν ἐπίδραση ἐξωτερικοῦ ηλεκτρικοῦ πεδίου τὰ ἐλεύθερα ηλεκτρόνια ἀποκοτοῦν

κινητική ενέργεια καί, καθώς κινούνται μέσα στο στερεό, συγκρούονται με τα θετικά ιόντα του κρυστάλλου. Έτσι το μέταλλο θερμαίνεται καί τότε αυξάνει τό πλάτος τής ταλαντώσεως πού εκτελούν τά θετικά ιόντα του κρυστάλλου (θερμική κίνηση). Έπομένως αυξάνει καί ο αριθμός τών συγκρούσεων του κινούμενου ηλεκτρονίου με τά θετικά ιόντα του κρυστάλλου. Αυτή όμως ή αύξηση του αριθμού τών συγκρούσεων του ηλεκτρονίου αντιστοιχεί *σε αύξηση τής αντίστασεως του άγωγού.*

β. Οι μονωτές. Σέ έναν άπόλυτα καθαρό κρύσταλλο μονωτή, πού έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία, όλα τά ηλεκτρόνια σθένους είναι *δεσμευμένα* από τό ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα του άτόμου. Έτσι σ' αυτό τόν κρύσταλλο δέν υπάρχουν εϋκίνητα ηλεκτρόνια καί γι' αυτό ο κρύσταλλος δέν έχει άγωγιμότητα. Όταν όμως αυξάνει ή θερμοκρασία του κρυστάλλου, λίγα ηλεκτρόνια σθένους άποκτούν ενέργεια καί τότε *άποδεσμεύονται* από τήν έλξη του πυρήνα καί γίνονται *εϋκίνητα*, δηλαδή *ελεύθερα ηλεκτρόνια*. Με τήν επίδραση έξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου αυτά τά ελεύθερα ηλεκτρόνια σχηματίζουν ένα πολύ άσθενές ρεύμα. Η άγωγιμότητα του κρυστάλλου αυξάνει με τή θερμοκρασία, γιατί τότε *αυξάνει* καί ο αριθμός τών ηλεκτρονίων σθένους πού άποδεσμεύονται.

γ. Οι ήμιαγωγοί. Συνηθισμένοι ήμιαγωγοί είναι τό γερμάνιο καί τό πυρίτιο. Σέ έναν άπόλυτα καθαρό κρύσταλλο ήμιαγωγού, πού έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία, όλα τά ηλεκτρόνια σθένους είναι *δεσμευμένα*, όπως συμβαίνει καί στους μονωτές. Τότε ο κρύσταλλος δέν έχει άγωγιμότητα. Άλλά στους ήμιαγωγούς τά ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ άσθενέστερα δεσμευμένα καί μόλις πάρουν τήν άπαιτούμενη λίγη ενέργεια, άμέσως *εγκαταλείπουν τή θέση τους* καί γίνονται μέσα στον κρύσταλλο *ελεύθερα ηλεκτρόνια*. Τά ηλεκτρόνια σθένους παίρνουν τήν άπαιτούμενη ενέργεια είτε όταν θερμαίνεται ο κρύσταλλος είτε από μιά άκτινοβολία πού πέφτει πάνω στον κρύσταλλο.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο σθένους εγκαταλείψει τή θέση του, τότε *σε εκείνη τή θέση δημιουργείται* μέσα στον κρύσταλλο μιά « *άδειανή θέση* » ηλεκτρονίου πού ονομάζεται *όπή*. Άποδεικνύεται ότι ή έλλειψη ηλεκτρονίου σ' αυτή τή θέση, δηλαδή ή *όπή, ισοδυναμεί με*

ένα στοιχειώδες θετικό ηλεκτρικό φορτίο (+ e). 'Η όπή μπορεί νά συμπληρωθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού ατόμου. Τότε όμως δημιουργείται όπή στό γειτονικό άτομο. "Ωστε ή όπή μπορεί νά μετακινείται μέσα στόν κρύσταλλο.

Σέ έναν καθαρό κρύσταλλο ήμιαγωγού ό αριθμός τών ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος μέ τόν αριθμό τών 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 στόν ήμιαγωγό δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, πού αναγκάζει τά ηλεκτρόνια νά κινούνται πρός τό θετικό πόλο τής γεννήτριας καί τίς όπές νά κινούνται πρός τόν άρνητικό πόλο τής. "Ετσι μέσα στόν ήμιαγωγό δημιουργείται **ηλεκτρικό ρεύμα**. 'Η ένταση τοῦ ρεύματος είναι ίση μέ τό άθροισμα τών δύο ίσων έντάσεων, πού αντιστοιχοῦν στά δύο ρεύματα πού δημιουργοῦνται από τήν κίνηση τών ηλεκτρονίων καί τών όπών.

δ. Οί ήμιαγωγοί προσμίξεως. Τό γερμάνιο καί τό πυρίτιο είναι τετρασθενή στοιχεΐα καί τά άτομά τους έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Τήκουμε 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, παίρνουμε έναν ήμιαγωγό **n** τύπου πού έχει τόσα παραπάνω ελεύθερα ηλεκτρόνια, όσα είναι τά άτομα τοῦ πεντασθενοῦς στοιχείου στόν κρύσταλλο. Τό σύμβολο n φανερώνει τήν παρουσία ελεύθερων ηλεκτρονίων (από τό negatif = άρνητικός). "Αντίθετα, άν νοθεύσουμε τόν κρύσταλλο τοῦ γερμανίου μέ άτομα ενός τρισθενοῦς στοιχείου (B, Al, Ga) πού στά άτομά του υπάρχουν τρία ηλεκτρόνια σθένους, τότε παίρνουμε έναν ήμιαγωγό **p** τύπου πού έχει τόσες παραπάνω εϋκίνητες όπές, όσα είναι τά άτομα τοῦ τρισθενοῦς στοιχείου στόν κρύσταλλο.

Οί ήμιαγωγοί προσμίξεως (δηλαδή νοθευμένοι κρύσταλλοι ήμιαγωγών) έχουν σήμερα πολλές καί σημαντικές εφαρμογές, π.χ. χρησιμοποιοῦνται ως ξηροί άνορθωτές, ως τρανσίστορ στά ραδιόφωνα, στά μαγνητόφωνα, στούς ηλεκτρονικούς ύπολογιστές κ.ά.

75. Ἡ ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων

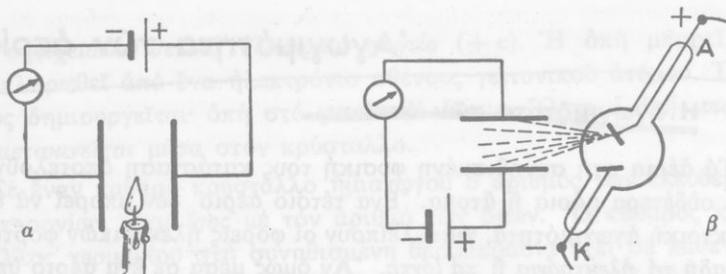
Τὰ ἀέρια στή συνηθισμένη φυσική τους κατάσταση ἀποτελοῦνται ἀπό οὐδέτερα μόρια ἢ ἄτομα. Ἐνα τέτοιο ἀέριο δέν μπορεῖ νά ἔχει ἠλεκτρική ἀγωγιμότητα, γιατί λείπουν οἱ φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, δηλαδή τὰ ἠλεκτρόνια ἢ τὰ ἰόντα. Ἄν ὁμως μέσα σέ ἕνα ἀέριο ὑπάρχουν ἐλεύθεροι φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, τότε αὐτό τό ἀέριο, ὅταν βρεθεῖ μέσα σέ ἠλεκτρικό πεδίο, ἀποκτᾷ ἀγωγιμότητα. Ὡστε :

Τὰ ἀέρια ἀποκτοῦν ἀγωγιμότητα, ὅταν μέσα σ' αὐτά δημιουργηθοῦν ἐλεύθεροι φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, δηλαδή ἠλεκτρόνια ἢ ἰόντα.

α. Ἴονισμός ἑνός 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 κολλάει 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 ἰονισμοῦ. Αὐτή τήν ἐνέργεια τήν παίρνει τό ἄτομο, ὅταν συγκρουστῆ μέ ἕνα ἄλλο σωματίδιο πού ἔχει μεγάλη κινητική ἐνέργεια (ιονισμός κρούσεως), ἢ ὅταν τό ἄτομο ἀπορροφήσει ἐνέργεια ἀπό μιά ἀκτινοβολία (ιονισμός ἀπό ἀπορρόφηση ἀκτινοβολίας).

β. Μορφές τῆς ἀγωγιμότητας τῶν ἀερίων. 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 μη αὐτοτελής, ὅταν ἡ παραγωγή τῶν φορέων ἠλεκτρικῶν φορτίων μέσα στό ἀέριο ὀφείλεται σέ ἐξωτερικά αἶτια, ἄσχετα μέ τό φαινόμενο τῆς ἀγωγιμότητας. Σ' αὐτή τήν περίπτωση ὁ ἰονισμός τοῦ ἀερίου γίνεται μέ ἐνέργεια πού προσφέρεται στά ἄτομα τοῦ ἀερίου ἀπέξω.



Σχ. 103. Ίονισμός του αέρα εξαιτίας κρούσεως (α) ή από απορρόφηση ακτινοβολίας (β)

γ. Φωτεινά φαινόμενα κατά την αὐτοτελή ἀγωγιμότητα. Συνήθως κατά την αὐτοτελή ἀγωγιμότητα ἐμφανίζονται φωτεινά φαινόμενα καί τότε λέμε ὅτι συμβαίνει ἠλεκτρική ἐκκένωση. Ἡ φωτοβολία τοῦ ἀερίου ἐξηγεῖται ὡς ἐξῆς: Ὅταν ἓνα ἄτομο τοῦ ἀερίου συγκρουσθεῖ μέ ἓνα σωματίδιο πού κινεῖται μέ μεγάλη ταχύτητα (π.χ. μέ ἓνα ἠλεκτρόνιο), τότε τό ἄτομο παίρνει μιά ἐνέργεια E , ἀλλά δέ συμβαίνει ἰονισμός τοῦ ἀτόμου. Σ' αὐτή τήν περίπτωση τό ἄτομο ἀποκτᾶ μιά κατάσταση διεγέρσεως, δηλαδή μιά ἀσταθῆ κατάσταση, γρήγορα ὅμως ἐπανέρχεται στήν κανονική του κατάσταση ἀποβάλλοντας τήν ἐνέργεια E μέ τή μορφή φωτεινῆς ἀκτινοβολίας. Ὡστε:

Ἡ φωτοβολία τοῦ ἀερίου κατά τήν αὐτοτελή ἐκκένωση ὀφείλεται σέ διέγερση τῶν ἀτόμων τοῦ ἀερίου, ἡ ὁποία προκαλεῖται, ὅταν τά ἄτομα (ἢ τά μόρια) τοῦ ἀερίου συγκρούονται μέ ἠλεκτρόνια ἢ ἰόντα πού κινοῦνται μέ μεγάλη ταχύτητα.

76 Ἡλεκτρικές ἐκκενώσεις μέσα στήν ἀτμόσφαιρα

α. Ἰονισμός τοῦ αέρα. Ὁ αέρας στή συνηθισμένη ἀτμοσφαιρική πίεση δέν ἔχει ἠλεκτρική ἀγωγιμότητα, μέ τήν ἐπίδραση ὅμως ὀρισμένων αἰτίων προκαλεῖται ἰονισμός τοῦ αέρα καί τότε ὁ αέρας ἀποκτᾶ ἀγωγιμότητα. Αὐτό φαίνεται μέ τό ἐξῆς πείραμα. Μεταξύ τῶν δύο ὀπλισμῶν ἑνός πυκνωτῆ δημιουργοῦμε μεγάλη διαφορά δυναμικοῦ (σχ. 103). Τότε μεταξύ τῶν δύο ὀπλισμῶν ὑπάρχει ἰσχυρό ἠλεκτρικό πεδίο. Ἐνα εὐαίσθητο γαλβανόμετρο δείχνει ὅτι στό κύκλωμα δέν κυκλοφορεῖ ρεῦμα. Ἄν μεταξύ τῶν ὀπλισμῶν φέρουμε μιά φλόγα,

παρατηρούμε ότι άμέσως τό κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Αυτό συμβαίνει, γιατί μέσα στον άέρα σχηματίστηκαν *ίοντα* από τίς συγκρούσεις των μορίων του άέρα μέ τά μόρια των αερίων τής φλόγας πού κινούνται μέ μεγάλες ταχύτητες, επειδή τά άέρια τής φλόγας έχουν ψηλή θερμοκρασία (*ιονισμός κρούσεως*). Τό ίδιο φαινόμενο συμβαίνει, άν στον άέρα πού υπάρχει μεταξύ των δύο όπλισμών πέσουν υπεριώδεις άκτίνες ή άκτίνες Röntgen (*ιονισμός από απορρόφηση άκτινοβολίας*). "Ωστε όρισμένα αίτια προκαλούν *ιονισμό* του άέρα.

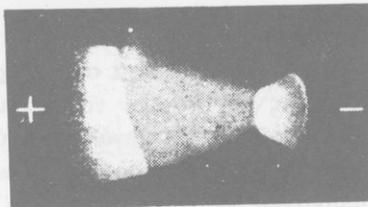
Διαρκής ιονισμός του άέρα. "Αν μέσα στον άέρα αφήσουμε ένα ήλεκτρισμένο και μονωμένο ήλεκτροσκόπιο, παρατηρούμε ότι έπειτα από λίγο χρόνο τό ήλεκτροσκόπιο χάνει τό θετικό ή άρνητικό φορτίο του. Αυτό συμβαίνει, γιατί πάντοτε μέσα στον άέρα υπάρχουν *θετικά* και *άρνητικά* *ίοντα*. Ο αριθμός των *ιοντων* πού υπάρχουν μέσα στον άέρα μεταβάλλεται μέ τό ύψος πάνω από τήν επιφάνεια τής Γης. Σέ ύψος πάνω από 80 km υπάρχει ένα στρώμα τής ατμόσφαιρας πού ονομάζεται *ιονόσφαιρα* και παρουσιάζει ισχυρό *ιονισμό*. Αυτός οφείλεται στις *υπεριώδεις ήλιακές άκτινοβολίες*, σέ *ήλεκτρόνια* πού εκπέμπονται από τον Ήλιο και σέ *ιά ιδιαίτερη άκτινοβολία*, πού φτάνει στον πλανήτη μας από όλα τά σημεία του άστρικού διαστήματος, και ονομάζεται *κοσμική άκτινοβολία* ή *κοσμικές άκτίνες*. "Ωστε:

I. Ο *άτμοσφαιρικός άέρας* είναι πάντοτε *ιονισμένος*.

II. Ο *ιονισμός* του άέρα οφείλεται σέ *ιονισμό κρούσεως* και σέ *ιονισμό από απορρόφηση άκτινοβολίας*.

β. Έκκένωση τόξου. Ξέρουμε ότι τό *ήλεκτρικό τόξο* σχηματίζεται μεταξύ δύο ραβδίων από άνθρακα, όταν ανάμεσά τους υπάρχει ένα στρώμα άέρα πού παρουσιάζει άγωγιμότητα. Αυτή ή εκκένωση ονομάζεται *εκκένωση τόξου* και οφείλεται στον *ιονισμό* πού προκαλούν τά *άφθονα ήλεκτρόνια* τά όποια εκπέμπει τό *άρνητικό ήλεκτρόδιο*. Τά *τόξα άνθρακα* χρησιμοποιούνται στους προβολείς ως ισχυρές φωτεινές πηγές, στον ήλεκτρικό φούρνο γιά τήν τήξη δύστηκτων σωμάτων ή τήν παρασκευή όρισμένων ενώσεων (π.χ. του άνθρακασβεστίου) και στην ήλεκτρομεταλλουργία (π.χ. γιά τήν παρασκευή άργιλίου). Χαρακτηριστικό τής εκκενώσεως τόξου

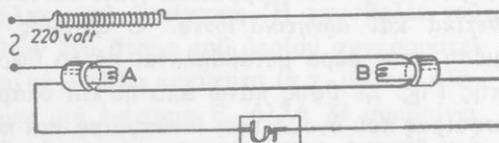
είναι ότι οι άκρες των δύο ηλεκτροδίων είναι πυρακτωμένες και η θερμοκρασία τους φτάνει πάνω από 3500° C (σχ. 104).



Σχ. 104. Ήλεκτρικό τόξο

Οι λαμπτήρες φθορισμού αποτελούνται από γυάλινο κυλινδρικό σωλήνα που στά εσωτερικά τοιχώματά του έχει ένα λεπτό στρώμα από φθορίζουσες ουσίες. Μέσα στο σωλήνα υπάρχει ένα ευγενές αέριο με μικρή πίεση και μία σταγόνα υδραργύρου. Κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα, μέσα στους ατμούς υδραργύρου συμβαίνει *εκκένωση τόξου* και παράγονται άορατες υπεριώδεις ακτινοβολίες. Αυτές πέφτουν πάνω στις φθορίζουσες ουσίες, οι οποίες

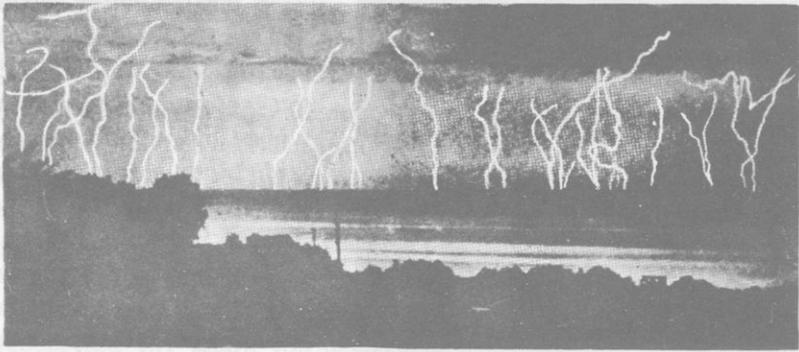
τότε εκπέμπουν όρατές ακτινοβολίες. Για να άρχισει ή λειτουργία του λαμπτήρα, υπάρχει ένα ειδικό σύστημα, που ονομάζεται *εκκινήτης* (σχ. 105).



Σχ. 105. Λαμπτήρας φθορισμού. Ο εκκινήτης κλείνει τό κύκλωμα εξαιτίας του διμεταλλικού ελάσματος σε σχήμα U.

γ. Ήλεκτρικός σπινθήρας. Όταν μεταξύ δύο ηλεκτροδίων υπάρχει μεγάλη τάση, τότε, με την επίδραση του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, τά ιόντα που βρίσκονται κοντά στά ηλεκτρόδια επιταχύνονται και προκαλούν στον άερα ιονισμό κρούσεως. Τότε μπορεί να συμβεί *εκκένωση*, που αποτελεί *τόν ήλεκτρικό σπινθήρα*.

δ. Άστραπή και κεραυνός. Τά σύννεφα αποτελούνται από ηλεκτρισμένα σταγονίδια νερού. Στά σύννεφα των καταιγίδων τά ηλεκτρικά φορτία διαχωρίζονται και συνήθως στά κατώτερα στρώματα του σύννεφου συγκεντρώνονται τά άρνητικά φορτία, ενώ στά άνωτερα στρώματα συγκεντρώνονται τά θετικά φορτία. Μεταξύ δύο περιοχών που έχουν αντίθετα φορτία μπορεί να συμβεί ήλεκτρική εκκένωση, που αποτελεί *τήν άστραπή*. Τά φορτία που βρίσκονται στά κατώτερα στρώματα του σύννεφου, δημιουργούν στό έδαφος άπό έπαγωγή ίσα έτερόνυμα φορτία. Έτσι μεταξύ του σύννεφου και του έδαφους δημιουργείται ήλεκτρικό πεδίο και όταν ή ένταση αυτού του πε-



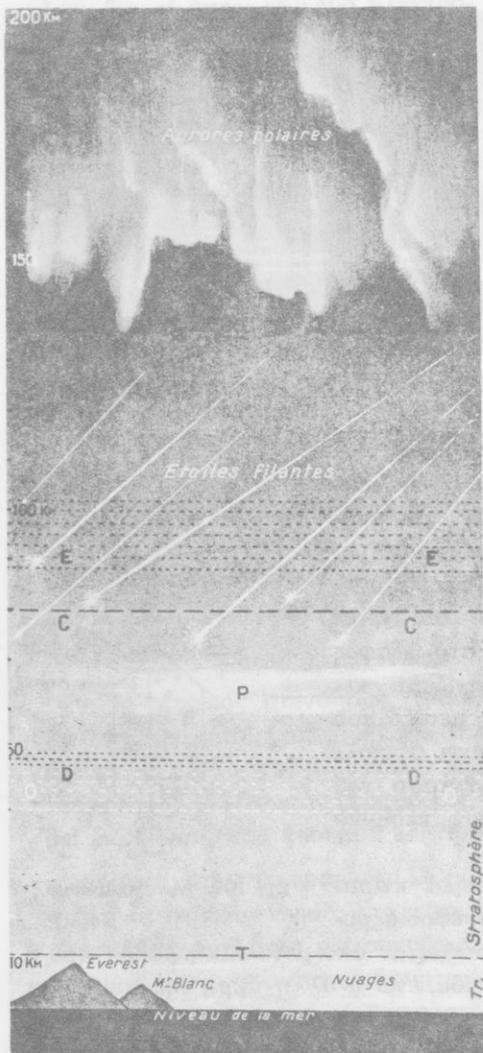
Σχ. 106. Οι κερανοί μεταφέρουν συνεχώς στο έδαφος αρνητικά ηλεκτρικά φορτία.

δίου γίνεται μεγαλύτερη από ένα όριο, τότε μεταξύ του σύννεφου και του εδάφους συμβαίνει ηλεκτρική εκκένωση που αποτελεί τον κερανό (σχ. 106). Έπειδή τα κατώτερα στρώματα του σύννεφου συνήθως έχουν αρνητικά φορτία, συνάγεται ότι οι κερανοί μεταφέρουν στο έδαφος αρνητικά φορτία. Όταν σχηματίζεται κερανός, η διαφορά δυναμικού μεταξύ του σύννεφου και του εδάφους φτάνει σε πολλά εκατομμύρια βόλτ και η ένταση του ρεύματος που αντιστοιχεί στον κερανό φτάνει σε 20 000 άμπέρ.



Σχ. 107. Άλεξικέρανο

Για να προφυλάξουμε τα ψηλά κτίρια από την πτώση κερανου, τα εφοδιάζουμε με άλεξικέρανο. Αυτό αποτελείται από μεταλλική ράβδο που ή μία άκρη της καταλήγει σε ακίδα, ενώ ή άλλη άκρη της συνδέεται με μεταλλική πλάκα που είναι βυθισμένη βαθιά μέσα στο έδαφος (σχ. 107). Όταν ο κερανός πέσει στο άλεξικέρανο, τό ρεύμα διχετεύεται στο έδαφος και έτσι αποφεύγεται βλάβη του κτιρίου. Άλλά ή πτώση του κερανου δημιουργεί ισχυρά επαγωγικά ρεύματα στά γύρω μεταλλικά αντικείμενα, που μπορεί νά πάθουν βλάβες.



Σχ. 108. Τομή του κατώτερου τμήματος της ατμόσφαιρας. T τροπόπαιση. O στρώμα όζοντος. D στρώμα ιονισμένο. P ήφαιστειακή σκόνη. C ανώτατο όριο λυκόφωτος. E στρώμα Heaviside. Διάττοντες άστέρες. Πολικό σέλας (σέ ύψος πάνω από 150 km).

ε. Πολικό σέλας. Όνομάζεται πολικό σέλας μιά ψυχρή φωτοβολία του άερα, πού παρατηρείται συνήθως στις πολικές περιοχές και πάντοτε σέ μεγάλα ύψη (100 ως 400 km). Τό πολικό σέλας εμφανίζεται μέ διάφορες μορφές, σάν τεράστιο φωτεινό τόξο, σάν τεράστια κουρτίνα κλπ. (σχ. 108). Αυτό τό φώς όφείλεται σέ διέγερση μορίων του άτμοσφαιρικού άζώτου και όξυγόνου κατά τή σύγκρουσή τους μέ ήλεκτρόνια πού προέρχονται από τόν Ήλιο. Τό πολικό σέλας εμφανίζεται μόνο στις πολικές περιοχές για τόν έξής λόγο: Τά ήλεκτρόνια πού έκπέμπονται από τόν Ήλιο, καθώς πλησιάζουν πρós τή Γή αναγκάζονται από τό μαγνητικό πεδίο τής Γής νά αλλάξουν πορεία και απομακρύνονται από τή Γή. Όσα όμως ήλεκτρόνια κατευθύνονται πρós τούς πόλους, άκολουθούν τίς δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου τής Γής, μπαίνουν μέσα στά άνώτερα στρώματα τής άτμόσφαιρας και προ-

καλοῦν διέγερση τῶν ἀτόμων καί τῶν μορίων τῆς (πολικό σέλας).

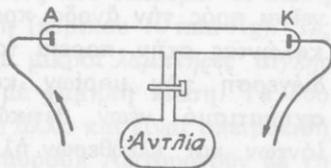
77. Ἡλεκτρικές ἐκκενώσεις μέσα σέ ἀραιωμένα ἀέρια

α. Ἐκκένωση αἴγλης. Ἐνας γυάλινος σωλήνας (σχ. 109) ἔχει στίς ἄκρες του δύο ἠλεκτρόδια, πού τά ὀνομάζουμε ἀντίστοιχα *ἄνοδο* (A) καί *κάθοδο* (K). Ἐφαρμόζουμε στά δύο ἠλεκτρόδια μιά ψηλή συνεχή τάση (U) μερικῶν χιλιάδων βόλτ. Στήν ἀρχή ὁ σωλήνας περιέχει ἀέρα μέ τή συνηθισμένη ἀτμοσφαιρική πίεση. Τότε ὁ ἀέρας πού εἶναι μέσα στό σωλήνα δέν ἔχει ἀγωγιμότητα καί στό κύκλωμα δέν κυκλοφορεῖ ρεῦμα. Μέ μιά ἀεραντλία ἀρχίζουμε νά ἐλαττώνουμε προοδευτικά τήν πίεση τοῦ ἀέρα. Ὅταν ἡ πίεση ἐλαττωθεῖ ἀρκετά (γύρω στά 40 mm Hg), τότε μέσα στό σωλήνα συμβαίνει *ἠλεκτρική ἐκκένωση* καί παρατηροῦμε ὅτι μεταξύ τῶν δύο ἠλεκτροδίων σχηματίζονται φωτεινά νήματα, πού δίνουν τήν ἐντύπωση ἠλεκτρικοῦ σπινθήρα (βλ. εἰκόνα ἐκτός κειμένου). Ἡ πίεση στήν ὁποία ἀρχίζει ἡ ἠλεκτρική ἐκκένωση δέν εἶναι ὀρισμένη, γιατί ἐξαρτᾶται ἀπό τό μήκος τοῦ σωλήνα καί τήν τάση πού ἐφαρμόζεται στά ἠλεκτρόδια.

Ἄν ἡ πίεση ἐλαττωθεῖ ἀκόμη περισσότερο (γύρω στά 10 mm Hg), τότε τά φωτεινά νήματα γίνονται πλατύτερα καί ἀποτελοῦν μιά φωτεινή στήλη, πού λέγεται *θετική στήλη* καί γεμίζει ὅλο τό σωλήνα (*αἴγλη*). Τότε ὁ σωλήνας ἐκπέμπει ὁμοιόμορφο φῶς μέ χρῶμα κοκκινωπό. Σ' αὐτή τή φάση τῆς ἐκκενώσεως ὁ σωλήνας ὀνομάζεται *σωλήνας Geissler*. Ἡ θετική στήλη χωρίζεται ἀπό τήν κάθοδο μέ μιά σκοτεινή περιοχή ἐνῶ πολύ κοντά στήν κάθοδο ὑπάρχει ἕνα φωτεινό στρῶμα ἀέρα μέ κυανό χρῶμα, ἡ *ἀρνητική αἴγλη*.

Ἄν ἐξακολουθήσουμε τήν ἀραίωση τοῦ ἀέρα, ἡ θετική στήλη ἀρχίζει νά ὀπισθοχωρεῖ πρὸς τήν ἄνοδο καί ἐμφανίζονται μέσα στό σωλήνα σκοτεινές περιοχές. Ἡ μορφή τῆς ἐκκενώσεως πού παρατηροῦμε μέ αὐτό τό πείραμα ὀνομάζεται *ἐκκένωση αἴγλης*.

Ὅταν ἡ πίεση τοῦ ἀέρα μέσα στό σωλήνα γίνει πολύ μικρή (μικρότερη ἀπό 0,05 mm Hg), τότε τό ρεῦμα ἐξακολουθεῖ νά κυκλοφορεῖ στό κύκλωμα, ἀλλά ὅλα τά φωτεινά φαινόμενα

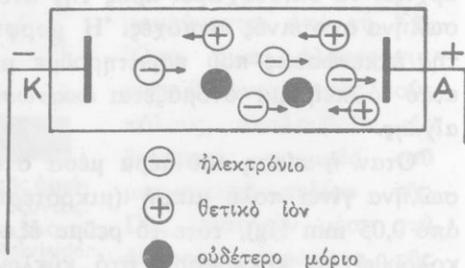


Σχ. 109. Σχηματική διάταξη γιά τή μελέτη τῆς ἠλεκτρικῆς ἐκκενώσεως μέσα σέ ἀραιωμένα ἀέρια

έξαφανίζονται. Τό έσωτερικό του σωλήνα είναι σκοτεινό και μόνο τά τοιχώματα του σωλήνα που βρίσκονται άπέναντι άπό τήν κάθοδο φθορίζουν και εκπέμπουν ένα άσθενές πρασινωπό φώς. Αυτός ό φθορισμός φανερώνει ότι πάνω σ' αυτό τό τμήμα του γυαλιού πέφτουν άόρατες άκτίνες που προέρχονται άπό τήν κάθοδο και γι' αυτό όνομάστηκαν καθοδικές άκτίνες. Τότε ό σωλήνας όνομάζεται σωλήνας Crookes.

Τά ίδια φαινόμενα παρατηρούμε και μέ όποιοδήποτε άλλο άέριο μέ τή διαφορά ότι τό χρώμα που εκπέμπει ή θετική στήλη εξαρτάται άπό τή φύση του άερίου.

β. Μηχανισμός τής εκκενώσεως αίγλης. Όπως ξέρουμε διάφορα αίτια προκαλούν πάντοτε ίονισμό του άερα. Έπομένως στον άερα που άρχικά είναι μέσα στο σωλήνα ύπάρχει ένας πολύ μικρός αριθμός θετικών και αρνητικών ίόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τό ίδιο συμβαίνει και σε κάθε άλλο άέριο. Άς θεωρήσουμε ότι μέσα στο σωλήνα ύπάρχει ένα άέριο μέ μικρή πίεση και ότι πολύ κοντά στην κάθοδο βρίσκεται ένα ελεύθερο ήλεκτρονίο (σχ. 110). Μέ τήν επίδραση του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου τό ήλεκτρονίο άρχίζει νά κινείται προς τήν άνοδο μέ επιτάχυνση. Άλλά στην πορεία του προς τήν άνοδο συγκρούεται μέ μόρια του άερίου. Όταν ή κινητική ενέργεια του ήλεκτρονίου δέν είναι άρκετά μεγάλη, τότε κατά τή σύγκρουσή του μέ τό μόριο προκαλεί μόνο διέγερση του μορίου, δηλαδή τό κάνει ικανό νά εκπέμψει φωτεινή άκτινοβολία. Όταν όμως τό ήλεκτρονίο άποκτήσει μεγάλη κινητική ενέργεια, τότε κατά τή σύγκρουσή του μέ ένα μόριο προκαλεί ίονισμό του μορίου και έτσι σχηματίζονται ένα θετικό ίόν και ένα ελεύθερο ήλεκτρονίο, που μέ τήν επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου άρχίζει και αυτό νά κινείται προς τήν άνοδο προκαλώντας στην πορεία του διέγερση των μορίων και σχηματισμό νέων θετικών ίόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων. Έτσι τελικά φτάνει στην άνοδο ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων. Μέσα



Σχ. 110. Ίονισμός του άερίου μέ κρούση

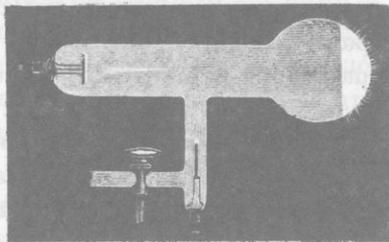
στό άέριο σχηματίστηκαν και πολλά θετικά ιόντα. Αυτά, με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, κινούνται προς την κάθοδο. Έπειδή όμως έχουν μεγάλη μάζα, δέν άποκτοδν μεγάλη ταχύτητα και έπομένως δέν έχουν την ίκανότητα νά προκαλέσουν Ιονισμό. Τά θετικά ιόντα, όταν φτάσουν στην κάθοδο, παίρνουν από αυτή ηλεκτρόνια και γίνονται ουδέτερα μόρια. Μερικά όμως θετικά ιόντα κατά τή συγκρούσή τους με την κάθοδο αναγκάζουν μερικά ηλεκτρόνια νά ξεφύγουν από την κάθοδο (δευτερογενή ηλεκτρόνια). Αυτά τά ηλεκτρόνια κατά τή πορεία τους προς τή άνοδο δημιουργοδν τά ίδια πάλι φαινόμενα. Έτσι ή εκκένωση διατηρείται όσο χρόνο ύπάρχει τό ηλεκτρικό πεδίο. Παρατηροδμε ότι οί φορείς τών ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρόνια, θετικά ιόντα) παράγονται κατά τή διάρκεια του φαινομένου τής άγωγιμότητας (αυτοτελής άγωγιμότητα) Έτσι:

Έκκένωση αίγλης όφείλεται στον Ιονισμό του άερίου, που προκαλείται από τίς συνεχείς συγκρούσεις τών μορίων του άερίου με ηλεκτρόνια, τά όποια με τήν επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου άποκτοδν μεγάλη κινητική ένέργεια.

γ. Έφαρμογές τής εκκένωσης αίγλης. Έκκένωση αίγλης είναι μία μορφή αυτοτελοδς άγωγιμότητας τών άερίων που έμφανίζεται σε άέρια με μικρή πίεση. Σήμερα σε πολλές εφαρμογές εκμεταλλεοδμαστε τήν εκκένωση αίγλης. Στή φασματοσκοπία χρησιμοποιοδμε ειδικούς σωλήνες Geissler που περιέχουν ένα άέριο με μικρή πίεση (περίπου 5 mm Hg). Τό φώς που εκπέμπει τό άέριο δίνει γραμμικό φάσμα, που είναι χαρακτηριστικό για κάθε άέριο. Οί σωλήνες τών φωτεινών διαφημίσεων είναι σωλήνες Geissler, που περιέχουν διάφορα άέρια, ανάλογα με τό χρώμα του φωτόδ που θέλοδμε. Έπίεση του άερίου μέσα στο σωλήνα είναι μικρή (περίπου 10 mm Hg). Όδ ασθενείς φωτεινές πηγές χρησιμοποιοδνται μικροί λαμπτήρες αίγλης που περιέχουν ένα εδγενές άέριο (νέο) με χαμηλή πίεση. Τά δύο ηλεκτρόδια είναι πολύ κοντά τό ένα με τό άλλο και είναι σπειροειδή ή μικρά πλακίδια (συνήθως σε σχήμα σταυροδ). Λειτουργοδν με τή συνηθισμένη τάση (220 V), έχουν πολύ μικρή κατανάλωση και χρησιμοποιοδνται ως δείκτες σε διάφορες συσκευές, για τόν άσθενή φωτισμό δωματίων τή νύχτα κ.ά.

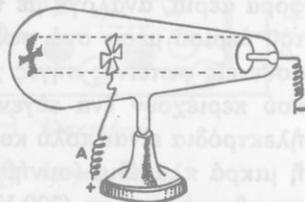
78. Καθοδικές ακτίνες

α. Ιδιότητες των καθοδικών ακτίνων. Στο σωλήνα Crookes τό τμήμα του γυαλιού που είναι απέναντι στην κάθοδο φθορίζει γιατί πέφτουν πάνω του οι καθοδικές ακτίνες (σχ. 111). Πειραματικώς βρίσκουμε ότι οι καθοδικές ακτίνες έχουν τρεις εξής ιδιότητες :



Σχ. 111. Σωλήνας Crookes για την παραγωγή καθοδικών ακτίνων

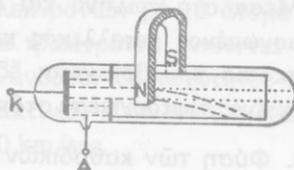
1. Προκαλούν τό φθορισμό πολλών σωμάτων, π.χ. του γυαλιού, του άσβεστιού, του κυανιούχου βαριολευκόχρυσου κ.ά.
2. Προσβάλλουν τή φωτογραφική πλάκα και προκαλούν χημικές αλλοιώσεις σέ όρισμένα σώματα. Π.χ. γυαλί που περιέχει μόλυβδο (κρύσταλλο) μαυρίζει, γιατί έλευθερώνεται μόλυβδος.
3. Φεύγουν κάθετα από τήν κάθοδο και διαδίδονται εϋθύγραμμα, άνεξάρτητα από τή θέση που έχει ή άνοδος. Άν στην πορεία των καθοδικών ακτίνων βάλουμε ένα σώμα, τότε πίσω από τό σώμα σχηματίζεται ή σκιά του σώματος πάνω στο τοίχωμα του σωλήνα που φθορίζει (σχ. 112).
4. Όταν πέφτουν πάνω σέ ένα σώμα, προκαλούν θέρμανση του σώματος, π.χ. μπορούν νά λευκοπυρώσουν ένα έλασμα από λευκόχρυσο.
5. Έχουν διεισδυτική ικανότητα. Τό τοίχωμα του σωλήνα που είναι απέναντι από τήν κάθοδο έχει μικρό άνοιγμα που κλείνεται μέ ένα λεπτό φύλλο από άλουμίνιο (πάχους 0,001 mm). Οι καθοδικές ακτίνες περνούν μέσα από τή μάζα του άλουμινίου και βγαίνουν στον άέρα, ό όποιος φωτοβολεί σέ άπόσταση 5 cm από τό τοίχωμα του σωλήνα.
6. Προκαλούν μηχανικά φαινόμενα. Άν οι καθοδικές ακτίνες πέφτουν πάνω



Σχ. 112. Εϋθύγραμμη διάδοση των καθοδικών ακτίνων



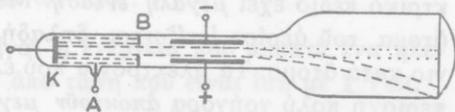
Σχ. 113. Μηχανικά αποτελέσματα των καθοδικών ακτίνων



Σχ. 114. Έκτροπή των καθοδικών ακτίνων με την επίδραση μαγνητικού πεδίου

στά πτερύγια ενός εϋκίνητου μύλου, αυτός αρχίζει νά περιστρέφεται (σχ. 113).

7. Μέ την επίδραση μαγνητικού πεδίου εκτρέπονται από την εϋθύγραμμη τροχιά τους. Μέ ένα διάφραγμα πού έχει μικρή τρύπα δημιουργούμε μία οριζόντια λεπτή δέσμη καθοδικών ακτίνων πού σχηματίζει ένα φωτεινό σημείο πάνω στο τοίχωμα πού φθορίζει (σχ. 114). Όταν οι καθοδικές ακτίνες τής δέσμης είναι κάθετες στις οριζόντιες δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, παρατηρούμε ότι οι καθοδικές ακτίνες εκτρέπονται κατακόρυφα, δηλαδή κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Αυτή ή εκτροπή είναι ίδια με την εκτροπή πού θά πάθαινε από αυτό τό μαγνητικό πεδίο ένα εϋθύγραμμο ρεύμα πού θά είχε φορά (συμβατική) αντίθετη με τή φορά των καθοδικών ακτίνων.
8. Μέ την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου εκτρέπονται από την εϋθύγραμμη τροχιά τους. Αυτή ή εκτροπή φαίνεται, αν μέσα στό σωλήνα υπάρχει ένας πυκνωτής (σχ. 115). Οι καθοδικές ακτίνες μιάς λεπτής δέσμης, περνώντας μέσα από τό ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, εκτρέπονται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου, σάν νά έλκονται από τό θετικό όπλισμό του πυκνωτή.
9. Μεταφέρουν αρνητικά ηλεκτρικά φορτία. Αυτό φαίνεται από την εκτροπή πού παθαίνουν οι καθοδικές ακτίνες με την επίδραση μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου, τό διαπιστώνουμε όμως και ως εξής:



Σχ. 115. Έκτροπή των καθοδικών ακτίνων με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου

Μέσα στο σωλήνα και απέναντι από την κάθοδο υπάρχει ένας μονωμένος μεταλλικός κύλινδρος. Αυτός συνδέεται με ηλεκτροσκόπιο που βρίσκεται έξω από το σωλήνα. Όταν οι καθοδικές ακτίνες πέφτουν μέσα στον κύλινδρο, αυτός αποκτά αρνητικό φορτίο.

β. Φύση των καθοδικών ακτίνων. Από την έκτροπή που παθαίνουν οι καθοδικές ακτίνες με την επίδραση μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου αποδείχτηκε ότι:

Οι καθοδικές ακτίνες αποτελούνται από σωματίδια που έχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο και κινούνται εθύγραμμα.

Πειραματικώς μπορούμε να μετρήσουμε *τή μάζα, τό ηλεκτρικό φορτίο* και *τήν ταχύτητα* των σωματιδίων που αποτελούν τις καθοδικές ακτίνες. Έτσι καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα:

- I. Οι καθοδικές ακτίνες αποτελούνται από ηλεκτρόνια.
- II. Η μάζα του ηλεκτρονίου είναι ίση με $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg και τό αρνητικό φορτίο του είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσο με τό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (e).
- III. Η ταχύτητα των ηλεκτρονίων των καθοδικών ακτίνων εξαρτάται από την τάση που υπάρχει μεταξύ τής ανόδου και τής καθόδου.

μάζα ηλεκτρονίου	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
φορτίο ηλεκτρονίου	$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb

γ. Παραγωγή των καθοδικών ακτίνων. Στο σωλήνα Crookes ή πίεση του αερίου είναι πολύ μικρή και αντίθετα ή τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια είναι πολύ μεγάλη. Πειραματικώς αποδεικνύεται ότι πολύ κοντά στην κάθοδο υπάρχει μιά περιοχή όπου τό ηλεκτρικό πεδίο έχει *μεγάλη ένταση*. Μέσα σ' αυτή την περιοχή μερικά άτομα του αερίου *ιονίζονται*, δηλαδή χάνουν συνήθως ένα ηλεκτρόνιο κατά άτομο. Τά ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται μέσα σ' αυτή την περιοχή πολύ γρήγορα *αποκοτύν μεγάλη ταχύτητα* με διεύθυνση *κάθετη στην επιφάνεια τής καθόδου*, γιατί ή ένταση (E) του ηλεκτρικού πεδίου είναι *κάθετη στην επιφάνεια τής καθόδου*. Έπειδή τό άεριο

είναι πολύ άραιό, οί συγκρούσεις τών ηλεκτρονίων μέ τά άτομα (ή μόρια) του άερίου είναι σπάνιες. Έτσι τά ηλεκτρόνια *κινούνται εύθύγραμμα*, άνεξάρτητα από τή θέση τής άνόδου. Οί ταχύτητες πού άποκτούν τά ηλεκτρόνια τών καθοδικών άκτίων είναι *πολύ μεγάλες* και μπορεί νά φτάσουν πάνω άπό 100 000 km/sec.

δ. Κινητική ένέργεια του ηλεκτρονίου. Μεταξύ τής άνόδου και τής καθόδου ύπάρχει ή τάση U , πού δημιουργεί τό ηλεκτρικό πεδίο. Ένα ηλεκτρόνιο ξεκινάει από τήν έπιφάνεια τής καθόδου χωρίς άρχική ταχύτητα. Τό ηλεκτρόνιο, εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου, κινείται μέ επιτάχυνση και άν στην πορεία του δέ συγκρουστεί μέ μόρια του άερίου, φτάνει στην άνοδο μέ *κινητική ενέργεια*

$E_{κιν} = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$. Αυτή ή ενέργεια είναι ίση μέ τό έργο πού παράγεται από τό ηλεκτρικό πεδίο. Τό έργο αυτό είναι κατ' άπόλυτη τιμή ίσο μέ $e \cdot U$ και, έπομένως, ισχύει ή εξίσωση:

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = e \cdot U \quad (1) \quad \text{και} \quad \boxed{E_{κιν} = e \cdot U} \quad (2)$$

Άπό τήν εξίσωση (1) βρίσκουμε ότι ή ταχύτητα v πού άποκτᾶ τό ηλεκτρόνιο εξαρτάται από τήν τάση U πού εφαρμόζεται στον καθοδικό σωλήνα και δίνεται από τήν εξίσωση:

$$\text{ταχύτητα ηλεκτρονίου} \quad v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m_e}}$$

ε. Η μονάδα ενέργειας ηλεκτρονιοβόλτ. Άν στην εξίσωση (2) βάλουμε $U = 1 \text{ V}$, βρίσκουμε $E_{κιν} = |e| \cdot U = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb} \cdot 1 \text{ V}$ και $E_{κιν} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$. Αυτή ή ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μιá άλλη *μονάδα ενέργειας*, πού ονομάζεται **ηλεκτρονιοβόλτ** (1 eV, electron - Volt) και ορίζεται ως εξής:

1 ηλεκτρονιοβόλτ (1 eV) είναι ή ενέργεια πού άποκτᾶ ένα ηλεκτρόνιο, όταν επιταχύνεται από τάση πού είναι ίση μέ 1 Volt.

$$\boxed{1 \text{ ηλεκτρονιοβόλτ (1 eV)} = 1 e \cdot 1 \text{ V} \quad \text{άρα} \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}}$$

Ἡ μονάδα ἠλεκτρονιοβόλτ χρησιμοποιεῖται πολὺ στὴν Ἀτομικὴ καὶ Πυρηνικὴ Φυσικὴ. Συνήθως χρησιμοποιοῦνται καὶ τὰ ἐξῆς πολλαπλάσια τῆς μονάδας ἠλεκτρονιοβόλτ:

1 Μέγα - ἠλεκτρονιοβόλτ : $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

1 Γιγα - ἠλεκτρονιοβόλτ : $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

79. Θετικές ἀκτίνες

Στὸ σωλῆνα Crookes ἀπὸ τὸν ἰονισμό τῶν ἀτόμων τοῦ ἀερίου σχηματίζονται θετικὰ ἰόντα καὶ ἠλεκτρόνια. Μὲ τὴν ἐπίδραση τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου τὰ θετικὰ ἰόντα κινοῦνται πρὸς τὴν κάθοδο. Ὅπως ὅμως μάθαμε πολὺ κοντὰ στὴν κάθοδο ὑπάρχει μιά περιοχὴ, ὅπου ἡ ἔνταση τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου εἶναι πολὺ μεγάλη. Μέσα σ' αὐτὴ τὴν περιοχὴ, πού εἶναι μιά ζώνη ἰονισμοῦ καὶ ἐπιταχύνσεως, ἐπιταχύνονται ὄχι μόνον τὰ ἠλεκτρόνια τῶν καθοδικῶν ἀκτίνων, ἀλλὰ καὶ τὰ θετικὰ ἰόντα πού κινοῦνται πρὸς τὴν κάθοδο. Ἔτσι πολὺ κοντὰ στὴν κάθοδο τὰ θετικὰ ἰόντα ἀποκοῦν μεγάλη ταχύτητα μὲ διεύθυνση κάθετη στὴν ἐπιφάνεια τῆς καθόδου.

Ἄν ἡ κάθοδος ἔχει μικρὲς τρύπες, τότε μερικὰ ἀπὸ τὰ θετικὰ ἰόντα πού κινοῦνται πρὸς τὴν κάθοδο περνοῦν μέσα ἀπὸ τίς τρύπες καὶ ἐξακολουθοῦν νὰ κινοῦνται εὐθύγραμμα πίσω ἀπὸ τὴν κάθοδο (σχ. 116). Αὐτὰ τὰ θετικὰ ἰόντα ἀποτελοῦν μιά δέσμη ἀκτίνων πού ὀνομάζονται θετικὲς ἀκτίνες (ἢ καὶ διαυλικὲς ἀκτίνες). Ἡ δέσμη τῶν θετικῶν ἀκτίνων ἔχει μιά ἀσθενὴ φωτοβολία.

α. Ἰδιότητες τῶν θετικῶν ἀκτίνων. Οἱ θετικὲς ἀκτίνες μὲ τὴν ἐπίδραση μαγνητικοῦ ἢ ἠλεκτρικοῦ πεδίου ἐκτρέπονται ἀπὸ τὴν εὐθύγραμμη τροχιὰ τους, προσβάλλουν τὴ φωτογραφικὴ πλάκα καὶ προκαλοῦν τὸ φθορισμὸ σὲ ὀρισμένα σώματα. Ἐπειδὴ τὰ σωματίδια τῶν θετικῶν ἀκτίνων ἔχουν μάζα πολὺ μεγαλύτερη ἀπὸ τὴ μάζα τοῦ ἠλε-



Σχ. 116. Οἱ θετικὲς ἀκτίνες εἶναι θετικὰ ἰόντα.

κτρονίου, γι' αυτό τὰ σωματίδια τῶν θετικῶν ἀκτίνων ἔχουν ταχύτητα *πολύ μικρότερη* ἀπὸ τὴν ταχύτητα πού ἔχουν τὰ ἠλεκτρόνια τῶν καθοδικῶν ἀκτίνων.

Ἀπὸ τὴν ἐκτροπή πού παθαίνει μὲ τὴν ἐπίδραση μαγνητικοῦ καὶ ἠλεκτρικοῦ πεδίου μιά λεπτή δέσμη θετικῶν ἀκτίνων μπορούμε νὰ μετρήσουμε *τὴ μάζα, τὸ ἠλεκτρικὸ φορτίο* καὶ *τὴν ταχύτητα* ἑνὸς σωματιδίου τῶν θετικῶν ἀκτίνων. Ἔτσι καταλήξαμε στὸ ἑξῆς συμπέρασμα:

Τὰ σωματίδια τῶν θετικῶν ἀκτίνων εἶναι θετικὰ ἰόντα τοῦ αἰρίου, πού ἔχουν ἓνα ἢ περισσότερα στοιχειώδη θετικὰ ἠλεκτρικὰ φορτία.

Ἄν π.χ. μέσα στὸ σωλήνα Crookes ὑπάρχει ὕδρογόνο, τότε οἱ θετικὲς ἀκτίνες πού σχηματίζονται, ἀποτελοῦνται ἀπὸ τοὺς πυρῆνες τῶν ἀτόμων ὕδρογόνου, δηλαδή ἀπὸ *πρωτόνια*. Σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση βρῖσκουμε τὰ ἑξῆς ἑξαγόμενα:

μάζα πρωτονίου	$m_p = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
φορτίο πρωτονίου	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$

β. Ἴσότοπα. Ὄταν μέσα στὸ σωλήνα Crookes ὑπάρχει χλώριο, τότε οἱ θετικὲς ἀκτίνες ἀποτελοῦνται ἀπὸ *θετικὰ ἰόντα χλωρίου* πού ἔχουν *τὸ ἴδιο θετικὸ φορτίο e*. Ἄν τὰ θετικὰ ἰόντα χλωρίου κινοῦνται μέσα σὲ μαγνητικὸ πεδίο, τότε ἐκτρέπονται ἀπὸ τὴν εὐθύγραμμη τροχιά τους *ἀνάλογα μὲ τὴ μάζα τους*. Ὁ Thomson (1913) ἀνακάλυψε ὅτι ὑπάρχουν *δύο εἶδη* θετικῶν ἰόντων χλωρίου, τὰ ὁποῖα ἀντιστοιχοῦν σὲ *δύο εἶδη ἀτόμων* χλωρίου πού ἔχουν ἀτομικὲς μάζες 35 καὶ 37. Αὐτὰ τὰ δύο εἶδη ἀτόμων ἔχουν *τὶς ἴδιες χημικὲς ιδιότητες*, διαφορετικὲς ὅμως ἀτομικὲς μάζες καὶ ὀνομάζονται *ἰσότοπα* τοῦ χλωρίου (Cl^{35} καὶ Cl^{37}). Ἔτσι ἀπὸ τὴ μελέτη τῶν θετικῶν ἀκτίνων ἀνακαλύψαμε ὅτι:

Ἐνα στοιχεῖο συνήθως εἶναι μίγμα ἀπὸ δύο ἢ περισσότερα ἰσότοπα. Τὰ ἄτομα τῶν ἰσοτόπων ἑνὸς στοιχείου ἔχουν τὶς ἴδιες χημικὲς ιδιότητες, διαφορετικὲς ὅμως ἀτομικὲς μάζες.

Τό υδρογόνο αποτελείται από δύο ισότοπα, τό κοινό υδρογόνο H^1 και τό δευτέριο H^2 , ενώ άλλα στοιχεΐα αποτελούνται από περισσότερα ισότοπα, π.χ. ό κασσίτερος (Sn) αποτελείται από δέκα ισότοπα. Ή διάταξη μέ τήν όποία διαχωρίζουμε τά ισότοπα ενός στοιχείου όνομάζεται φασματογράφος τών μαζών.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

104. Σέ ένα σωλήνα Crookes σχηματίζεται ρεύμα έντάσεως 10 mA. Πόσα ήλεκτρόνια 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 και πόση κινητική ενέργεια αποκτούν τά ήλεκτρόνια τών καθοδικών ακτίνων; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

106. Μέσα σέ έναν καθοδικό σωλήνα υπάρχει πυκνωτής, πού οί όπλισμοί του είναι όριζόντιοι, έχουν μήκος $l = 6$ cm και ή μεταξύ τους απόσταση είναι $d = 2$ cm. Στούς όπλισμούς του πυκνωτή εφαρμόζεται τάση $U = 500$ V. Ή λεπτή καθοδική δέσμη είναι όριζόντια και αποτελείται από ήλεκτρόνια πού κινούνται μέ σταθερή ταχύτητα $v_0 = 25 \cdot 10^3$ km/sec. Ή καθοδική δέσμη μπαίνει μέσα στό ήλεκτρικό πεδίο πού υπάρχει μεταξύ τών όπλισμών του πυκνωτή και κάθετα στίς δυναμικές γραμμές του πεδίου. 1) Πόσο χρόνο ένα ήλεκτρόνιο κινείται μέσα στό ήλεκτρικό πεδίο; 2) Βγαίνοντας τό ήλεκτρόνιο από τό ήλεκτρικό πεδίο, πόσο έχει έκτραπει από τήν άρχική διεύθυνση τής κινήσεώς του; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

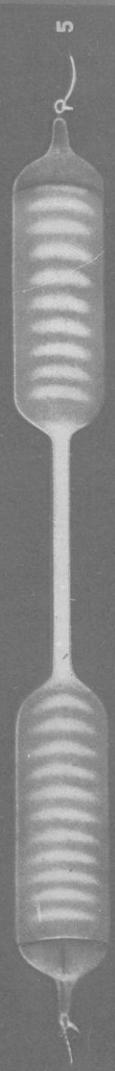
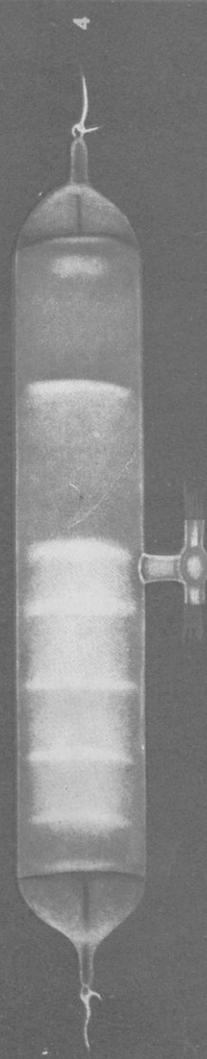
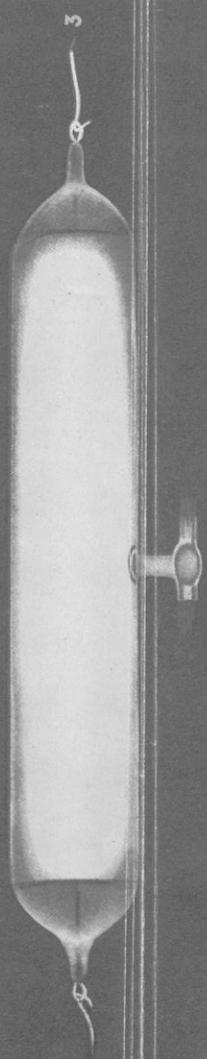
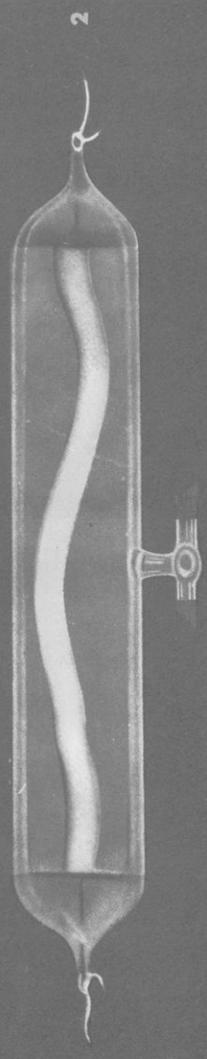
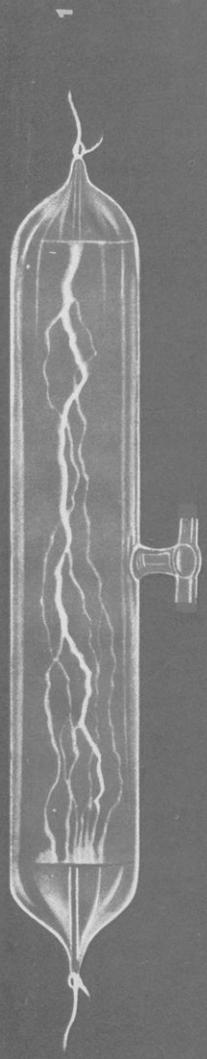
107. Τά ήλεκτρόνια μιās λεπτής καθοδικής δέσμης κινούνται μέ σταθερή ταχύτητα $v_0 = 10^8$ m/sec και μπαίνουν μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο, πού έχει μαγνητική επαγωγή $B = 2,8 \cdot 10^{-3}$ T. Ή ταχύτητα v_0 είναι κάθετη στίς δυναμικές γραμμές του πεδίου. 1) Τί τροχιά διαγράφει τό ήλεκτρόνιο; 2) Νά βρεθούν τά στοιχεία τής κινήσεως του ήλεκτρονίου.

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb. } m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg.}$$

108. Τά ήλεκτρόνια μιās λεπτής καθοδικής δέσμης κινούνται μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο, πού έχει μαγνητική επαγωγή $B = 5 \cdot 10^{-3}$ T και διαγράφουν κυκλική τροχιά μέ ακτίνα $r = 7,5$ cm.

Διάφορες φάσεις τῆς ἠλεκτρικῆς ἐκκενώσεως

1. Ὑπὸ τὴν ἀτμοσφαιρικὴ πίεση ὁ ἠλεκτρικὸς σπινθήρας εἶναι διακλαδισμένος.
2. Ὑπὸ πίεση ἴση μὲ τὸ $1/4$ τῆς ἀτμοσφαιρικῆς ὁ ἠλεκτρικὸς σπινθήρας ἔχει τὴν ὄψη ἐγγρωμῆς φωτεινῆς στήλης.
3. Ὑπὸ πίεση ἴση μὲ τὸ $1/20$ τῆς ἀτμοσφαιρικῆς ὅλο τὸ ἀέριο φωτοβολεῖ.
4. Ὑπὸ πίεση ἴση μὲ τὸ $1/100$ τῆς ἀτμοσφαιρικῆς ἐμφανίζονται σκοτεινὲς περιοχὲς μέσα στὸ σωλῆνα.
5. Ὑπὸ πίεση ἴση μὲ τὸ $1/1000$ τῆς ἀτμοσφαιρικῆς τὸ στενὸ τμῆμα τοῦ σωλῆνα φωτοβολεῖ ἰσχυρότερα.



Πόση είναι η ταχύτητα v_0 ενός ηλεκτρονίου της δέσμης;
 $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb. } m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg.}$

109. Μιά λεπτή δέσμη θετικών ακτίνων αποτελείται από ατομικούς πυρήνες υδρογόνου, δηλαδή από πρωτόνια, που επιταχύνονται από μία τάση $U = 1000 \text{ V}$. Πόση ταχύτητα και πόση κινητική ενέργεια αποκτά κάθε πρωτόνιο αυτής της δέσμης; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb. } m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$

Άγωγιμότητα στο κενό

80. Η άγωγιμότητα στο κενό

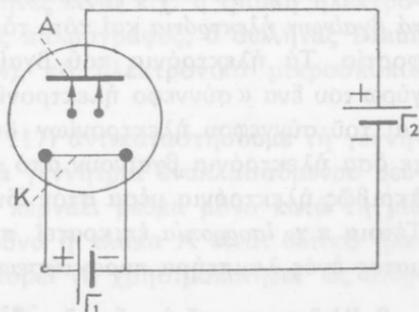
Τό ηλεκτρικό ρεύμα είναι κίνηση φορέων ηλεκτρικού φορτίου. Τέτοιοι φορείς, όπως ξέρουμε, είναι τά ηλεκτρόνια και τά ιόντα. Τό κενό αποκτά άγωγιμότητα, όταν μέσα σ' αυτό δημιουργηθούν ηλεκτρόνια. Ατά παράγονται μέσα στό κενό μέ δύο φαινόμενα, πού ονομάζονται αντίστοιχα *θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο* και *φωτοηλεκτρικό φαινόμενο*.

81. 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 έξής διάταξη (σχ. 117). Μέσα σέ αερόκενο σωλήνα υπάρχει σύρμα K (κάθοδος), πού διατηρώνεται μέ τό συνεχές ρεύμα μιάς γεννήτριας Γ_1 , και μία με-



Σχ. 117. Η διάπυρη κάθοδος (K) εκπέμπει ηλεκτρόνια.

ταλλική πλάκα Α (άνοδος), πού συνδέεται μέ τό θετικό πόλο μιᾶς ἰσχυρῆς γεννήτριας Γ_2 . Ὁ ἀρνητικός πόλος τῆς γεννήτριας Γ_2 συνδέεται μέ τόν ἀρνητικό πόλο τῆς γεννήτριας Γ_1 . Ὄταν ἡ κάθοδος Κ ἔχει τή θερμοκρασία τοῦ περιβάλλοντος στό κύκλωμα τῆς ἀνόδου Α δέν κυκλοφορεῖ ρεῦμα. Ὄταν ὅμως ἡ κάθοδος Κ, διαπυρωθεῖ καί μεταξύ τῆς ἀνόδου Α καί τῆς καθόδου Κ ὑπάρχει θετική τάση U_A (ἀνοδική τάση), τότε στό κύκλωμα τῆς ἀνόδου κυκλοφορεῖ ρεῦμα (ἀνοδικό ρεῦμα). Αὐτό δείχνει ὅτι τό κενό ἔχει ἀποκτήσει ἀγωγιμότητα, πού ὀφείλεται στά ἠλεκτρόνια πού ἐκπέμπει ἡ διάπυρη κάθοδος. Τά ἠλεκτρόνια μέ τήν επίδραση τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου κινοῦνται μέσα στό κενό, φτάνουν στήν ἄνοδο καί ἔτσι κλείνει τό κύκλωμα τῆς ἀνόδου.

Μέσα στό σωλήνα τό ἀνοδικό ρεῦμα ἔχει συμβατική φορά ἀπό τήν πλάκα Α πρὸς τό σύρμα Κ καί γι' αὐτό ἡ πλάκα ὀνομάζεται ἄνοδος καί τό σύρμα κάθοδος. Ἐπειδή μέσα στό σωλήνα ὑπάρχουν δύο ἠλεκτροδία (ἡ ἄνοδος Α καί ἡ κάθοδος Κ), γι' αὐτό ὁ σωλήνας ὀνομάζεται δίοδη ἠλεκτρονική λυχνία ἢ καί ἀπλά δίοδη. Στήν πράξη ἡ ἄνοδος εἶναι ἕνας κύλινδρος πού ὡς ἄξονά του ἔχει τό σύρμα τῆς καθόδου. Ἀπό τά παραπάνω βγάζουμε τό ἑξῆς συμπέρασμα:

Στή δίοδη ἠλεκτρονική λυχνία τό ρεῦμα περνάει, μόνο ὅταν ἡ ἀνοδική τάση εἶναι θετική ($U_A > 0$).

Ἄν διακόψουμε τή σύνδεση τῆς ἀνόδου Α μέ τή γεννήτρια Γ_2 , τό ἀνοδικό ρεῦμα καταργεῖται. Ἀπό τό διάπυρο σύρμα ἐξακολουθοῦν νά βγαίνουν ἠλεκτρόνια καί τότε τό σύρμα ἀρχίζει νά ἀποκτᾷ θετικό φορτίο. Τά ἠλεκτρόνια πού βγαίνουν ἀπό τό σύρμα σχηματίζουν γύρω του ἕνα « σύννεφο ἠλεκτρονίων » καί ἔτσι μεταξύ τοῦ σύρματος καί τοῦ σύννεφου ἠλεκτρονίων δημιουργεῖται ἠλεκτρικό πεδίο. Τότε ὅσα ἠλεκτρόνια βγαίνουν ἀπό τό σύρμα μέσα σέ χρόνο Δt , τόσα ἀκριβῶς ἠλεκτρόνια μέσα στόν ἴδιο χρόνο ξαναγυρίζουν στό σύρμα. Τέτοια π.χ. ἰσορροπία ἐπικρατεῖ στό περιβάλλον τοῦ διάπυρου σύρματος ἕνός λαμπτήρα πυρακτώσεως.

β. Ἡ ἔνταση τοῦ ἀνοδικοῦ ρεύματος. Διατηροῦμε σταθερή τή θερμοκρασία τῆς καθόδου. Ὄταν αὐξάνουμε προοδευτικά τήν ἀνοδική τάση (U_A), συνεχῶς αὐξάνει καί ἡ ἔνταση (I_A) τοῦ ἀνοδικοῦ ρεύμα-

τος, ἄρα συνεχῶς αὐξάνει ὁ ἀριθμὸς τῶν ἠλεκτρονίων πού φτάνουν στήν ἄνοδο. Καί ὅταν ἡ ἀνοδική τάση ἀποκτήσει μιὰ ὀρισμένη τιμή, ὅλα τὰ ἠλεκτρόνια πού βγαίνουν ἀπό τό σύρμα φτάνουν στήν ἄνοδο καί τότε ἡ ἔνταση τοῦ ἀνοδικοῦ ρεύματος παίρνει τή μέγιστη δυνατή τιμή της, πού ὀνομάζεται *ρεῦμα κόρου*.

* Ἄν αὐξάνουμε προοδευτικά τή θερμοκρασία τοῦ σύρματος (*), βρίσκουμε ὅτι αὐξάνει καί τό ρεῦμα κόρου. Ἄρα, ὅταν ὑψώνεται ἡ θερμοκρασία τοῦ σύρματος, αὐξάνει ὁ ἀριθμὸς τῶν ἠλεκτρονίων πού βγαίνουν ἀπό τό σύρμα. Πειραματικῶς βρίσκουμε ὅτι μικρὴ αὐξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ σύρματος προκαλεῖ σημαντικὴ αὐξηση τοῦ ρεύματος κόρου. Ἄπό τὰ παραπάνω καταλήγουμε στὰ ἐξῆς συμπεράσματα:

I. Ἡ ἔνταση τοῦ ἀνοδικοῦ ρεύματος μπορεῖ νά λάβει μιὰ ὀρισμένη μέγιστη τιμή (ρεῦμα κόρου), πού ἐξαρτᾶται ἀπὸ τή θερμοκρασία τῆς καθόδου καί ἀπὸ τήν ἀνοδική τάση.

II. Ὁ ἀριθμὸς τῶν ἠλεκτρονίων πού σέ μιὰ μονάδα χρόνου βγαίνουν ἀπὸ τό διάπυρο σύρμα αὐξάνει μέ τή θερμοκρασία τοῦ σύρματος.

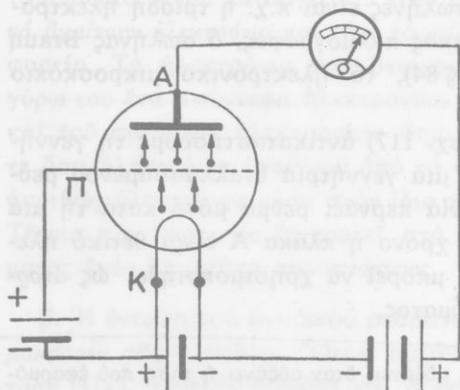
γ. Ἐφαρμογές τοῦ θερμοηλεκτρονικοῦ φαινομένου. Τό θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο ἔχει σημαντικές ἐφαρμογές. Πολλές συσκευές, πού γενικά ὀνομάζονται *ἠλεκτρονικοί σωληνες*, εἶναι ἀερόκενοι σωληνες στοὺς ὁποίους παράγονται ἠλεκτρόνια ἀπὸ μιὰ *διαπυρωμένη κάθοδο*. Τέτοιοι ἠλεκτρονικοί σωληνες εἶναι π.χ. ἡ τρίοδη ἠλεκτρονικὴ λυχνία (§ 82), ὁ ἠλεκτρονικός παλμογράφος, ὁ σωλήνας Braun (§ 83), ὁ σωλήνας Coolidge (§ 84), τὸ ἠλεκτρονικὸ μικροσκόπιο (§ 88) κ.ἄ.

* Ἄν στὸ ἀνοδικὸ κύκλωμα (σχ. 117) ἀντικαταστήσουμε τή γεννήτρια συνεχοῦς ρεύματος Γ_2 μέ μιὰ γεννήτρια ἐναλλασσόμενου ρεύματος, τότε ἀπὸ τή δίοδη λυχνία περνάει ρεῦμα μόνο κατὰ τή μιὰ ἡμιπερίοδο ($T/2$), δηλαδή ὅσο χρόνο ἡ πλάκα A εἶναι θετικὸ ἠλεκτρόδιο. Ὡστε ἡ δίοδη λυχνία μπορεῖ νά χρησιμοποιηθεῖ ὡς ἀνορθωτῆς τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος.

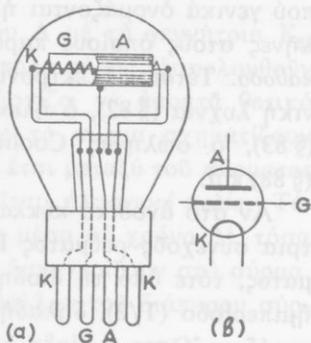
(*) Ἡ θερμοκρασία τοῦ σύρματος αὐξάνει, ὅταν αὐξάνει ἡ τάση πού ἐφαρμόζεται στὸ σύρμα.

182. Τρίοδη ηλεκτρονική λυχνία

Ἡ τρίοδη ηλεκτρονική λυχνία ἢ ἀπλά τρίοδη (σχ. 118) εἶναι μιά δίοδη λυχνία στήν ὁποία μεταξύ τῆς ἀνόδου (A) καί τῆς καθόδου (K) ἔχει προστεθεῖ ἕνα τρίτο ηλεκτρόδιο πού ὀνομάζεται πλέγμα (Π). Αὐτό συνήθως ἀποτελεῖται ἀπό σύρμα πού μέ τή μορφή σωληνοειδοῦς περιβάλλει τήν κάθοδο (σχ. 119). Ἡ ἄνοδος ἔχει σχῆμα κυλίνδρου καί περιβάλλει τό πλέγμα. Μεταξύ τῆς ἀνόδου καί τῆς καθόδου ὑπάρχει ἡ τάση ἀνόδου (U_A), ἡ ὁποία δημιουργεῖ ἠλεκτρικό πεδίο. Ἄν συνδέσουμε τό πλέγμα μέ τό θετικό πόλο μιᾶς γεννήτριας, ὥστε τό δυναμικό τοῦ πλέγματος νά εἶναι θετικό σχετικά μέ τό δυναμικό τῆς καθόδου, τότε τά ηλεκτρόνια πού βγαίνουν ἀπό τήν κάθοδο ἔλκονται ἀπό τήν ἄνοδο καί ἀπό τό πλέγμα καί ἔτσι τό ἀνοδικό ρεῦμα ἐνισχύεται. Ἀντίθετα, ἂν συνδέσουμε τό πλέγμα μέ τόν ἀρνητικό πόλο τῆς γεννήτριας, ὥστε τό δυναμικό τοῦ πλέγματος νά εἶναι ἀρνητικό σχετικά μέ τό δυναμικό τῆς καθόδου, τότε τά ηλεκτρόνια πού βγαίνουν ἀπό τήν κάθοδο ἀπωθοῦνται ἀπό τό πλέγμα καί τό ἀνοδικό ρεῦμα ἐξασθενεῖ ἢ καί καταργεῖται τελείως. Ἐτσι μεταξύ τοῦ πλέγματος καί τῆς καθόδου δημιουργοῦμε τήν τάση πλέγματος (U_G), ἡ ὁποία δημιουργεῖ ἕνα ἠλεκτρικό πεδίο. Οἱ μεταβολές τῆς τάσεως τοῦ πλέγματος προκαλοῦν ἀντίστοιχες μεταβολές στήν ένταση τοῦ ἀνοδικοῦ ρεύματος. Αὐτή τήν ιδιότητα τῆς τρίοδης λυχνίας ἐκμεταλ-



Σχ. 118. Τρίοδη ηλεκτρονική λυχνία



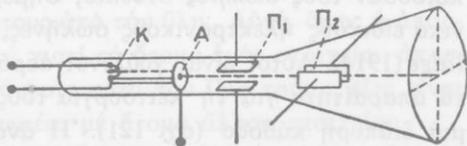
Σχ. 119. Τομή τῆς τρίοδης λυχνίας καί συμβολική παράστασή της (K κάθοδος, G πλέγμα, A ἄνοδος)

λευόμαστε 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 τών ηλεκτροδίων ονομάζονται τετράοδες (μέ δύο πλέγματα), πεντάοδες (μέ τρία πλέγματα) κ.ο.κ. Τά τελευταία χρόνια σέ πολλές εφαρμογές αντί γιά τίς τρίοδες λυχνίες χρησιμοποιούμε τούς *τρανζίστορ*, πού ή λειτουργία τους στηρίζεται στίς ιδιότητες τών ήμιαγωγών.

83. Σωλήνας Braun

Μιά πολύ ένδιαφέρουσα μορφή ηλεκτρονικού σωλήνα είναι ό **σωλήνας Braun** (σχ. 120). Αυτός είναι αερόκενος σωλήνας, πού στή μιά άκρη έχει κάθοδο πού διαπυρώνεται καί στήν άλλη άκρη έχει κυκλικό διάφραγμα πού φθορίζει. Η άνοδος είναι ένας δίσκος πού στή μέση του έχει μιά μικρή τρύπα. Έτσι δημιουργείται μιά λεπτή δέσμη καθοδικών ακτίνων, ή όποία σχηματίζει ένα φωτεινό σημείο στό κέντρο του κυκλικού διαφράγματος. Όλα τά ηλεκτρόνια τής δέσμης έχουν τήν ίδια ταχύτητα. Μέσα στό σωλήνα υπάρχουν δύο πυκνωτές πού οί όπλισμοί τους είναι κάθετοι μεταξύ τους. Έτσι ή καθοδική δέσμη περνάει διαδοχικά μέσα από δύο *ηλεκτρικά πεδία* πού οί έντάσεις τους είναι κάθετες μεταξύ τους.

Όταν οί δύο πυκνωτές είναι αφόρτιστοι, ή καθοδική δέσμη είναι εϋθύγραμμη. Αν στόν πρώτο πυκνωτή Π_1 εφαρμόσουμε μιά συνεχή τάση (U_1), τότε μεταξύ τών όπλισμών του δημιουργείται κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο, πού προκαλεί *κατακόρυφη έκτροπή* τής καθοδικής δέσμης καί επομένως προκαλεί *μετακίνηση* του φωτεινού σημείου πάνω στήν *κατακόρυφη* διάμετρο του κυκλικού διαφράγματος. Αν μόνο στό δεύτερο πυκνωτή Π_2 εφαρμόσουμε μιά συνεχή τάση (U_2), τότε μεταξύ τών όπλισμών του σχηματίζεται *οριζόντιο* ηλεκτρικό πεδίο, πού προκαλεί *οριζόντια έκτροπή* τής καθοδικής δέσμης καί επομένως προκαλεί *μετακίνηση* του φωτεινού σημείου



Σχ. 120. Σωλήνας Braun (K διάπυρη κάθοδος, A άνοδος, Π_1 καί Π_2 πυκνωτές)

πάνω στην οριζόντια 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. Άν σ' αυτούς εφαρμόσουμε ταυτόχρονα τις τάσεις U_1 και U_2 , τότε εξαιτίας των δύο έκτροπων της καθοδικής δέσμης τό φωτεινό σημείο σχηματίζεται σε μία ορισμένη θέση της επιφάνειας του κυκλικού διαφράγματος. Ωστε μεταβάλλοντας τις τάσεις U_1 και U_2 μπορούμε νά μετακινούμε τό φωτεινό σημείο πάνω σε όλο τό διάφραγμα. Η δέσμη των ηλεκτρονίων δέν παρουσιάζει καμιά αδράνεια και επομένως μπορεί νά παρακολουθηί τις ταχύτατες μεταβολές της εναλλασσόμενης τάσεως πού συνήθως εφαρμόζουμε στους δύο πυκνωτές. Έτσι τό φωτεινό σημείο μπορεί νά μετακινείται ταχύτατα σε όλη τήν έκταση του διαφράγματος πού φθορίζει. Ο σωλήνας Braun έχει σήμερα σημαντικές εφαρμογές, π.χ. στον ηλεκτρονικό παλμογράφο, στην τηλεόραση, στό ραντάρ κ.ά.

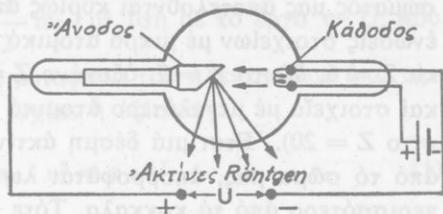
84. Άκτίνες Röntgen

α. Παραγωγή των ακτίνων Röntgen. Ο Röntgen (1895) μελετώντας τις καθοδικές ακτίνες ανακάλυψε ότι τά τοιχώματα του γυάλινου σωλήνα πού βρίσκονται απέναντι από τήν κάθοδο εκπέμπουν μία άόρατη και πολύ διεισδυτική ακτινοβολία, πού ονομάζεται ακτίνες Röntgen ή και ακτίνες X. Έτσι ανακαλύφθηκε ότι:

Οι ακτίνες Röntgen παράγονται, όταν ηλεκτρόνια πού κινούνται με μεγάλη ταχύτητα πέφτουν πάνω σε ένα στόχο.

Γιά τήν παραγωγή των ακτίνων Röntgen στην αρχή χρησιμοποιούσαν τους σωλήνες Crookes, σήμερα όμως χρησιμοποιούμε γενικά ειδικούς ηλεκτρονικούς σωλήνες, πού ονομάζονται σωλήνες Coolidge (1914). Αυτοί είναι γυάλινοι αερόκενοι σωλήνες, στους οποίους τά απαραίτητα για τή λειτουργία τους ηλεκτρόνια παράγονται από μία διάπυρη κάθοδο (σχ. 121). Η άνοδος πού ειδικότερα ονομάζεται αντικάθοδος, αποτελείται από ένα δύστηκτο μέταλλο (συνήθως βολφράμιο). Μεταξύ της αντικαθόδου και της καθόδου εφαρμόζεται

ψηλή συνεχής τάση (10 ως 300 kV), η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η διάπυρη κάθοδος. Οι ακτίνες Röntgen που παράγονται από την αντικάθοδο εκπέμπονται προς όλες τις διευθύνσεις.



Σχ. 121. Σωλήνας Coolidge για την παραγωγή ακτίνων Röntgen

β. Ιδιότητες τών ακτίνων

Röntgen. Πειραματικώς βρίσκουμε ότι οι ακτίνες Röntgen έχουν τις εξής ιδιότητες:

1. Προκαλούν τό φθορισμό μερικῶν σωμάτων, (π.χ. τοῦ κυανιούχου βαριολευκόχρυσου, τοῦ θειούχου ψευδαργύρου).

2. Προσβάλλουν τή φωτογραφική πλάκα καί προκαλούν χημικά φαινόμενα, π.χ. ἀλλάζουν τό χρώμα μερικῶν πολύτιμων λίθων, γιατί προκαλούν ἀλλαγές στή δομή τοῦ μορίου τοῦ σώματος.

3. Προκαλούν ἰσχυρό ἰονισμό τῶν ἀερίων καί γι' αὐτό ἕνα φορτισμένο ἠλεκτροσκόπιο, ὅταν βρίσκεται κοντά σέ μιά πηγή ακτίνων Röntgen, ἐκφορτίζεται πολύ γρήγορα.

4. Διαδίδονται εὐθύγραμμα, δέν ἐκτρέπονται ἀπό μαγνητικό ἢ ἠλεκτρικό πεδίο καί ἐπομένως δέ μεταφέρουν ἠλεκτρικό φορτίο.

5. Προκαλοῦν εὐκολα τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή τήν ἔξοδο ἠλεκτρονίων ἀπό διάφορα μέταλλα.

6. Ἐπιδρουν στά κύτταρα τῶν ζωντανῶν ὀργανισμῶν καί προκαλοῦν διάφορες βιολογικές δράσεις.

7. Ἐχουν μεγάλη διεισδυτική ἰκανότητα 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 ακτίνες Röntgen, περνοῦν μέσα ἀπό τήν ὕλη, πάντοτε συμβαίνει κάποια ἀπορρόφησή τους ἀπό τήν ὕλη. Αὐτή ὅμως ἡ ἀπορρόφηση εἶναι ἰδιότητα ἀτομική, γιατί τά ἄτομα ἑνός στοιχείου ἀπορροφῶν τίς ακτίνες Röntgen πάντοτε κατά τόν ἴδιο τρόπο, εἴτε εἶναι μονωμένα ἄτομα, εἴτε εἶναι ἐνωμένα μέ ἄτομα ἄλλου στοιχείου.

9. Ἡ ἀπορρόφηση τῶν ακτίνων Röntgen αὐξάνει πολύ γρήγορα, ὅταν αὐξάνει ὁ ἀτομικός ἀριθμός (Z) τοῦ στοιχείου. Οἱ σάρκες τοῦ

σώματός μας αποτελούνται κυρίως από λευκώματα, πού είναι χημικές ενώσεις στοιχείων με μικρό άτομικό αριθμό (υδρογόνο $Z = 1$, άνθρακα $Z = 6$, άζωτο $Z = 7$, οξυγόνο $Z = 8$), ενώ τά κόκκαλα περιέχουν καί στοιχεΐα με μεγαλύτερο άτομικό αριθμό (φωσφόρο $Z = 15$, ασβέστιο $Z = 20$). Έτσι μιά δέσμη ακτίνων Röntgen, όταν περνάει μέσα από τό σῶμα μας, απορροφάται λιγότερο από τίς σάρκες καί πολύ περισσότερο από τά κόκκαλα. Τότε πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει ή στή φωτογραφική πλάκα τά κόκκαλα σχηματίζουν σκιά.

10. Σέ μιά πλάκα με όρισμένο πάχος (π.χ. σέ μιά πλάκα μολύβδου) ή απορρόφηση τῶν ακτίνων Röntgen αυξάνει, όταν αυξάνει τό μήκος κύματος (λ). Έτσι οί ακτίνες Röntgen πού έχουν πολύ μικρά μήκη κύματος είναι περισσότερο διεισδυτικές καί ονομάζονται σκληρές, ενώ εκείνες πού έχουν μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι λιγότερο διεισδυτικές καί ονομάζονται μαλακές. Όσο μεγαλύτερη γίνεται ή τάση πού εφαρμόζεται μεταξύ τῆς αντικαθόδου καί τῆς καθόδου, τόσο μικρότερο γίνεται τό μήκος κύματος τῶν ακτίνων Röntgen.

γ. Φύση τῶν ακτίνων Röntgen. Πειραματικῶς αποδείχτηκε ότι μιά λεπτή δέσμη ακτίνων Röntgen, όταν πέφτει πάνω σέ έναν κρύσταλλο, δίνει πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει φαινόμενα περιθλάσεως, ὅμοια με εκείνα πού δίνει μιά λεπτή μονοχρωματική δέσμη φωτός, όταν πέφτει σέ φράγμα περιθλάσεως. Γενικά αποδείχτηκε ότι:

Οί ακτίνες Röntgen είναι ὁρατή ηλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία, πού έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τά μήκη κύματος τῆς ὑπεριώδους ἀκτινοβολίας.

Σημείωση. Τά μήκη κύματος είναι:

τῶν ὁρατῶν ἀκτινοβολιῶν	ἀπό	7500 Å	ὄς	4000 Å
τῶν ἀκτίνων Röntgen	ἀπό	20 Å	ὄς	0,05 Å

Παρατηροῦμε ότι τά μήκη κύματος τῶν ακτίνων Röntgen είναι πολύ μικρά σχετικά με τά μήκη κύματος τῶν ὁρατῶν ἀκτινοβολιῶν.

δ. Μηχανισμός τῆς παραγωγῆς τῶν ακτίνων Röntgen. Ένα ἠλεκτρόνιο, πού έχει μάζα m_e καί φορτίο κατ' ἀπόλυτη τιμή ἴσο με e , βγαίνει από τή διάπυρη κάθοδο. Έπειδή μεταξύ τῆς αντικαθόδου καί τῆς καθόδου εφαρμόζεται τάση U , τό ἠλεκτρόνιο ἐπιταχύνεται καί

ἀποκτᾶ κινητική ἐνέργεια $E = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$ ἴση μέ τό ἔργο $e \cdot U$, πού παράγεται ἀπό τό πεδίο κατά τή μεταφορά τοῦ ἠλεκτρονίου ἀπό τήν κάθοδο στήν ἀντικάθοδο. Ἄρα ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$E = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = e \cdot U \quad (1)$$

Στίς περισσότερες περιπτώσεις, ὅταν τό ἠλεκτρόνιο συγκρούεται μέ τήν ἀντικάθοδο, ἡ κινητική ἐνέργεια τοῦ ἠλεκτρονίου μετατρέπεται σέ θερμότητα καί γι' αὐτό ἡ ἀντικάθοδος θερμαίνεται πολύ. Σέ μερικές ὅμως περιπτώσεις μέρος ἢ καί ὅλη ἡ κινητική ἐνέργεια τοῦ ἠλεκτρονίου ἀπορροφᾶται ἀπό ἓνα ἄτομο τοῦ μετάλλου τῆς ἀντικαθόδου. Τότε τό ἄτομο ἀποκτᾶ μιᾶ ἀσταθῆ κατάσταση διεγέρσεως, ἀλλά ἀμέσως ξαναγυρίζει στή σταθερή ἀρχική κατάστασή του, ἀποβάλλοντας μέ τή μορφή ἐνός φωτονίου συχνότητας ν τήν ἐνέργεια πού πήρε ἀπό τό ἠλεκτρόνιο. Ἄν ὅλη ἡ κινητική ἐνέργεια τοῦ ἠλεκτρονίου μετατραπῆ σέ ἐνέργεια ἐνός φωτονίου Röntgen, τότε ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h \cdot \nu \quad (2)$$

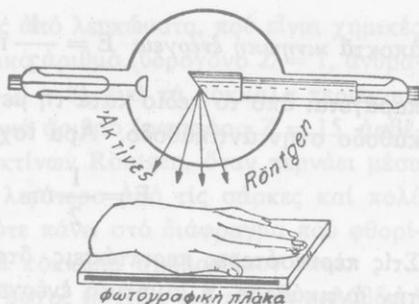
Ἄπό τίς ἐξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε

$$h \cdot \nu = e \cdot U \quad \text{ἢ} \quad h \cdot \frac{c}{\lambda} = e \cdot U \quad \text{καί} \quad \lambda = \frac{h \cdot c}{e \cdot U} \quad (3)$$

Ἡ ἐξίσωση (3) δείχνει ὅτι μεταβάλλοντας τήν τάση U μπορούμε νά ἔχουμε ἀκτίνες Röntgen μέ τό μήκος κύματος (λ) πού θέλουμε. Ἄν μόνο ἓνα μέρος τῆς κινητικῆς ἐνέργειας τοῦ ἠλεκτρονίου μεταβληθῆ σέ ἐνέργεια ἐνός φωτονίου, τότε τό μήκος κύματος τῶν ἀκτίνων Röntgen εἶναι μεγαλύτερο ἀπό ἐκεῖνο πού ὀρίζει ἡ ἐξίσωση (3).

ε. Ἐφαρμογές τῶν ἀκτίνων Röntgen. Οἱ ιδιότητες τῆς ἀπορροφῆσεως τῶν ἀκτίνων Röntgen ἀπό τήν ὕλη ἔχουν σήμερα μεγάλη ἐφαρμογή στήν Ἱατρική, γιατί οἱ ἱστοί τοῦ σώματός μας, πού ἀποτελοῦνται ἀπό στοιχεῖα μέ μικρό ἀτομικό ἀριθμό (H, C, N, O), προκαλοῦν μικρή ἀπορρόφηση, ἐνώ ὁ ὀστεώδης ἱστός, πού περιέχει στοιχεῖα μέ μεγαλύτερο ἀτομικό ἀριθμό (P, Ca), προκαλεῖ μεγαλύτερη ἀπορρόφηση. Σ' αὐτή τήν ἀρχή στηρίζεται ἡ ἀκτινοσκόπηση καί ἡ ἀκτι-

νογραφία. Κατά την ακτινοσκόπηση παρατηρούμε τīs σκιές πού σχηματίζονται πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει, ένῶ κατά τήν ακτινογραφία οί σκιές αποτυπώνονται πάνω σέ φωτογραφική πλάκα (σχ. 122). Μέ τήν ακτινοσκόπηση καί τήν ακτινογραφία γίνεται σήμερα ἡ διάγνωση πολλῶν παθήσεων (π.χ. ἀλλοιώσεις στά κόκκαλα, κατάγματα, φυματίωση κ.ἄ.).



Σχ. 122. Ἀκτινογραφία

Γιά τή διάγνωση παθήσεων τοῦ πεπτικού ἢ τοῦ οὔροποιητικοῦ συστήματος εἰσάγουμε μέσα σ' αὐτά τά συστήματα ἐνώσεις στοιχείων μέ μεγάλο ἀτομικό ἀριθμό (π.χ. ἐνώσεις βισμούθιου $Z = 83$, βαρίου $Z = 56$, ιωδίου $Z = 53$ κλπ.). Ἐπειδή οί ἀκτίνες Röntgen ἀσκοῦν βιολογικές δράσεις στά κύτταρα, γι' αὐτό χρησιμοποιοῦνται καί γιά θεραπευτικούς σκοπούς (ἀκτινοθεραπεία). Γενικά οί ἐφαρμογές τῶν ἀκτίνων Röntgen στήν Ἱατρική ἀποτελοῦν ἕναν ἰδιαίτερο κλάδο πού ὀνομάζεται Ἀκτινολογία.

Οί πολύ σκληρές ἀκτίνες Röntgen χρησιμοποιοῦνται στή *μεταλλουργία*. Μέ αὐτές ἐλέγχουμε τήν ὁμοιογένεια καί τή συνέχεια τοῦ μεταλλικοῦ ὑλικοῦ καί βρίσκουμε ἄν ὑπάρχουν κενοί χῶροι μέσα στό ὑλικό ἢ ἄν εἶναι τέλειες οί μεταλλικές συγκολλήσεις.

Οί ἀκτίνες Röntgen παίζουν σπουδαῖο ρόλο στή μελέτη τῆς δομῆς τῶν κρυστάλλων (*Κρυσταλλογραφία*).

στ. Φυσιολογικό ἀποτέλεσμα τῶν ἀκτίνων Röntgen. Ὄταν ἡ προσβολή τοῦ ὄργανισμοῦ μέ ἀκτίνες Röntgen εἶναι σύντομη, τότε εἶναι ἀκίνδυνη. Ὄταν ὅμως ἡ προσβολή διαρκεῖ πολύ χρόνο, τότε προκαλοῦνται στόν ὄργανισμό σοβαρές βλάβες (π.χ. ἐλάττωση τῶν ἐρυθρῶν αἰμοσφαιρίων, ἐπικίνδυνα τραύματα, πού μπορεῖ νά ὀδηγήσουν σέ ἀκρωτηριασμούς ἢ καί στό θάνατο). Τά ἀποτελέσματα τῆς δράσεως τῶν ἀκτίνων Röntgen πάνω στόν ὄργανισμό εἶναι *ἀθροιστικά*, δηλαδή τά ἀποτελέσματα τά ὁποῖα προκαλοῦν οί ἀκτίνες Röntgen πάνω στά κύτταρα δέν ἐξασθενίζουν μέ τό πέρασμα τοῦ χρόνου, ἀλλά προσθέτονται στά ἀποτελέσματα τῶν ἐπόμενων ἀκτίνων Rönt-

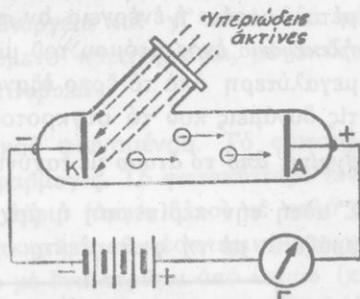
gen. Βρέθηκε ότι ο ανθρώπινος οργανισμός σε όλη τη διάρκεια της ζωής του δεν πρέπει να ξεπεράσει μία ορισμένη δόση ακτινοβολίας Röntgen. Όσοι ασχολούνται με ακτίνες Röntgen προστατεύονται με διάφορους τρόπους (π.χ. σκεπάζουν το σώμα τους και τα χέρια τους με κάλυμμα από καουτσούκ που είναι εμπλουτισμένο με μόλυβδο και φορούν γυαλιά από γυαλί που περιέχει πυριτικό μόλυβδο).

85. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

α. Πειραματική απόδειξη. Ένας αερόκενος γυάλινος σωλήνας έχει άνοιγμα που κλείνεται με γυαλί από χαλαζία, ο οποίος είναι διαφανής στις υπεριώδεις ακτίνες (σχ. 123). Μέσα στο σωλήνα υπάρχουν δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, ή άνοδος (A) και η κάθοδος (K), που συνδέονται με τους δύο πόλους μίας γεννήτριας. Στο κύκλωμα υπάρχει και ευαίσθητο αμπερόμετρο (μικροαμπερόμετρο). Όταν πάνω στην κάθοδο πέσουν υπεριώδεις ακτίνες, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Αυτό συμβαίνει, γιατί από την κάθοδο αποσπώνται ηλεκτρόνια, τα οποία με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου έρχονται στην άνοδο και έτσι κλείνει το κύκλωμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**. Τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται από το μέταλλο της καθόδου ονομάζονται **φωτοηλεκτρόνια** και το ρεύμα που κυκλοφορεί στο κύκλωμα ονομάζεται **φωτοηλεκτρικό ρεύμα**. Ωστε:

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται ή απόσπαση ηλεκτρονίων από τα μέταλλα, όταν πέφτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ορατή ή υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες Röntgen ή γ).

β. Εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Ξέρουμε ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος λ μίας ηλεκτρομαγνητικής ακτι-



Σχ. 123. Από το μέταλλο της καθόδου K βγαίνουν ηλεκτρόνια.

νοβολίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητά της ν (γιατί είναι $\nu = c/\lambda$) και, επομένως, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια $E = h\nu$ που μεταφέρει κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας. Για να εξηγήσουμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κάνουμε τα εξής πειράματα:

1. Πάνω στην κάθοδο, που αποτελείται από ορισμένο μέταλλο, π.χ. από λευκόχρυσο, αφήνουμε να πέσουν διαδοχικά ακτινοβολίες με διαρκώς μεγαλύτερη συχνότητα ν . Παρατηρούμε ότι από το μέταλλο αρχίζουν να αποσπώνται φωτοηλεκτρόνια, όταν η συχνότητα ν της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στο μέταλλο γίνει ίση ή μεγαλύτερη από μία όριση συχνότητα ν_{0p} , που είναι χαρακτηριστική για το θεωρούμενο μέταλλο. Αυτό δείχνει ότι από το μέταλλο αποσπώνται φωτοηλεκτρόνια, μόνο όταν κάθε φωτόνιο, που πέφτει πάνω στο μέταλλο, έχει ενέργεια E ίση ή μεγαλύτερη από μία όριση τιμή, που είναι ίση με $E_{0p} = h\nu_{0p}$.

2. Πάνω στην κάθοδο αφήνουμε να πέσει μονοχρωματική ακτινοβολία που έχει συχνότητα ν μεγαλύτερη από την όριση συχνότητα ν_{0p} ($\nu > \nu_{0p}$). Τότε από την κάθοδο αποσπώνται φωτοηλεκτρόνια. Όταν αυξήσουμε τη φωτεινή ροή, δηλαδή τον αριθμό των φωτονίων, που πέφτουν πάνω στο μέταλλο, αυξάνει η ένταση I του φωτοηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αποσπώνται από το μέταλλο.

Τά παραπάνω πειράματα δείχνουν ότι για να αποσπαστεί ένα ηλεκτρόνιο από ένα άτομο της επιφάνειας του μετάλλου, πρέπει να απαιτηθεί ορισμένο έργο b , που ονομάζεται έργο εξαγωγής και εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου. Όταν ένα φωτόνιο πέφτει πάνω στο μέταλλο, τότε η ενέργεια $h\nu$ του φωτονίου απορροφάται μόνο από ένα ηλεκτρόνιο ενός ατόμου του μετάλλου. Αν αυτή η ενέργεια $h\nu$ είναι μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής b , τότε το ηλεκτρόνιο υπερνικαίτις δυνάμεις που το συγκροτούν μέσα στο άτομο και το ηλεκτρόνιο βγαίνει από το άτομο με ταχύτητα v και κινητική ενέργεια $\frac{1}{2} m_e v^2$.

Σ' αυτή την περίπτωση η αρχή της διατήρησης της ενέργειας εκφράζεται με τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein:

$$\text{φωτοηλεκτρική εξίσωση} \quad \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h \cdot \nu - b$$

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 ἕνα μέταλλο εἶναι δυνατή, μόνο ὅταν ἡ ἐνέργεια $h\nu$ τοῦ φωτονίου πού πέφτει πάνω στό μέταλλο εἶναι ἴση ἢ μεγαλύτερη ἀπό τό ἔργο ἐξαγωγῆς b , πού εἶναι χαρακτηριστικό γιά τό μέταλλο τῆς καθόδου.

$$\text{ἀπόσπαση φωτοηλεκτρονίου } h\nu \geq b$$

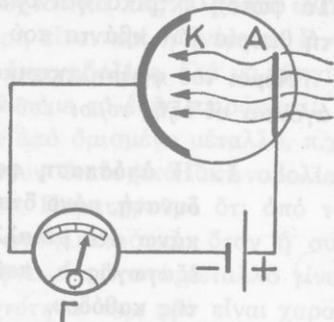
II. Ὁ ἀριθμός τῶν φωτοηλεκτρονίων πού ἀποσπῶνται ἀπό τήν κάθοδο κατά μονάδα χρόνου εἶναι ἀνάλογος μέ τόν ἀριθμό τῶν φωτονίων πού πέφτουν πάνω στήν κάθοδο κατά μονάδα χρόνου.

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 ἔργο ἐξαγωγῆς 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 ὑπεριώδεις ἀκτινοβολίες.

γ. Ἐφαρμογές τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου. Τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ἔχει σημαντικές ἐφαρμογές. Τό φωτοκύτταρο εἶναι γυάλινος σωλήνας πού περιέχει ἕνα ἀέριο (ἀργό, ἥλιο) μέ πολύ μικρή πίεση (περίπου 0,1 mm Hg). Ἐνα τμήμα τῶν ἐσωτερικῶν τοιχωμάτων τοῦ σωλήνα εἶναι σκεπασμένο μέ ἕνα στρώμα ἀπό καίσιο (κάθοδος) πού εἶναι εὐαίσθητο στίς ὁρατές ἀκτινοβολίες (σχ. 124). Ἡ ἄνοδος ἀποτελεῖται ἀπό εὐθύγραμμο ἢ κυκλικό ἤλεκτροδιο. Ἡ ἐν-

ταση 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 έντασης του ρεύματος. Το φωτοκύτταρο δέν παρουσιάζει καμιά αδράνεια και γι' αυτό η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλεται την ίδια στιγμή που συμβαίνει ή μεταβολή της φωτεινής ροής.



Σχ. 124. Φωτοκύτταρο

Σήμερα τά φωτοκύτταρα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, π.χ. για τόν αυτόματο έλεγχο και τη ρύθμιση της λειτουργίας μηχανών, για τη ρύθμιση της κυκλοφορίας δχημάτων, σε συστήματα άσφαλείας χρηματοκιβωτίων, στόν ήχητικό κινηματογράφο κ.ά.

Ένα φωτοκύτταρο ειδικής μορφής είναι ο φωτοπολλαπλασιαστής, ό οποίος πολλαπλασιάζει τά λίγα φωτοηλεκτρόνια που αρχικά βγαίνουν από την κάθοδο (σε κάθε ένα φωτοηλεκτρόνιο που βγαίνει από την κάθοδο αντίστοιχούν 10^8 ως 10^9 ηλεκτρόνια που φτάνουν στην άνοδο).

86. Ήχητικός κινηματογράφος

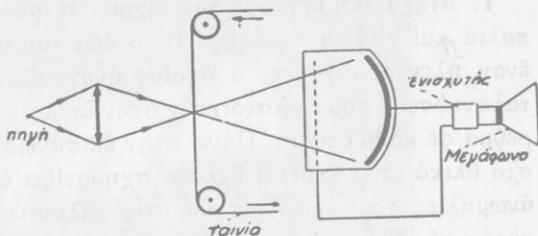
Στόν ήχητικό κινηματογράφο πάνω στην κινηματογραφική ταινία άποτυπώνονται ταυτόχρονα οι εικόνες και οι ήχοι. Ή άποτύπωση τών εικόνων βασίζεται στις μεθόδους της φωτογραφίας. Ή άποτύπωση τών ήχων πάνω στην κινηματογραφική ταινία ονομάζεται ήχοληψία και γίνεται με την έξης σειρά μετατροπών:

ήχος \rightarrow ηλεκτρικό ρεύμα \rightarrow φώς

Ή 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 άπλουστερος είναι ό έξης: Τό ρεύμα του μικροφώνου περνάει από μιά ειδική λυχνία αήγλης, ή όποία σε κάθε στιγμή παράγει φωτεινή ροή ανάλογη με την ένταση



Σχ. 125. Καταγραφή του ήχου πάνω στην κινηματογραφική ταινία (οι ζώνες με τό διαφορετικό μαύρισμα αντίστοιχούν σέ ήχους).



Σχ. 126. Σχηματική διάταξη για τήν αναπαραγωγή του ήχου από τήν κινηματογραφική ταινία

του μικροφωνικού ρεύματος. Οί μεταβολές τής φωτεινής ροής αποτυπώνονται πάνω σέ φωτογραφική ταινία πού ξετυλίγεται όμαλά (σχ. 125). Έτσι πάνω στήν ταινία αποτυπώνονται περιοχές πού παρουσιάζουν διαφορετικό μαύρισμα (όπτική έγγραφή τών ήχων). Αυτές οί περιοχές αποτυπώνονται δίπλα από τίσ αντίστοιχες εικόνες.

Όταν γίνεται προβολή τής ταινίας, οί εικόνες φωτίζονται από τόν προβολέα καί προβάλλονται στήν όθόνη. Ό ήχος πού είναι αποτυπωμένος πάνω στήν ταινία αναπαράγεται μέ τήν έξής σειρά μετατροπών:

φως → ηλεκτρικό ρεύμα → ήχος

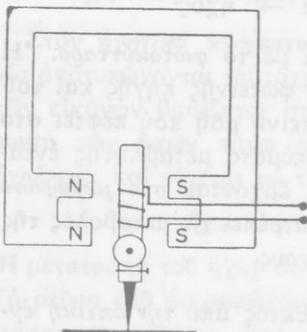
Ή μετατροπή του φωτός σέ ρεύμα γίνεται μέ τό φωτοκύτταρο. Ή ταινία ξετυλίγεται καί περνάει μεταξύ μιās φωτεινής πηγής καί του φωτοκυττάρου (σχ. 126). Ή μεταβλητή φωτεινή ροή πού πέφτει στό φωτοκύτταρο δημιουργεί φωτοηλεκτρικά ρεύματα μεταβλητής έντάσεως. Αυτά τά ρεύματα, αφού ένισχυθούν, έρχονται στό μέγάφωνο πού βρίσκεται πίσω από τήν όθόνη καί μετατρέπει τίσ μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος σέ αντίστοιχους ήχους.

α. Άλλες μέθοδοι έγγραφής του ήχου. Έκτός από τήν όπτική έγγραφή του ήχου, πού εφαρμόζουμε στόν ήχητικό κινηματογράφο, εφαρμόζουμε πολύ καί δύο άλλες μεθόδους, τή μηχανική καί τή μαγνητική έγγραφή του ήχου.

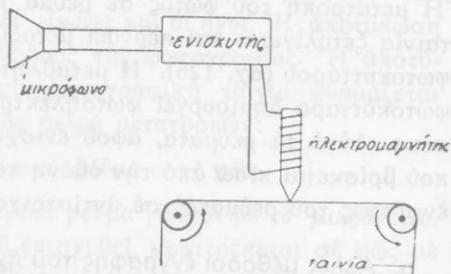
1. Μηχανική έγγραφη του ήχου. Ἡ μέθοδος αὐτή εἶναι ἡ πιό παλιά καί γίνεται ὡς ἐξῆς: Τό ρεύμα τοῦ μικροφώνου περνάει ἀπό ἕναν ἠλεκτρομαγνήτη, ὁ ὁποῖος ἀναγκάζει μιά βελόνα νά ἐκτελεεῖ ταλαντώσεις, πού ἀντιστοιχοῦν στήν ἔνταση πού ἔχει τό μικροφωνικό ρεύμα σέ κάθε στιγμή. Πάνω στήν ἐπιφάνεια ἑνός δίσκου ἀπό εὐπλαστο ὑλικό (π.χ. κερύ) ἡ βελόνα σχηματίζει ἐλικοειδές αὐλάκι πού οἱ ἀνωμαλίες του ἀντιστοιχοῦν στίς ταλαντώσεις τῆς βελόνας. Ἀπό αὐτόν τό δίσκο παίρνουμε ἠλεκτρολυτικῶς ἕνα μεταλλικό ἀρνητικό ἀντίτυπο, πού τό χρησιμοποιοῦμε ὡς καλούπι (μῆτρα) γιά τήν παραγωγή τῶν δίσκων τοῦ ἐμπορίου.

Γιά τήν ἀναπαραγωγή τοῦ ἡχου ἀπό τό δίσκο τοῦ γραμμοφώνου χρησιμοποιοῦμε σήμερα μιά εἰδική συσκευή, πού εἶναι γνωστή μέ τό ὄνομα *πικάπ* (ἠλεκτρομαγνητικός ἀναπαραγωγός ἡχου) καί λειτουργεῖ ὡς ἐξῆς: Μιά βελόνα εἶναι στερεωμένη σέ μιά μικρή ράβδο μαλακοῦ σιδήρου πού μπορεῖ νά μετακινεῖται μέσα στό ὁμογενές μαγνητικό πεδίο ἠλεκτρομαγνήτη (σχ. 127). Γύρω ἀπό τή ράβδο μαλακοῦ σιδήρου ὑπάρχει ἕνα πηνίο. Οἱ μετακινήσεις τῆς ράβδου δημιουργοῦν μέσα στό πηνίο *ἐπαγωγικά ρεύματα* τά ὁποῖα, ἀφοῦ ἐνισχυθοῦν, ἔρχονται στό μέγᾳφωνο καί ἐκεῖ ἀναπαράγεται ὁ ἡχος.

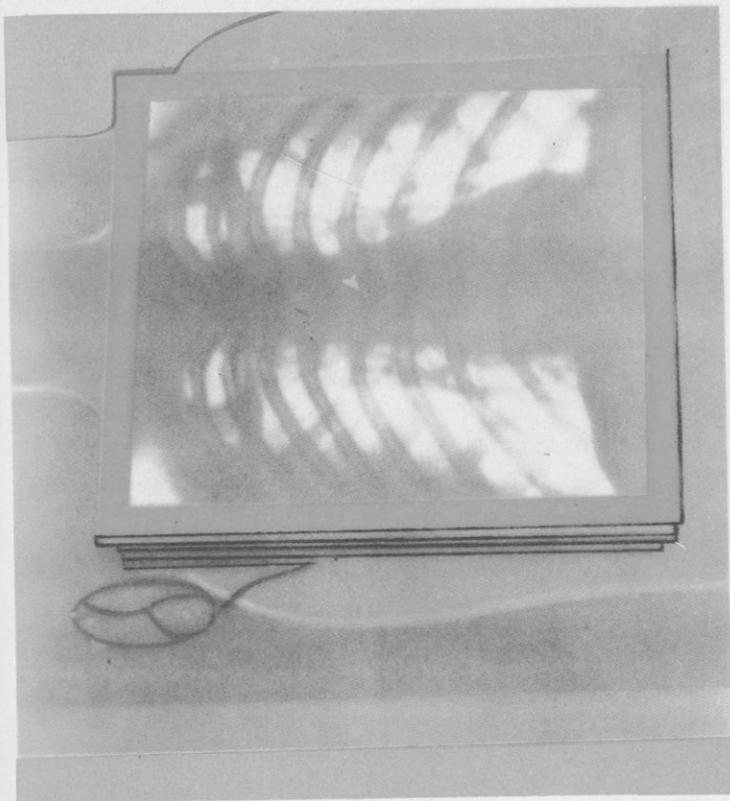
2. Μαγνητική έγγραφη τοῦ ἡχου. Ἡ νεώτερη αὐτή μέθοδος στηρίζεται στήν ἐξῆς ἀρχή: Τό ἐνισχυμένο ρεύμα τοῦ μικροφώνου ἔρχεται σέ ἕναν εὐθύγραμμο ἠλεκτρομαγνήτη (σχ. 128). Ἐμπρός ἀπό



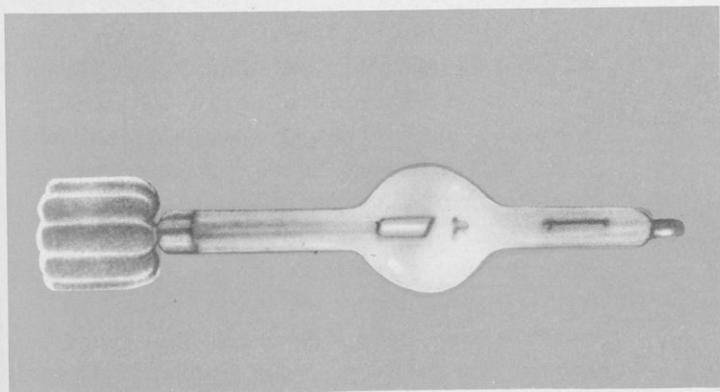
Σχ. 127. Ἐλεκτρομαγνητική διάταξη γιά τήν ἀναπαραγωγή τοῦ ἡχου ἀπό δίσκο (πικάπ)



Σχ. 128. Καταγραφή τοῦ ἡχου πάνω σέ ταινία ἀπό χάλυβα (μαγνητική έγγραφη)



Ακτινoscόπηση θώρακα



Σωλήνας Coolidge

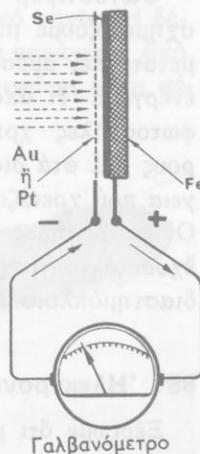
τόν ένα πόλο του κινείται όμαλά μιά λεπτή ταινία από χάλυβα. Αυτή μαγνητίζεται, αλλά σέ κάθε σημείο τής ταινίας ή μαγνήτισή της είναι ανάλογη μέ τήν ένταση πού έχει εκείνη τή στιγμή τό ρεύμα του μικροφώνου. Έτσι ό ήχος εγγράφεται πάνω στήν ταινία μέ τή μορφή μικρών περιοχών μέ διαφορετική μαγνήτιση.

Η αναπαραγωγή του ήχου από τήν ταινία γίνεται ως εξής: Η μαγνητισμένη ταινία κινείται όμαλά καί περνάει εμπρός από ένα πηνίο πού έχει πυρήνα από μαλακό σίδηρο. Τότε μέσα στό πηνίο δημιουργούνται επαγωγικά ρεύματα τά όποια, αφού ένισχυθούν, έρχονται στό μεγάφωνο καί εκεί αναπαράγεται ό ήχος. Τά συνηθισμένα μαγνητόφωνα είναι συσκευές πού εγγράφουν καί αναπαράγουν τόν ήχο. Η μέθοδος τής μαγνητικής εγγραφής του ήχου έχει σήμερα μεγάλη διάδοση καί μπορεί νά συνδυαστεί μέ ταυτόχρονη προβολή εικόνων (τηλεόραση).

87. Φωτοστοιχειό

Τό φωτοστοιχειό είναι μιά εφαρμογή τών ιδιοτήτων πού έχουν οι ήμιαγωγοί. Στην πράξη τό φωτοστοιχειό αποτελείται συνήθως από ένα δίσκο σιδήρου πού ή μιά επιφάνειά του είναι σκεπασμένη μέ ένα στρώμα από ήμιαγωγό ύλικό (σελήνιο ή πυρίτιο). Η επιφάνεια του ήμιαγωγού ύλικου είναι σκεπασμένη μέ ένα λεπτό διαφανές στρώμα από εύγενές μέταλλο (χρυσό ή λευκόχρυσο). Τά δύο ήλεκτροδία (σίδηρος, χρυσός) συνδέονται μέ ευαίσθητο γαλβανόμετρο (σχ. 129).

Όταν πάνω στόν ήμιαγωγό πέφτει φώς, τότε μέσα στόν ήμιαγωγό δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρικών φορέων, δηλαδή ηλεκτρόνια καί όπές. Τά ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στή μιά άκρη του ήμιαγωγού καί οι όπές στήν άλλη άκρη του. Έτσι στους δύο άκροδέκτες του φωτοστοιχειού αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού καί τό κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, πού ή έντασή του είναι ανάλογη μέ τή φωτεινή ροή πού πέφτει πάνω στό φωτοστοιχειό. Ωστε :



Σχ. 129. Τό φωτοστοιχειό είναι μιά γεννήτρια.

Τό φωτοστοιχείο λειτουργεί ως γεννήτρια, στην οποία ή ενέργεια τών φωτονίων μετατρέπεται άμέσως σέ ήλεκτρική ενέργεια.

Έφαρμογές τού φωτοστοιχείου. Τό φωτοστοιχείο χρησιμοποιείται στή φωτομετρία καί σέ πρακτικές έφαρμογές, όπως π.χ. γιά τόν προσδιορισμό τού φωτισμού όταν φωτογραφίζουμε, γιά τή ρύθμιση τής λειτουργίας έγκαταστάσεων, γιά τήν καταμέτρηση ανθρώπων ή αντικειμένων πού περνούν έμπρός από τό φωτοστοιχείο. Στην τελευταία περίπτωση μιά δέσμη φωτεινών ή άόρατων υπέρυθρων άκτίων πέφτει κάθετα στό φωτοστοιχείο καί δημιουργεί ένα φωτοηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό καταργείται κάθε φορά πού ένα άδιαφανές σώμα περνάει έμπρός από τό φωτοστοιχείο. Μιά κατάλληλη ήλεκτρομηχανική διάταξη αυτόματα μετράει πόσες φορές καταργείται τό ρεύμα.

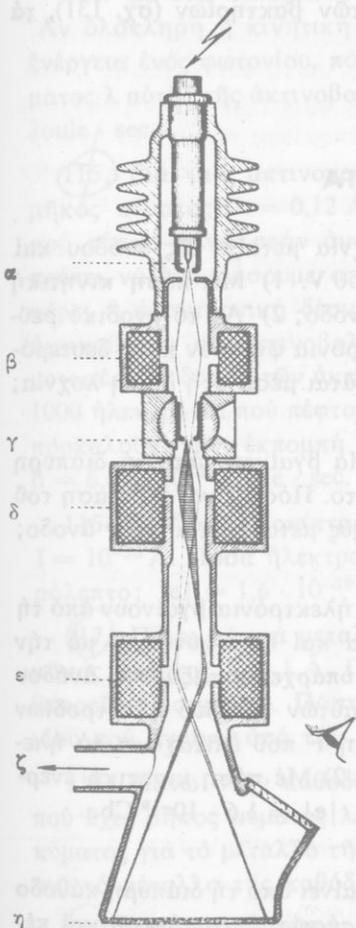
Σύγκριση φωτοκυττάρου καί φωτοστοιχείου. Στο φωτοκύτταρο (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) ή φωτεινή ροή προκαλεί έξοδο ήλεκτρονίων από τό μέταλλο τής καθόδου. Στο φωτοστοιχείο ή φωτεινή ροή αναγκάζει πολλά ήλεκτρόνια σθένους τών ατόμων τού ήμιαγωγού νά γίνουν *ελεύθερα ήλεκτρόνια* καί έτσι δημιουργεί μέσα στόν κρύσταλλο τού ήμιαγωγού *ήλεκτρόνια* καί *όπές*.

Φωτοστήλη. Αν συνδέσουμε κατά σειρά πολλά φωτοστοιχεία, σχηματίζουμε μιά *φωτοστήλη* ή *ήλιακή συστοιχία* πού μπορεί νά μετατρέπει άμέσως τήν ενέργεια τού ήλιακού φωτός σέ ήλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση τής φωτοστήλης φτάνει σέ 15%. Σήμερα οί φωτοστήλες χρησιμοποιούνται κυρίως στους τεχνητούς δορυφόρους καί στά διαστημόπλοια. Αυτές παράγουν *τήν ήλεκτρική ενέργεια* πού χρειάζονται οί διάφορες συσκευές γιά τή λειτουργία τους. Οί φωτοστήλες πού υπάρχουν στό δορυφόρο ή στό διαστημόπλοιο έχουν όλική ισχύ πού φτάνει σέ αρκετές έκατοντάδες βάτ (π.χ. στό διαστημόπλοιο *Maginer II* ήταν 200 W).

88. Ήλεκτρονικό μικροσκόπιο

Ξέρουμε ότι μιά δέσμη παράλληλων φωτεινών άκτίων μεταβάλλεται από τό φακό σέ συγκλίνουσα ή άποκλίνουσα δέσμη καί ότι όλες οί φωτεινές άκτίνες πού προέρχονται από μιά σημειακή φωτεινή πηγή συγκεντρώνονται από τό φακό σέ ένα σημείο (είδωλο). Σέ

όρισμένες περιπτώσεις τό ήλεκτρικό καί τό μαγνητικό πεδίο ένεργούν πάνω σέ μία δέσμη ήλεκτρονίων, πού κινούνται μέ τήν ίδια ταχύτητα, άκριβώς όπως ένεργεί ό όπτικός φακός πάνω σέ μία μονοχρωματική δέσμη φωτεινών άκτίων. Γι' αυτό σ' αυτή τήν περίπτωση τό ήλεκτρικό ή τό μαγνητικό πεδίο όνομάζονται αντίστοιχα ήλεκτροστατικός ή μαγνητικός φακός. Σήμερα χρησιμοποιούμε αυτούς τούς φακούς στό ήλεκτρονικό μικροσκόπιο μέ τό όποιο πετυχαίνουμε μεγέθυνση ώς 800 000, ένώ στά καλύτερα όπτικά μικροσκόπια ή μεγέθυνση φτάνει ώς 2000. Τό είδωλο τοῦ άντικειμένου πού εξετάζουμε σχηματίζεται είτε πάνω σέ διάφραγμα πού φθορίζει είτε άποτυπώνεται πάνω σέ φωτογραφική πλάκα. Στή σχηματική παράσταση πού δείχνει τό σχήμα 130 τά μαγνητικά πεδία δημιουργούνται άπό πηνία. Η δέσμη τών ήλεκτρονίων παράγεται άπό διάπυρη κάθοδο καί κινείται μέσα σέ



Σχ. 130. Ήλεκτρονικό μικροσκόπιο (α διάπυρη κάθοδος, β συναγωγός φακός, γ άντικείμενο, δ άντικειμενικός φακός, ε φακός προβολής, ζ πρός άντλία, η διάφραγμα πού φθορίζει)



Σχ. 131. Φωτογραφία βακτηριοφάγου πού πάρθηκε μέ ήλεκτρονικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση 20 000).

αερόκενο σωλήνα. Η χρησιμοποίηση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου άνοιξε νέους ορίζοντες ιδιαίτερα στη βιολογική έρευνα, ή όποια μέ τό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρατηρεί τά γονίδια πάνω στά χρωματοσώματα, τήν κατασκευή τών βακτηρίων (σχ. 131), τά μακρομόρια κ.ά.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

110. Σέ μία δίοδη ηλεκτρονική λυχνία μεταξύ τής άνόδου και τής καθόδου εφαρμόζεται τάση $U = 250 \text{ V}$. 1) Μέ πόση κινητική ενέργεια φτάνουν τά ηλεκτρόνια στην άνοδο; 2) Άν τό άνοδικό ρεύμα έχει ένταση $I = 6,4 \text{ mA}$, πόσα ηλεκτρόνια φτάνουν κάθε δευτερόλεπτο στην άνοδο και πόση ισχύς δαπανάται μέσα στη δίοδη λυχνία; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$. $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

111. Σέ μία δίοδη ηλεκτρονική λυχνία βγαίνουν από τή διάπυρη κάθοδο 10^{15} ηλεκτρόνια κατά δευτερόλεπτο. Πόση είναι ή ένταση του ρεύματος μέσα στη λυχνία και πόση ισχύς μεταφέρεται στην άνοδο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$. $U_A = 150 \text{ V}$.

112. Σέ έναν ηλεκτρονικό σωλήνα τά ηλεκτρόνια βγαίνουν από τή διάπυρη κάθοδο χωρίς άρχική ταχύτητα και επιταχύνονται μέ τήν επίδραση τής τάσεως $U = 2000 \text{ V}$ πού υπάρχει μεταξύ τής άνόδου και τής καθόδου. Η άπόσταση μεταξύ αυτών τών δύο ηλεκτροδίων είναι $l = 20 \text{ cm}$. 1) Πόση είναι ή δύναμη F πού επιταχύνει τό ηλεκτρόνιο και πόση είναι ή επιτάχυνση γ ; 2) Μέ πόση κινητική ενέργεια φτάνει τό ηλεκτρόνιο στην άνοδο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$. $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

113. Θεωρούμε ότι ένα ηλεκτρόνιο βγαίνει από τή διάπυρη κάθοδο χωρίς άρχική ταχύτητα και εξαιτίας τής τάσεως επιταχύνεται και πέφτει πάνω στην άντικάθοδο ενός σωλήνα Coolidge μέ ταχύτητα $v = 2 \cdot 10^4 \text{ km/sec}$. 1) Μέ πόση κινητική ενέργεια τό ηλεκτρόνιο φτάνει στην άντικάθοδο και πόση είναι ή τάση U ; 2) Άν κατά τή σύγκρουση του ηλεκτρονίου μέ τήν άντικάθοδο όλόκληρη ή ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου Röntgen, πόση

είναι ή συχνότητα ν του φωτονίου; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.
 $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

114. Σέ ένα σωλήνα Coolidge εφαρμόζεται τάση $U = 2 \cdot 10^5$ V. Άν όλόκληρη ή κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατραπεί σέ ενέργεια ενός φωτονίου, πόση είναι ή συχνότητα ν καί τό μήκος κύματος λ αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

115. Για μία ἀκτινογραφία χρειαζόμαστε ἀκτίνες Röntgen μέ μήκος κύματος $\lambda = 0,12$ Å. Ἡ ἔνταση τῆς ηλεκτρονικῆς δέσμης πού πέφτει πάνω στήν ἀντικáθοδο είναι 50 mA. 1) Πόση τάση U πρέπει νά εφαρμόσουμε στό σωλήνα Coolidge; 2) Πόση ἰσχύ μεταφέρει ή ηλεκτρονική δέσμη; 3) Άν ὁ συντελεστής ἀποδόσεως τῆς ἀντικαθόδου σέ ἀκτινοβολία Röntgen είναι $\eta = 0,003$, πόση ἰσχύ μεταφέρει ή δέσμη τῶν ἀκτίνων Röntgen; (Τό η φανερώνει ὅτι ἀπό τά 1000 ηλεκτρόνια πού πέφτουν πάνω στήν ἀντικáθοδο μόνο 3 ἀπό αὐτά προκαλοῦν τήν ἐκπομπή 3 φωτονίων). $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

116. Σέ ένα φωτοκύτταρο τό φωτοηλεκτρικό ρεύμα ἔχει ἔνταση $I = 10^{-10}$ A. Πόσα ηλεκτρόνια βγαίνουν ἀπό τήν κάθοδο κάθε δευτερόλεπτο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

117. Πάνω σέ μία μεταλλική πλάκα πέφτει ἀκτινοβολία πού ἔχει μήκος κύματος $\lambda = 1$ Å. Για τό μέταλλο αὐτό τό ἔργο ἐξαγωγῆς b θεωρεῖται ἀσήμαντο. Πόση είναι ή κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου πού βγαίνει ἀπό τήν κάθοδο; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

118. Πάνω στήν κάθοδο ενός φωτοκυττάρου πέφτει ἀκτινοβολία πού ἔχει μήκος κύματος $\lambda_{op} = 0,66 \cdot 10^{-6}$ m, δηλαδή τό ὀρικό μήκος κύματος για τό μέταλλο τῆς καθόδου. Πόσο είναι τό ἔργο ἐξαγωγῆς για τό μέταλλο τῆς καθόδου; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

119. Μία φωτεινή ἀκτινοβολία πού ἔχει μήκος κύματος $\lambda = 4000$ Å πέφτει πάνω στήν κάθοδο ενός φωτοκυττάρου. Αὐτή ἐκπέμπει φωτοηλεκτρόνια πού ἔχουν ταχύτητα $v = 8 \cdot 10^5$ m/sec. Πόσο είναι τό ἔργο ἐξαγωγῆς για τό μέταλλο τῆς καθόδου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.
 $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule \cdot sec.

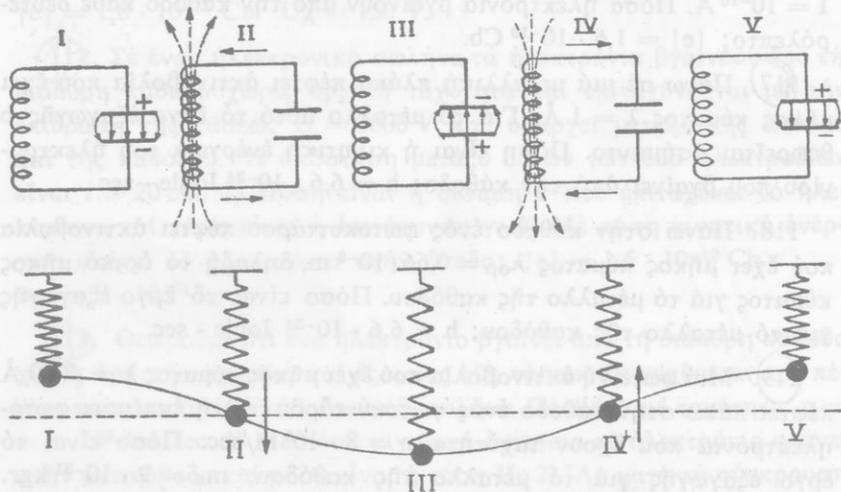
Ήλεκτρομαγνητικά κύματα

89. Ήλεκτρικές ταλαντώσεις

Ένα κύκλωμα αποτελείται από έναν πυκνωτή που έχει χωρητικότητα C και από ένα πηνίο, που έχει συντελεστή αυτεπαγωγής L και ασημαντή ωμική αντίσταση (σχ. 132). Η ωμική αντίσταση (R) του κυκλώματος θεωρείται ίση με μηδέν και επομένως σ' αυτό τό κύκλωμα δέ συμβαίνει απώλεια ενέργειας εξαιτίας του φαινομένου Joule (δηλαδή δέ συμβαίνει μετατροπή τής ηλεκτρικής ενέργειας σέ θερμότητα). Αυτό τό κύκλωμα ονομάζεται κύκλωμα Thomson.

Φορτίζουμε τόν πυκνωτή (σχ. 132 I). Τότε οί όπλισμοί του έχουν αντίστοιχα φορτίο $+Q$ και $-Q$ και μεταξύ τών όπλισμών του υπάρχει τάση U . Άρα ό πυκνωτής έχει ενέργεια $\frac{1}{2} Q U$, 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 εκφορτίζεται. Τότε τό πηνίο διαρ-



Σχ. 132. Στο κύκλωμα ταλαντώσεων τό ηλεκτρικό φορτίο εκτελεί ταλάντωση, ανάλογη μέ τή μηχανική ταλάντωση μίας σφαιρας κρεμασμένης από έλατήριο.

ρέεται από ρεύμα και στο έσωτερικό του δημιουργείται *μαγνητικό πεδίο* (σχ. 132 II). Όταν ο πυκνωτής εκφορτίζεται, ή ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου συνεχώς ελαττώνεται, ενώ αντίθετα ή ενέργεια του μαγνητικού πεδίου συνεχώς αυξάνει. Καί όταν ο πυκνωτής εκφορτιστεί, τότε όλη ή ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου έχει μετατραπεί σέ ενέργεια μαγνητικού πεδίου $\frac{1}{2} L I^2$ (*ήλεκτρομαγνητική*

ένέργεια). Όταν ο πυκνωτής εκφορτιστεί, τό ρεύμα καταργείται. Τότε από αὐτεπαγωγή δημιουργείται μέσα στό πηνίο ρεύμα, πού είναι *όμόροπο* μέ τό ρεύμα πού διακόπηκε. Αυτό τό ρεύμα φορτίζει τόν πυκνωτή, αλλά μέ αντίθετη τώρα πολικότητα (σχ. 132 III). Τό μαγνητικό πεδίο καταργήθηκε καί ή ενέργειά του έχει μετατραπεί σέ ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου πού υπάρχει τώρα μεταξύ τῶν ὀπλισμῶν του πυκνωτή. Ἀκολουθεῖ ἔπειτα νέα εκφόρτιση του πυκνωτή, πού δημιουργεῖ νέο μαγνητικό πεδίο (σχ. 132 IV). Αυτό, όταν καταργηθεῖ, προκαλεῖ νέα φόρτιση του πυκνωτή, αλλά μέ *τήν ἀρχική του πολικότητα* (σχ. 132 V).

Ἐπειδή δεχθήκαμε ὅτι σ' αὐτό τό κύκλωμα δέν υπάρχουν ἀπώλειες ἐνέργειας, τό φαινόμενο θά ἐπαναλαμβάνεται διαρκῶς, δηλαδή μέσα στό κύκλωμα δημιουργεῖται ἕνα *ἡμιτονοειδές ρεύμα* μεγάλης συχνότητας, πού ὀνομάζεται *ἠλεκτρική ταλάντωση*. Τό κύκλωμα Thomson λέγεται καί *κύκλωμα ταλαντώσεων*. Ἀπό τά παραπάνω βγάζουμε τό ἑξῆς συμπέρασμα:

Ἡ ἠλεκτρική ταλάντωση πού παράγεται σέ ἕνα κύκλωμα Thomson ὀφείλεται σέ περιοδική μετατροπή τῆς ἐνέργειας του ἠλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή σέ ἐνέργεια του μαγνητικού πεδίου του πηνίου καί ἀντίστροφα.

Αὐτές οἱ μετατροπές τῆς ἐνέργειας προκαλοῦνται ἀπό *τήν αὐτεπαγωγή* του πηνίου, ή ὁποία εἶναι ή 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 *ή ἰδιοπερίοδος*

(T_0) τής ηλεκτρικής ταλαντώσεως πού παράγεται μέσα σ' αυτό τό κύκλωμα δίνεται από τήν ακόλουθη **έξίσωση του Thomson** :

έξίσωση του Thomson $T_0 = 2\pi \sqrt{LC}$	$\left\{ \begin{array}{l} L \text{ σε H, } C \text{ σε F} \\ T \text{ σε sec} \end{array} \right.$
--	--

Έπομένως ή *ιδιοσυχνότητα* (ν_0) τής ηλεκτρικής ταλαντώσεως είναι

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0} \quad \text{καί} \quad \nu_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Έπειδή στό κύκλωμα Thomson δέν υπάρχουν απώλειες ενέργειας, ή ηλεκτρική ταλάντωση είναι *αμείωτη*, δηλαδή τό πλάτος (I_0) τής έντάσεως του ήμιτονοειδούς ρεύματος διατηρείται *σταθερό*. Αύτή ή ηλεκτρική ταλάντωση είναι *ελεύθερη ταλάντωση*, ανάλογη μέ τή μηχανική ταλάντωση πού έκτελεί μιά μεταλλική σφαίρα κρεμασμένη από σπειροειδές έλατήριο (σχ. 132).

Παράδειγμα. Σέ ένα κύκλωμα Thomson ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C = 0,01 \mu\text{F}$ καί τό πηνίο έχει συντελεστή αὐτεπαγωγής $L = 1 \mu\text{H}$. Έη ηλεκτρική ταλάντωση έχει ιδιοπερίοδο

$$T_0 = 2\pi \sqrt{LC} = 2\pi \cdot \sqrt{10^{-6} \text{ H} \cdot 10^{-8} \text{ F}} \quad \text{καί} \quad T_0 = 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$$

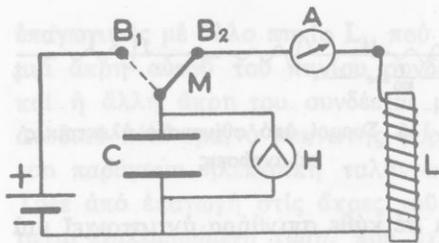
Έη ιδιοσυχνότητα τής ηλεκτρικής ταλαντώσεως είναι

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{10^7}{6,28} \text{ sec}^{-1} \quad \text{ή} \quad \nu_0 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 1,6 \text{ MHz}$$

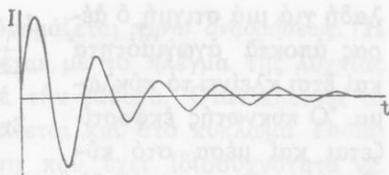
Παρατηρούμε ότι οί ηλεκτρικές ταλαντώσεις είναι *έναλλασσόμενα ρεύματα ψηλής συχνότητας*.

90. Φθίνουσα ηλεκτρική ταλάντωση

Πειραματικῶς μπορούμε νά παρατηρήσουμε ηλεκτρική ταλάντωση μέ τή διάταξη πού δείχνει τό σχήμα 133. Έη χωρητικότητα C του πυκνωτή καί ό συντελεστής αὐτεπαγωγής L του πηνίου έχουν μεγάλες τιμές, ὥστε ή περίοδος T τής ηλεκτρικής ταλαντώσεως νά είναι ίση μέ αρκετά δευτερόλεπτα. "Όταν φέρουμε τό μεταγωγό M σέ επαφή μέ τόν άκροδέκτη B_1 , ό πυκνωτής φορτίζεται καί τό ηλεκτρό-



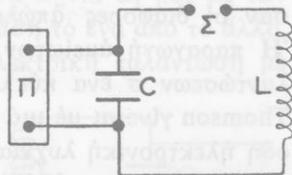
Σχ. 133. Γιά τήν πειραματική απόδειξη τής ηλεκτρικής ταλαντώσεως



Σχ. 134. Φθίνουσα ηλεκτρική ταλάντωση. [Ἡ περίοδος (T) διατηρεῖται σταθερή, ἐνῶ τό πλάτος (I_0) συνεχῶς ἐλαττώνεται].

μετρο H δείχνει τήν τάση (U) πού ὑπάρχει μεταξύ τῶν δύο ὀπλισμῶν τοῦ πυκνωτῆ. Ἄν ἔπειτα φέρουμε τό μεταγωγό M σέ ἐπαφή μέ τόν ἀκροδέκτη B_2 , παρατηροῦμε περιοδικές μεταβολές τής τάσεως καί ἀντίστοιχες περιοδικές ταλαντώσεις τοῦ δείκτη τοῦ ἀμπερομέτρου A . Αὐτές οἱ ταλαντώσεις φανερώνουν ὅτι στό κύκλωμα κυκλοφορεῖ ἐναλλασσόμενο ρεῦμα. Ἀλλά τό ἀμπερόμετρο δείχνει ὅτι τό πλάτος (I_0) τής ἐντάσεως τοῦ ρεύματος συνεχῶς ἐλαττώνεται. Ἄρα ἡ ηλεκτρική ταλάντωση εἶναι φθίνουσα καί πολύ γρήγορα σταματᾷ (σχ. 134). Αὐτό συμβαίνει, γιατί ἐξαιτίας τοῦ φαινομένου Joule ὑπάρχουν ἀπώλειες ἐνέργειας. Γιά νά ἔχουμε νέα ηλεκτρική ταλάντωση, πρέπει πάλι νά φορτίσουμε τόν πυκνωτή φέρνοντας τό μεταγωγό M σέ ἐπαφή μέ τόν ἀκροδέκτη B_1 καί ἔπειτα σέ ἐπαφή μέ τόν ἀκροδέκτη B_2 .

Γιά τήν αὐτόματη διαδοχική φόρτιση τοῦ πυκνωτῆ χρησιμοποιοῦμε τή διάταξη πού δείχνει τό σχῆμα 135. Ὁ πυκνωτής συνδέεται μέ τό δευτερεύον κύκλωμα ἑνός ἐπαγωγικοῦ πηνίου Π . Σέ ἕνα σημεῖο τοῦ κυκλώματος ὑπάρχει μιά μικρή διακοπή Σ καί ἐκεῖ τό κύκλωμα καταλήγει σέ δύο μικρές σφαῖρες. Ἡ διακοπή Σ ὀνομάζεται σπινθηριστής. Ξέρουμε ὅτι στίς ἄκρες τοῦ δευτερεύοντος κυκλώματος τοῦ ἐπαγωγικοῦ πηνίου ἡ τάση φτάνει σέ πολλές χιλιάδες βόλτ. Αὐτή ἡ τάση ἐφαρμόζεται τώρα στοῦς ὀπλισμοῦς τοῦ πυκνωτῆ, καί ὅταν ἡ τάση λάβει τή μέγιστη τιμή, τότε στή διακοπή Σ παράγεται ἕνας σπινθήρας, δη-



Σχ. 135. Διάταξη γιά τήν παραγωγή ηλεκτρικῶν ταλαντώσεων (Π ἐπαγωγικό πηνίο, C πυκνωτής, L πηνίο, Σ σπινθηριστής)

λαδή για μία στιγμή δ άε-
ρας άποκτῶ άγωγιμότητα
καί ἔτσι κλείνει τό κύκλω-
μα. Ὁ πυκνωτής έκφορτί-
ζεται καί μέσα στό κύ-
κλωμα παράγεται μία φθί-
νουσα ἠλεκτρική ταλάντωση.

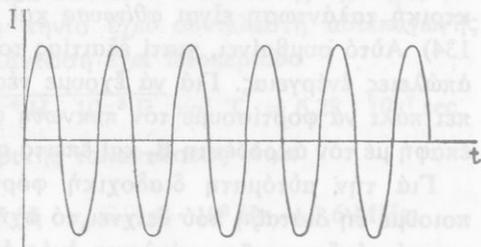


Σχ. 136. Συρμοί από φθίνουσες ἠλεκτρικές
ταλαντώσεις

Ἔτσι σέ κάθε σπινθήρα ἀντιστοιχεῖ μία φθίνουσα ταλάντωση πού διαρκεῖ πολύ λίγο (π.χ. $1/1000$ sec). Ἄν ἡ συχνότητα τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος στό δευτερεύον κύκλωμα τοῦ ἐπαγωγικοῦ πηνίου εἶναι π.χ. $\nu = 50$ Hz, τότε κάθε δευτερόλεπτο παράγονται 100 σπινθήρες καί ἐπομένως παράγονται 100 συρμοί από φθίνουσες ταλαντώσεις στό δευτερόλεπτο (σχ. 136).

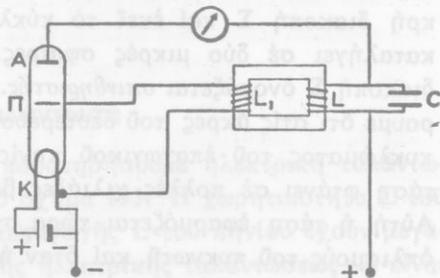
91. Ἀμείωτη ἠλεκτρική ταλάντωση

Στίς ἐφαρμογές ἰδιαίτερη σημασία ἔχουν οἱ ἀμείωτες ἠλεκτρικές ταλαντώσεις (σχ. 137). Σέ ἕνα κύκλωμα ταλαντώσεων, γιά νά διατηρηθεῖ σταθερό τό πλάτος τῆς ταλαντώσεως, πρέπει μέσα σέ κάθε περίοδο καί σέ ὀρισμένη στιγμή νά προσφέρεται ἀπέξω στό κύκλωμα τόση ἀκριβῶς ἐνέργεια, ὅση κατά τήν προηγούμενη περίοδο ἀπορρόφησαν οἱ διάφορες ἀπώλειες.



Σχ. 137. Ἀμείωτη ἠλεκτρική ταλάντωση

Ἡ παραγωγή ἀμείωτων ταλαντώσεων σ' ἕνα κύκλωμα Thomson γίνεται μέ μία τρίοδη ἠλεκτρονική λυχνία. Τό κύκλωμα Thomson (C, L) παρεμβάλλεται στό ἀνοδικό κύκλωμα τῆς λυχνίας (σχ. 138). Τό πηνίο L τοῦ κυκλώματος Thomson συνδέεται

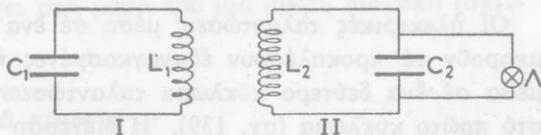


Σχ. 138. Διάταξη γιά τήν παραγωγή ἀμείωτων ἠλεκτρικῶν ταλαντώσεων

ἐπαγωγικῶς μέ ἄλλο πηνίο L_1 , πού ὀνομάζεται πηνίο ἀναδράσεως. Ἡ μιά ἄκρη αὐτοῦ τοῦ πηνίου συνδέεται μέ τό πλέγμα τῆς λυχνίας καί ἡ ἄλλη ἄκρη του συνδέεται μέ τήν κάθοδο. Ὅταν κλείσει τό ἀνοδικό κύκλωμα, ὁ πυκνωτής φορτίζεται καί στό κύκλωμα Thomson παράγεται ἠλεκτρική ταλάντωση πού ἔχει ἰδιοσυχνότητα ν_0 . Τότε ἀπό ἐπαγωγή στίς ἄκρες τοῦ πηνίου ἀναδράσεως L_1 ἀναπτύσσεται ἐναλλασσόμενη τάση, πού ἔχει συχνότητα ἴση μέ τήν ἰδιοσυχνότητα ν_0 τῆς ἠλεκτρικῆς ταλαντώσεως. Αὐτές οἱ ἐναλλαγές τῆς τάσεως ἐπηρεάζουν μέ τόν ἴδιο ρυθμό τήν τάση (U_g) πού ὑπάρχει μεταξύ τοῦ πλέγματος καί τῆς καθόδου (τάση πλέγματος) καί, ἐπομένως, τό ἀνοδικό ρεῦμα δέχεται ρυθμικά ἐνισχύσεις. Ἔτσι ρυθμικά ἀναπληρώνονται οἱ ἀπώλειες ἐνέργειας πού συμβαίνουν στό κύκλωμα Thomson μέσα σέ κάθε περίοδο (ὅπως σέ ἕνα ἐκκρεμές οἱ ρυθμικές ὠθήσεις ἀναπληρώνουν τήν ἀπώλεια ἐνέργειας μέσα σέ κάθε περίοδο). Μέ τό σύστημα ἀναδράσεως δημιουργοῦνται ἀμείωτες ἠλεκτρικές ταλαντώσεις, πού ἡ συχνοτήτά τους μπορεῖ νά φτάσει ὡς 10^8 Hz (δηλαδή 100 MHz). Στή ραδιοφωνία, τήν τηλεόραση καί τό ραντάρ χρησιμοποιοῦνται ἀμείωτες ἠλεκτρικές ταλαντώσεις πού ἔχουν συχνοτήτες ἀπό 10^8 ὡς 10^{10} Hz. Γι' αὐτές τίς συχνοτήτες χρησιμοποιοῦμε εἰδικές διατάξεις πού ταυτόχρονα παίζουν τό ρόλο τοῦ κυκλώματος ταλαντώσεων καί τοῦ συστήματος ἀναδράσεως.

92. Ἐπαγωγική σύζευξη δύο κυκλωμάτων ταλαντώσεων

Ἔχουμε δύο κυκλώματα Thomson, τά I καί II (σχ. 139). Τό πρῶτο κύκλωμα ἔχει 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 ἕνα ἀπό τό ἄλλο. Στό πρῶτο κύκλωμα παράγεται ἀμείωτη ἠλεκτρική ταλάντωση μέ ἰδιοπερίοδο T_1 . Οἱ δυναμικές γραμμές 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 I



Σχ. 139. Στό κύκλωμα II παράγονται ἐξαναγκασμένες ἠλεκτρικές ταλαντώσεις (ἐπαγωγική σύζευξη κυκλωμάτων).

καί Π υπάρχει *επαγωγική σύζευξη*. Ἡ μαγνητική ροή πού περνάει ἀπό τὶς σπειρες τοῦ πηνίου L_2 μεταβάλλεται ἡμιτονοειδῶς μὲ τὴ συχνότητα ν_1 , πού ἔχει ἡ ἠλεκτρικὴ ταλάντωση στό πρῶτο κύκλωμα I . Ἔτσι μέσα στό δεύτερο κύκλωμα Π παράγεται *ἐξαναγκασμένη ἠλεκτρικὴ ταλάντωση*, πού ἔχει περίοδο T_1 ἴση μὲ τὴν ἰδιοπερίοδο τοῦ πρῶτου κυκλώματος I . Ἡ ἠλεκτρικὴ ταλάντωση στό δεύτερο κύκλωμα Π ἀποδεικνύεται ἀπὸ τὴ φωτοβολία τοῦ λαμπτήρα. Τό κύκλωμα Π ἔχει μεταβλητό πυκνωτή. Μεταβάλλοντας τὴ χωρητικότητα τοῦ πυκνωτῆ μεταβάλλουμε τὴν ἰδιοπερίοδο τοῦ κυκλώματος Π . Τότε βρίσκουμε ὅτι τὸ πλάτος τῆς ἐξαναγκασμένης ταλαντώσεως στό δεύτερο κύκλωμα παίρνει *τὴ μέγιστη τιμὴ*, ὅταν ἡ ἰδιοπερίοδος τοῦ δευτέρου κυκλώματος

$$T_2 = 2\pi \sqrt{L_2 C_2}$$

γίνει ἴση μὲ τὴν ἰδιοπερίοδο T_1 τοῦ πρῶτου κυκλώματος, δηλαδή ὅταν εἶναι:

$$T_1 = T_2 \quad \text{ἢ} \quad 2\pi \sqrt{L_1 C_1} = 2\pi \sqrt{L_2 C_2}$$

Σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση λέμε ὅτι μεταξύ τῶν δύο κυκλωμάτων ὑπάρχει *συντονισμός*. Τότε ἡ φωτοβολία τοῦ λαμπτήρα εἶναι ἔντονη. Ὡστε:

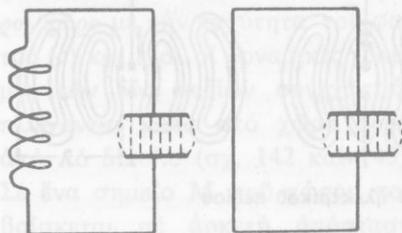
Δύο κυκλώματα ταλαντώσεων πού συνδέονται μὲ ἐπαγωγικὴ σύζευξη βρίσκονται σὲ συντονισμό, ὅταν ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\text{συνθήκη συντονισμοῦ} \quad L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2$$

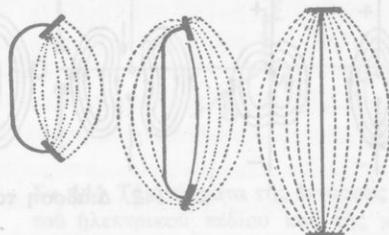
Ἡ ἠλεκτρικὴ ταλάντωση πού παράγεται μέσα στό δεύτερο κύκλωμα ὀφείλεται *σὲ ἐνέργεια πού μεταφέρεται* ἀπὸ τὸ πρῶτο κύκλωμα μὲ τὸ μαγνητικὸ πεδίο του.

93. Παλλόμενο ἠλεκτρικὸ δίπολο

Οἱ ἠλεκτρικὲς ταλαντώσεις μέσα σὲ ἓνα κύκλωμα ταλαντώσεων μποροῦν νὰ προκαλέσουν ἐξαναγκασμένες ἠλεκτρικὲς ταλαντώσεις μέσα σὲ ἓνα δεύτερο κύκλωμα ταλαντώσεων πού βρίσκεται κοντὰ στό πρῶτο κύκλωμα (σχ. 139). Ἡ διέγερση τοῦ δευτέρου κυκλώματος ὀφείλεται μόνο στὴν ἐπίδραση τοῦ *μαγνητικοῦ πεδίου* πού δημιουργεῖται γύρω ἀπὸ τὸ πρῶτο κύκλωμα, γιατί τὸ ἠλεκτρικὸ πεδίο μένει ἐντοπισμένο μεταξύ τῶν δύο ὀπλισμῶν τοῦ πυκνωτῆ. Μποροῦμε



Σχ. 140. Αντικατάσταση του πηνίου με εὐθύγραμμο ἄγωγό



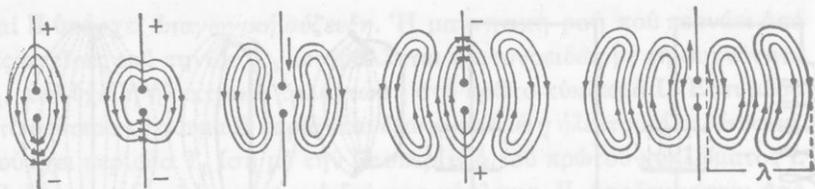
Σχ. 141. Τό ἠλεκτρικό πεδίο ἀπλώνεται στό χῶρο.

ὅμως νά προκαλέσουμε τή διέγερση τοῦ δεύτερου κυκλώματος καί μέ τό ἠλεκτρικό πεδίο τοῦ πρώτου κυκλώματος, ἂν διαμορφώσουμε κατάλληλα τά δύο κυκλώματα ταλαντώσεων.

Στό κύκλωμα Thomson στή θέση τοῦ πηνίου βάζουμε ἕναν εὐθύγραμμο ἄγωγό (σχ. 140). Αὐτή ἡ ἀντικατάσταση τοῦ πηνίου δέν ἀλλάζει τίς ιδιότητες τοῦ κυκλώματος Thomson, ἀλλά προκαλεῖ μόνο ἐλάττωση τοῦ συντελεστή αὐτεπαγωγῆς (L) τοῦ κυκλώματος καί ἐπομένως ἐλάττωση τῆς ἰδιοπεριόδου (T) τοῦ κυκλώματος. Σιγά-σιγά ἀπομακρύνουμε τόν ἕνα ὄπλισμό τοῦ πυκνωτή ἀπό τόν ἄλλο, ὥσπου οἱ δύο ὄπλισμοί νά βρεθοῦν στίς δύο ἄκρες ἑνός εὐθύγραμμου ἄγωγου (σχ. 141). Τότε τό ἠλεκτρικό πεδίο ἀπλώνεται στό χῶρο. Ὁ εὐθύγραμμος ἄγωγός μπορεῖ στίς δύο ἄκρες του νά καταλήγει ἐλεύθερα ἢ νά ἔχει μικρές πλάκες ἢ σφαῖρες. Αὐτό τό ἀνοιχτό κύκλωμα Thomson, πού ἀποτελεῖται μόνο ἀπό ἕναν εὐθύγραμμο ἄγωγό, ὀνομάζεται **παλλόμενο ἠλεκτρικό δίπολο**, γιατί σέ μιά στιγμή τῆς ἠλεκτρικῆς ταλαντώσεως στίς δύο ἄκρες τοῦ ἄγωγου βρίσκονται ἴσα καί ἀντίθετα ἠλεκτρικά φορτία (ὅπως συμβαίνει καί στούς δύο ὄπλισμούς τοῦ πυκνωτή στό κλειστό κύκλωμα Thomson). Ὁ εὐθύγραμμος ἄγωγός μπορεῖ νά ἔχει στή μέση του μιά μικρή διακοπή (σπινθηριστή).

94. Ἡλεκτρομαγνητικά κύματα

α. Τό ἠλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ὄταν μέσα στό παλλόμενο ἠλεκτρικό δίπολο παράγεται ἀμείωτη ἠλεκτρική ταλάντωση, στίς δύο ἄκρες τοῦ διπόλου ἀναπτύσσεται ἐναλλασσόμενη τάση καί οἱ δύο

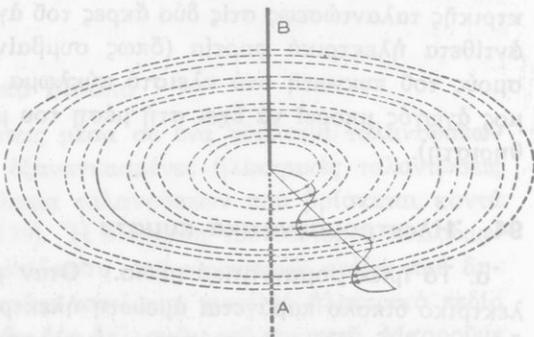


Σχ. 142. Διάδοση του ηλεκτρικού πεδίου

Άκρες του άποκτούν διαδοχικά θετικό και άρνητικό δυναμικό. Έπομένως γύρω από τό δίπολο δημιουργείται ένα *έναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο*. Έξαιτίας τής έναλλασσόμενης τάσεως δημιουργείται μέσα στον άγωγό έναλλασσόμενο ρεύμα, πού παράγει γύρω του ένα *έναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο*. Οί δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι όμόκεντροι κύκλοι, κάθετοι στον άγωγό. Όταν σιγά-σιγά εξασθενίζει τό ηλεκτρικό πεδίο, ένισχύεται τό μαγνητικό πεδίο και αντίστροφα, όταν εξασθενίζει τό μαγνητικό πεδίο, ένισχύεται τό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτά τά δύο *έναλλασσόμενα πεδία*, τό ηλεκτρικό και τό μαγνητικό, είναι άλληλένδετα και άποτελούν τό *ηλεκτρομαγνητικό πεδίο*. Όστε:

• Η ηλεκτρική ταλάντωση πού παράγεται μέσα στό παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο δημιουργεί γύρω από αυτό έναλλασσόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, πού είναι άλληλένδετα και άποτελούν τό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

β. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Κάθε μισή περίοδο αλλάζει ή φορά των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Στο διάστημα αυτό τό ηλεκτρικό και τό μα-

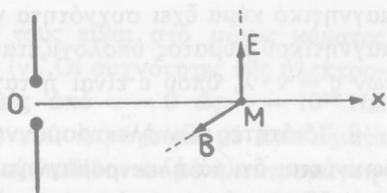


Σχ. 143. Διάδοση του μαγνητικού πεδίου

γνητικό πεδίο *διαδίδονται* στο γύρω χώρο με την ταχύτητα του φωτός (c) και έτσι οι δυναμικές γραμμές των δύο πεδίων συνεχώς απλώνονται μέσα στο χώρο γύρω από το δίπολο (σχ. 142 και 143).

Σέ ένα σημείο M του χώρου πού βρίσκεται σέ αρκετή απόσταση από τό δίπολο ή ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου και ή μαγνητική επαγωγή B του μαγνητικού πεδίου

είναι κάθετες μεταξύ τους και κάθετες στή διεύθυνση τής διαδόσεως του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (σχ. 144). Στή διάρκεια μις περιόδου τά μεγέθη E και B μεταβάλλονται *ήμιτονοειδώς* και σέ κάθε στιγμή έχουν τήν ίδια φάση (δηλαδή ταυτόχρονα παίρνουν τή μέγιστη τιμή τους και ταυτόχρονα μηδενίζονται). Αυτή ή διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αποτελεί τό **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**, τό όποιο μεταφέρει *ηλεκτρομαγνητική ενέργεια*. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά εξής συμπεράσματα:



Σχ. 144. Τά άνύσματα τής έντάσεως E του ηλεκτρικού πεδίου και τής μαγνητικής επαγωγής B μεταβάλλονται ήμιτονοειδώς και είναι κάθετα μεταξύ τους και στήν ευθεία Ox .

I. **Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ή διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με την ταχύτητα του φωτός.**

II. **Ένα παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, πού μεταφέρεται από τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα.**

Πρώτος ό Maxwell ανακάλυψε θεωρητικώς ότι ένα παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Άργότερα ό Hertz επιβεβαίωσε πειραματικώς τίς προβλέψεις του Maxwell και 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 και ή ηλεκτρική ταλάντωση ή όποία παράγεται μέσα στο παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο. Άρα τό ηλεκτρο-

μαγνητικό κύμα έχει συχνότητα ν . Τό μήκος κύματος λ τοῦ ἠλεκτρομαγνητικοῦ κύματος ὑπολογίζεται ἀπό τή γενική ἐξίσωση τῶν κυμάτων $c = \nu \cdot \lambda$, ὅπου c εἶναι ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός.

β. Ἰδιότητες τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. Πειραματικῶς ἀποδεικνύεται ὅτι τὰ ἠλεκτρομαγνητικά κύματα ἔχουν τῖς ἐξῆς *ιδιότητες*:

1. Ὄταν πέφτουν πάνω στήν ἐπιφάνεια μετάλλων (καί γενικότερα ἀγωγῶν), *ἀνακλῶνται* σύμφωνα μέ τούς νόμους τῆς ἀνακλάσεως τοῦ φωτός.

2. Ὄταν περνοῦν τήν ἐπιφάνεια πού χωρίζει δύο διαφορετικά διηλεκτρικά ὑλικά, *διαθλῶνται* σύμφωνα μέ τούς νόμους τῆς διαθλάσεως τοῦ φωτός.

3. Παράγουν φαινόμενα *συμβολῆς* καί *περιθλάσεως*, ὅπως καί στήν περίπτωση τοῦ φωτός.

4. Εἶναι *ἐγκάρσια κύματα*, ὅπως εἶναι καί τὰ φωτεινά κύματα. Ὡστε τὰ ἠλεκτρομαγνητικά κύματα ἔχουν ὅλες τῖς ἰδιότητες τῶν φωτεινῶν κυμάτων. Πρῶτος ὁ Maxwell (1865) ἀπέδειξε ὅτι *ἡ φύση* τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν καί τῶν φωτεινῶν κυμάτων *εἶναι ἡ ἴδια* καί διατύπωσε τήν *ἠλεκτρομαγνητική θεωρία τοῦ φωτός*, πού ἔδωσε ἐνιαία ἐξήγηση σέ ὅλα τὰ ὡς τότε γνωστά ἠλεκτρομαγνητικά καί ὀπτικά φαινόμενα.

95. Ἐλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία

Σήμερα ἔχει συμπληρωθεῖ ὅλη ἡ σειρά τῶν συχνοτήτων, ἀπό τὰ ἠλεκτρομαγνητικά κύματα πού παράγονται μέ κυκλώματα ὡς τὰ φωτεινά κύματα καί τῖς ἀκτίνες Röntgen ἤ γ . Γενικά ἔχουμε τόν ἐξῆς *ὀρισμό*:

Ἐλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία ὀνομάζεται τό σύνολο τῶν **ἀκτινοβολιῶν** πού μεταφέρουν ἐνέργεια μέ τή **μορφή ἠλεκτρομαγνητικοῦ κύματος**.

Ἡ ἐνέργεια πού μεταφέρεται ἀπό τό ἠλεκτρομαγνητικό κύμα ἐξαρτᾶται ἀπό ὀρισμένα χαρακτηριστικά τοῦ κύματος.

Τό φάσμα τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας. Πειραματικῶς ἀποδείχθηκε ὅτι τὰ τεχνικά ἠλεκτρομαγνητικά κύματα, οἱ ὑπέρυθρες ἀκτίνες, οἱ ὀρατές ἀκτινοβολίες, οἱ ὑπεριώδεις ἀκτίνες, οἱ ἀκτίνες Röntgen καί οἱ ἀκτίνες γ εἶναι διάφορες μορφές ἠλεκτρομαγνητικῆς

ακτινοβολίας, πού ή μόνη διαφορά τους είναι στό μήκος κύματος (λ) και, επομένως, και στό συχνότητα (ν). Οί συχνότητες τής ήλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουν τιμές από $\nu = 0$ ως $\nu = 10^{24}$ Hz. Οί ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες πού παράγουμε μέ κυκλώματα έχουν συχνότητες από 0 ως 10^{13} Hz και διαδίδονται μέ ήλεκτρομαγνητικά κύματα, πού συνήθως τά ονομάζουμε *εργζιανά κύματα*. Οί ακτινοβολίες πού έχουν συχνότητες από 10^{13} ως 10^{24} Hz παράγονται από τά άτομα και τά μόρια τής ύλης, όταν βρίσκονται σε κατάσταση διεγέρσεως. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τό φάσμα τής ήλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι μόνο μιά μικρή περιοχή αὐτοῦ τοῦ φάσματος ἀποτελεῖ τό *δρατό φάσμα*, δηλαδή τίς δρατές ακτινοβολίες.

Τό φάσμα τής ήλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Συχνότητα ν (σέ Hz)		Μήκος κύματος λ
10^{24}	'Ακτίνες γ	$3 \cdot 10^{-8}$ Å
10^{21}		$3 \cdot 10^{-3}$ Å
10^{18}	'Ακτίνες Röntgen	3 Å
10^{15}	'Υπεριώδεις ακτίνες	$3 \cdot 10^3$ Å
	'Ορατές ακτινοβολίες	
10^{12}	'Υπέρυθρες ακτίνες	300 μm
	Μικροκύματα	
10^9	'Υπερβραχέα κύματα	30 cm
10^6	Βραχέα κύματα	300 m
	Μεσαία και μακρά κύματα	
10^3	Τηλεφωνικά κύματα	300 km
10^0	Βιομηχανικά κύματα	300 000 km

96. Ραδιοτηλεπικοινωνίες

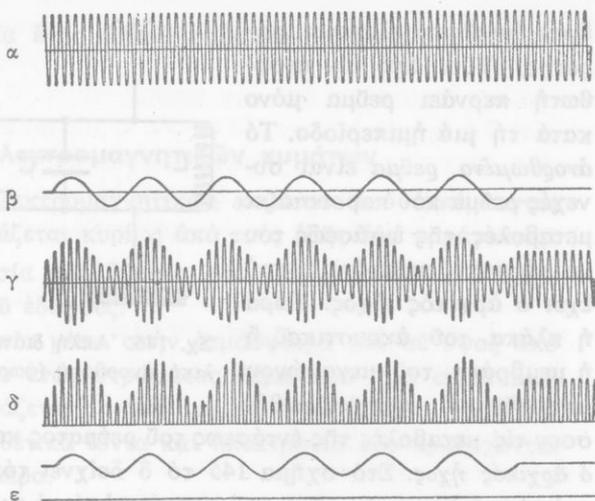
Τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα πού παράγονται από κυκλώματα, δηλαδή *τά έρτζιανά κύματα*, χρησιμοποιούνται σήμερα πάρα πολύ στις *ραδιοτηλεπικοινωνίες* (τηλεγραφία, τηλεφωνία, ραδιοφωνία, τηλεόραση, τηλεφωτογραφία, ραντάρ). Η ραδιοτηλεπικοινωνία με τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα *μεταδίνει ενέργεια* σε μεγάλη 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* καί στοιχειά πού αντίστοιχούν σε μορσικά σήματα, σε ήχους ή σε εικόνες. Η τεχνική τών ραδιοτηλεπικοινωνιών είναι σήμερα ένας τεράστιος κλάδος, πού συνεχώς εξελίσσεται. Θά εξετάσουμε σε πολύ γενικές γραμμές τήν εφαρμογή τών έρτζιανών κυμάτων.

97. Πομπός έρτζιανών κυμάτων

α. Φέρον κύμα. Ο *πομπός* έρτζιανών κυμάτων αποτελείται από ένα *κύκλωμα ταλαντώσεων*, στό όποιο παράγονται αμείωτες ηλεκτρικές ταλαντώσεις πού έχουν πολύ μεγάλη συχνότητα (ν). Η συχνότητα αυτή ονομάζεται *φέρουσα συχνότητα* (καί είναι τής τάξεως του MHz). Γιά τήν παραγωγή αυτών τών ταλαντώσεων χρησιμοποιούνται κυρίως τρίοδες ηλεκτρονικές λυχνίες. Τό παραπάνω κύκλωμα συνδέεται με τήν *κεραία*, πού είναι ένα παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο, στό όποιο παράγονται ηλεκτρικές ταλαντώσεις με τήν ίδια συχνότητα (ν). Η κεραία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα, πού έχει *σταθερή μεγάλη συχνότητα* (ν) καί ονομάζεται *φέρον κύμα*.

β. Διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Κατά τήν όμιλία καί στή μουσική παράγονται ήχοι πού έχουν *χαμηλές συχνότητες* (ώς 12 kHz). Αυτοί οί ήχοι, όταν φτάνουν στό μικρόφωνο προκαλούν μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος του μικροφώνου με τή συχνότητα ($\nu_{\eta\chi}$), πού έχει ό αντίστοιχος ήχος. Γιά τή μετάδοση ήχων (*ραδιοτηλεφωνία, ραδιοφωνία*) τό κύκλωμα του μικροφώνου συνδέεται με τό κύκλωμα ταλαντώσεων. Οί μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος του μικροφώνου (πού αντίστοιχούν σε ήχο όρισμένης συχνότητας $\nu_{\eta\chi}$) προκαλούν αντίστοιχες *μεταβολές στό πλάτος του φέροντος κύ-*

Σχ. 145. Διαμόρφωση των κυμάτων στο σταθμό έκπομπής και αποδιαμόρφωση στο δέκτη (α φέρον κύμα, β μικροφωνικό ήμιτονοειδές ρεύμα, γ διαμορφωμένο κύμα, δ ανόρθωση, ε ανορθωμένο ρεύμα όμοιο με τό μικροφωνικό ρεύμα)

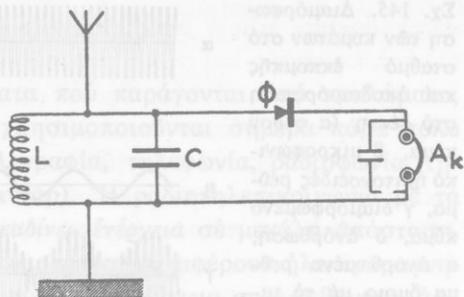


ματος με τό ρυθμό τής ήχητικῆς συχνότητος. Τότε ἡ κεραία ἐκπέμπει ἕνα **διαμορφωμένο κύμα**, πού μεταφέρει τίς χαρακτηριστικές μεταβολές πού προκάλεσε ὁ ἦχος στό ρεύμα τοῦ μικροφώνου. Στό σχῆμα 145 τό α δείχνει τό φέρον κύμα, πρὶν πάθει διαμόρφωση. Τό β δείχνει τήν ἡμιτονοειδή μεταβολή πού προκαλεῖ στήν ένταση τοῦ ρεύματος τοῦ μικροφώνου ἕνας ἀπλός ἦχος. Τό γ δείχνει τή διαμόρφωση πού παθαίνει τό φέρον κύμα.

98. Δέκτης ἔρτζιανῶν κυμάτων

Ὁ δέκτης ἔρτζιανῶν κυμάτων ἀποτελεῖται ἀπό τήν *κεραία*, πού συνδέεται μέ ἕνα *κύκλωμα ταλαντώσεων*. Αὐτό βρίσκεται σέ *συντονισμό* μέ τό κύκλωμα ταλαντώσεων τοῦ πομποῦ. Ἐτσι μέσα στό κύκλωμα τοῦ δέκτη παράγονται *διαμορφωμένες ἠλεκτρικές ταλαντώσεις*, ἴδιες μέ ἐκεῖνες πού σχηματίστηκαν στό κύκλωμα τοῦ πομποῦ. Ἄν αὐτές οἱ ταλαντώσεις ἔρθουν στό ἀκουστικό ἢ στό μεγάφωνο, δέν παράγεται ἦχος, γιατί ἡ πλάκα τοῦ ἀκουστικοῦ ἢ ἡ μεμβράνη τοῦ μεγαφώνου δέν μποροῦν νά παρακολουθήσουν τίς τόσο γρήγορες μεταβολές τής έντάσεως τοῦ ρεύματος. Μεταξύ τοῦ κυκλώματος ταλαντώσεων καί τοῦ ἀκουστικοῦ ἢ τοῦ μεγαφώνου 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 έντάσεώς του μέ τή συχνότητα ($\nu_{\eta\chi}$) πού έχει ο άρχικός ήχος. Τώρα ή πλάκα του άκουστικού ή ή μεμβράνη του μεγαφώνου μπορούν νά παρακολουθή-

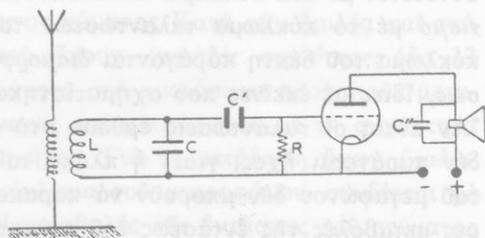


Σχ. 146. Άπλή διάταξη δέκτη μέ κρυσταλλικό άνορθωτή (φωρατή Φ) καί άκουστικά

σουν τίς μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος καί έτσι αναπαράγεται ο άρχικός ήχος. Στο σχήμα 145 τό δ δείχνει τό άνορθωμένο ρεύμα καί τό ε δείχνει τό ρεύμα πού περνάει από τό άκουστικό ή τό μεγάφωνο καί όπως βλέπουμε διατηρείται ή ήμιτονοειδής μεταβολή τής έντάσεως του ρεύματος του μικροφώνου. Στο σχήμα 146 φαίνεται μία άπλή διάταξη δέκτη μέ άκουστικά.

Ένίσχυση, επιλογή. Οί διαμορφωμένες ήλεκτρικές ταλαντώσεις πού παράγονται στο κύκλωμα είναι πολύ άσθενείς καί γι' αυτό ένισχύονται μέ κατάλληλους ένισχυτές. Στην κεραία πέφτουν ήλεκτρομαγνητικά κύματα μέ πολύ διαφορετικές συχνότητες. Για νά μπορούμε νά κάνουμε επιλογή καί νά συντονίζουμε τό δέκτη μέ τόν πομπό, ο δέκτης έχει έναν πυκνωτή μεταβλητής χωρητικότητας, μέ τόν όποιο μεταβάλλουμε τήν ιδιοσυχνότητα του κυκλώματος του δέκτη. Όταν υπάρχει συντονισμός του δέκτη μέ τόν πομπό, οί ταλαντώσεις στο κύκλωμα του δέκτη έχουν μεγάλο πλάτος.

Ραδιόφωνο. Τό ραδιόφωνο είναι ένας δέκτης έρτζιανών κυμάτων, στον όποιο ή άνορθωση καί ή ένίσχυση γίνεται μέ κατάλληλες ήλεκτρονικές λυχνίες ή μέ ήμιαγωγούς (ραδιόφωνα μέ τρανζίστορ). Τό σχήμα 147 δεί-



Σχ. 147. Άπλό ραδιόφωνο μέ μία τρίοδη λυχνία

χνει τή συνδεσμολογία ενός άπλου ραδιοφώνου μέ μιά τρίοδη ήλεκτρονική λυχνία.

99. Διάδοση τών ήλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η διάδοση τών ήλεκτρομαγνητικών κυμάτων πού εκπέμπονται από τήν κεραία έπηρεάζεται κυρίως από τούς έξής δύο παράγοντες:

α) Από τήν παρουσία του εδάφους, πού ή *άγωγιμότητά του* εξαρτάται από τή φύση του εδάφους.

β) Από τήν παρουσία μέσα στήν ατμόσφαιρα καί σέ ύψος από 80 ως 350 km περίπου ενός στρώματος άέρα πού έχει σημαντική *άγωγιμότητα* καί ονομάζεται **ιονόσφαιρα**. Η άγωγιμότητα τής ιονόσφαιρας οφείλεται σέ θετικά ίόντα καί ήλεκτρόνια πού προέρχονται από τόν ιονισμό του άέρα.

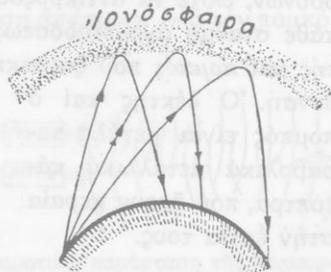
Τά ήλεκτρομαγνητικά κύματα πού εκπέμπονται από τήν κεραία διακρίνονται στίς έξής δύο κατηγορίες: α) *στά κύματα επιφάνειας*, πού διαδίδονται κοντά στήν επιφάνεια τής Γής, καί β) *κύματα χώρου*, πού εκπέμπονται από τήν κεραία προς τά πάνω.

Τά κύματα επιφάνειας *άπορροφώνται* από τήν επιφάνεια τής Γής καί ή άπορρόφηση είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο *μικρότερο* είναι τό μήκος κύματος (λ) του ήλεκτρομαγνητικού κύματος. Τά κύματα χώρου, όταν έχουν μήκος κύματος (λ) μεγαλύτερο ενός όριου, *ανάκλωνται* πάνω στήν ιονόσφαιρα καί ξαναγυρίζουν στήν επιφάνεια τής Γής (σχ. 148). Έτσι τά *άνακλώμενα* κύματα φτάνουν σέ μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική εξασθένηση.

α. Τά *έρτζιανά* κύματα στίς τηλεπικοινωνίες. Τά έρτζιανά κύματα πού χρησιμοποιούνται στίς τηλεπικοινωνίες διακρίνονται στίς έξής κατηγορίες:

α) Τά *μακρά κύματα* ($\lambda > 600$ m), παρουσιάζουν μικρή άπορρόφηση τών κυμάτων επιφάνειας καί είναι κατάλληλα για μεταδοση σέ μεγάλες αποστάσεις.

β) Τά *μεσαία κύματα*
($100 \text{ m} < \lambda < 600$ m),



Σχ. 148. Άνάκλαση τών ήλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στήν ιονόσφαιρα

παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορρόφηση των κυμάτων επιφάνειας, αλλά τα κύματα χώρου ανακλώνται πάνω στην ιονόσφαιρα και φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις από τον πομπό.

γ) Τά βραχέα κύματα ($10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$) παρουσιάζουν πολύ μεγάλη απορρόφηση των κυμάτων επιφάνειας, 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) Τά υπερβραχέα κύματα ($1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$) δέν ανακλώνται πάνω στην ιονόσφαιρα, αλλά περνούν μέσα από αυτήν και βγαίνουν στο άστρικό διάστημα. Έπομένως για τή μετάδοση χρησιμοποιούμε μόνο τά κύματα επιφάνειας, πού έχουν πολύ μικρή έμβέλεια. Τά υπερβραχέα κύματα διαδίδονται εϋθύγραμμα, όπως και τό φώς, και γι' αυτό ό δέκτης πρέπει νά βρίσκεται στον οπτικό όρίζοντα του πομπού. Χρησιμοποιούνται στην τηλεόραση.

ε) Τά μικροκύματα ($0,1 \text{ mm} < \lambda < 1 \text{ m}$) περνούν μέσα από τήν ιονόσφαιρα και βγαίνουν στο άστρικό διάστημα. Μπορούν νά αποτελέσουν μιά κατευθυνόμενη δέσμη ανάλογη μέ μιά δέσμη φωτεινών ακτίνων. Χρησιμοποιούνται στο ραντάρ και στη ραδιοτηλεφωνία.

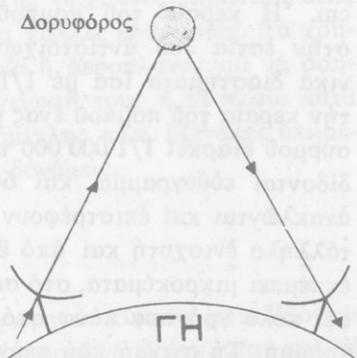
β. Αναμετάδοση των κυμάτων. Τά υπερβραχέα κύματα και τά μικροκύματα διαδίδονται εϋθύγραμμα και έπομένως τά βουνά και ή καμπυλότητα τής Γής εμποδίζουν τή διάδοση αυτών των κυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Σ' αυτή τήν περίπτωση χρησιμοποιούμε σταθμούς αναμεταδόσεως των κυμάτων πού βρίσκονται στις κορυφές βουνών, ώστε νά αντικρύζουν ό ένας τόν άλλο σταθμό (σχ. 149). Σε κάθε σταθμό αναμεταδόσεως υπάρχει δέκτης των κυμάτων, ενισχυτής και πομπός πού ξαναεκπέμπει τά κύματα προς όρισμένη κατεύθυνση. Ό δέκτης και ό πομπός είναι μεγάλα παραβολικά μεταλλικά κάτοπτρα, πού έχουν κεραία στην έστία τους.

γ. Διαστημικές τηλεπικοινωνίες. Τά έρτζιανά κύματα πού έχουν μικρό



Σχ. 149. Σχηματική παράσταση σταθμών αναμεταδόσεως των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

μήκος κύματος μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια ειδικών τεχνητών δορυφόρων, που περιφέρονται γύρω από τη Γη σε ύψη από 10 000 km ως 36 000 km και ονομάζονται *τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι* (σχ. 150). Κάθε τέτοιος δορυφόρος έχει δέκτη, ενισχυτή και πομπό. Οί συσκευές του δορυφόρου λειτουργούν με συσσωρευτές που φορτίζονται με το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παράγεται από πολλές φωτοστήλες. Αυτές μετατρέπουν την ενέργεια του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια.

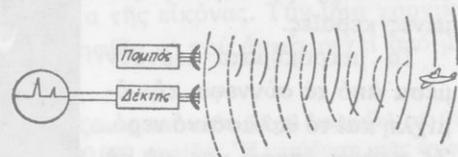


Σχ. 150. Αναμετάδοση των κυμάτων από τηλεπικοινωνιακό τεχνητό δορυφόρο

Τά έρτζιανά κύματα που εκπέμπονται από την επιφάνεια της Γης ξαναγαυρίζουν σ' αυτή, αφού διατρέξουν μεγάλες αποστάσεις έξω από την ατμόσφαιρα, δηλαδή μέσα στο αστρικό διάστημα (*διαστημικές τηλεπικοινωνίες*).

100. Ραντάρ

Μιά σπουδαιότατη εφαρμογή των μικροκυμάτων έχουμε στο **ραντάρ** (radar *). Με αυτό μπορούμε να εντοπίσουμε την παρουσία αντικειμένων που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τον πομπό, δηλαδή μπορούμε να βρούμε κατά ποιά *διεύθυνση* βρίσκεται ένα αντικείμενο (αεροπλάνο, πλοίο κ.ά.) και σε πόση *απόσταση* από τον πομπό. Γι' αυτό το ραντάρ ονομάζεται και *ραδιοεντοπιστής*. Το ραντάρ αποτελείται από έναν πομπό μικροκυμάτων και από ένα δέκτη (σχ. 151). Τά μικροκύματα που χρησιμοποιούμε συνήθως έχουν μήκος κύματος από 3 ως 10

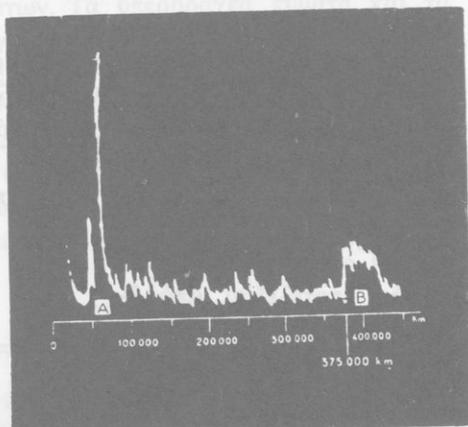


Σχ. 151. Σχηματική παράσταση της λειτουργίας του ραντάρ

(*) Διεθνής όρος από τά αρχικά γράμματα των λέξεων: RAdio Detection And Ranging.

cm. Ἡ κεραία τοῦ πομποῦ καί ἡ κεραία τοῦ δέκτη βρίσκονται στήν ἑστία δύο ἀντίστοιχων παραβολικῶν κατόπτρων. Κατά χρονικά διαστήματα ἴσα μέ $1/1000$ τοῦ δευτερολέπτου ἐκπέμπεται ἀπό τήν κεραία τοῦ πομποῦ ἕνας συρμός μικροκυμάτων. Ἡ ἐκπομπή κάθε συρμοῦ διαρκεῖ $1/1\ 000\ 000$ τοῦ δευτερολέπτου. Τά μικροκύματα διαδίδονται εὐθύγραμμα, καί ὅταν πέσουν πάνω σέ ἕνα ἀντικείμενο, ἀνακλῶνται καί ἐπιστρέφουν στό δέκτη. Αὐτός ἀποτελεῖται ἀπό κατάλληλο ἐνισχυτή καί ἀπό ἕνα σωλήνα Braun. Ὄταν ὁ πομπός δέν ἐκπέμπει μικροκύματα, στό σωλήνα Braun τό φωτεινό σημεῖο διαγράφει πολύ γρήγορα πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει μιά ὀριζόντια γραμμή. Τή στιγμή πού φεύγουν τά μικροκύματα ἀπό τόν πομπό καθώς καί τή στιγμή πού τά μικροκύματα φτάνουν στό δέκτη τό φωτεινό σημεῖο ἐκτρέπεται ἀπότομα πρὸς τά πάνω καί ἔτσι ἐμφανίζονται δύο αἰχμές. Ἡ πρώτη ἀντιστοιχεῖ στήν ἐκπομπή καί ἡ δεύτερη στήν ἀφιξη τῶν μικροκυμάτων. Ἡ ἀπόσταση μεταξύ τῶν δύο αἰχμῶν εἶναι ἀνάλογη μέ τό χρόνο πού μεσολαβεῖ μεταξύ τῆς ἐκπομπῆς καί τῆς λήψεως τῶν μικροκυμάτων. Ὁ χρόνος αὐτός εἶναι ἀνάλογος μέ τήν ἀπόσταση τοῦ πομποῦ ἀπό τό στόχο πού προκαλεῖ τήν ἀνάκλαση τῶν μικροκυμάτων. Ἐτσι ἡ ἀπόσταση τῶν δύο αἰχμῶν πάνω σέ μιά κλίμακα δίνει ἀμέσως τήν ἀπόσταση τοῦ στόχου ἀπό τόν πομπό. Ἡ διεύθυνση τοῦ στόχου καθορίζεται εὐκόλα, γιατί ἡ κατευθυνόμενη δέσμη τῶν μικροκυμάτων μπορεῖ νά κατευθύνεται σέ διάφορες διευθύνσεις μέ περιστρεφόμενες κεραίες.

Τά μικροκύματα περνοῦν μέσα ἀπό τά σύννεφα, τήν ὀμίχλη καί τό θαλασσινό νερό. Ἡ πρώτη ἐπαφή μας μέ τή Σελήνη ἔγινε μέ μικροκύματα (1947), πού πάνω στήν ἐπιφάνειά της ἔπαθαν ἀνάκλαση καί ξαναγύρισαν στό δέκτη



Σχ. 152. Τά μικροκύματα ἔπαθαν ἀνάκλαση πάνω στήν ἐπιφάνεια τῆς Σελήνης καί ξαναγύρισαν στή Γῆ (A ἀναχώρηση, B ἀφιξη τῶν μικροκυμάτων).

(σχ. 152). Μέ έναν ειδικό τύπο ραντάρ μπορούμε νά λάβουμε πάνω στό διάφραγμα τήν εικόνα μιᾶς περιοχῆς (π.χ. ενός λιμανιοῦ, ἐνός ἀεροδρομίου). Τά ραντάρ ἔχουν σήμερα πολλές ἐφαρμογές. Τά χρησιμοποιοῦμε γιά νά ἐπισημαίνουμε πλοῖα ἢ ἀεροπλάνα, γιά νά βοηθήσουμε τά ἀεροπλάνα κατά τήν προσγείωσή τους ἢ τά πλοῖα κατά τήν εἴσοδό τους στό λιμάνι σέ καιρό ὀμίχλης κλπ. Μεγάλες ὑπηρεσίες προσφέρει τό ραντάρ στίς ἔνοπλες δυνάμεις.

101. Τηλεόραση

Στήν τηλεόραση μέ τά ἠλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται εἰκόνας προσώπων ἢ ἀντικειμένων πού μπορεῖ νά βρίσκονται καί σέ κίνηση. Ὅπως ξέρουμε, τό μάτι μας δέν μπορεῖ νά διακρίνει ὅτι στήν ὀθόνη τοῦ κινηματογράφου προβάλλονται πολύ γρήγορα διαδοχικές εἰκόνας τοῦ ἀντικειμένου πού κινεῖται. Σ' αὐτή τήν ιδιότητα τοῦ ματιοῦ στηρίζεται καί ἡ τηλεόραση, μέ τή διαφορά ὅτι ἀκόμα δέν μπορούμε νά μεταδώσουμε μονομιᾶς ὁλόκληρη τήν εἰκόνα καί γι' αὐτό μεταδίδουμε πολύ γρήγορα διαδοχικά μικρά τμήματα τῆς εἰκόνας.

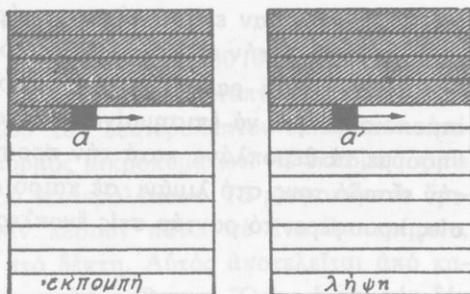
α. Ἀνάλυση τῆς εἰκόνας. Ἡ ἀνάλυση τῆς εἰκόνας σέ πολλά μικρά διαδοχικά τμήματα γίνεται ὡς ἐξῆς: Ἡ εἰκόνα διαιρεῖται σέ πολλές στενές παράλληλες ζῶνες καί κάθε ζώνη διαιρεῖται σέ πολλά μικρά τμήματα πού τά ὀνομάζουμε «ψηφίδες» (*). Γιά τή μετάδοση τῆς εἰκόνας μιά λεπτή φωτεινή δέσμη «σαρώνει» διαδοχικά τίς ζῶνες τῆ μιά μετά τήν ἄλλη. Τό σάρωμα ὅλης τῆς εἰκόνας γίνεται πολύ γρήγορα, μέσα σέ $1/25$ τοῦ δευτερολέπτου. Ἐτσι κάθε ψηφίδα φωτίζεται ἐπί ἓνα ἐλάχιστο χρονικό διάστημα (λιγότερο ἀπό ἓνα ἑκατομμυριοστό τοῦ δευτερολέπτου). Σέ μιά ὀρισμένη χρονική στιγμή στόν πομπό φωτίζεται ἡ ψηφίδα α τῆς εἰκόνας. Τήν ἴδια χρονική στιγμή στό δέκτη ἀναπαράγεται ἡ ψηφίδα α' πού ἀντιστοιχεῖ στό μι-

(*) Ἐν π.χ. ἡ εἰκόνα διαιρεθεῖ σέ 625 ζῶνες καί κάθε ζώνη διαιρεθεῖ σέ 640 ψηφίδες, τότε ὅλη ἡ εἰκόνα ἀναλύεται σέ 400 000 ψηφίδες. Ἡ μετάδοση μιᾶς ψηφίδας διαρκεῖ ἐπί χρόνο

$$\frac{1/25 \text{ sec}}{4 \cdot 10^5 \text{ ψηφίδες}} = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ sec /ψηφίδα}$$

κρό τμήμα α τής εικόνας πού μεταδίδεται (σχ. 153).

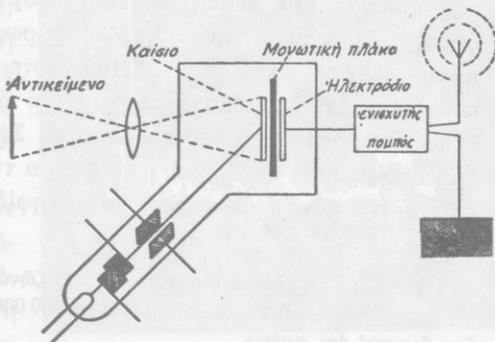
Ἡ διαμόρφωση τοῦ φέροντος κύματος ἢ ὁποῖα ἀντιστοιχεῖ σέ μιά ψηφίδα, διαρκεῖ ἐπί ἐλάχιστο χρόνο. Ἐπομένως, ἡ περίοδος τοῦ φέροντος κύματος πρέπει νά εἶναι πολύ μικρότερη ἀπό αὐτό τό χρόνο. Γι' αὐτό στήν τηλεόραση πρέπει νά χρησιμοποιοῦμε φέροντα κύματα μέ πολύ μεγάλη συχνότητα, δηλαδή ὑπερβραχέα κύματα ἢ μικροκύματα ($\lambda < 1 \text{ m}$). Ἄλλά αὐτά τά κύματα ἔχουν πολύ μικρή ἐμβέλεια.



Σχ. 153. Ἀνάλυση τής εικόνας σέ μικρά τμήματα (α) πού μεταδίδονται διαδοχικά

β. Πομπός τηλεόρασης. Γιά τήν ἀνάλυση τής εικόνας καί τή διαδοχική μετάδοση τῶν μικρῶν τμημάτων τής ἐφαρμόζουμε διάφορα συστήματα. Ἐνα ἀπό αὐτά εἶναι τό εἰκονοσκόπιο Zworykin. Αὐτό εἶναι ἕνας σωλήνας Braun, πού στό ἐσωτερικό του ὑπάρχει μιά λεπτή μονωτική πλάκα (σχ. 154). Ἡ μιά ἐπιφάνεια τής πλάκας σκεπάζεται μέ μιά λεπτή μεταλλική πλάκα (ἠλεκτρόδιο) πού συνδέεται μέ τό κύκλωμα ταλαντώσεων τοῦ πομποῦ. Ἡ ἄλλη ἐπιφάνεια τής μονωτικῆς πλάκας ἔχει σκεπαστεῖ μέ πολύ μικρά κοκκίδια καυσίου, πού εἶναι μονωμένα τό ἕνα ἀπό τό ἄλλο. Ἐτσι κάθε κοκκίδιο καυσίου καί τό ἀντίστοιχο τμήμα τοῦ ἠλεκτροδίου ἀποτελοῦν ἕνα μικρότατο πυκνωτή.

Μέ ἕνα φακό σχηματίζεται πάνω στό στρῶμα τοῦ καυσίου τό πραγματικό εἶδωλο τής εικόνας πού



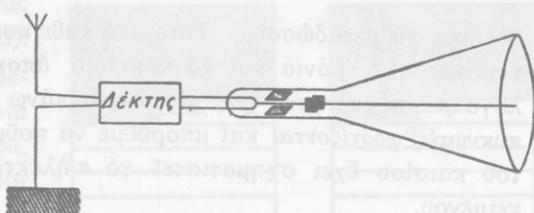
Σχ. 154. Σχηματική διάταξη τοῦ πομποῦ τηλεόρασης

θέλουμε νά μεταδώσουμε. Τότε από κάθε κοκκίδιο καισίου ἀποσπών-
ται φωτοηλεκτρόνια καί τό κοκκίδιο ἀποκτᾷ *θετικό φορτίο* ἀνά-
λογο μέ *τή φωτεινή ροή* πού ἔπεσε πάνω του. Ἔτσι οἱ μικρότατοι
πυκνωτές *φορτίζονται* καί μπορούμε νά πούμε ὅτι πάνω στό στῤῥωμα
τοῦ καισίου ἔχει σχηματιστεῖ τό «ἤλεκτρικό εἶδωλο» τοῦ ἀντι-
κειμένου.

Ἡ ἤλεκτρονική δέσμη πού παράγει ἡ κάθοδος, ἀρχίζει νά σαρώ-
νει διαδοχικά κάθε ζώνη καί ὅταν σαρώσει ὅλες τίς ζώνες, ξαναγυ-
ρίζει ἀπότομα στήν ἀρχή τῆς πρώτης ζώνης καί ἀρχίζει νέο σάρωμα.
Τά ἤλεκτρόνια τῆς δέσμης, ὅταν πέφτουν πάνω σέ ἕνα κοκκίδιο και-
σίου, ἐξουδετερώνουν τό θετικό φορτίο του. Αὐτή ἡ ἐξουδετέρωση
ἰσοδυναμεῖ μέ ἀπότομη *ἐκφόρτιση τοῦ μικροῦ πυκνωτῆ*, γιατί ἀπο-
δεσμεύεται τό ἀρνητικό φορτίο πού ἦταν στόν ἄλλο ὄπλισμό του
(δηλαδή στό ἀντίστοιχο τμήμα τοῦ ἤλεκτροδίου). Ὡστε ἡ ἤλεκτρο-
νική δέσμη σαρώνοντας διαδοχικά τούς μικρούς πυκνωτές προκαλεῖ
διαδοχικά τήν *ἐκφόρτισή* τους, δηλαδή δημιουργεῖ *διαδοχικά ρεύ-
ματα*, τά ὁποῖα, ἀφοῦ ἐνισχυθοῦν, ἔρχονται *στόν πομπό* καί προκα-
λοῦν *τή διαμόρφωση* τοῦ φέροντος κύματος. Μέ τό εἰκονοσκόπιο
πετυχαίνουμε *τήν ἀνάλυση* τῆς εἰκόνας καί *τή μετατροπή τῶν φωτει-
νῶν* διαφορῶν τῆς εἰκόνας σέ διαφορές τῆς *ἐντάσεως ρεύματος* πού
προκαλοῦν ἀντίστοιχες διαμορφώσεις στό φέρον κύμα.

γ. Δέκτης τηλεοράσεως. Ὁ *δέκτης τηλεοράσεως* εἶναι ἕνας συνη-
θισμένος ραδιοφωνικός δέκτης πού συνδέεται μέ σωλήνα Braun. Τό
διάφραγμα πού φθορίζει εἶναι ἕνα παραλληλόγραμμο. Τά ἤλεκτρομα-
γνητικά κύματα πού πέφτουν στήν κεραία δημιουργοῦν στό κύκλωμα
ταλαντώσεων τοῦ δέκτη διαμορφωμένες ἤλεκτρικές ταλαντώσεις. Αὐ-
τές, ἀφοῦ ἐνισχυθοῦν, ὑποβάλλονται σέ ἀνόρθωση. Οἱ μεταβολές
τῆς ἐντάσεως τοῦ ἀνορθωμένου ρεύματος ρυθμίζουν τήν *ἐνταση* τῆς
ἤλεκτρονικῆς δέσμης πού ἐκπέμπει ἡ διάπυρη κάθοδος στό σωλήνα
Braun. Ἔτσι ἡ φωτεινότητα σέ ἕνα σημεῖο τοῦ διαφράγματος εἶναι
ἀνάλογοι μέ τήν ἐνταση τῆς ἤλεκτρονικῆς δέσμης. Στό δέκτη τό σά-
ρωμα πού κάνει ἡ ἤλεκτρονική δέσμη πάνω στό διάφραγμα τοῦ σω-
λήνα Braun εἶναι *ἀπόλυτα συγχρονισμένο* μέ τό σάρωμα πού κάνει
ἡ ἤλεκτρονική δέσμη πάνω στό «ἤλεκτρικό εἶδωλο» πού σχηματίζε-
ται στόν πομπό. Τό σάρωμα τῆς ὀθόνης τοῦ δέκτη γίνεται μέσα σέ

1/25 του δευτερολέπτου. Έτσι κάθε στιγμή στην οθόνη του δέκτη σχηματίζεται ή εικόνα του φωτεινού αντικειμένου που βρίσκεται στον τόπο του πομπού (σχ. 155).



Σχ. 155. Σχηματική διάταξη του δέκτη τηλεόρασεως

Σε πολλές χώρες χρησιμοποιείται ή *έγχρωμη τηλεόραση* που βασίζεται στην εξής αρχή: με τρία μόνο χρώματα, τό ερυθρό, 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 ή τηλεόραση, με τή 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. Επίσης χρησιμοποιείται γιά τή γρήγορη μετάδοση χαρτών ή κειμένων.

102. Ραδιοαστρονομία

Μιά εφαρμογή των έρτζιανών κυμάτων είναι ό νέος κλάδος τής *Άστροφυσικής*, που ονομάζεται **Ραδιοαστρονομία** και αναπτύχθηκε κυρίως μετά τό δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Τά *ραδιοτηλεσκόπια* είναι μεγάλα μεταλλικά παραβολικά κάτοπτρα που έχουν κεραία στην έστιά τους. Έτσι ανακαλύψαμε ότι σε διάφορα σημεία του Γαλαξία, αλλά και έξω από αυτόν υπάρχουν ισχυρότατοι πομποί έρτζιανών κυμάτων. Η ραδιοαστρονομική έρευνα πλουτίζει τίς γνώσεις μας

γιά τό Σύμπαν καί φτάνει σέ πολύ μεγαλύτερο βάθος μέσα στό Σύμπαν από εκείνο στό όποιο φτάνει ή όπτική έρευνα μέ τά γνωστά όπτικά τηλεσκόπια.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

120. Σ' ένα κύκλωμα ταλαντώσεων ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C = 1 \mu\text{F}$ καί τό πηνίο έχει συντελεστή αúτεπαγωγής $L = 1 \mu\text{H}$. Πόση είναι ή περίοδος καί ή συχνότητα τών ήλεκτρικών ταλαντώσεων;

121. Σέ ένα κύκλωμα ταλαντώσεων τό πηνίο έχει συντελεστή αúτεπαγωγής $L = 0,1 \mu\text{H}$. Πόση πρέπει νά είναι ή χωρητικότητα του πυκνωτή, ώστε ή συχνότητα τών ήλεκτρικών ταλαντώσεων νά είναι ίση μέ $\nu = 1 \text{ MHz}$; $\pi^2 = 10$.

122. Ό πυκνωτής ενός κυκλώματος ταλαντώσεων έχει χωρητικότητα $C = 0,2 \mu\text{F}$. Πόσος πρέπει νά είναι ό συντελεστής αúτεπαγωγής του πηνίου, ώστε ή συχνότητα τών ήλεκτρικών ταλαντώσεων νά είναι $\nu = 2 \text{ MHz}$; $\pi^2 = 10$.

123. Σέ ένα κύκλωμα ταλαντώσεων Α ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C_1 = 2 \mu\text{F}$ καί τό πηνίο έχει συντελεστή αúτεπαγωγής $L_1 = 4 \mu\text{H}$. Οί παραγόμενες ήλεκτρικές ταλαντώσεις έχουν συχνότητα ν_0 ίση μέ τήν ιδιοσυχνότητα του κυκλώματος. Σέ ένα γειτονικό κύκλωμα ταλαντώσεων Β τό πηνίο έχει συντελεστή αúτεπαγωγής $L_2 = 10 \mu\text{H}$. Πόση πρέπει νά γίνει ή χωρητικότητα C_2 του πυκνωτή, ώστε τά δύο κυκλώματα νά βρίσκονται σέ συντονισμό;

124. Τό κύκλωμα ταλαντώσεων ενός πομπού αποτελείται από ένα πηνίο, πού έχει συντελεστή αúτεπαγωγής $L = \frac{1}{\pi \cdot 10^6}$ Η καί από έναν πυκνωτή, πού έχει χωρητικότητα $C = \frac{1}{\pi \cdot 10^6}$ F. Πόσο είναι τό μήκος κύματος λ καί ή συχνότητα ν τών ήλεκτρομαγνητικών κυμάτων πού εκπέμπει αυτός ό σταθμός;

125. Σέ ένα ραδιοφωνικό δέκτη τό κύκλωμα ταλαντώσεων αποτελείται από ένα πηνίο, πού έχει συντελεστή αúτεπαγωγής $L = 0,8 \text{ mH}$, καί από έναν πυκνωτή, πού ή χωρητικότητά του μπορεί νά μεταβάλλεται από $C_1 = 2 \cdot 10^{-12} \text{ F}$ ως $C_2 = 50 \cdot 10^{-12} \text{ F}$. Για ποιά μήκη κύματος λειτουργεί αυτός ό δέκτης;

126. Τό κύκλωμα ταλαντώσεων ενός ραδιοφωνικού δέκτη έχει ένα πηνίο με $L = 0,2 \text{ mH}$ και ένα μεταβλητό πυκνωτή, πού ή χωρητικότητά του μπορεί νά μεταβάλλεται από $C_1 = 50 \text{ pF}$ ως $C_2 = 200 \text{ pF}$. Μπορούμε μέ αυτό τό δέκτη νά πιάσουμε κύματα πού έχουν μήκη κύματος $\lambda_1 = 100 \text{ m}$, $\lambda_2 = 300 \text{ m}$ και $\lambda_3 = 500 \text{ m}$;

127. Ένας ραδιοφωνικός δέκτης προορίζεται γιά τά μεσαία κύματα πού έχουν μήκος κύματος από $\lambda_1 = 180 \text{ m}$ ως $\lambda_2 = 600 \text{ m}$. Τό κύκλωμα ταλαντώσεων τού δέκτη έχει πηνίο μέ $L = 0,8 \text{ mH}$. Άνάμεσα σέ ποιά όρια πρέπει νά μεταβάλλεται ή χωρητικότητα C τού πυκνωτή πού θά βάλουμε σέ αυτό τό κύκλωμα;

103. Η θεωρία τῶν κβάντα

Μάθαμε (§ 95) ὅτι τὰ ἄτομα τῆς ὕλης ἐκπέμπουν ἠλεκτρομαγνητικές ἀκτινοβολίες πού ἔχουν πολὺ μεγάλες συχνότητες (ἀπὸ 10^{13} Hz ὡς 10^{24} Hz). Γιὰ νὰ ἐξηγηθοῦν ὀρισμένα φαινόμενα, διατυπώθηκε ἡ θεωρία τῶν κβάντα (§ 44β), πού ἀπέδειξε ὅτι τὰ ἄτομα τῆς ὕλης ἐκπέμπουν καὶ ἀπορροφοῦν φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιᾶς ἀκτινοβολίας μεταφέρει ὀρισμένη ἐνέργεια, ἴση μὲ $E = h \cdot \nu$, ὅπου ν εἶναι ἡ συχνότητα τῆς ἀκτινοβολίας. Ὅπως θὰ δοῦμε παρακάτω, ἡ θεωρία τῶν κβάντα μᾶς ἐπιτρέπει νὰ ἐξηγήσουμε πῶς τὸ ἄτομο ἐκπέμπει καὶ ἀπορροφᾷ τὸ φωτόνιο μιᾶς ἀκτινοβολίας.

104. Η θεωρία τῆς σχετικότητας

Ὁ Einstein, γιὰ νὰ ἐξηγήσει ὀρισμένα πειραματικά ἀποτελέσματα, διατύπωσε μιὰ πολὺ γενικὴ θεωρία, πού εἶναι γνωστὴ μὲ τὸ ὄνομα **θεωρία τῆς σχετικότητας**. Θὰ ἐξετάσουμε μόνο δύο πολὺ ἐνδιαφέρουσες συνέπειες τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας.

α. Μεταβολὴ τῆς μάζας μὲ τὴν ταχύτητα. Στὴν Κλασσικὴ Μηχανικὴ ἀποδεικνύεται θεωρητικά καὶ πειραματικά ὅτι ἡ μάζα m ἐνὸς σώματος εἶναι μέγεθος σταθερὸ καὶ ἀνεξάρτητο ἀπὸ τὴν κατάσταση τῆς ἠρεμίας ἢ τῆς κινήσεως τοῦ σώματος. Ἀντίθετα, ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας ἀποδεικνύει θεωρητικά ὅτι ἡ μάζα ἐνὸς σώματος *ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν ταχύτητα* μὲ τὴν ὁποία κινεῖται τὸ σῶμα καὶ διατυπώνει τὸν ἐξῆς νόμο μεταβολῆς τῆς μάζας μὲ τὴν ταχύτητα:

Ἄν ἡ μάζα ἐνὸς σώματος στὴν κατάσταση ἠρεμίας εἶναι m_0 (μάζα ἠρεμίας), τότε γιὰ ἕναν παρατηρητὴ, πού σχετικὰ μὲ αὐτὸν τὸ σῶμα κινεῖται μὲ ταχύτητα v , ἡ μάζα m τοῦ σώματος εἶναι ἴση μὲ:

$$\text{μάζα κινούμενου σώματος} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (1)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = 3 \cdot 10^8$ m/sec). Οι ταχύτητες που έχουμε στο μακρόκοσμο είναι πολύ μικρές σχετικά με την ταχύτητα του φωτός. Έτσι, ο λόγος $(v/c)^2$ είναι πολύ μικρός και δε μπορούμε να διαπιστώσουμε τη μεταβολή της μάζας ενός σώματος που κινείται (γιατί βρίσκουμε $m = m_0$). Στόν καθοδικό σωλήνα αυξάνοντας την τάση U αυξάνουμε την ταχύτητα v των ηλεκτρονίων. Από τις μετρήσεις βρέθηκε ότι η μάζα των ηλεκτρονίων μεταβάλλεται με την ταχύτητα όπως ακριβώς όριζει η θεωρία της σχετικότητας.

Όταν η ταχύτητα (v) του σώματος συνεχώς αυξάνει, τότε ο λόγος v/c τείνει προς τη μονάδα, και επομένως η μάζα m του σώματος συνεχώς αυξάνει. Όταν η ταχύτητα v του σώματος τείνει να γίνει ίση με την ταχύτητα c του φωτός, τότε η μάζα m του σώματος τείνει να γίνει άπειρη. Γιατί στην όρική περίπτωση $v = c$ έχουμε:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 1}} = \frac{m_0}{0} \quad \text{άρα} \quad m = \infty$$

Έτσι καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα:

Είναι αδύνατο να κινηθεί ένα σώμα με την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι τό όριο των ταχυτήτων στο Σύμπαν.

Όταν λέμε ότι η μάζα (m) ενός σώματος αυξάνει με την ταχύτητα (v) του σώματος, δεν έννοούμε ότι αυξάνει η ποσότητα της ύλης του σώματος. Εκείνο που αυξάνει είναι η αδράνεια του σώματος, γιατί όπως ξέρουμε η μάζα ενός σώματος εκφράζει και τό βαθμό της αδράνειας του σώματος. Όστε, όταν είναι $v = c$, η αδράνεια του σώματος γίνεται άπειρη.

Παράδειγμα. 1) Ένα βλήμα έχει μάζα ήρεμίας $m_0 = 1$ kgf και κινείται με ταχύτητα $v = 1$ km/sec. Τότε είναι:

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = \left(\frac{1 \text{ km/sec}}{3 \cdot 10^5 \text{ km/sec}}\right)^2 = \frac{1}{9 \cdot 10^{10}}$$

Τό κινούμενο βλήμα έχει 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 είναι $m = m_0 \left(1 + \frac{5}{10^{12}}\right)$

*Αρα 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 ήρεμίας m_0 κινείται με ταχύτητα $v = 0,9 c$ (δηλαδή είναι $v = 2,7 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$). Τό 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 ήρεμίας του ηλεκτρονίου.

β. Ίσοδυναμία μάζας και ενέργειας. Ένα σώμα που έχει μάζα ήρεμίας m_0 , όταν κινείται με ταχύτητα v , έχει μάζα:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Η θεωρία της σχετικότητας αποδεικνύει ότι τό 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 τό σώμα ήρεμεί ($v = 0$) ή κινητική ενέργειά του $\left(\frac{1}{2} m_0 \cdot v^2\right)$ είναι ίση με μηδέν, αλλά ή μάζα ήρεμίας m_0 του σώματος εξακολουθεί να έχει ενέργεια ίση με $m_0 \cdot c^2$. Έτσι ή θεωρία της σχετικότητας αποδεικνύει ότι ή μάζα και ή ενέργεια είναι δύο φυσικά μεγέθη *ισοδύναμα*

καί διατυπώνει τήν ακόλουθη **ἀρχή τῆς ἰσοδυναμίας μάζας καί ἐνέργειας** :

Μιά μάζα m ἰσοδυναμεῖ μέ ἐνέργεια E , ἴση μέ τό γινόμενο τῆς μάζας (m) ἐπί τό τετράγωνο τῆς ταχύτητας (c) τοῦ φωτός στό κενό.

$$\text{ἰσοδυναμία μάζας καί ἐνέργειας} \quad E = m \cdot c^2$$

Ἡ ἀρχή τῆς ἰσοδυναμίας μάζας καί ἐνέργειας ἰσχύει καί ἀντίστροφα, δηλαδή:

Μιά ἐνέργεια E ἰσοδυναμεῖ μέ μάζα m , ἴση μέ τό πηλίκο τῆς ἐνέργειας (E) διά τοῦ τετραγώνου τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός στό κενό.

$$\text{ἰσοδυναμία ἐνέργειας καί μάζας} \quad m = \frac{E}{c^2}$$

Ἡ ἀρχή τῆς ἰσοδυναμίας μάζας καί ἐνέργειας ἐπιβεβαιώθηκε μέ τό πείραμα καί σήμερα βρίσκει ἐφαρμογή στήν ἐκμετάλλευση τῆς *πυρηνικῆς ἐνέργειας*.

Παράδειγμα. Μιά μάζα $m = 1$ gr ἰσοδυναμεῖ μέ ἐνέργεια:

$$E = m \cdot c^2 = 0,001 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec})^2 \quad \text{ἄρα} \quad E = 9 \cdot 10^{13} \text{ Joule}$$

Σύμφωνα μέ τή γνωστή ἐξίσωση $E = m \cdot g \cdot h$, πού δίνει τή δυναμική ἐνέργεια, μπορούμε μέ τήν παραπάνω ἐνέργεια νά ἐκσφενδονίσουμε σέ ὕψος $h = 100$ m μιά μάζα m ἴση μέ:

$$m = \frac{E}{g \cdot h} = \frac{9 \cdot 10^{13} \text{ Joule}}{10 \text{ m/sec}^2 \cdot 100 \text{ m}} \quad \text{καί} \quad m = 9 \cdot 10^{10} \text{ kg}$$

δηλαδή

$$m = 90 \text{ 000 000} \text{ τόνους}$$

γ. Διατήρηση τῆς ὕλοἐνέργειας. Ὄταν θεωρούσαμε ὅτι ἡ ὕλη καί ἡ ἐνέργεια, εἶναι δύο διαφορετικά φυσικά μεγέθη, διατυπώσαμε τήν ἀρχή τῆς διατηρήσεως τῆς ὕλης (τῆς μάζας) καί τήν ἀρχή τῆς διατηρήσεως τῆς ἐνέργειας. Ἀλλά θεωρητικά καί πειραματικά ἀπο-

δείχτηκε ότι ή ύλη και ή ενέργεια είναι ισοδύναμες και ή μιá μετατρέπεται στην άλλη. Άρα στή Φύση ύπάρχει μόνο μιá φυσική όντότητα, ή *ύλοενέργεια*, ή όποία, ανάλογα μέ τίς συνθήκες πού επικρατούν, μιás εμφανίζεται ως *ύλη* ή ως *ένέργεια*. Έτσι οί δύο γνωστές άρχές τής διατηρήσεως τής ύλης και τής ενέργειας συγχωνεύονται σήμερα στην έξης γενικότερη *άρχή τής διατηρήσεως τής ύλοενέργειας*:

Ή ύλοενέργεια πού ύπάρχει στή Φύση είναι σταθερή και κάθε ποσότητα ύλης ισοδυναμεί μέ όρισμένη ποσότητα ενέργειας και αντίστροφα. Ή ισοδυναμία μεταξύ τής ύλης και τής ενέργειας δίνεται από τήν έξίσωση $E = m \cdot c^2$.

Άτομική Φυσική

ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

105. Άτομική θεωρία του Δημόκριτου

Άπό τόν έκτο π.Χ. αιώνα οί Έλληνες φιλόσοφοι ύποστήριζαν ότι στά φυσικά φαινόμενα δέν έπεμβαίνουν ύπερφυσικές δυνάμεις, αλλά ότι στή Φύση ισχύουν *άκατάλυτοι φυσικοί νόμοι*. Σχετικά μέ τήν ύλη ιδιαίτερα σημαντική ήταν ή θεωρία πού ύποστήριζε ότι ή ύλη δέν είναι άπερίοριστα διαιρετή, και έπομένως τά σώματα αποτελούνται από πάρα πολλά *μικρότατα σωματίδια*, τά όποια δέν μπορούν νά διαιρεθούν και γι' αυτό όνομάστηκαν *άτομα* (δηλαδή άτμητα). Τή θεωρία αυτή ύποστήριζε κυρίως ό *Λεύκιππος*, αλλά ό μαθητής του *Δημόκριτος* (470 - 360 π.Χ.) τήν έκαμε *γενική θεωρία τής ύλης* και μέ αυτή θέλησε νά εξηγήσει όλες τίς ιδιότητες τής ύλης πού ήταν τότε γνωστές.

Τήν άτομική θεωρία του Δημόκριτου τή δίδασκε άργότερα ό *Έπίκουρος* (341 - 270 π.Χ.) και 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 αποσπάσματα διασώθηκαν. Ό Δημόκριτος ύποστήριζε ότι τά άτομα διαφέρουν μεταξύ τους κατά τό σχήμα και τό μέγεθος, δέ δημιουργούν

ται ούτε καταστρέφονται, άρα είναι αδιαίρετα και αιώνια. Τά άτομα είναι άπειρα και βρίσκονται *σε διαρκή κίνηση*. Τά διάφορα φυσικά φαινόμενα οφείλονται στην αιώνια κίνηση τών ατόμων, καθώς και στις ενώσεις τους μέ άλλα άτομα ή στους αποχωρισμούς τους από τά άτομα μέ τά όποια ήταν ενωμένα. Σ' αυτές τις αντιλήψεις του Δημόκριτου φαίνονται καθαρά ή ιδέα για *τήν ατομική δομή τής ύλης* καθώς και ή ιδέα *μιās κινητικής θεωρίας τής ύλης*. Είναι χαρακτηριστικό ότι μεταξύ τών πολλών φαινομένων πού ό Λουκρήτιος περιγράφει μέ βάση τις ατομικές αντιλήψεις του Δημόκριτου ιδιαίτερη θέση έχουν ή πίεση πού εξασκούν τά άέρια, ή διάχυση τών όσμών και τό σχήμα τών κρυστάλλων. Όπως όμως ξέρουμε, αυτά τά τρία φαινόμενα σχετίζονται άμεσα μέ τήν κινητική και ατομική θεωρία τής ύλης.

Η ατομική θεωρία του Δημόκριτου καταπολεμήθηκε από τή Σωκρατική σχολή και έπεσε σε άφάνεια ως τήν Άναγέννηση. Τότε άρχισαν νά αναβιώνουν οι ιδέες του Δημόκριτου και νά κατευθύνουν τήν επιστημονική σκέψη. Στις άρχές του δέκατου ένατου αιώνα ό Dalton (1808), για νά εξηγήσει τούς δύο νόμους πού ανακάλυψε πειραματικά (τό νόμο τών σταθερών αναλογιών και τό νόμο τών άπλών πολλαπλασίων), δέχτηκε τήν παλιά ιδέα του Δημόκριτου ότι *ή ύλη αποτελείται από άτομα*. Έτσι επιβεβαιώθηκε και πειραματικά ή *ύπαρξη τών ατόμων*, τά όποια πριν από πολλούς αιώνες είχε συλλάβει ή σκέψη τών Έλλήνων ατομικών φιλοσόφων.

Οί θεωρητικές και πειραματικές έρευνες πού έγιναν από τις άρχές του είκοστού αιώνα έδειξαν ότι τό άτομο τής ύλης είναι ένα πολύπλοκο σύστημα *ύποατομικών σωματιδίων*, στο όποιο ισχύουν και όρισμένοι ειδικοί νόμοι. Έτσι δημιουργήθηκε ένας ιδιαίτερος κλάδος τής Φυσικής, ή **Άτομική Φυσική**.

106. Μονάδα ατομικής μάζας

Η μάζα τών ατόμων, τών πυρήνων και τών σωματιδίων μετριέται μέ τή *μονάδα ατομικής μάζας*, πού συμβολικά γράφεται *1 amu* (1 atomic mass unit) και όρίζεται ως έξής:

Μονάδα ατομικής μάζας (1 amu) είναι τό 1/12 τής μάζας του ατόμου του ισότοπου του άνθρακα 12 (C^{12}).

$$\text{μονάδα ατομικής μάζας} \quad 1 \text{ amu} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Σημείωση Το στοιχείο άνθρακας αποτελείται από δύο ισότοπα που έχουν αντίστοιχα ατομική μάζα 12 και 13. Πιο άφθονο στη Φύση είναι το ισότοπο με την ατομική μάζα 12.

Ίσοδυναμία της μονάδας ατομικής μάζας με ενέργεια. Στην Ατομική και στην Πυρηνική Φυσική την ενέργεια συνήθως τη μετράμε με τη μονάδα ενέργειας ηλεκτρονιοβόλτ (1 eV) και με το πολλαπλάσιό της 1 MeV. Σύμφωνα με την αρχή της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας $E = mc^2$ βρίσκουμε ότι:

Η μονάδα ατομικής μάζας (1 amu) ισοδυναμεί με ενέργεια 931 MeV (κατά προσέγγιση).

$$1 \text{ amu} \simeq 931 \text{ MeV} \quad \eta \quad 1 \text{ amu} = 1492 \cdot 10^{-18} \text{ Joule}$$

107. Τό άτομο και ο πυρήνας του

α. Τά ηλεκτρόνια και ο πυρήνας. Η παραγωγή των καθοδικών ακτίνων από τον ιονισμό των ατόμων του αερίου, τό θερμοηλεκτρικό φαινόμενο και τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δείχνουν ότι σε όρισμένες περιπτώσεις από τά άτομα της ύλης βγαίνουν **ηλεκτρόνια**, που όλα έχουν την ίδια μάζα (m_e), και ένα **άρνητικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο** ($-e$). Έτσι από διάφορα φαινόμενα διαπιστώθηκε ότι **τό ηλεκτρόνιο είναι κοινό συστατικό των ατόμων της ύλης.**

Ο Rutherford (1911) ανακάλυψε πειραματικά ότι μέσα στο άτομο υπάρχει ένα πολύ μικρό σωματίδιο που ονομάστηκε **πυρήνας** και έχει **θετικό ηλεκτρικό φορτίο**. Σχεδόν όλη ή μάζα του ατόμου είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα του. Ωστε από την πειραματική έρευνα διαπιστώθηκε ότι:

Μέσα στο άτομο υπάρχουν: α) ο πυρήνας, στον οποίο είναι συγκεντρωμένη σχεδόν όλη ή μάζα του ατόμου και όλο τό θετικό ηλεκτρικό φορτίο, και β) ηλεκτρόνια που όλα έχουν την ίδια μάζα και τό ίδιο άρνητικό ηλεκτρικό φορτίο.

β. Ἡ διάμετρος τοῦ ἀτόμου καί τοῦ πυρήνα. Μποροῦμε νά θεωρήσουμε ὅτι τὸ ἄτομο καί ὁ πυρήνας ἔχουν σφαιρικό σχῆμα. Ἀπὸ τὴ μελέτη ὀρισμένων φαινομένων βρήκαμε ὅτι ἡ διάμετρος τοῦ ἀτόμου 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 ἀπὸ τὴ διάμετρο τοῦ ἀτόμου.

γ. Συστατικά τοῦ ἀτομικοῦ πυρήνα. Μὲ διάφορα πειράματα ἀποδείχτηκε ὅτι μέσα σέ ὄλους τούς πυρήνες ὑπάρχουν δύο εἶδη σωματιδίων, πού ἀντίστοιχα ὀνομάζονται **πρωτόνια καί νετρόνια**. Αὐτά τὰ δύο εἶδη σωματιδίων ὀνομάζονται γενικά **νουκλεόνια** (ἀπὸ τὸ nucleus = πυρήνας).

Τὸ **πρωτόνιο** εἶναι ὁ ἀτομικός πυρήνας τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου, δηλαδή εἶναι ἓνα ἰόν ὕδρογόνου. Ἔχει ἓνα θετικό στοιχειῶδες ἠλεκτρικό φορτίο (+e) καί ἡ μάζα του ἡρεμίας εἶναι περίπου ἴση μὲ μιὰ μονάδα ἀτομικῆς μάζας (1 amu). Μόνο ὁ πυρήνας τοῦ ἀτόμου τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου ἀποτελεῖται ἀπὸ ἓνα πρωτόνιο, ἐνῶ ὅλοι οἱ ἄλλοι πυρήνες ἔχουν πρωτόνια καί νετρόνια.

Τὸ **νετρόνιο** εἶναι σωματίδιο οὐδέτερο καί ἡ μάζα του ἡρεμίας εἶναι λίγο μεγαλύτερη ἀπὸ τὴ μάζα ἡρεμίας τοῦ πρωτονίου. Ἐπειδὴ τὸ νετρόνιο δέν ἔχει ἠλεκτρικό φορτίο, μπορεῖ νά μπαίνει ἐλεύθερα μέσα στό ἠλεκτρικό πεδίο πού ὑπάρχει γύρω ἀπὸ κάθε ἀτομικὸ πυρήνα. Ἔτσι τὸ νετρόνιο ἔχει τὴν ἰκανότητα νά πλησιάζει κάθε πυρήνα. Ὡστε:

I. Ὅλοι οἱ ἀτομικοὶ πυρήνες (ἐκτός ἀπὸ τὸν πυρήνα τοῦ ἀτόμου τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου) ἀποτελοῦνται ἀπὸ πρωτόνια καί νετρόνια πού γενικά ὀνομάζονται νουκλεόνια.

II. Τὸ πρωτόνιο ἔχει ἓνα θετικό στοιχειῶδες ἠλεκτρικό φορτίο, ἐνῶ τὸ νετρόνιο εἶναι οὐδέτερο.

III. Ἡ μάζα τοῦ πρωτονίου καί τοῦ νετρονίου εἶναι περίπου ἴση μὲ μιὰ μονάδα ἀτομικῆς μάζας (1 amu).

δ. Ἀτομικός καί μαζικός ἀριθμός. Ὀνομάζεται **ἀτομικός ἀριθμός Z** ὁ ἀριθμός πού φανερῶνει πόσα θετικά στοιχειῶδη ἠλεκτρικά φορ-

τία έχει ο πυρήνας ενός ατόμου, π.χ. για τον πυρήνα υδρογόνου είναι $Z = 1$, για τον πυρήνα ήλιου είναι $Z = 2$, για τον πυρήνα νατρίου είναι $Z = 11$ κ.λ. Έπειδή κάθε πρωτόνιο έχει ένα θετικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, συμπεραίνουμε ότι:

Ο ατομικός αριθμός Z είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων που υπάρχουν μέσα στον πυρήνα του ατόμου ενός στοιχείου.

Όνομάζεται **μαζικός αριθμός A** ο αριθμός που φανερώνει πόσα νουκλεόνια έχει ο πυρήνας ενός ατόμου. Έπομένως, αν ένας πυρήνας έχει μαζικό αριθμό A (δηλαδή περιέχει A νουκλεόνια) και ατομικό αριθμό Z (δηλαδή περιέχει Z πρωτόνια), τότε ο αριθμός N των νετρονίων που υπάρχουν μέσα σ' αυτόν τον πυρήνα είναι ίσος με τη διαφορά $N = A - Z$. Όστε:

Ο ατομικός αριθμός Z είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων του πυρήνα, ενώ ο μαζικός αριθμός A είναι ίσος με τον αριθμό των νουκλεονίων του πυρήνα, δηλαδή είναι ίσος με το άθροισμα των Z πρωτονίων και των N νετρονίων του πυρήνα.

A	$=$	Z	$+$	N
νουκλεόνια		πρωτόνια		νετρόνια

Ο μαζικός αριθμός A του ατομικού πυρήνα ενός στοιχείου είναι ίσος με τον άκεραίο αριθμό που πλησιάζει προς την ατομική μάζα του στοιχείου π.χ.

	He	B
στοιχείο		
ατομική μάζα	4,002 604 amu	11,009 305 amu
μαζικός αριθμός	$A = 4$	$A = 11$

ε. Τα 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 ($A = 0$). Έπειδή 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 ${}_Z^A C^A$ (ή και C_Z^A). Η ίδια συμβολική παράσταση ισχύει και για τρία στοιχειώδη σωματίδια, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Σωματίδιο	Z	Μάζα (σε amu)	A	Φορτίο	Σύμβολο
Ηλεκτρόνιο	-1	$m_e = 0,000548$	0	-e	${}_{-1}e^0$
Πρωτόνιο	1	$m_p = 1,007825$	1	+e	${}_1^1 p^1$ ή ${}_1^1 H^1$
Νετρόνιο	0	$m_n = 1,008665$	1	0	${}_0^1 n^1$

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $m_p = 1836 m_e$ $m_n = 1838,6 m_e$

$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$

108. Δομή του ατόμου

α. Τό ουδέτερο άτομο. Ο Bohr (1913), για να εξηγήσει τα φαινόμενα που ως τότε ήταν γνωστά, διατύπωσε μία θεωρία για τη δομή του ατόμου, η οποία αργότερα συμπληρώθηκε από άλλους θεωρητικούς φυσικούς, για να συμφωνεί με τα αποτελέσματα του πειράματος.

Αν ένας ατομικός πυρήνας έχει ατομικό αριθμό Z, τότε ο πυρήνας αυτός περιέχει Z πρωτόνια και, επομένως, τό θετικό φορτίο του πυρήνα είναι ίσο με τό γινόμενο του ατομικού αριθμού Z επί τό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο e. Ωστε:

$$\text{θετικό φορτίο ατομικού πυρήνα: } + Z \cdot e$$

Ο ατομικός πυρήνας π.χ. του νατρίου έχει ατομικό αριθμό $Z = 11$. Άρα ο ατομικός πυρήνας νατρίου έχει θετικό φορτίο $+11e$. Ένα άτομο νατρίου, για να είναι ουδέτερο, πρέπει να περιέχει τόσα ηλεκτρόνια, ώστε τό συνολικό αρνητικό φορτίο τους να είναι ίσο με $-11e$. Άρα τό ουδέτερο άτομο νατρίου έχει 11 ηλεκτρόνια, δηλαδή

δσος είναι ο ατομικός αριθμός Z . Από τὰ παραπάνω βγαίνει τὸ ἐξῆς συμπέρασμα:

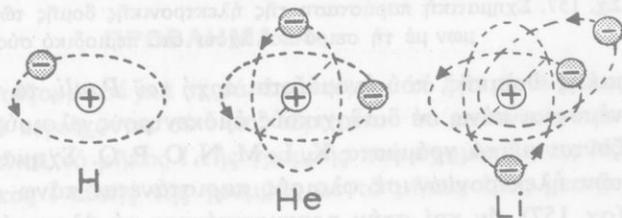
Ὁ ατομικός αριθμός Z φανερώνει πόσα πρωτόνια ὑπάρχουν στὸν πυρήνα τοῦ ατόμου καὶ πόσα ἠλεκτρόνια ὑπάρχουν μέσα στὸ ἄτομο, ὅταν αὐτὸ εἶναι οὐδέτερο.

θετικό φορτίο τοῦ πυρήνα	$+ Z \cdot e$
ἠλεκτρόνια στὸ οὐδέτερο ἄτομο	Z

β. Κατανομή τῶν ἠλεκτρονίων γύρω ἀπὸ τὸν πυρήνα. Σύμφωνα μὲ τὴ θεωρία τοῦ Bohr, πού τὴν ἐπιβεβαίωσαν τὰ πειράματα, τὸ ἄτομο εἶναι μιὰ μικρογραφία πλανητικοῦ συστήματος. Στὸ κέντρο τοῦ ατόμου βρίσκεται ὁ πυρήνας πού μὲ τὸ θετικό φορτίο του $+ Ze$ δημιουργεῖ γύρω του ἠλεκτρικό πεδίο. Μέσα σ' αὐτὸ περιφέρονται γύρω ἀπὸ τὸν πυρήνα τὰ ἠλεκτρόνια, ὅπως οἱ πλανῆτες περιφέρονται γύρω ἀπὸ τὸν ἥλιο. Σὲ κάθε ἠλεκτρόνιο ἐνεργεῖ ὡς κεντρομόλος δύναμη ἢ δύναμη *Coulomb*, τὴν ὁποία ἐξασκεῖ τὸ θετικό φορτίο τοῦ πυρήνα στὸ ἀρνητικό φορτίο τοῦ ἠλεκτρονίου. Μόνο τὸ ἄτομο ὑδρογόνου ἔχει ἓνα ἠλεκτρόνιο πού περιφέρεται γύρω ἀπὸ τὸν πυρήνα, γιατί γιὰ τὸ ὑδρογόνο εἶναι $Z = 1$ (σχ. 156). Στὸ ἄτομο ἡλίου ($Z = 2$) γύρω ἀπὸ τὸν πυρήνα του περιφέρονται δύο ἠλεκτρόνια πάνω σὲ τροχιές πού ἔχουν τὴν ἴδια ἀκτίνα, ἀλλὰ δὲ βρίσκονται στὸ ἴδιο ἐπίπεδο. Λέμε ὅτι τὰ δύο ἠλεκτρόνια βρίσκονται στὸν ἴδιο φλοιό. Τὸ ἄτομο λιθίου ($Z = 3$) ἔχει τρία ἠλεκτρόνια. Τὰ δύο ἀπὸ αὐτὰ βρίσκονται στὸν ἴδιο φλοιό, ἐνῶ τὸ τρίτο ἠλεκτρόνιο βρίσκεται σὲ ἓναν ἄλλο πὸ ἐξωτερικό φλοιό.

Γενικά, ὅταν τὸ ἄτομο ἔχει περισσότερα ἀπὸ δύο ἠλεκτρόνια, (δηλαδή ὅταν εἶναι $Z > 2$), τότε σύμφωνα μὲ μιὰ βασική ἀρχὴ τῆς Ἀτο-

σχ. 156. Σχηματική παράσταση τῆς κατανομῆς τῶν ἠλεκτρονίων στὰ ἄτομα ὑδρογόνου, ἡλίου καὶ λιθίου



στον ίδιο φλοιό δέ βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Τά ηλεκτρόνια πού ἀνήκουν στον εξωτερικό φλοιό ονομάζονται *ηλεκτρόνια σθένους*.

γ. Συμπληρωμένος φλοιός. Στους διαδοχικούς φλοιούς ἀντιστοιχούν οί ἀκέραιοι ἀριθμοί $n = 1, 2, 3, 4, \dots$. Ὁ ἀκέραιος ἀριθμός n πού ἀντιστοιχεῖ σέ ἕνα φλοιό ονομάζεται **κύριος κβαντικός ἀριθμός**. Σύμφωνα μέ τήν ἀρχή τοῦ Pauli βρίσκουμε πόσα ηλεκτρόνια μπορούν νά υπάρχουν πάνω στον ίδιο φλοιό. Ὄταν ὁ φλοιός ἔχει τό μέγιστο ἀριθμό ηλεκτρονίων πού μπορεί νά περιλάβει, τότε λέμε ὅτι ὁ φλοιός εἶναι *συμπληρωμένος*. Γενικά οί συμπληρωμένοι φλοιοί ἀποτελοῦν πολύ σταθερή κατανομή τῶν ηλεκτρονίων γύρω ἀπό τόν πυρήνα. Ἀποδεικνύεται ὅτι:

Κάθε φλοιός, πού ἔχει κύριο κβαντικό ἀριθμό n , εἶναι συμπληρωμένος, ὅταν ἔχει $2n^2$ ηλεκτρόνια.

Ἔτσι οί τέσσερις πρῶτοι φλοιοί, ὅταν εἶναι συμπληρωμένοι, ἔχουν ηλεκτρόνια:

φλοιός	K	L	M	N
κύριος κβαντικός ἀριθμός	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
ηλεκτρόνια	2	8	18	32

Στά ἄτομα στά ὁποῖα ἀντιστοιχεῖ μέγας ἀτομικός ἀριθμός Z οἱ πῶ ἐξωτερικοί φλοιοί O, P, Q *ποτέ δέν εἶναι συμπληρωμένοι*. Αὐτό ὀφείλεται στίς ἀμοιβαῖες ἐπιδράσεις τῶν πολλῶν ηλεκτρονίων πού υπάρχουν στό ἄτομο. Ἔτσι π.χ. στό ἄτομο οὐρανίου ($Z = 92$) τά 92 ηλεκτρόνια του κατανέμονται ὡς ἑξῆς:

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. Ἄν παρατάξουμε σέ μιὰ σειρά, ἐφαπτόμενα τό ἕνα μέ τό ἄλλο, ὅλα τά ἄτομα πού περιέχονται σέ 1 cm^3 ὕδρογόνου σέ κανονικές συνθήκες, πόσο θά εἶναι τό μήκος l τῆς γραμμῆς πού σχηματίζεται; Νά συγκριθεῖ τό μήκος l αὐτῆς τῆς γραμμῆς μέ τό μήκος ἑνός μεσημ-

βρινοῦ τῆς Γῆς $l_{\mu\sigma} = 40\,000$ km. Διάμετρος ἀτόμου ὕδρογόνου $\delta = 10^{-10}$ m. $N_L = 2,688 \cdot 10^{18}$ μόρια/cm³ (ἀριθμὸς τοῦ Loschmidt).

129. Ὑποθέτουμε ὅτι μιὰ μηχανὴ ἀπαραριθμήσεως μπορεῖ νὰ ἐργάζεται συνεχῶς καὶ νὰ καταμετράει 1 μόριο νεροῦ τὸ δευτερόλεπτο. Πόσος χρόνος χρειάζεται γιὰ νὰ καταμετρηθοῦν τὰ $N = 33 \cdot 10^{15}$ μόρια πού υπάρχουν σὲ 1 ἑκατομμυριοστὸ τοῦ γραμμαρίου νεροῦ; 1 ἔτος $\simeq 3,15 \cdot 10^7$ sec.

130. Ἐνα ἠλεκτρόνιο καὶ ἓνα πρωτόνιο ἐπιταχύνονται μὲ τὴν ἴδια τάση $U = 10^6$ V. 1) Πόση κινητικὴ ἐνέργεια σὲ ἠλεκτρονιοβόλτ (eV) καὶ Joule ἀποκτᾶ τὸ καθένα ἀπὸ αὐτὰ τὰ σωματίδια; 2) Πόσος εἶναι ὁ λόγος τῆς ταχύτητας v_1 τοῦ ἠλεκτρονίου πρὸς τὴν ταχύτητα v_2 τοῦ πρωτονίου: $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_1 = 1836 m_e$.

131. Πόση εἶναι ἡ μάζα ἑνὸς ἠλεκτρονίου πού κινεῖται μὲ ταχύτητα $v = 200\,000$ km/sec; Πόση εἶναι ἡ σχετικὴ αὐξηση τῆς μάζας του; Μάζα ἡρεμίας ἠλεκτρονίου $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

132. Ἐνα σωματίδιο (ἠλεκτρόνιο, πρωτόνιο κ.λ.) ἔχει μάζα ἡρεμίας m_0 . Πόση ταχύτητα v πρέπει νὰ ἀποκτήσει τὸ σωματίδιο, ὥστε ἡ μάζα του m νὰ εἶναι διπλάσια ἀπὸ τὴ μάζα ἡρεμίας (δηλαδὴ γιὰ νὰ γίνει $m = 2m_0$);

133. Πόση εἶναι σὲ Joule καὶ MeV ἡ ὅλικὴ ἐνέργεια ($E_{ολ}$) ἑνὸς ἠλεκτρονίου πού κινεῖται μὲ ταχύτητα (v) ἴση μὲ τὰ 0,8 τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

134. Πόση τάση πρέπει νὰ ἐφαρμόσουμε σὲ ἓναν καθοδικὸ σωλήνα ὥστε τὰ ἠλεκτρόνια τῶν καθοδικῶν ἀκτίνων νὰ ἔχουν ταχύτητα v ἴση μὲ τὰ 2/3 τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός στὸ κενό; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

135. Μὲ πόση ἐνέργεια (E) ἰσοδυναμεῖ μάζα $m = 0,1$ mgr. Ἄν μὲ αὐτὴ τὴν ἐνέργεια τροφοδοτούσαμε ἓνα λαμπτήρα πυρακτώσεως πού ἔχει ἰσχύ $P = 100$ W, πόσο χρόνο θὰ μπορούσε νὰ λειτουργεῖ συνεχῶς ὁ λαμπτήρας; 1 ἔτος $= 3,15 \cdot 10^7$ sec.

136. Μὲ πόση ἐνέργεια σὲ Joule καὶ MeV ἰσοδυναμοῦν: 1) ἡ μάζα ἡρεμίας m_e τοῦ ἠλεκτρονίου, καὶ β) ἡ μάζα ἡρεμίας m_p τοῦ πρωτονίου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg. $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

137. Μὲ πόση μάζα m ἰσοδυναμεῖ ἡ θερμότητα πού ἐλευθερώνεται, ὅταν συμβαίνει τέλεια καύση 10^6 λίτρων βενζίνης; Θερμότητα καύ-

σεως τής βενζίνης $8 \cdot 10^3$ kcal κατά λίτρο. $J = 4,2 \cdot 10^3$ Joule/kcal.

138. Μιά ακτινοβολία Röntgen έχει μήκος κύματος $\lambda = 0,1 \text{ \AA}$. Μέ πόση μάζα ισοδυναμεί ή ενέργεια πού μεταφέρει ένα φωτόνιο αυτής τής ακτινοβολίας;

139. Ένα ήλεκτρονίο πού αρχικά βρίσκεται σέ ήρεμία, απορροφά τήν ενέργεια ην ενός φωτονίου μιās ακτινοβολίας, πού έχει συχνότητα $\nu = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz. Πόση κινητική ενέργεια και πόση ταχύτητα αποκτά τό ήλεκτρονίο; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg. $h = 6,67 \cdot 10^{-34}$ Joule·sec.

140. Ένα ήλεκτρονίο επιταχύνεται μέ τήν επίδραση τάσεως $U = 506\ 000$ V. 1) Πόση ταχύτητα αποκτά τό ήλεκτρονίο; 2) Είναι παραδεκτή αυτή ή τιμή τής ταχύτητας του ήλεκτρονίου; Ποιά διόρθωση πρέπει νά κάνουμε στους ύπολογισμούς μας; 3) Πόση είναι ή μάζα του ήλεκτρονίου, όταν κινείται μέ τήν ταχύτητα πού βρήκαμε μετά τή διόρθωση;

141. Πόσο είναι τό δυναμικό σέ ένα σημείο B, πού απέχει $r = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm από ένα πρωτόνιο; Πόση δυναμική ενέργεια έχει ένα ήλεκτρονίο, όταν βρίσκεται στό σημείο B; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

142. Πόσο είναι τό δυναμικό σέ ένα σημείο B, πού απέχει $r = 5 \cdot 10^{-12}$ cm από έναν πυρήνα πού έχει άτομικό αριθμό $Z = 80$; Πόση δυναμική ενέργεια έχει ό πυρήνας ήλίου ($Z = 2$), όταν αυτός βρίσκεται στό σημείο B;

143. Στο άτομο υδρογόνου μέ πόση ταχύτητα κινείται τό ήλεκτρονίο πάνω σέ μιιά κυκλική τροχιά, πού έχει ακτίνα $r = 0,5 \text{ \AA}$; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

144. Όταν τό άτομο υδρογόνου βρίσκεται στήν κανονική κατάσταση, τό ήλεκτρονίο κινείται μέ συχνότητα $\nu = 6,6 \cdot 10^{15}$ Hz πάνω σέ κυκλική τροχιά, πού έχει ακτίνα $r = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm. 1) Πόση είναι ή ένταση του ρεύματος πού αντιστοιχεί στήν κίνηση του ήλεκτρονίου; 2) Πόση είναι ή μαγνητική επαγωγή πού δημιουργεί αυτό τό κυκλικό ρεύμα στό κέντρο τής κυκλικής τροχιάς;

145. Πόσα ήλεκτρόνια υπάρχουν στό άτομο άργιλίου, πού έχει άτομικό αριθμό $Z = 13$, και πώς κατανομονται αυτά στους φλοιούς;

ΣΥΝΟΗΚΕΣ ΤΟΥ BOHR

109. Στοιχειώδης μελέτη του ατόμου υδρογόνου

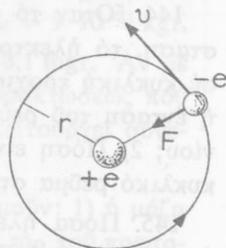
α. Οί δύο κινήσεις του ηλεκτρονίου. Στο άτομο υδρογόνου ($Z = 1$) υπάρχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο (σχ. 158). Όταν το άτομο υδρογόνου βρίσκεται στην κανονική κατάσταση, το μοναδικό ηλεκτρόνιο του περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα διαγράφοντας με σταθερή γωνιακή ταχύτητα κυκλική τροχιά που έχει ακτίνα r . Επομένως το ηλεκτρόνιο κινείται με ταχύτητα $v = \omega r$. Αυτή ή κυκλική κίνηση του ηλεκτρονίου ισοδυναμεί με ένα κυκλικό ρεύμα, που αποτελεί ένα μαγνητικό δίπολο.

Όπως η 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 ορισμένες ιδιότητες. Ωστε:

Στό 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 $E_{κιν}$. Επομένως 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. Οί δύο κβαντικές συνθήκες του Bohr. Το φάσμα εκπομπής του υδρογόνου αποτελείται από ορισμένες φασματικές γραμμές, που καθεμιά από αυτές αντιστοιχεί σε μία ακτινοβολία με ορισμένη συχνότητα. Ωστε το άτομο υδρογόνου μπορεί να εκπέμψει μόνο ορισμένες ακτινοβολίες που έχουν συχνότητες $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$ Σύμφωνα με



Σχ. 158. Κίνηση του ηλεκτρονίου στο άτομο υδρογόνου

τή θεωρία των κβάντα πρέπει να δεχτούμε ότι το άτομο υδρογόνου μπορεί να εκπέμπει μόνο *ορισμένα φωτόνια* που μεταφέρουν ενέργεια $h\nu_1, h\nu_2, h\nu_3, \dots$

Ο Bohr, για να εξηγήσει το φάσμα έκπομπής του υδρογόνου, διατύπωσε δύο αρχές, που ονομάζονται **κβαντικές συνθήκες του Bohr** και επιβεβαιώνονται πειραματικά.

δ. Πρώτη συνθήκη του Bohr. Για *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 **ορισμένες επιτρεπόμενες τροχιές (κβαντικές τροχιές)**.

Η κβαντική τροχιά με τη *μικρότερη* δυνατή ακτίνα ονομάζεται *θεμελιώδης τροχιά* και η ακτίνα της είναι ίση με $r_1 = 0,5 \text{ \AA}$. Οι ακτίνες των άλλων κβαντικών τροχιών δίνονται από την εξίσωση:

$$\text{ακτίνες κβαντικών τροχιών} \quad r = n^2 \cdot r_1$$

όπου n είναι **άκεραιος αριθμός**, που ονομάζεται **κύριος κβαντικός αριθμός** και μπορεί να λάβει τις 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 στην **κανονική κατάσταση**. Σ' αυτή την 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

(*) Το **αρνητικό σημείο** οφείλεται στο ότι κατ' **απόλυτη τιμή** η δυναμική ενέργεια ($E_{δυν}$) του ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερη από την **κινητική ενέργεια**. Η δυναμική ενέργεια είναι **αρνητική**, γιατί είναι ίση με το γινόμενο του δυναμικού U_r σε απόσταση r από τον πυρήνα επί το φορτίο $-e$ του ηλεκτρονίου, δηλαδή είναι $E_{δυν} = U_r \cdot (-e)$.

κβαντικές τροχιές, ή ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{ολική ενέργεια ηλεκτρονίου } E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \eta \quad E_n = \frac{-13,53}{n^2} \text{ eV}$$

• Η τελευταία εξίσωση φανερώνει ότι:

• Όταν αυξάνει η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου, τότε αυξάνει απότομα η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου.

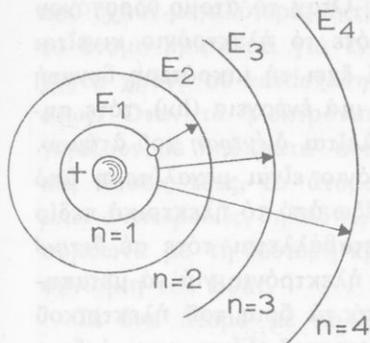
ε. Δεύτερη συνθήκη του Bohr. Για την *εκπομπή* και *τήν απορρόφηση* της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το άτομο υδρογόνου ισχύει η εξής δεύτερη συνθήκη του Bohr:

Τό ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μόνο όταν τό ηλεκτρόνιο πηδάει από μιά κβαντική τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας ($E_{αρχ}$) σέ άλλη κβαντική τροχιά μικρότερης ενέργειας ($E_{τελ}$). Η ενέργεια ($h\nu$) του φωτονίου πού εκπέμπεται είναι ίση μέ τή διαφορά τών ενεργειών του ηλεκτρονίου πάνω στίς δύο κβαντικές τροχιές.

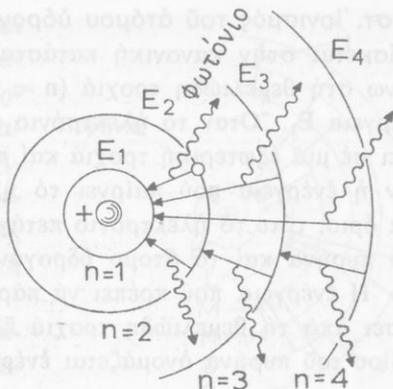
$$\text{ενέργεια φωτονίου πού εκπέμπεται } h\nu = E_{αρχ} - E_{τελ}$$

Σύμφωνα μέ τή δεύτερη συνθήκη του Bohr ή γένεση τής ακτινοβολίας οφείλεται σέ *απότομα πηθήματα* του ηλεκτρονίου από μιά *έξωτερική* κβαντική τροχιά σέ μιά άλλη κβαντική τροχιά πού είναι *πιο κοντά* στον πυρήνα. Όταν τό άτομο υδρογόνου βρίσκεται στήν κανονική κατάσταση, τότε τό ηλεκτρόνιο κινείται πάνω στή *θεμελιώδη τροχιά* ($n = 1$) καί έχει ενέργεια E_1 . Σ' αὐτή τήν περίπτωση τό ηλεκτρόνιο *δέν εκπέμπει* ακτινοβολία.

Όταν τό ηλεκτρόνιο πάρει μιά ενέργεια ΔE , τότε τό ηλεκτρόνιο πηδάει *απότομα* σέ μιά άλλη *έξωτερική* τροχιά, στήν όποια αντιστοιχεί ενέργεια του ηλεκτρονίου $E_n = E_1 + \Delta E$ (σχ. 159). Αυτό τό απότομο πήδημα του ηλεκτρονίου από τή θεμελιώδη σέ μιά *πιο έξω-*



Σχ. 159. Διέγερση του ατόμου υδρογόνου. Τό ήλεκτρονίο πηδάει από τή θεμελιώδη ($n = 1$) σέ μία πιό εξωτερική τροχιά ($n = 2, 3, 4, \dots$).



Σχ. 160. Έκπομπή ακτινοβολίας από τό άτομο υδρογόνου (αποδιέγερση του ατόμου)

τερική τροχιά λέγεται **διέγερση** του ατόμου. Ἡ διέγερση εἶναι μιὰ ἀσταθῆς κατάσταση του ατόμου, πού διαρκεῖ γιά πολύ μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 10^{-8} sec). Ἐτσι τό ἄτομο υδρογόνου πολύ γρήγορα ἐπανερχεται στή κανονική του κατάσταση, γιὰτί τό ήλεκτρόνιο ἐπανερχεται στή θεμελιώδη τροχιά, εἴτε μέ ἕνα μόνο πήδημά του εἴτε μέ διαδοχικά πήδημάτά του ἀπό μιὰ ἐξωτερική σέ μιὰ πιό ἐσωτερική τροχιά (σχ. 160). Μέ αὐτό ὁμως τό πήδημά του ἀπό τή μιὰ τροχιά στήν ἄλλη τό ήλεκτρόνιο **ἀποβάλλει ἀπότομα** τό πλεόνασμα τῆς ἐνέργειάς του μέ τή μορφή ἑνός **φωτονίου** πού ἔχει ἐνέργεια ($h\nu$) ἴση μέ τή διαφορά τῶν ἐνεργειῶν του ήλεκτρονίου πάνω στίς δύο τροχίες. Ἐτσι ἡ δευτέρα συνθήκη του Bohr ἐξηγεῖ εὐκόλα γιὰτί τό φάσμα ἐκπομπῆς του υδρογόνου ἀποτελεῖται μόνο ἀπό ὀρισμένες ἀκτινοβολίες, πού τά φωτόνιά τους ἔχουν ὀρισμένες συχνότητες. Ἀπό τά παραπάνω συνάγεται ὅτι ἡ **δευτέρα συνθήκη του Bohr** μπορεῖ νά διατυπωθεῖ γενικότερα ὡς ἑξῆς:

Τό ήλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου, ὅταν πηδάει ἀπό μιὰ κβαντική τροχιά σέ ἄλλη, ἐκπέμπει ἢ ἀπορροφᾷ τήν ἐνέργεια ἑνός φωτονίου ($h\nu$) καί ἐπομένως ἡ μεταβολή τῆς ὀλικῆς ἐνέργειας του ήλεκτρονίου γίνεται μόνο κατά $h\nu$.

στ. Ίονισμός του ατόμου υδρογόνου. Όταν το άτομο υδρογόνου βρίσκεται στην κανονική κατάσταση, τότε το ηλεκτρόνιο κινείται πάνω στη θεμελιώδη τροχιά ($n = 1$) και έχει τη μικρότερη δυνατή ενέργεια E_1 . Όταν το ηλεκτρόνιο πάρει μιá ενέργεια ($h\nu$), τότε πηδάει σέ μιá εξωτερική τροχιά και προκαλείται *διέγερση* του ατόμου. Αν ή ενέργεια πού παίρνει τό ηλεκτρόνιο είναι μεγαλύτερη από ένα όριο, τότε τό ηλεκτρόνιο πετάγεται έξω από τό ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα και τό άτομο υδρογόνου μεταβάλλεται τότε σέ *θετικό ίόν*. Η ενέργεια πού πρέπει νά πάρει τό ηλεκτρόνιο γιά νά μεταπηδήσει από τή θεμελιώδη τροχιά έξω από τά όρια του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται **ένέργεια ιονισμού**. Είναι φανερό ότι :

Γιά τό άτομο υδρογόνου ή ενέργεια ιονισμού είναι ίση μέ τήν όλική ενέργεια E_1 , πού έχει τό ηλεκτρόνιο όταν κινείται πάνω στή θεμελιώδη τροχιά (δηλαδή κατ' απόλυτη τιμή είναι ίση μέ $E_1 = 13,53$ eV).

Η διέγερση και ό ιονισμός του ατόμου υδρογόνου συμβαίνουν, όταν τό άτομο απορροφήσει ενέργεια είτε από μιá ακτινοβολία πού πέφτει πάνω του είτε κατά τή σύγκρουσή του μέ άτομο ή σωματίδιο πού έχει μεγάλη κινητική ενέργεια. Αν ή ενέργεια E πού απορροφά τό άτομο υδρογόνου είναι *μεγαλύτερη* από τήν ενέργεια ιονισμού E_1 , τότε τό πλεόνασμα τής ενέργειας μένει πάνω στό ηλεκτρόνιο ως *κινητική ενέργεια* και ισχύει ή εξίσωση:

$$\text{κινητική ενέργεια εξερχόμενου ηλεκτρονίου} \quad E_{\text{κιν}} = E - E_1$$

110. Άτομα μέ πολλά ηλεκτρόνια

Τά άτομα πού έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό (Z) έχουν πολλά ηλεκτρόνια, π.χ. τό άτομο λευκοχρύσου ($Z = 78$) έχει 78 ηλεκτρόνια πού κατανέμονται πάνω σέ έξι φλοιούς (από τόν K ως τόν P). Όταν ένα άτομο μέ πολλά ηλεκτρόνια βρίσκεται στην *κανονική κατάσταση*, τότε όλα τά ηλεκτρόνια του κατανέμονται πάνω σέ κβαντικές τροχιές έτσι, ώστε κάθε ηλεκτρόνιο νά έχει τήν έπιτρεπομένη ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Αν αυτό τό άτομο προσλάβει ενέργεια, τότε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια μεταπηδούν σέ κβαντικές τροχιές

πού έχουν μεγαλύτερες ακτίνες και τό άτομο βρίσκεται γιά έναν ελάχιστο χρόνο σέ κατάσταση διεγέρσεως. Όταν τά ηλεκτρόνια ξαναγυρίζουν μέ πηδήματα στίς αρχικές θέσεις τους, τό άτομο εκπέμπει ακτινοβολίες, δηλαδή φωτόνια, σύμφωνα μέ τή δεύτερη κβαντική συνθήκη τοῦ Bohr.

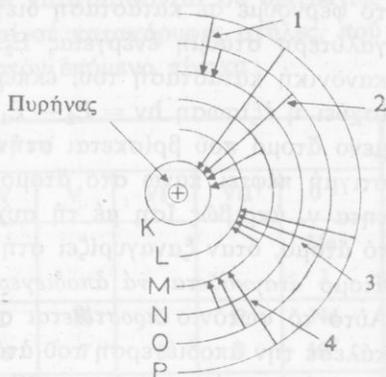
Σέ ένα άτομο μέ πολλά ηλεκτρόνια, π.χ. στό άτομο λευκοχρύσου, κατά τή διεγέρσή του ένα ηλεκτρόνιο πηδάει ἀπό τούς δύο προτελευταίους φλοιούς N ή O στόν τελευταίο φλοιό P (σχ. 161).

Όταν τό ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζει στήν αρχική του θέση, τότε τό ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο, πού έχει σχετικά μικρή ἐνέργεια και ἀνήκει στίς *όρατές*, τίς *υπέυρυθρες* ή τίς *υπεριώδεις* ακτινοβολίες. Αν όμως κατά τή διεγέρση τοῦ ἀτόμου ένα ηλεκτρόνιο τῶν ἐσωτερικῶν φλοιῶν K, L, M πηδήσει στούς πίο ἐξωτερικούς φλοιούς, τότε τό ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζοντας στήν αρχική θέση του εκπέμπει ένα φωτόνιο, πού έχει μεγάλη ἐνέργεια και ἀνήκει στίς *ακτίνες Röntgen*. Ἀπό τά παραπάνω βγαίνει τό ἐξῆς συμπέρασμα:

Σέ ένα άτομο μέ πολλά ηλεκτρόνια κατά τήν πτώση τῶν ηλεκτρονίων πάνω στούς πίο ἐξωτερικούς φλοιούς παράγονται *όρατές*, *υπέυρυθρες* ή *υπεριώδεις* ακτινοβολίες, ἐνώ κατά τήν πτώση τῶν ηλεκτρονίων πάνω στούς τρεῖς πίο ἐσωτερικούς φλοιούς (K, L, M) παράγονται *ακτίνες Röntgen*.

Ἄν ένα άτομο μέ πολλά ηλεκτρόνια πάρει τήν ἀπαιτούμενη ἐνέργεια *ιονισμού*, τότε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνιά του πηδοῦν ἐξω ἀπό τά ὄρια τοῦ ηλεκτρικοῦ πεδίου τοῦ πυρήνα και τό άτομο μεταβάλλεται σέ *θετικό ἰόν*. Ἡ ἐνέργεια ἰονισμού εἶναι μικρότερη γιά τά ηλεκτρόνια τοῦ ἐξωτερικοῦ φλοιοῦ (ηλεκτρόνια σθένους).

Λήξερ. Γιά ένα άτομο μέ πολλά ηλεκτρόνια ή κανονική κατάσταση του ἀντιστοιχεί σέ μία στάθμη ἐνέργειας E_1 . Ἀυτό τό άτομο



Σχ. 161. Παραγωγή τῶν *όρατῶν* ακτινοβολιῶν και τῶν *ακτίνων Röntgen* (1 *όρατές* ακτινοβολίες, 2, 3, 4 σειρές *ακτίνων Röntgen*)

τό φέρνουμε σέ κατάσταση διεγέρσεως, πού ἀντιστοιχεί σέ μιά μεγαλύτερη στάθμη ἐνέργειας E_2 . "Όταν τό ἄτομο ξαναγυρίζει στήν κανονική κατάστασή του, ἐκπέμπει ἕνα φωτόνιο συχνότητας ν καί ἰσχύει ἡ ἐξίσωση $h\nu = E_2 - E_1$. "Ας θεωρήσουμε πάλι τό προηγούμενο ἄτομο πού βρίσκεται στήν κατάσταση διεγέρσεως. Ἐκείνη τή στιγμή πέφτει πάνω στό ἄτομο ἕνα φωτόνιο ($h\nu$) πού ἔχει συχνότητα ν , ἀκριβῶς ἴση μέ τή συχνότητα τοῦ φωτονίου πού ἐκπέμπει τό ἄτομο, ὅταν ξαναγυρίζει στήν κανονική κατάστασή του. Τότε τό ἄτομο ἀναγκάζεται νά ἀποδιεγερθεῖ καί ἐκπέμπει ἕνα φωτόνιο $h\nu$. Αὐτό τό φωτόνιο προστίθεται στό προηγούμενο φωτόνιο πού προκάλεσε τήν ἀποδιέγερση τοῦ ἀτόμου καί ἔτσι ἔχουμε δύο μαζί φωτόνια πού μεταφέρουν ἐνέργεια $2(h\nu)$. Σ' αὐτή τήν ἀρχή στηρίζεται ἡ λειτουργία τοῦ λέιζερ πού ἀποτελεῖ ἕνα καινούριο τύπο φωτεινῆς πηγῆς. Ἡ ὀνομασία του προέρχεται ἀπό τά ἀρχικά γράμματα τοῦ τίτλου του (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation = πολλαπλασιασμός τοῦ φωτός ἀπό ἐξαναγκασμένη ἐκπομπή ἀκτινοβολίας).

Συνηθισμένος τύπος λέιζερ εἶναι ὁ λέιζερ μέ ρουμπίνι. Αὐτός εἶναι ἕνας μικρός κύλινδρος ἀπό ρουμπίνι, πού γύρω του ὑπάρχει ἕνας γυάλινος ἐλικοειδῆς σωλήνας μέ ἀραιό ἀέριο. Μέσα στό σωλήνα γίνεται μιά πολύ σύντομη ἠλεκτρική ἐκκένωση, πού προκαλεῖ τή διεγερση μερικῶν ἀτόμων μέσα στό ρουμπίνι. Αὐτά ἀποδιεγείρονται ταυτόχρονα καί τότε προκαλεῖται διεγερση σέ πολύ περισσότερα ἄτομα. Ἐπειτα ἀπό μερικές διαδοχικές διεγέρσεις καί ἀποδιεγέρσεις ἔρχεται μιά στιγμή πού ἕνα πολύ μεγάλο πλῆθος ἀτόμων βρίσκονται σέ διεγερση καί ἀπότομα ὅλα μαζί ἀποδιεγείρονται. Τότε ἀπό τή συσκευή βγαίνει μιά δέσμη παράλληλων φωτεινῶν ἀκτίνων πού ἀποτελοῦνται μόνο ἀπό μιά ἀκτινοβολία συχνότητας ν (μονοχρωματική δέσμη). Ἡ χρήση τῶν λέιζερ διαρκῶς ἐπεκτείνεται (τηλεπικοινωνίες, βιομηχανία, χειρουργική κ.ἄ.), γιατί στή λεπτή δέσμη πού ἐκπέμπει ὁ λέιζερ εἶναι συγκεντρωμένη πολύ μεγάλη ἐνέργεια.

111. Περιοδικό σύστημα τῶν στοιχείων

Ἄο Mendeleeff (1869) κατέταξε τά στοιχεῖα, πού ἦταν ὡς τότε γνωστά, κατά τή σειρά τοῦ ἀτομικοῦ βάρους τοῦ κάθε στοιχείου καί παρατήρησε ὅτι οἱ χημικές ιδιότητες τῶν στοιχείων μεταβάλλονται

περιοδικά. Έτσι τὰ διάφορα στοιχεία κατατάσσονται σέ ὀριζόντιες σειρές, πού ὀνομάζονται *περίοδοι*, καί σέ κατακόρυφες στήλες, πού ὀνομάζονται *ὀμάδες*, ὅπως φαίνεται στόν ἐπόμενον πίνακα :

Περίοδοι	Ὀμάδες							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	0
1	H 1							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

Ὁ Mendelejeff παρατήρησε ὅτι στοιχεία πού ἔχουν τίς ἴδιες χημικές ιδιότητες (π.χ. τό λίθιο καί τό νάτριο, ἢ τό φθόριο καί τό χλώριο) βρίσκονται στήν ἴδια ὀμάδα. Μιά ἰδιαίτερη ὀμάδα ἀποτελοῦν τὰ στοιχεία πού ὀνομάζονται *εὐγενή ἀέρια* (π.χ. τὰ στοιχεία ἥλιο, νέο, ἀργό). Αὐτές οἱ παρατηρήσεις ὀδήγησαν τόν Mendelejeff νά συντάξει ἕναν πίνακα τῶν ὡς τότε γνωστῶν στοιχείων, ὁ ὀποῖος ὀνομάστηκε *περιοδικό σύστημα τῶν στοιχείων*.

Σήμερα ἡ κατάταξη τῶν στοιχείων στό περιοδικό σύστημα βασίζεται στήν *ἠλεκτρονική δομή* τῶν ἀτόμων τους, ἡ ὀποία ἐξαρτᾶται ἀπό τόν ἀτομικό ἀριθμό.

α. Διαδοχική συμπλήρωση τῶν φλοιῶν. Ὅταν τό ἄτομο βρίσκεται στήν κανονική κατάσταση, ὁ κάθε φλοιός μπορεῖ νά περιλάβει μόνο ὀρισμένο ἀριθμό ἠλεκτρονίων. Στό περιοδικό σύστημα, ὅταν προχωροῦμε ἀπό τό ἄτομο ὕδρογόνου ($Z = 1$) πρὸς τό ἄτομο οὐρανίου ($Z = 92$), ὁ ἀτομικός ἀριθμός αὐξάνει διαδοχικά κατὰ μιά μονάδα ἀπό τό 1 ὡς τό 92. Ἄρα ὁ ἀριθμός τῶν ἠλεκτρονίων τοῦ ἀτόμου αὐξάνει κατὰ ἕνα ἠλεκτρόνιο, ὅταν πηγαίνουμε ἀπό τό ἕνα στοιχεῖο στό ἀμέσως ἐπόμενο στοιχεῖο τοῦ περιοδικοῦ συστήματος. Ἡ διαδοχική πρόσθεση ἑνός ἠλεκτρονίου προχωρεῖ μέ τέτοιο τρόπο, ὥστε νά *συμπληρώνονται διαδοχικά* οἱ διάφοροι φλοιοί (σχ. 157). Στό ἄτομο ὕδρογόνου ($Z = 1$) τό μοναδικό ἠλεκτρόνιο βρίσκεται στό

φλοιό Κ. Στο άτομο ήλιου ($Z = 2$) τό δεύτερο ήλεκτρονίο μπαίνει στό φλοιό Κ και τότε αυτός ό φλοιός είναι *συμπληρωμένος*. Στο άτομο λιθίου ($Z = 3$) τό τρίτο ήλεκτρονίο μπαίνει στό φλοιό L. Ή πρόσθεση ήλεκτρονίου στό φλοιό L συνεχίζεται, ώσπου ό φλοιός αυτός *νά συμπληρωθεί*, δηλαδή ώσπου ό φλοιός αυτός *νά αποκτήσει 8 ήλεκτρονία*. Αυτό συμβαίνει στό άτομο νέου ($Z = 10$) πού έχει *συμπληρωμένους* και τούς δύο φλοιούς Κ και L. Έτσι συνεχίζεται ή διαδοχική συμπλήρωση τών φλοιών και κάθε περίοδος του περιοδικού συστήματος κλείνει μέ ένα ευγενές άέριο πού τό άτομο του έχει συμπληρωμένους όλους τούς φλοιούς. Σέ κάθε ομάδα υπάρχουν στοιχεία πού τά άτομά τους έχουν στόν έξωτερικό φλοιό *τόν ίδιο αριθμό ήλεκτρονίων (ήλεκτρόνια σθένους)*. Τά στοιχεία αυτά έχουν τό ίδιο σθένος. Ωστε:

Ή περιοδικότητα πού παρουσιάζουν οί χημικές ιδιότητες τών στοιχείων όφείλεται στό ότι περιοδικά στόν έξωτερικό φλοιό υπάρχει ό ίδιος αριθμός ήλεκτρονίων.

β. Ή παραγωγή τών χημικών φαινομένων. Ή θεωρητική και ή πειραματική έρευνα κατέληξαν στό εξής συμπέρασμα:

Τά χημικά φαινόμενα όφείλονται σέ μεταβολές του αριθμού τών ήλεκτρονίων πού ανήκουν στόν έξωτερικό φλοιό.

Στά άτομα τών ευγενών αερίων ό έξωτερικός φλοιός είναι συμπληρωμένος και γι' αυτό είναι πολύ σταθερός. Για τά άτομα όλων τών άλλων στοιχείων ισχύει ό εξής γενικός κανόνας:

Τό άτομο αποβάλλοντας ή προσλαμβάνοντας ήλεκτρόνια τείνει *νά αποκτήσει έξωτερικό φλοιό συμπληρωμένο.*

Σύμφωνα μέ αυτόν τόν κανόνα, τό άτομο νατρίου (σχ. 157) *αποβάλλοντας* τό ένα ήλεκτρονίο, πού έχει στόν έξωτερικό φλοιό του, αποκτά *συμπληρωμένο* έξωτερικό φλοιό, όμοιο μέ τόν έξωτερικό φλοιό του ατόμου του στοιχείου νέου. Έτσι όμως τό άτομο νατρίου μεταβάλλεται σέ *θετικό ίόν*. Αντίθετα, τό άτομο χλωρίου *προσλαμβάνοντας* ένα ήλεκτρονίο αποκτά *συμπληρωμένο* έξωτερικό φλοιό, όμοιο μέ τόν έξωτερικό φλοιό του ατόμου του ευγενούς αερίου άργό.

Περιοδικό σύστημα των στοιχείων

Περ- όδοι	I	II	Ο μ ά δ ε ς										III	IV	V	VI	VII	0		
1	H 1		Μεταβατικά στοιχεία																	
2	Li 3	Be 4	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10		
3	Na 11	Mg 12	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
4	K 19	Ca 20	Rb 37	Sr 38	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36		
5			Cs 55	Ba 56	Hf 72								In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54		
6													Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86		
7																				

* Σπάνιες γαίες	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
** Ακτινίδες	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

Τότε όμως το άτομο χλωρίου μεταβάλλεται σε *αρνητικό ιόν*. Τά δύο αυτά *ετερόνυμα ιόντα* (Na^+ και Cl^-), επειδή έλκονται μεταξύ τους, σχηματίζουν *ένα μόριο* χλωριούχου νατρίου (NaCl). Στα μόρια υδρογόνου (H_2), οξυγόνου (O_2), άζωτου (N_2) κ.ά. ή τάση των ατόμων να αποβάλλουν ή να προσλάβουν ηλεκτρόνια ικανοποιείται, αν μερικά ηλεκτρόνια των εξωτερικών φλοιών των δύο ατόμων *γίνουν κοινά* και για τά δύο άτομα.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

146. Το ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου κινείται πάνω στη θεμελιώδη τροχιά ($r_1 = 0,5 \cdot 10^{-10}$ m) με ταχύτητα $v = 22 \cdot 10^5$ m/sec. Πόση είναι η κεντρομόλος δύναμη που ενεργεί στο ηλεκτρόνιο; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgf.

147. Όταν το ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου κινείται πάνω στη θεμελιώδη τροχιά ($r_1 = 0,5 \cdot 10^{-10}$ m), τότε έχει ταχύτητα $v = 22 \cdot 10^5$ m/sec. Πόση είναι σε Joule και eV η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgf.

148. Στο άτομο υδρογόνου ή ακτίνα της θεμελιώδους τροχιάς είναι $r_1 = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm. Νά γραφούν οι ακτίνες των τροχιών του ηλεκτρονίου που αντιστοιχούν στους κβαντικούς 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 · 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 σε μία εξωτερική τροχιά και ή

ένεργειά του αδξήθηκε κατά $\Delta E = 12 \text{ eV}$. Πηδώντας πάλι τό ήλεκτρόνιο από τή νέα τροχιά στή θεμελιώδη έκπέμπει ένα φωτόνιο. Πόσο είναι τό μήκος κύματος τής ακτινοβολίας πού έκπέμπεται από τό άτομο υδρογόνου; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$.

153. Στο άτομο υδρογόνου τό ήλεκτρόνιο πάνω στή θεμελιώδη τροχιά έχει όλική ένεργεια κατ' απόλυτη τιμή ίση μέ $13,5 \text{ eV}$. Πόσο πρέπει νά είναι τό μήκος κύματος τής ακτινοβολίας πού ένα φωτόνιο της ($h\nu$) προκαλεί τόν ιονισμό του ατόμου υδρογόνου;

154. Κατά τή διέγερση ενός ατόμου μέ πολλά ήλεκτρόνια ένα ήλεκτρόνιο πηδάει από τή θεμελιώδη σε μία έξωτερική κβαντική τροχιά. Αν ή αύξηση τής ένεργειας του ήλεκτρονίου είναι ίση μέ $\Delta E = 4,95 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$, πόσο είναι τό μήκος κύματος τής ακτινοβολίας πού έκπέμπει τό άτομο, όταν τό ήλεκτρόνιο ξαναγυρίζει μέ ένα πήδημα στή θεμελιώδη τροχιά;

155. Κατά τή διέγερση ενός ατόμου μέ πολλά ήλεκτρόνια δύο ήλεκτρόνια πηδοϋν από τήν τροχιά πού βρίσκονται σε δύο πιό έξωτερικές τροχιές. Η αύξηση τής ένεργειας είναι για τό ένα ήλεκτρόνιο $\Delta E_1 = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ καί για τό άλλο είναι $\Delta E_2 = 19,8 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$. Τά ήλεκτρόνια ξαναγυρίζουν μέ ένα μόνο πήδημα στις αρχικές θέσεις τους. Πόσο είναι τό μήκος κύματος λ_1 καί λ_2 των δύο ακτινοβολιών πού έκπέμπει τό άτομο; Είναι ορατές αυτές οι ακτινοβολίες;

Πυρηνική Φυσική

Ο ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΠΥΡΗΝΑΣ

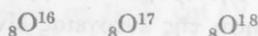
112. Πυρηνική Φυσική

Ο Rutherford απέδειξε πειραματικώς ότι μέσα στο άτομο υπάρχει ο μικρότατος ατομικός πυρήνας, πού έχει θετικό φορτίο. Από τήν περιθλαση των ακτίνων Röntgen υπολογίζεται ο ατομικός αριθμός Z ενός στοιχείου (νόμος του Moseley), δηλαδή βρίσκεται ο αριθμός Z των θετικών στοιχειωδών φορτίων πού έχει ο πυρήνας. Έτσι ξέρουμε πόσα πρωτόνια υπάρχουν στον πυρήνα. Μέ τό φασματογράφο των μαζών (§ 79) βρίσκουμε τήν ατομική μάζα, πού σχεδόν όλόκληρη είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα. Οι γνώσεις μας για τόν ατομικό

πυρήνα συμπληρώνονται από τή φυσική καί τήν τεχνητή ραδιενέργεια, ή όποία είναι μιά έκρηξη του πυρήνα. Μέ τή μελέτη ειδικά του άτομικού πυρήνα άσχολείται ένας ιδιαίτερος κλάδος τής Φυσικής, ή **Πυρηνική Φυσική**.

113. Ίσότοποι καί Ισοβαρείς πυρήνες

α. Ίσότοποι πυρήνες. Όλα σχεδόν τά φυσικά στοιχειά είναι σταθερά μίγματα από όρισμένα *ισότοπα*, δηλαδή από στοιχειά που έχουν τίσ ίδιες χημικές ιδιότητες, διαφορετική όμως άτομική μάζα. Τό όξυγόνο π.χ. αποτελείται από τρία ισότοπα στοιχειά, στά όποία άντιστοιχούν *τρία είδη* άτομικών πυρήνων. Αύτοί οί πυρήνες έχουν τόν ίδιο άτομικό άριθμό $Z = 8$, αλλά οί μαζικοί άριθμοί τους A άντίστοιχα είναι 16, 17 καί 18. Οί τρεις αύτοί πυρήνες όνομάζονται *ισότοποι πυρήνες* καί γράφονται έτσι:



Καί οί τρεις πυρήνες έχουν γύρω τους $Z = 8$ ήλεκτρόνια καί γι' αύτό τά άτομα τών τριών ισότόπων του όξυγόνου έχουν τίσ ίδιες χημικές ιδιότητες. Άλλά οί τρεις ισότοποι πυρήνες όξυγόνου δέν έχουν τήν ίδια σύσταση, γιατί περιέχουν τόν ίδιο άριθμό πρωτονίων, διαφορετικό όμως άριθμό νετρονίων, όπως δείχνει ό έπόμενος πίνακας:

Πυρήνας	Πρωτόνια	Μαζικός άριθμός	Νετρόνια
${}_8\text{O}^{16}$	$Z = 8$	$A = 16$	$N = 8$
${}_8\text{O}^{17}$	$Z = 8$	$A = 17$	$N = 9$
${}_8\text{O}^{18}$	$Z = 8$	$A = 18$	$N = 10$

Άπό τά παραπάνω βγαίνουν τά έξής συμπεράσματα:

- I. Ίσότοποι όνομάζονται οί πυρήνες που έχουν τόν ίδιο άτομικό άριθμό Z , διαφορετικό όμως μαζικό άριθμό A , γιατί αύτοί οί πυρήνες περιέχουν τόν ίδιο άριθμό (Z) πρωτονίων, διαφορετικό όμως άριθμό (N) νετρονίων.

II. Οί ισότοποι πυρῆνες ἀνήκουν σέ ἄτομα ἰσοτόπων τοῦ ἴδιου στοιχείου.

β. Ἴσοβαρεῖς πυρῆνες. Ὀνομάζονται *ἰσοβαρεῖς πυρῆνες* ἐκεῖνοι πού περιέχουν τόν ἴδιο ἀριθμό νουκλεονίων καί, ἐπομένως, ἔχουν τόν ἴδιο μαζικό ἀριθμό A , διαφορετικό ὅμως ἀτομικό ἀριθμό Z . Τέτοιοι π.χ. εἶναι οἱ πυρῆνες ${}_3\text{Li}^7$ καί ${}_4\text{Be}^7$. Ἡ σύσταση αὐτῶν τῶν πυρῆνων φαίνεται στόν ἐπόμενο πίνακα:

Πυρήνας	Μαζικός ἀριθμός	Πρωτόνια	Νετρόνια
${}_3\text{Li}^7$	$A = 7$	$Z = 3$	$N = 4$
${}_4\text{Be}^7$	$A = 7$	$Z = 4$	$N = 3$

Παρατηροῦμε ὅτι οἱ δύο ἰσοβαρεῖς πυρῆνες περιέχουν τόν ἴδιο ἀριθμό νουκλεονίων ($A = 7$), διαφέρουν ὅμως στόν ἀριθμό τῶν πρωτονίων (Z) καί τῶν νετρονίων (N). Ἔτσι καταλήγουμε στά ἑξῆς συμπεράσματα:

I. Ἴσοβαρεῖς ὀνομάζονται οἱ πυρῆνες πού ἔχουν τόν ἴδιο μαζικό ἀριθμό A , διαφορετικό ὅμως ἀτομικό ἀριθμό Z .

II. Οἱ ἰσοβαρεῖς πυρῆνες ἀνήκουν σέ ἄτομα διαφορετικῶν στοιχείων.

γ. Βαρύ νερό. Τό ὕδρογόνο ἀποτελεῖται ἀπό δύο ἰσότοπα, τό κοινό ὕδρογόνο καί τό βαρῦ ὕδρογόνο ἢ δευτέριο. Οἱ δύο αὐτοῖ ἰσότοποι πυρῆνες συμβολίζονται μέ ${}_1\text{H}^1$ καί ${}_1\text{H}^2$ ἢ ${}_1\text{D}^2$. Τό βαρῦ ὕδρογόνο ἔχει ἀτομικό βάρος 2 καί βρίσκεται σέ μικρή ἀναλογία μέσα στό φυσικό ὕδρογόνο. Τό βαρῦ ὕδρογόνο ἐνώνεται μέ τό ὀξυγόνο καί σχηματίζει τό βαρῦ νερό D_2O , πού ἔχει μοριακό βάρος 20 καί φυσικές ἰδιότητες διαφορετικές ἀπό τό κοινό νερό. Π.χ. τό βαρῦ νερό σέ θερμοκρασία 4°C ἔχει πυκνότητα $1,104 \text{ gr/cm}^3$, ἔχει θερμοκρασία πήξεως $3,8^\circ\text{C}$ καί θερμοκρασία βρασμοῦ $101,4^\circ\text{C}$ (σέ κανονική πίεση). Αὐτές οἱ διαφορές μᾶς βοηθοῦν νά διαχωρίζουμε εὐκολά τό βαρῦ νερό ἀπό τό κοινό νερό. Συνήθως τό βαρῦ νερό τό παίρνουμε ἀπό τά ὑπολείμματα τῆς ἠλεκτρολύσεως καί τό χρησιμοποιοῦμε σέ ὀρισμένους τύπους πυρηνικῶν ἀντιδραστήρων.

114. Έλλειμμα μάζας και ενέργεια συνδέσεως

α. Έλλειμμα μάζας των πυρήνων. Κάθε πυρήνας αποτελείται από Z πρωτόνια και N νετρόνια. Έπομένως, η μάζα (ήρεμίας) του πυρήνα πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα των μαζών (ήρεμίας) των νουκλεονίων που υπάρχουν μέσα στον πυρήνα, δηλαδή πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\text{μάζα πυρήνα} \quad m_{\text{πυρ}} = Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

Αλλά με τίς μετρήσεις βρήκαμε ότι πάντοτε η μάζα του πυρήνα είναι *μικρότερη* από το άθροισμα των μαζών των πρωτονίων και των νετρονίων του πυρήνα. Έτσι κάθε πυρήνας παρουσιάζει ένα **έλλειμμα μάζας** (Δm) που είναι χαρακτηριστικό για κάθε είδος πυρήνα. Όστε:

Όταν τά πρωτόνια και τά νετρόνια συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν τον πυρήνα, πάντοτε εμφανίζεται ένα έλλειμμα μάζας (Δm).

$$\text{έλλειμμα μάζας} \quad \Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{πυρήνα}}$$

β. Ενέργεια συνδέσεως. Το έλλειμμα μάζας (Δm) ενός πυρήνα *ισοδυναμεί με ενέργεια* $\Delta m \cdot c^2$. Μέσα στον πυρήνα τά πρωτόνια και τά νετρόνια συνδέονται μεταξύ τους πολύ ισχυρά. Για να διαλυθεί ο πυρήνας και να διαχωριστούν τά συστατικά του μακριά τό ένα από τό άλλο, πρέπει να δαπανήσουμε ενέργεια ίση με $\Delta m \cdot c^2$, δηλαδή ενέργεια *ισοδύναμη* με τό έλλειμμα μάζας (Δm) του πυρήνα. Αιτή ή ενέργεια ονομάζεται **ενέργεια συνδέσεως** του πυρήνα. Όσο μεγαλύτερη είναι ή ενέργεια συνδέσεως, τόσο σταθερότερος είναι ο πυρήνας. Όστε:

I. Ενέργεια συνδέσεως ενός πυρήνα ονομάζεται ή ενέργεια που πρέπει να δαπανηθεί, για να ελευθερωθούν τελείως τά νουκλεόνια του πυρήνα.

II. Η ενέργεια συνδέσεως ενός πυρήνα είναι ισοδύναμη με τό έλλειμμα μάζας αυτού του πυρήνα.

$$\text{ενέργεια συνδέσεως} \quad E_{\text{συνδέσεως}} = \Delta m \cdot c^2$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

156. Ένας ατομικός πυρήνας βρέθηκε ότι έχει φορτίο $q = 1,76 \cdot 10^{-18} \text{ Cb}$. Πόσα πρωτόνια έχει αυτός ο πυρήνας και ποιός είναι ο ατομικός αριθμός του; Σέ ποιο στοιχείο ανήκει τό άτομο πού έχει αυτό τόν πυρήνα; Πόσα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από αυτό τόν πυρήνα και πώς κατανέμονται; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$.

157. Ο πυρήνας μολύβδου θεωρείται ως σημείο. 1) Πόσο είναι τό δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου πού δημιουργεί ο πυρήνας μολύβδου ($Z = 82$) σέ απόσταση $r = 4 \cdot 10^{-14} \text{ m}$; 2) Πόση δυναμική ενέργεια αποκτά ο πυρήνας ήλιου ($Z = 2$), αν βρεθεί σ' αυτή τήν απόσταση r από τόν πυρήνα μολύβδου; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$.

158. Ένας πυρήνας ήλιου (${}^4_2\text{He}$) έκτοξεύεται μέ ταχύτητα $v = 1,78 \cdot 10^7 \text{ m/sec}$ πρós έναν πυρήνα χρυσού ($Z = 79$). Σέ πόση απόσταση r από τόν πυρήνα χρυσού θά κατορθώσει νά φτάσει αυτός ο πυρήνας ήλιου; Μάζα του πυρήνα ήλιου: $m = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

159. Τό δευτερόνιο (${}^2_1\text{H}$ ή ${}^2_1\text{D}$), δηλαδή ο πυρήνας του ατόμου του βαριού υδρογόνου, έχει μάζα $m_D = 2,014\ 102 \text{ amu}$. 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;

$$1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV. } m_p = 1,007\ 825 \text{ amu. } m_n = 1,008\ 665 \text{ amu.}$$

160. Η μάζα του πυρήνα ήλιου (${}^4_2\text{He}$) είναι $m_{\text{πυρ}} = 4,00260 \text{ amu}$. 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.

$$1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV } m_p = 1,00782 \text{ amu. } m_n = 1,00867 \text{ amu.}$$

161. Σέ 1 gr νέου (${}^{10}\text{Ne}^{20}$) υπάρχουν $n = 3 \cdot 10^{22}$ άτομα. Γιά τόν πυρήνα νέου ή ενέργεια συνδέσεως είναι $E_{\text{συνδ}} = 160,6 \text{ MeV}$. Πόση ενέργεια σέ Joule πρέπει νά δαπανήσουμε, γιά νά διαχωρίσουμε τελείως τούς n πυρήνες στά συστατικά τους;

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Joule}$$

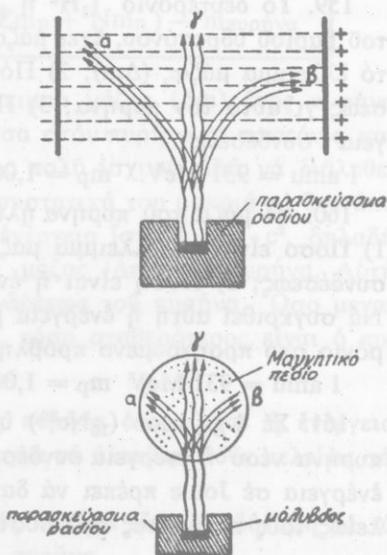
ΦΥΣΙΚΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

115. Ραδιενέργεια

Ο Becquerel (1896) ανακάλυψε ότι ορυκτά πού περιέχουν ούρανιο ή ενώσεις του εκπέμπουν συνεχώς μία άορατη ακτινοβολία, η οποία προσβάλλει τή φωτογραφική πλάκα, προκαλεί τόν φθορισμό σέ όρισμένα σώματα καί τόν ιονισμό τών αερίων. Η ιδιότητα πού έχουν μερικά στοιχεία νά εκπέμπουν αυτόματα τέτοια ακτινοβολία ονομάζεται **ραδιενέργεια** καί τά στοιχεία ονομάζονται **ραδιενεργά στοιχεία**. Έκτός από τόν ούρανιο, φυσικά ραδιενεργά στοιχεία είναι τόν άκτίνιο, τόν θόριο, τόν πολώνιο, τόν ράδιο κ.ά. Τόν πολώνιο καί τόν ράδιο τά ανακάλυψε τόν ζευγος Curie. Τά φυσικά ραδιενεργά στοιχεία έχουν μεγάλο άτομικό αριθμό ($Z > 80$).

116. Φύση τής ακτινοβολίας τών ραδιενεργών στοιχείων

Ένα κομμάτι μολύβδου έχει μία στενόμακρη κοιλότητα καί στό βάθος αútης τής κοιλότητας ύπάρχει ένα ραδιενεργό παρασκεύασμα (σχ. 162). Η συσκευή βρίσκεται μέσα σέ αερόκενο δοχείο. Η λεπτή δέσμη τής ακτινοβολίας πού βγαίνει από τήν κοιλότητα περνάει μέσα από όμογενές ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο κάθετα στις δυναμικές γραμμές τού πεδίου καί έπειτα πέφτει πάνω σέ φωτογραφική πλάκα, πού είναι κάθετη στή δέσμη. Τότε τόν ηλεκτρικό ή τόν μαγνητικό πεδίο διαχωρίζουν τήν ακτινοβολία τού ραδιενεργού στοιχείου σέ τρία είδη ακτίνων, πού χαρακτηρίζονται διεθνώς μέ τά γράμματα α, β, γ τού ελληνικού αλφαβήτου. Οι ακτίνες α καί β αποτελούνται από σωματίδια πού έχουν ηλεκτρικό φορτίο καί γι' αυτό μέ



Σχ. 162. Ανάλυση τής ακτινοβολίας τού ραδίου από τόν ηλεκτρικό ή τόν μαγνητικό πεδίο

τήν επίδραση του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου εκτρέπονται από την εὐθύγραμμη τροχιά τους. Ἀντίθετα οἱ ἀκτίνες γ εἶναι *ἠλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία*, ἡ ὁποία δέν εκτρέπεται ἀπό τό ἠλεκτρικό ἢ τό μαγνητικό πεδίο.

Οἱ ἀκτίνες α εἶναι σωματίδια καί τό καθένα ἔχει δύο θετικά στοιχειώδη ἠλεκτρικά φορτία (+ 2e). Κάθε σωματίδιο α εἶναι ἕνας ἀτομικός πυρήνας *ἠλίου*, ἔχει μάζα περίπου ἴση μέ 4 amu καί ταχύτητα πού μπορεῖ νά φτάσει ὡς 20 000 km/sec. Ἔτσι τά σωματίδια α ἔχουν μεγάλη κινητική ἐνέργεια καί, ἐπομένως, προκαλοῦν ἰσχυρό ἰονισμό.

Οἱ ἀκτίνες β ἀποτελοῦνται ἀπό *ἠλεκτρόνια* (e⁻), τά ὁποία ἐκτοξεύονται μέσα ἀπό τόν πυρήνα μέ πολύ μεγάλη ταχύτητα πού μπορεῖ νά φτάσει ὡς 290 000 km/sec. Ἔχουν μεγάλη διεισδυτική ἱκανότητα.

Οἱ ἀκτίνες γ εἶναι *ἠλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία*, πού ἔχει μήκος κύματος πολύ μικρότερο ἀπό τό μήκος κύματος τῶν ἀκτίνων Röntgen. Εἶναι πολύ περισσότερο διεισδυτικές ἀπό τίς ἀκτίνες α καί β καί ἐξασκοῦν ἔντονες βιολογικές δράσεις.

Ἀπό τά παραπάνω βγάζουμε τό ἐξῆς συμπέρασμα:

Ἡ ἀκτινοβολία τῶν ραδιενεργῶν στοιχείων ἀποτελεῖται ἀπό τίς ἀκτίνες α, πού εἶναι ἀτομικοί πυρήνες ἠλίου, ἀπό τίς ἀκτίνες β, πού εἶναι ἠλεκτρόνια, καί ἀπό τίς ἀκτίνες γ, πού εἶναι ἠλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία μέ πολύ μικρό μήκος κύματος.

Ἡ ραδιενέργεια πυρηνικό φαινόμενο. Ἡ ἀκτινοβολία πού ἐκπέμπει μιά ὀρισμένη ποσότητα ραδιενεργοῦ στοιχείου (π.χ. οὐρανίου) δέν ἐπηρεάζεται ἀπό καμιά ἐξωτερική αἰτία (θερμοκρασία, πίεση), οὔτε ἀπό τή χημική ἔνωση αὐτοῦ τοῦ στοιχείου μέ ἄλλα στοιχεῖα. Ἄρα ἡ ραδιενέργεια εἶναι ἕνα *πυρηνικό φαινόμενο* καί ὀφείλεται σέ *αὐτόματη ἐκροή* τοῦ ἀτομικοῦ πυρήνα.

117. Φυσική μεταστοιχείωση

Ὁ πυρήνας ραδίου ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ ἐκπέμπει ἕνα σωματίδιο α πού εἶναι πυρήνας ἠλίου ${}_{2}\text{He}^4$. Ἔτσι ὁμως ὁ πυρήνας ραδίου μεταβάλλεται σέ ἕναν καινούριο πυρήνα πού ἔχει:

ἀτομικό ἀριθμό $Z = 88 - 2 = 86$, μαζικό ἀριθμό $A = 226 - 4 = 222$.

Αὐτός ὁ καινούριος πυρήνας ἀνήκει σέ ἄτομο ἑνός ἄλλου στοι-

χειού, πού είναι εύγενές άέριο καί όνομάζεται *ραδόνιο* (Rn). "Ωστε ή ραδιενέργεια προκαλεί **μεταστοιχείωση**, δηλαδή μεταβολή του ένός στοιχείου σέ άλλο.

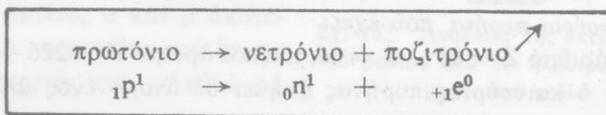
Στούς πολύ βαριούς πυρήνες ($Z > 80$) ό άριθμός τών νετρονίων είναι πολύ μεγαλύτερος άπό τόν άριθμό τών πρωτονίων. Έτσι π.χ. στόν άτομικό πυρήνα ούρανίου ${}_{92}\text{U}^{238}$ ύπάρχουν $Z = 92$ πρωτόνια καί $N = 146$ νετρόνια. Έξαιτίας αύτης τής μεγάλης διαφορής μεταξύ τών νετρονίων καί τών πρωτονίων ό πυρήνας ούρανίου είναι **άσταθής** καί μέ τή διαδοχική άποβολή σωματιδίων τείνει νά μεταβληθεί σέ ένα **σταθερό** πυρήνα. "Ωστε:

Οί άτομικοί πυρήνες τών φυσικών ραδιενεργών στοιχείων είναι άσταθείς καί αυτόματα μεταστοιχείωνονται έκπέμποντας σωματίδια (φυσική μεταστοιχείωση).

118. Τό ποζιτρόνιο

Ξέρουμε ότι μέσα στόν άτομικό πυρήνα ύπάρχουν μόνο πρωτόνια καί νετρόνια. Σέ όρισμένες όμως περιπτώσεις μεταστοιχειώσεων βγαίνει μέσα άπό τόν πυρήνα ένα νέο σωματίδιο, πού όνομάζεται **ποζιτρόνιο**. Αυτό τό σωματίδιο έχει μάζα ίση μέ τή μάζα (m_e) του ήλεκτρονίου, αλλά έχει ένα θετικό στοιχειώδες ήλεκτρικό φορτίο ($+e$). Άρα τό ποζιτρόνιο είναι ένα *άντιηλεκτρόνιο*. Τό ποζιτρόνιο δέν ύπάρχει μέσα στόν πυρήνα, αλλά σέ όρισμένες περιπτώσεις γεννιέται μέσα στόν πυρήνα καί άμέσως έκπέμπεται έξω άπό τόν πυρήνα. Τό ποζιτρόνιο συμβολίζεται μέ $+e^0$ (ή e^+).

Γένεση του ποζιτρονίου. Σέ μερικές περιπτώσεις μέσα στόν πυρήνα ένα *πρωτόνιο* μετατρέπεται σέ *νετρόνιο*, πού έξακολουθεί νά παραμένει μέσα στόν πυρήνα. Τό θετικό στοιχειώδες φορτίο $+e$ πού είχε τό πρωτόνιο τό παίρνει τό ποζιτρόνιο καί τό μεταφέρει έξω άπό τόν πυρήνα. Η γένεση του ποζιτρονίου εκφράζεται μέ τήν άκόλουθη *πυρηνική αντίδραση*:

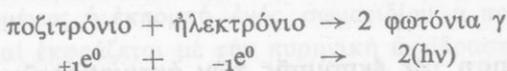


Από τά παραπάνω συμπεραίνουμε τά εξής:

I. Τό ποζιτρόνιο έχει μάζα ίση μέ τή μάζα τοῦ ἠλεκτρονίου, ἀλλά έχει πάνω του ἓνα θετικό στοιχειῶδες ἠλεκτρικό φορτίο.

II. Τό ποζιτρόνιο γεννιέται μέσα στόν πυρήνα, ὅταν ἓνα πρωτόνιο μετατρέπεται σέ νετρόνιο, καί ἀμέσως ἀποβάλλεται ἀπό τόν πυρήνα.

α. Ἡ ἐξαφάνιση τοῦ ποζιτρονίου. Τό ποζιτρόνιο, μόλις βγεῖ ἀπό τόν πυρήνα, *εξαφανίζεται* πολύ γρήγορα (μέσα σέ χρονικό διάστημα μικρότερο ἀπό 10^{-6} sec). Αὐτή ἡ *ταχύτατη ἐξαφάνιση* τοῦ ποζιτρονίου ὀφείλεται στήν ἐξίης αἰτία: Ἡ ὕλη ἀποτελεῖται ἀπό ἄτομα καί μέσα σέ αὐτά κινεῖται ἓνα τεράστιο πλῆθος ἠλεκτρονίων. Ὄταν τό ποζιτρόνιο ἀποβληθεῖ ἀπό τόν πυρήνα, ἀμέσως βρίσκεται μέσα στό πλῆθος τῶν ἠλεκτρονίων. Τό *ποζιτρόνιο* καί τό *πρῶτο ἠλεκτρόνιο* πού θά βρεθεῖ μπροστά του, ἐπειδή ἔχουν ἀντίθετα φορτία, ἔλκονται μεταξύ τους καί συνενώνονται. Τότε *ὀλόκληρη ἡ μάζα* τῶν δύο ἑτερόνυμων ἠλεκτρονίων μετατρέπεται σέ *ισοδύναμη ἐνέργεια* δύο φωτονίων γ πού ἔχουν τήν ἴδια συχνότητα ν . Τό καθένα φωτόνιο ἔχει ἐνέργεια $(h\nu)$ ἰσοδύναμη μέ τή μάζα ἡρεμίας (m_e) τοῦ ἠλεκτρονίου.

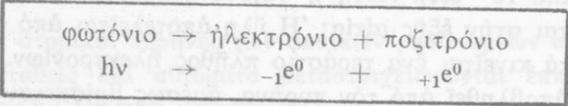


Ὄταν τό ποζιτρόνιο ἐξαφανίζεται, τότε *εξαφανίζεται μάζα* ἴση μέ $2 m_e$ καί στή θέση της *ἐμφανίζεται ἐνέργεια* ἴση μέ $2 (h\nu)$. Τά δύο φωτόνια προέρχονται ἀπό τήν *εξαθλίωση* τῆς μάζας $2 m_e$. Αὐτή ἡ μετατροπή τῆς μάζας σέ ἐνέργεια γίνεται σύμφωνα μέ τήν ἐξίσωση τοῦ Einstein $E = mc^2$. Ὄστε:

I. Ἡ *ταχύτατη ἐξαφάνιση τοῦ ποζιτρονίου* ὀφείλεται στήν *ἔνωσή του* μέ ἓνα ἠλεκτρόνιο καί τότε συμβαίνει *μετατροπή τῆς μάζας* τῶν δύο ἑτερόνυμων ἠλεκτρονίων σέ *ισοδύναμη ἐνέργεια* δύο φωτονίων γ .

II. Καθένα ἀπό τά δύο φωτόνια ἔχει ἐνέργεια $(h\nu)$ ἰσοδύναμη μέ τή μάζα ἡρεμίας (m_e) τοῦ ἠλεκτρονίου.

β. Δίδυμη γένεση. Τό ηλεκτρόνιο καί τό ποζιτρόνιο ἔχουν τήν ἴδια μάζα ἡρεμίας (m_e), πού ἰσοδυναμεῖ μέ ἐνέργεια 0,51 MeV. Ἐνα φωτόνιο ἔχει ἐνέργεια $h\nu$ διπλάσια ἀπό τήν παραπάνω ἐνέργεια, δηλαδή εἶναι $h\nu = 1,02$ MeV. Ἄν αὐτό τό φωτόνιο περάσει πολύ κοντά ἀπό ἕνα βαρῦ πυρήνα, τότε *ὀλόκληρη ἡ ἐνέργεια* τοῦ φωτονίου μετατρέπεται σέ *ἰσοδύναμη μάζα* ἑνός ποζιτρονίου καί ἑνός ηλεκτρονίου. Αὐτά τά δύο σωματίδια γεννιοῦνται ἀπό τήν *ὕλοποίηση* τῆς ἐνέργειας πού μεταφέρει τό φωτόνιο, σύμφωνα μέ τήν ἐξίσωση $m = E/c^2$. Τό φαινόμενο αὐτό ὀνομάζεται *δίδυμη γένεση* ἢ *γένεση ζεύγους ἡλεκτρονίων*.

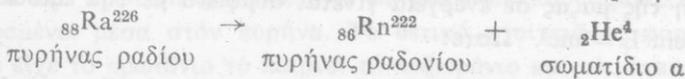


Ἄν τό φωτόνιο ἔχει ἐνέργεια $h\nu > 1,02$ MeV, τότε τό πλεόνασμα τῆς ἐνέργειας κατανέμεται ἐξίσου στά δύο σωματίδια μέ τή μορφή κινητικῆς ἐνέργειας. Ὡστε:

Ἀπό τήν ὕλοποίηση τῆς ἐνέργειας ἑνός φωτονίου, πού ἔχει ἐνέργεια τουλάχιστο ἴση μέ 1,02 MeV, σχηματίζεται ἕνα ζεύγος ἑτερόνυμων ἡλεκτρονίων (ποζιτρόνιο, ἡλεκτρόνιο).

119. Ἐξήγηση τῆς ἐκπομπῆς τῶν ἀκτινοβολιῶν

α. Οἱ δύο ἀρχές τῶν πυρηνικῶν ἀντιδράσεων. Ὁ πυρήνας ραδίου ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ ἐκπέμπει ἕνα σωματίδιο α, δηλαδή ἕναν πυρήνα ἡλίου ${}_2\text{He}^4$ καί μεταστοιχειώνεται σέ πυρήνα ραδονίου ${}_{86}\text{Rn}^{222}$. Αὕτη ἡ μεταστοιχείωση ἐκφράζεται μέ τήν ἀκόλουθη *πυρηνική ἀντίδραση*:



Στήν πυρηνική αὕτη ἀντίδραση παρατηροῦμε τά ἑξῆς:

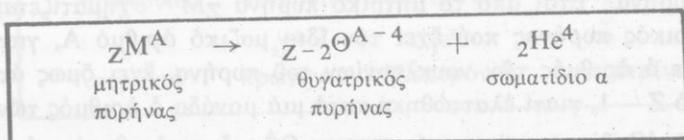
1) Ὁ μαζικός ἀριθμός $A = 226$ τοῦ ἀρχικοῦ πυρήνα εἶναι ἴσος μέ τό *ἄθροισμα* τῶν μαζικῶν ἀριθμῶν τῶν προϊόντων τῆς ἀντιδράσεως. Αὐτό σημαίνει ὅτι κατά τήν πυρηνική ἀντίδραση *δέν μεταβάλλεται ὁ ἀριθμός τῶν νουκλεονίων*.

2) Ο ατομικός αριθμός $Z = 88$ του αρχικού πυρήνα είναι ίσος με τό *άθροισμα* των ατομικών αριθμών των προϊόντων της αντίδρασης. Αυτό σημαίνει ότι κατά την πυρηνική αντίδραση *δέν μεταβάλλεται* τό *αρχικό ηλεκτρικό φορτίο*. Γενικά αποδεικνύεται ότι:

Σέ κάθε πυρηνική αντίδραση ισχύουν δύο αρχές, ή αρχή τής διατηρήσεως των νουκλεονίων και ή αρχή τής διατηρήσεως του ηλεκτρικού φορτίου.

Η μεταστοιχείωση ενός ραδιενεργού πυρήνα είναι μία πυρηνική αντίδραση, πού γίνεται αυτόματα. Θα εξετάσουμε σέ γενικές γραμμές πώς παράγονται οί ακτινοβολίες, όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας μεταστοιχείωνεται.

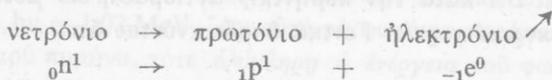
β. Έκπομπή σωματιδίου α. Ο αρχικός πυρήνας (μητρικός πυρήνας, M) έχει ατομικό αριθμό Z και μαζικό αριθμό A , δηλαδή ο μητρικός πυρήνας είναι ZM^A . Αυτός ο πυρήνας εκπέμπει ένα σωματίδιο α, δηλαδή έναν πυρήνα ήλιου (${}_2\text{He}^4$). Έτσι από τόν αρχικό πυρήνα δημιουργείται ένας νέος πυρήνας (θυγατρικός 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 σέ άτομο *άλλου στοιχείου*. Έπομένως ή έκπομπή ενός σωματιδίου α προκαλεί **μεταστοιχείωση** και εκφράζεται μέ την πυρηνική αντίδραση:



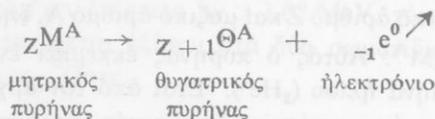
Αν ο θυγατρικός πυρήνας είναι και αυτός άσταθής, τότε θα συμβεί νέα έκπομπή σωματιδίου α και έπομένως νέα μεταστοιχείωση.

γ. Έκπομπή ηλεκτρονίου. Όπως ξέρουμε ο πυρήνας *δέν περιέχει* ηλεκτρόνια. Άρα τό ηλεκτρόνιο (ακτίνες β) πού εκπέμπεται από τόν πυρήνα δημιουργείται *μέσα στο μητρικό πυρήνα* M. Αυτό συμβαίνει, όταν ένα *νετρόνιο* μεταβάλλεται σέ *πρωτόνιο* πού εξακολουθεί νά παραμένει μέσα στον πυρήνα. Τό ηλεκτρόνιο, μόλις δημιουργηθεί,

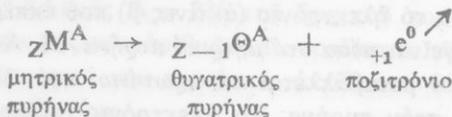
έκτοξεύεται έξω από τόν πυρήνα μέ μεγάλη ταχύτητα. Ἡ γένεση τοῦ ἠλεκτρονίου ἐκφράζεται μέ τήν ἀκόλουθη πυρηνική ἀντίδραση:



Ἔτσι ἀπό τό μητρικό πυρήνα ZM^A σχηματίζεται ἕνας θυγατρικός πυρήνας, πού ἔχει τόν ἴδιο μαζικό ἀριθμό A , γιατί δέν ἄλλαξε ὁ ἀριθμός τῶν νουκλεονίων τοῦ πυρήνα, ἔχει ὅμως ἀτομικό ἀριθμό $Z + 1$, γιατί ἀυξήθηκε κατά μία μονάδα ὁ ἀριθμός τῶν πρωτονίων. Ὁ θυγατρικός πυρήνας $Z+1\Theta^A$ εἶναι *ἰσοβαρής* μέ τό μητρικό πυρήνα καί ἀνήκει σέ ἄτομο ἄλλου στοιχείου. Ἐπομένως ἡ ἐκπομπή ἑνός ἠλεκτρονίου προκαλεῖ **μεταστοιχείωση** καί ἐκφράζεται μέ τήν πυρηνική ἀντίδραση:

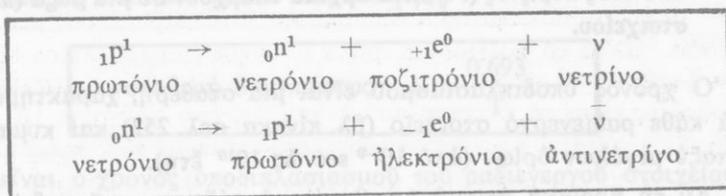


δ. Ἐκπομπή ποζιτρονίου. Ὅπως ξέρουμε τό ποζιτρόνιο γεννιέται μέσα στόν πυρήνα, ὅταν ἕνα *πρωτόνιο* μετατρέπεται σέ *νετρόνιο*. Καί τά δύο αὐτά σωματίδια ἐξακολουθοῦν νά παραμένουν μέσα στόν πυρήνα, ἀλλά τό ποζιτρόνιο, μόλις γεννηθεῖ, ἀποβάλλεται ἐξω ἀπό τόν πυρήνα. Ἔτσι ἀπό τό μητρικό πυρήνα ZM^A σχηματίζεται ἕνας θυγατρικός πυρήνας πού ἔχει τόν ἴδιο μαζικό ἀριθμό A , γιατί δέν ἄλλαξε ὁ ἀριθμός τῶν νουκλεονίων τοῦ πυρήνα, ἔχει ὅμως ἀτομικό ἀριθμό $Z - 1$, γιατί ἐλαττώθηκε κατά μία μονάδα ὁ ἀριθμός τῶν πρωτονίων. Ὁ θυγατρικός πυρήνας $Z-1\Theta^A$ εἶναι *ἰσοβαρής* μέ τό μητρικό πυρήνα καί ἀνήκει σέ ἄτομο ἄλλου στοιχείου. Ἐπομένως, ἡ ἐκπομπή ἑνός ποζιτρονίου προκαλεῖ **μεταστοιχείωση** καί ἐκφράζεται μέ τήν πυρηνική ἀντίδραση:



ε. Έκπομπή φωτονίου γ . Όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας μεταστοιχειώνεται με την έκπομπή σωματιδίου α , ηλεκτρονίου ή ποζιτρονίου, πάντοτε αυτή ή μεταστοιχείωση συνοδεύεται από την έκπομπή ενός φωτονίου γ με μεγάλη ενέργεια. Αυτά τα 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 ο θυγατρικός πυρήνας που σχηματίζεται βρίσκεται σε κατάσταση διεγέρσεως. Για να επανέλθει ο νέος πυρήνας στην κανονική κατάσταση, αποβάλλει το πλεόνασμα της ενέργειας που έχει πάνω του με τη μορφή ενός φωτονίου γ μεγάλης ενέργειας.

στ. Νετρίνο και αντινετρίνο. Το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο ονομάζονται και σωματίδια β (ηλεκτρόνιο β^- , ποζιτρόνιο β^+). Θεωρητικά αποδείχτηκε και έπειτα επιβεβαιώθηκε και πειραματικά ότι κατά τη γένεση ενός σωματιδίου β μέσα στον πυρήνα, ταυτόχρονα γεννιέται και ένα άλλο ουδέτερο σωματίδιο, που ή μάζα του θεωρείται ίση με μηδέν, γιατί είναι ασήμαντη σχετικά με τη μάζα του ηλεκτρονίου. Το ουδέτερο σωματίδιο που συνοδεύει τη γένεση του ποζιτρονίου ονομάζεται νετρίνο (ν ή ν^0), ενώ εκείνο που συνοδεύει τη γένεση του ηλεκτρονίου ονομάζεται αντινετρίνο ($\bar{\nu}$ ή $\bar{\nu}^0$).



ζ. Γενικά συμπεράσματα για την έκπομπή των ακτινοβολιών. Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα για την έκπομπή των ακτινοβολιών από τους ραδιενεργούς πυρήνες:

I. Όταν ο ραδιενεργός πυρήνας εκπέμπει σωματίδιο α , ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο, συμβαίνει μεταστοιχείωση, ή οποία πάντοτε συνοδεύεται από την έκπομπή φωτονίου γ , για να μεταπέσει ο νέος πυρήνας από την κατάσταση διεγέρσεως στην κανονική κατάσταση.

ΠΙ. Τό ποζιτρόνιο ή τό ήλεκτρόνιο γεννιοδνται μέσα στό ραδιενεργό πυρήνα καί ταυτόχρονα γεννιέται αντίστοιχα ένα νετρίνιο (ν) ή ένα αντινετρίνιο ($\bar{\nu}$).

120. Νόμος τής ραδιενέργειας

α. Χρόνος ύποδιπλασιασμοῦ. Σέ μιá ορισμένη χρονική στιγμή $t = 0$, έχουμε μιá μάζα m_0 ενός ραδιενεργού 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 τούς ἀρχικούς πυρήνες ραδίου, δηλαδή διασπῶνται $N_0/2$ πυρήνες. Ἔτσι κατά τή χρονική στιγμή $t = T$ ἔχουν ἀπομείνει ἀδιάσπαστοι οἱ μισοὶ ἀπό τούς ἀρχικούς 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 $T = 1620$ ἔτη. Ὡστε:

Χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ (T) ἢ **ἡμιζωή** ενός ραδιενεργού στοιχείου ὀνομάζεται ὁ χρόνος, μέσα στόν ὁποῖο διασπῶνται οἱ μισοὶ ἀπό τούς πυρήνες (N_0) πού ἀρχικά ὑπάρχουν σέ μιá μάζα (m_0) τοῦ στοιχείου.

Ὁ χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ εἶναι μιá σταθερή, χαρακτηριστική γιά κάθε ραδιενεργό στοιχεῖο (βλ. πίνακα σελ. 252) καί κυμαίνεται μεταξύ μεγάλων ὀρίων (ἀπό 10^{-9} sec ὠς 10^{10} ἔτη).

Ἄν τή χρονική στιγμή $t = 0$ σέ μιá μάζα m_0 τοῦ ραδιενεργού στοιχείου ὑπάρχουν N_0 ἀρχικοὶ πυρήνες, τότε, σύμφωνα μέ τόν ὀρισμό τοῦ χρόνου ὑποδιπλασιασμοῦ T , οἱ ἀδιάσπαστοι πυρήνες N πού ἀπομένουν κατά τή χρονική στιγμή $t = T, 2T, 3T \dots nT$ εἶναι:

$t :$	0	T	$2T$	$3T$	nT
$N :$	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$	$\frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{2^3}$	$\frac{N_0}{2^n}$

Ὡστε τή χρονική στιγμή $t = nT$ οἱ ἀδιάσπαστοι πυρήνες N εἶναι:

$$\text{αδιάσπαστοι πυρήνες (για } t = nT) \quad N = \frac{N_0}{2^n} \quad (1)$$

Μέ τον ίδιο ρυθμό ελαττώνεται και η αρχική μάζα m_0 και επομένως τη χρονική στιγμή $t = nT$ απομένει μάζα m του ραδιενεργού στοιχείου ίση με:

$$m = \frac{m_0}{2^n}$$

β. Νόμος της ραδιενέργειας. Αν κατά τη χρονική στιγμή $t = 0$ υπάρχουν N_0 πυρήνες ενός ραδιενεργού στοιχείου, τότε κατά τη χρονική στιγμή t θα έχουν απομείνει N αδιάσπαστοι πυρήνες και οι υπόλοιποι θα έχουν μεταστοιχειωθεί. Αποδεικνύεται ότι ισχύει ο εξής νόμος της ραδιενέργειας (ή νόμος των ραδιενεργών μετατροπών):

$$\text{νόμος της ραδιενέργειας} \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

όπου $e = 2,7$ είναι η βάση των φυσικών λογαρίθμων και λ μία σταθερή χαρακτηριστική για κάθε ραδιενεργό στοιχείο, ή οποία ονομάζεται σταθερή διασπάσεως και είναι ίση με:

$$\text{σταθερή διασπάσεως} \quad \lambda = \frac{0,693}{T}$$

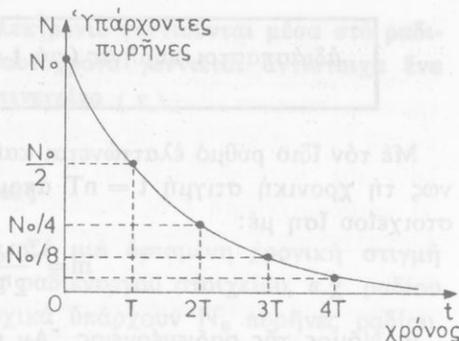
Τό T είναι ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ραδιενεργού στοιχείου. Αν τη χρονική στιγμή $t = 0$ υπάρχουν N_0 πυρήνες, τότε στη διάρκεια της πρώτης χρονικής μονάδας διασπάζεται ένα ποσοστό λ από τους πυρήνες N_0 , δηλαδή οι πυρήνες που διασπώνται είναι:

$$\text{διασπώμενοι πυρήνες} \quad N_{\text{διασπ}} = -\lambda \cdot N_0 / \text{κατά χρονική μονάδα}$$

Τό αρνητικό σημείο φανερώνει ότι στη διάρκεια της χρονικής μονάδας (έτος, ημέρα, δευτερόλεπτο) ελαττώνεται ο αρχικός αριθμός N_0 των πυρήνων. Η καμπύλη του σχήματος 163 εκφράζει τό νόμο της ραδιενέργειας.

Άλλη μορφή του νόμου της ραδιενέργειας. Αν στην εξίσωση (1) βάλουμε $n=t/T$, βρίσκουμε μία άλλη μορφή του νόμου της ραδιενέργειας:

$$N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$$



121. Βιολογικά αποτελέσματα των πυρηνικών ακτινοβολιών

Σχ. 163. Ο ρυθμός της ελαττώσεως των ραδιενεργών πυρήνων

Ο άνθρωπος δέχεται πυρηνικές ακτινοβολίες που προέρχονται από το κοσμικό διάστημα (κοσμικές ακτίνες), από τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία που περιέχονται στα πετρώματα και από ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν μέσα στους ιστούς (κάλιο 40, άνθρακας 14). Οί πυρηνικές ακτινοβολίες προκαλούν βιολογικά αποτελέσματα που οφείλονται κυρίως στον ιονισμό που συμβαίνει μέσα στους ιστούς. Αποτέλεσμα του ιονισμού είναι όρισμένες βιοχημικές μεταβολές που δημιουργούν πολύπλοκες διαταραχές. Αυτές έχουν ως συνέπεια να εμφανιστούν όρισμένες παθήσεις (π.χ. λευχαιμία, τραύματα του δέρματος κ.ά.).

Κατά γενικό κανόνα περισσότερο ευαίσθητα στις πυρηνικές ακτινοβολίες είναι τά κύτταρα που αναπαράγονται γρήγορα. Οί πυρηνικές ακτινοβολίες προκαλούν αποτελέσματα *σωματικά*, δηλαδή βλάβες στον οργανισμό του ίδιου του ατόμου, και αποτελέσματα *γενετικά*, δηλαδή βλάβες στα όργανα αναπαραγωγής με συνέπεια όρισμένες μεταβολές στους απογόνους. Αποδείχτηκε ότι ο άνθρωπος σε όλη τη διάρκεια της ζωής του μπορεί να προσλάβει ακίνδυνα μόνο μία όρισμένη ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρουν οί πυρηνικές ακτινοβολίες.

Οί πυρηνικές ακτινοβολίες προσβάλλουν τον ανθρώπινο οργανισμό με δύο τρόπους, που ονομάζονται *ακτινοβολία* και *μόλυνση*. Όταν πάνω σ' ένα άτομο (ή αντικείμενο) πέφτουν οί πυρηνικές ακτινοβολίες, λέμε ότι τό άτομο παθαίνει *ακτινοβολία*. Αυτή διαρκεί

Όσο χρόνο πέφτουν πάνω στο άτομο οι πυρηνικές ακτινοβολίες. Όταν πάνω σέ διάφορα αντικείμενα (π.χ. ένδύματα, τρόφιμα κ.ά.) έχουν κολλήσει ουσίες πού έχουν ραδιενέργεια, λέμε ότι αυτά τά αντικείμενα έπαθαν μόλυνση. Ο άνθρωπος οργανισμός μπορεί νά πάθει είτε *έξωτερική μόλυνση* από ραδιενεργά σώματα πού κόλλησαν πάνω στό σώμα του είτε *έσωτερική μόλυνση* από ραδιενεργά σώματα πού μπήκαν μέσα στόν οργανισμό μέ τίς τροφές ή μέ τόν εισπνεόμενο αέρα. Η μόλυνση διαρκεί όσο συνεχίζεται ή παρουσία τοῦ ραδιενεργοῦ σώματος.

122. Μονάδες ραδιενέργειας

α. Ένταση ραδιενεργοῦ πηγῆς. Η ραδιενέργεια μιᾶς ραδιενεργοῦ πηγῆς είναι ανάλογη μέ τόν αριθμό τῶν πυρήνων πού διασπῶνται κατά δευτερόλεπτο, τή μετράμε μέ τή μονάδα πού ονομάζεται **κιουρί** (1 Curie, 1 Ci) καί ορίζεται ὡς ἐξῆς:

Μιά ποσότητα από οποιαδήποτε ραδιενεργό οὐσία ἔχει ένταση ραδιενέργειας ἴση μέ 1 κιουρί, όταν σ' αὐτή τήν ποσότητα συμβαίνουν $3,7 \cdot 10^{10}$ διασπάσεις πυρήνων κατά δευτερόλεπτο.

$$1 \text{ κιουρί (1 Ci)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ διασπάσεις/sec}$$

Στήν πράξη χρησιμοποιοῦμε συνήθως τά ἐξῆς ὑποπολλαπλάσια τῆς μονάδας κιουρί:

$$1 \text{ μικροκιουρί (1 } \mu\text{Ci)} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ πικοκιουρί (1 pCi)} = 10^{-12} \text{ Ci}$$

β. Δόση ακτινοβολίας. Η δράση τῶν πυρηνικῶν ακτινοβολιῶν πάνω στους οργανισμούς εξαρτᾶται κυρίως από τήν ποσότητα ἐνέργειας πού ἀπορροφᾶ ὁ οργανισμός. Ονομάζεται **δόση ακτινοβολίας** ή ποσότητα ακτινοβολίας πού ἀπορροφᾶ ἕνας οργανισμός ή ἕνα ὑλικό (ἀέρας, νερό κ.ά.). Γιά τίς ἠλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες (ἀκτίνες Röntgen καί ἀκτίνες γ) ὡς μονάδα δόσεως παίρνουμε τή μονάδα πού ονομάζεται *röntgen* (1 R) καί ορίζεται ὡς ἐξῆς:

1 röntgen (1 R) είναι η ποσότητα ακτινοβολίας Röntgen ή γ , ή όποια μέσα σε ένα κυβικό εκατοστόμετρο (1 cm^3) ξηρού αέρα σε κανονικές συνθήκες δημιουργεί ιόντα που τό φορτίο τους θετικό ή αρνητικό είναι ίσο με μία ηλεκτροστατική μονάδα φορτίου(*).

$$1 \text{ röntgen (1 R)} = (+ \text{ ή } -) 1 \text{ ΗΣΜ} - \varphi \text{ ιόντων/cm}^3$$

Συνήθως χρησιμοποιούμε το υποπολλαπλάσιο

$$1 \text{ milliröntgen (1 mR)} = 10^{-3} \text{ R}$$

Η μονάδα δόσεως rad. Η μονάδα δόσεως röntgen αναφέρεται στην απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ακτίνες Röntgen ή γ). Συνήθως ως μονάδα δόσεως χρησιμοποιούμε τη μονάδα rad (radiation absorbed dose) που ορίζεται ως εξής:

Η δόση μιās οποιασδήποτε ακτινοβολίας που προκαλεί ιονισμό, είναι ίση με 1 rad, όταν κατά γραμμάριο του υλικού απορροφάται ενέργεια ίση με 100 erg.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/gr}$$

Η μονάδα rad αναφέρεται στην ενέργεια που προέρχεται από ηλεκτρομαγνητική και από σωματιδιακή ακτινοβολία.

γ . Μέση ισχύς δόσεως. Η βιολογική δράση μιās ακτινοβολίας εξαρτάται και από τη διάρκεια που είχε ή επίδραση της ακτινοβολίας. Αν μιιά δόση D ο οργανισμός την παίρνει στη διάρκεια του χρόνου t, τότε η μέση ισχύς δόσεως L είναι ίση με τό πηλίκο D/t. Άρα:

(*) Τό φορτίο ενός μονοσθενούς ιόντος κατά απόλυτη τιμή είναι ίσο με $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ΗΣΜ-φορτίου. Άρα δόση 1 röntgen δημιουργεί μέσα σε 1 cm^3 αέρα N θετικά και N αρνητικά ιόντα και είναι:

$$N = \frac{1 \text{ ΗΣΜ} - \varphi / \text{cm}^3}{4,8 \cdot 10^{-10} \text{ ΗΣΜ} - \varphi / \text{ιόν}} \quad \text{και} \quad N = 2,08 \cdot 10^9 \text{ ιόντα/cm}^3$$

Ωστε μέσα σε 1 cm^3 αέρα σχηματίζονται $N = 2,08 \cdot 10^9$ ζεύγη μονοσθενών ιόντων (δηλαδή 2 δισεκατομμύρια ζεύγη ιόντων).

$$\text{μέση ισχύς δόσεως} = \frac{\text{δόση}}{\text{χρόνος}} \quad \text{ή} \quad L = \frac{D}{t}$$

123. Οι σειρές τῶν φυσικῶν ραδιενεργῶν στοιχείων

Τό οὐράνιο 238 (${}_{92}\text{U}^{238}$) εἶναι τό πρῶτο μέλος μιᾶς σειρᾶς φυσικῶν ραδιενεργῶν στοιχείων πού σχηματίζονται διαδοχικά τό ἓνα ἀπό τό ἄλλο μέ τήν ἐκπομπή σωματιδίων α ἢ ἠλεκτρονίων (βλ. πίνακα). Ὅλα αὐτά τά στοιχεῖα ἀποτελοῦν τή **σειρά τοῦ οὐρανίου**.

Τό ἀκτίνιο 227 (${}_{89}\text{Ac}^{227}$), τό θόριο 232 (${}_{90}\text{Th}^{232}$) καί τό νεπτούνιο 237 (${}_{93}\text{Np}^{237}$) εἶναι τά πρῶτα μέλη ἀπό τρεῖς ἄλλες σειρές φυσικῶν ραδιενεργῶν στοιχείων, πού ἀντίστοιχα ὀνομάζονται **σειρά τοῦ ἀκτινίου**, **σειρά τοῦ θορίου** καί **σειρά τοῦ νεπτουνίου**. Στίς σειρές τοῦ οὐρανίου, τοῦ ἀκτινίου καί τοῦ θορίου τό **τελικό προϊόν** τῶν μεταστοιχειώσεων εἶναι τρία σταθερά ἰσότοπα τοῦ **μολύβδου**, ἐνῶ στή σειρά τοῦ νεπτουνίου τό

τελικό προϊόν τῶν μεταστοιχειώσεων εἶναι ἓνα σταθερό ἰσότοπο τοῦ **βισμουθίου** (βλ. στό διπλανό πίνακα). Τά μέλη τῆς σειρᾶς τοῦ νεπτουνίου δημιουργήθηκαν στά ἐργαστήρια, γιατί αὐτά τά ραδιενεργά στοιχεῖα εἶναι σχετικὰ βραχύβια καί γι' αὐτό ἐξαφανίστηκαν. Σήμερα βρίσκουμε στή Φύση τό τελικό προϊόν τῶν μεταστοιχειώσεών τους, τό βισμούθιο 209.

Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα

Σειρά	Πρῶτο μέλος	Τελικό προϊόν
Οὐρανίου	${}_{92}\text{U}^{238}$	${}_{82}\text{Pb}^{206}$
Ἀκτινίου	${}_{89}\text{Ac}^{227}$	${}_{82}\text{Pb}^{207}$
Θορίου	${}_{90}\text{Th}^{232}$	${}_{82}\text{Pb}^{208}$
Νεπτουνίου	${}_{93}\text{Np}^{237}$	${}_{83}\text{Bi}^{209}$

Τά ἐλαφρά ραδιοϊσότοπα. Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα πού ἔχουν ἀτομικό ἀριθμό *Z* **μεγαλύτερο ἀπό 80** κατατάσσονται στίς παραπάνω τέσσερις σειρές. Ἀλλά στή Φύση βρέθηκαν καί μερικά ραδιενεργά ἰσότοπα πού ἔχουν ἀτομικό ἀριθμό **μικρότερο ἀπό 80**, ἐκπέμπουν ἀσθενεῖς ἀκτινοβολίες καί μεταστοιχειώνονται κυρίως μέ τήν ἐκπομπή ἠλεκτρονίων. Ἀπό τά ἐλαφρά ραδιοϊσότοπα ἐνδιαφέροντα εἶναι ὁ

άνθρακα 14 (C^{14}) και τό κάλιο 40 (K^{40}) πού υπάρχουν μέσα στους
 ιστούς τῶν ὀργανισμῶν (μέ αντίστοιχο χρόνο ὑποδιπλασιαμοῦ
 5760 ἔτη καί $1,2 \cdot 10^9$ ἔτη).

Ἡ σειρά τοῦ οὐρανίου

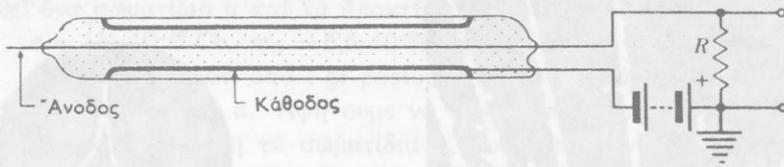
Ἴσότοπο	Χρόνος ὑπο- διπλασιαμοῦ	Ἐνέργεια ἀκτινοβολίας (σέ MeV)		
		α	β	γ
Οὐράνιο ${}_{92}U^{238}$	$4,5 \cdot 10^9$ y	4,18	—	0,045
Θόριο ${}_{90}Th^{234}$	24,1 d	—	0,19	0,09
Πρωτακτίνιο ${}_{91}Pa^{234}$	1,14 min	—	2,32	1,50
Οὐράνιο ${}_{92}U^{234}$	$2,48 \cdot 10^5$ y	4,76	—	0,055
Θόριο ${}_{90}Th^{230}$	$8,22 \cdot 10^4$ 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
Βισμουθιο ${}_{83}Bi^{214}$	19,7 min	5,44	3,15	0,426
Πολώνιο ${}_{84}Po^{214}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$ sec	7,68	—	—
Μόλυβδος ${}_{82}Pb^{210}$	25 y	—	0,025	0,047
Βισμουθιο ${}_{83}Bi^{210}$	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)

124. Ἡ μελέτη τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν

Γιά νά μελετήσουμε τίς πυρηνικές ἀκτινοβολίες, εφαρμόζουμε
 διάφορες μεθόδους. Ἀπό αὐτές θά ἀναφέρουμε μόνο τόν ἀπαριθμητή
Geiger - Muller καί τό θάλαμο *Wilson*.

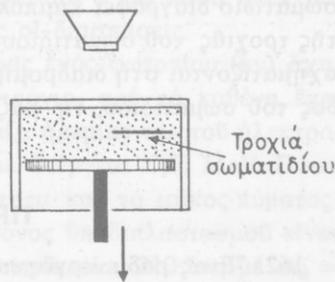
Ὁ ἀπαριθμητής *Geiger - Muller* ἀποτελεῖται ἀπό ἕναν κυλινδρικό
 μεταλλικό σωλήνα μέ λεπτά τοιχώματα καί ἀπό ἕνα λεπτό σύρμα,



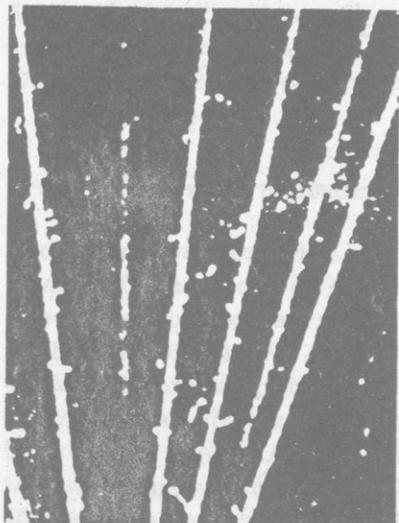
Σχ. 164. Σχηματική παράσταση του άπαριθμητή Geiger - Muller

πού είναι μονωμένο από τὰ τοιχώματα καί βρίσκεται πάνω στον άξονα του κυλίνδρου (σχ. 164). Ο κύλινδρος καί τό σύρμα άποτελοϋν έναν κυλινδρικό πυκνωτή καί βρίσκονται μέσα σέ γυάλινο δοχείο, πού περιέχει ένα άέριο (άργό) μέ μικρή πίεση. Μεταξύ του κυλίνδρου καί του σύρματος εφαρμόζεται κατάλληλη τάση (περίπου 1200 V), ή όποία, όμως, δέν είναι ικανή νά προκαλέσει έκκένωση. Άν μέσα στον άπαριθμητή μπει ένα σωματίδιο πού έχει ηλεκτρικό φορτίο (π.χ. σωματίδιο α, πρωτόνιο, ηλεκτρόνιο), τότε αυτό τό σωματίδιο στην πορεία του δημιουργεί ζεύγη ιόντων (δηλαδή θετικά ίόντα καί ηλεκτρόνια). Ήξαιτίας του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου τά θετικά ίόντα τρέχουν στην κάθοδο καί τά ηλεκτρόνια στην άνοδο κι έτσι συμβαίνει μιά ηλεκτρική έκκένωση. Τότε τό κύκλωμα διαρρέεται άπό ένα στιγμιαίο ρεύμα. Αυτό, άφου ένισχυθεί, διαβιβάζεται σέ ένα μεγάφωνο, καί τότε άκοϋμε έναν άπότομο ήχο, ή διαβιβάζεται σέ κατάλληλη διάταξη, πού αυτόματα κάνει καταμέτρηση των σωματιδίων πού μπαίνουν μέσα στον άπαριθμητή.

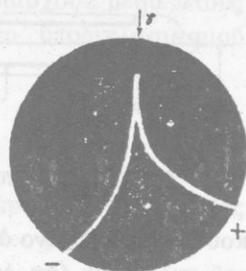
Ο θάλαμος Wilson ή θάλαμος νεφώσεως άποτελείται άπό έναν κύλινδρο πού περιέχει ένα άέριο καί κορεσμένους άτμούς αίθυλικής άλκοόλης. Η πάνω βάση του κυλίνδρου είναι μιά γυάλινη πλάκα, ένώ ή κάτω βάση άποτελεί έμβολο (σχ. 165). Άν τό έμβολο μετακινηθεί άπότομα προς τά κάτω, τό άέριο ψύχεται άπότομα (έκτόνωση) καί τότε μερικοί κορεσμένοι άτμοί υγροποιούνται καί σχηματίζουν μικρά σταγονίδια. Άν εκείνη τή στιγμή μπει μέσα στό θάλαμο ένα φορτισμένο σωματίδιο, αυτό κατά μήκος της τρο-



Σχ. 165. Σχηματική παράσταση του θαλάμου Wilson



Σχ. 166. Φωτογραφία των τροχιών σωματιδίων α, πού την πήραμε με θάλαμο Wilson. Διακρίνονται τὰ ηλεκτρόνια πού έκτοξεύονται κατά τόν ιονισμό των μορίων του αέριου.



Σχ. 167. Φωτογραφία πού πήραμε με θάλαμο Wilson. Από τήν ύλοποίηση τής ενέργειας ενός φωτονίου γ σχηματίστηκε ένα ηλεκτρόνιο (e^-) και ένα ποζιτρόνιο (e^+), τὰ όποια, εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου πού υπάρχει, διαγράφουν καμπύλες τροχιές κατά αντίθετη φορά.

χιᾶς του δημιουργεί ζεύγη ιόντων. Τά σταγονίδια συγκεντρώνονται γύρω από κάθε ιόν κι έτσι σχηματίζεται μιά λεπτή γραμμή όμίχλης, πού μπορούμε νά τή φωτογραφίσουμε (σχ. 166). Συνήθως ό θάλαμος Wilson βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο και τότε τό φορτισμένο σωματίδιο διαγράφει καμπύλη τροχιά. Από τό μήκος και τή μορφή τής τροχιάς του σωματιδίου και από τήν πυκνότητα των ιόντων πού σχηματίζονται στή διαδρομή του βγάζουμε συμπεράσματα για τό είδος του σωματιδίου, τή μάζα του και τήν ενέργειά του (σχ. 167).

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

162. Ένας ραδιενεργός πυρήνας έκπέμπει σωματίδια α, πού έχουν ταχύτητα $v = 2 \cdot 10^7$ m/sec. 1) Πόση είναι σε MeV ή κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου α; 2) Πόση τάση χρειάζεται, για νά επιταχυν-

θεϊ ένα σωματίδιο α και νά αποκτήσει αυτή τήν κινητική ενέργεια;

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb} \cdot m_{\alpha} = 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kgr.}$$

163. Βρήκαμε ότι από 1 gr ραδίου εκπέμπονται κάθε δευτερόλεπτο $1,5 \cdot 10^{11}$ σωματίδια α . Ἀφήνουμε νά πέσουν πάνω σέ ένα μονωμένο μεταλλικό συλλέκτη τά σωματίδια α , πού εκπέμπονται από 0,01 gr ραδίου. Ὁ συλλέκτης ἔχει χωρητικότητα $C = 10^{-12}$ F. Παρατηροῦμε ότι μέσα σέ 1 sec ὁ συλλέκτης ἀποκτᾷ δυναμικό $U = 500$ V. Πόσο φορτίο ἔχει κάθε σωματίδιο α ;

164. Ξέρουμε ότι από 1 gr ραδίου εκπέμπονται κάθε δευτερόλεπτο $1,5 \cdot 10^{11}$ σωματίδια α . Ἡ κινητική ἐνέργεια αὐτῶν τῶν σωματιδίων, όταν μετατραπεί σέ θερμότητα, δίνει 576 Joule τήν ὥρα. Πόση εἶναι κατά μέσο ὄρο ἡ ταχύτητα ἑνός σωματιδίου α ;

$$m_{\alpha} = 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kgr.}$$

165. Τά σωματίδια α πού εκπέμπει ἕνας ραδιενεργός πυρήνας ἔχουν ταχύτητα $v = \sqrt{3} \cdot 10^7$ m/sec καί στόν ἀέρα ἡ ἐμβέλεια τους εἶναι ἴση μέ $l = 5$ cm. Ὀλόκληρη ἡ κινητική ἐνέργεια κάθε σωματιδίου χρησιμοποιεῖται γιά τόν ἰονισμό τῶν μορίων τοῦ ἀέρα τά ὁποῖα τό σωματίδιο συναντᾷ στό δρόμο του. Γιά τόν ἰονισμό ἑνός μορίου τοῦ ἀέρα πρέπει νά δαπανηθεῖ ἐνέργεια ἴση μέ 25 eV. Κάθε σωματίδιο α πόσα ζεύγη ἰόντων δημιουργεῖ κατά ἑκατοστόμετρο τῆς διαδρομῆς του; $m_{\alpha} = 6,67 \cdot 10^{-27}$ kgr.

166. Ὁ πυρήνας οὐρανίου $238, {}_{92}\text{U}^{238}$, μεταστοιχειώνεται τελικά σέ πυρήνα μόλυβδου $206, {}_{82}\text{Pb}^{206}$, μέ μιᾶ σειρά μεταστοιχειώσεων, κατά τίς ὁποῖες εκπέμπονται x σωματίδια α καί y ἠλεκτρόνια. 1) Νά γραφεῖ μιᾶ συνοπτική πυρηνική ἀντίδραση, πού νά δείχνει τό σύνολο τῶν διασπάσεων. 2) Νά βρεθεῖ πόσα σωματίδια α καί πόσα ἠλεκτρόνια εκπέμπονται, όταν συμβαίνουν αὐτές οἱ διασπάσεις.

167. Ἀπό τήν ὑλοποίηση τῆς ἐνέργειας ἑνός φωτονίου (hv) σχηματίζεται ἕνα ἠλεκτρόνιο καί ἕνα ποζιτρόνιο, πού τό καθένα ἔχει κινητική ἐνέργεια ἴση μέ 0,09 MeV. Ἡ μάζα ἡρεμίας m_e τοῦ ἠλεκτρονίου καί τοῦ ποζιτρονίου ἰσοδυναμεῖ μέ ἐνέργεια 0,51 MeV. Πόση εἶναι ἡ ἐνέργεια τοῦ φωτονίου, ἡ συχνότητα καί τό μήκος κύματος;

168. Γιά τό πολώνιο 210 (Po^{210}) ὁ χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ εἶναι $T = 138,6$ ἡμέρες. Ἀπό μιᾶ ἀρχική μάζα πολωνίου 210 ἴση μέ $m_0 = 0,8$ mgr πόση μάζα ἀπομένει ἔπειτα ἀπό χρονικό διάστημα $t = 415,8$ ἡμέρες;

169. Έχουμε μία αρχική μάζα m_0 ραδονίου (Rn^{222}). Έξαιτίας των ραδιενεργών διασπάσεων έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 15,2$ ημέρες απομένει τό $1/16$ τής αρχικής μάζας. Πόσος είναι γιά τό ραδόνιο ό χρόνος ύποδιπλασιασμού T ;

170. Ένα ραδιενεργό ισότοπο (Po^{218}) έχει χρόνο ύποδιπλασιασμού $T = 3$ min. Πόσο τοίς έκατό από τούς πυρήνες πού ύπάρχουν διασπᾶται στή διάρκεια 1 sec;

171. Σέ 1 gr ραδίου (Ra^{226}) ύπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες. Ό χρόνος ύποδιπλασιασμού τού ραδίου είναι $T = 1600$ έτη (y) καί ή σταθερή διασπάσεως είναι:

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{1600 \text{ y}} \quad \eta \quad \lambda = 43 \cdot 10^{-5} \text{ y}^{-1}$$

Στή διάρκεια ενός έτους (1 y) πόσοι πυρήνες διασπῶνται κατά γραμμάριο ραδίου;

172. Σέ 1 gr ραδίου (Ra^{226}) ύπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες. Έ σταθερή διασπάσεως τού ραδίου είναι:

$$\lambda = \frac{0,693}{7,24 \cdot 10^{10} \text{ sec}} \quad \eta \quad \lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

Άπό αρχική μάζα ραδίου $m_0 = 1$ gr, πόση μάζα ραδίου μεταστοιχειώνεται στή διάρκεια ενός δευτερολέπτου (1 sec);

173. Σέ 1 mgr ραδίου (Ra^{226}) ύπάρχουν $N_1 = 2,665 \cdot 10^{18}$ πυρήνες ραδίου, ένῶ σέ 1 mgr θορίου (Th^{232}) ύπάρχουν $N_2 = 2,596 \cdot 10^{18}$ πυρήνες θορίου. Έ σταθερή διασπάσεως λ είναι άντίστοιχα:

$$\text{γιά τό ράδιο } \lambda_1 = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

$$\text{γιά τό θόριο } \lambda_2 = 1,58 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1}.$$

Πόσοι πυρήνες ραδίου καί πόσοι πυρήνες θορίου διασπῶνται στή διάρκεια 1 sec;

174. Σέ μία μάζα m_0 θορίου (Th^{232}) στή διάρκεια 1 sec διασπᾶται ό πυρήνας μόνο ενός άτομου. Πόσα άτομα ύπάρχουν σ' αὐτή τή μάζα θορίου; Σταθερή διασπάσεως τού θορίου:

$$\lambda = 1,58 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1}$$

175. Τό τελικό προϊόν τών διαδοχικών μεταστοιχειώσεων τού ούρανίου 238 (${}_{92}U^{238}$) είναι τό σταθερό ισότοπο μόλυβδος 206 (${}_{82}Pb^{206}$).

1) Πόσος είναι ο λόγος των νετρονίων (N) προς τα πρωτόνια (Z) σε αυτούς τους δύο πυρήνες; 2) Τί προσπαθεί να πετύχει ένας ραδιενεργός πυρήνας με τις διαδοχικές μεταστοιχειώσεις του;

ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

125. Πυρηνικές αντιδράσεις

Η φυσική μεταστοιχείωση που παρατηρείται στα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία οφείλεται στο ότι οι πυρήνες με μεγάλο ατομικό αριθμό είναι ασταθείς και αυτόματα διασπώνται, για να μεταπέσουν σε σταθερούς πυρήνες. Αλλά και οι σταθεροί πυρήνες (π.χ. του δεξυγόνου, του αζώτου) μπορούν να γίνουν ασταθείς πυρήνες, αν βομβαρδιστούν με κατάλληλα βλήματα. Τότε συμβαίνουν πυρηνικές αντιδράσεις και σχηματίζονται νέοι πυρήνες ή και σωματίδια. Με την πυρηνική αντίδραση προκαλούμε τεχνητή μεταστοιχείωση, δηλαδή τη μετατροπή του ενός στοιχείου σε άλλο. Κατά τις πυρηνικές αντιδράσεις ισχύουν οι δύο αρχές, της διατηρήσεως των νουκλεονίων και της διατηρήσεως του ηλεκτρικού φορτίου (§ 119 α).

Ιδιαίτερη αξία ως βλήμα έχει το νετρόνιο, επειδή δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο και μπορεί ελεύθερα να πλησιάζει τους πυρήνες και να ενώνεται με αυτούς. Αλλά η πρόσθεση ενός νετρονίου σε ένα σταθερό πυρήνα μεταβάλλει τον πυρήνα σε ασταθή και έτσι προκαλείται διάσπασή του.

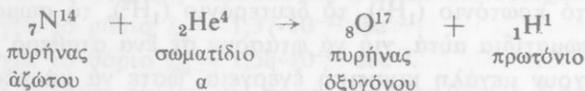
Αλλα βλήματα είναι τα σωματίδια που έχουν θετικό φορτίο, όπως είναι το πρωτόνιο (${}^1_1\text{H}^+$), το δευτερόνιο (${}^2_1\text{H}^+$), το σωματίδιο α (${}^4_2\text{He}^+$). Τα σωματίδια αυτά, για να φτάσουν σε ένα σταθερό πυρήνα, πρέπει να έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια, ώστε να μπορέσουν να υπερνικήσουν την άπωση που εξασκεί πάνω τους το ηλεκτρικό πεδίο του σταθερού πυρήνα. Σημαντική κινητική ενέργεια έχουν τα σωματίδια α, που εκπέμπονται από μερικά φυσικά ραδιοϊσότοπα (βλ. πίνακα σελ. 252). Σήμερα, για να δημιουργήσουμε βλήματα με μεγάλη κινητική ενέργεια, χρησιμοποιούμε ειδικές διατάξεις, που ονομάζονται επιταχυντές.

α. Έπιταχυντές. Ένα σωματίδιο με θετικό φορτίο, π.χ. ένα πρωτόνιο, αποκτά μεγάλη κινητική ενέργεια, αν επιταχυνθεί μέσα σε

ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αν η τάση πού χρησιμοποιούμε είναι U , τότε τό πρωτόνιο αποκτᾶ κινητική ἐνέργεια $E_{κιν} = eU$. Ἐπειδή, ὅμως, δέν μπορούμε νά ἔχουμε πολύ μεγάλες τάσεις, γι' αὐτό ἐπινοήσαμε διάφορες διατάξεις, στίς ὁποῖες τό ηλεκτρικό πεδίο δίνει στό θετικά 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 ηλεκτρικό πεδίο. Στούς κυκλικούς ἐπιταχυντές στό σωματίδιο ἐπιδρᾷ ἐκτός ἀπό τό ηλεκτρικό πεδίο καί ἕνα μαγνητικό πεδίο, πού δέ δίνει ἐπιτάχυνση, ἀλλά ὁδηγεῖ τό σωματίδιο πάνω σέ μιᾶ κυκλική τροχιά. Τό σωματίδιο αποκτᾶ 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. 252), ἐνῶ μέ τούς σημερινούς ἐπιταχυντές δημιουργοῦμε βλήματα πού ἡ ἐνέργειά τους φτάνει σέ δεκάδες ἢ καί ἑκατοντάδες GeV (1 GeV = 10^9 MeV).

β. Ἡ πρώτη τεχνητή μεταστοιχείωση. Ὁ Rutherford (1919) ἔκαμε τήν πρώτη πυρηνική ἀντίδραση καί πέτυχε τήν πρώτη τεχνητή μεταστοιχείωση. Μέ σωματίδια α βομβάρδισε πυρῆνες ἀζώτου 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 ἑξῆς πυρηνική ἀντίδραση:

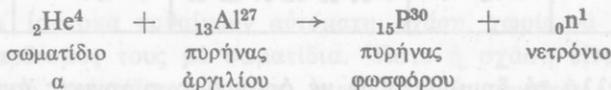


Ἔτσι τό πείραμα τοῦ Rutherford ἀπέδειξε ὅτι μπορούμε νά πετύχουμε τήν τεχνητή μεταστοιχείωση τῶν σταθερῶν φυσικῶν πυρῆων.

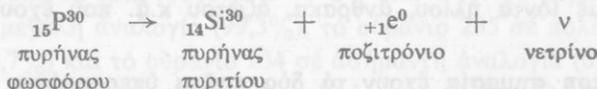
126. Τεχνητή ραδιενέργεια

Σέ πολλές περιπτώσεις πυρηνικῶν ἀντιδράσεων ἐμφανίζονται νέοι πυρῆνες, πού εἶναι ἀσταθεῖς καί αὐτόματα διασπῶνται, γιά νά μεταβληθοῦν σέ σταθεροῦς πυρῆνες. Οἱ νέοι ἀσταθεῖς πυρῆνες μεταστοι-

χειώνονται εκπέμποντας πυρηνικές ακτινοβολίες (σωματίδια α, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, φωτόνια γ). Έτσι δημιουργούνται **τεχνητοί ραδιενεργοί πυρήνες**, πού ανήκουν σέ άτομα στοιχείων τά όποια είναι *ισότοπα* μέ τά σταθερά φυσικά στοιχεία. Αυτά τά καινούρια ισότοπα στοιχεία δέν υπάρχουν στή Φύση, αλλά τά δημιουργομε μέ όρισμένες πυρηνικές αντιδράσεις καί γι' αυτό όνομάζονται **τεχνητά ραδιοϊσότοπα**. Καί γιά τήν *τεχνητή ραδιενέργεια* ισχύει ό νόμος τής ραδιενέργειας, όπως καί στή φυσική ραδιενέργεια. Κάθε τεχνητό ραδιοϊσότοπο έχει χαρακτηριστικό χρόνο όποδιπλασιασμού (T). Ένα παράδειγμα πυρηνικής αντιδράσεως, κατά τήν όποία δημιουργείται τεχνητό ραδιοϊσότοπο είναι τό έξής: "Αν βομβαρδίσουμε μέ σωματίδια α τούς πυρήνες άργιλίου, σχηματίζεται *ραδιενεργός φωσφόρος* καί νετρόνιο :



Ό πυρήνας τού ραδιενεργού φωσφόρου είναι άσταθής καί εκπέμποντας ένα ποζιτρόνιο καί ένα νετρόνιο μεταστοιχειώνεται σέ σταθερό πυρήνα πυριτίου.



Ό ραδιενεργός φωσφόρος P^{30} έχει χρόνο όποδιπλασιασμού $T = 2,5$ min.

Στόν πίνακα τής σελίδας 260 άναφέρονται μερικοί ισότοποι πυρήνες. Όσοι σημειώνονται μέ μαύρα στοιχεία δημιουργήθηκαν μέ πυρηνικές αντιδράσεις καί είναι άσταθείς (*τεχνητά ραδιοϊσότοπα*).

127. Τά όπερουράνια στοιχεία

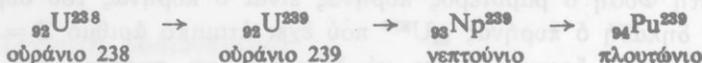
Στή Φύση ό βαρύτερος πυρήνας είναι ό πυρήνας τού ούρανίου 238, δηλαδή ό πυρήνας ${}_{92}\text{U}^{238}$ πού έχει άτομικό άριθμό $Z = 92$. Η πειραματική έρευνα πέτυχε νά δημιουργήσει πυρήνες πού έχουν άτομικούς άριθμούς άπό 93 ώς 103, δηλαδή δημιούργησε έντεκα νέους πυρήνες. Αυτοί ανήκουν σέ άτομα στοιχείων πού δέν υπάρχουν στή

Μερικοί ισότοποι πυρηνες

Ατομικός 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

Φύση, αλλά τά δημιουργούμε με όρισμένες πυρηνικές αντιδράσεις. Τά στοιχεία αυτά ονομάζονται **υπερουράνια στοιχεία**, είναι όλα ραδιενεργά και σχηματίζονται, όταν πυρηνες του ουρανίου ή άλλου υπερουρανίου στοιχείου βομβαρδίζονται με νετρόνια μεγάλης ενέργειας ή με ιόντα ήλιου, άνθρακα, άζωτου κ.ά. που έχουν μεγάλη ενέργεια.

Ίδιαίτερη σημασία έχουν τά δύο πρώτα υπερουράνια στοιχεία, δηλαδή τό νεπτούνιο (Np, Z = 93) και τό πλουτώνιο (Pu, Z = 94). Τό νεπτούνιο σχηματίζεται, όταν πυρηνες ουρανίου 238 βομβαρδίζονται με νετρόνια. Τότε σχηματίζεται ό ασταθής πυρήνας ουρανίου 239, που μεταστοιχειώνεται σε πυρήνα νεπτουνίου 239. Αυτός ό πυρήνας μεταστοιχειώνεται τελικά σε πυρήνα πλουτωνίου 239. Τό ισότοπο αυτό έχει χρόνο ύποδιπλασιασμού T = 24 000 έτη και παίζει σήμερα σπουδαίο ρόλο στην εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας. Οί παραπάνω ενδιαφέρουσες μεταστοιχειώσεις εκφράζονται σχηματικά ως εξής:



Οί δύο πυρηνες ουρανίου είναι **ισότοποι**, ενώ οί πυρηνες του νεπτουνίου και του πλουτωνίου είναι **ισοβαρείς** (§ 113).

Τά γνωστά ύπερουράνια στοιχεΐα εΐναι τά εξής:

93 Νεπτούνιο Np	97 Μπερκέλιο Bk	101 Μεντελέβιο Md
94 Πλουτώνιο Pu	98 Καλιφόρνιο Cf	102 Νομπέλιο No
95 Άμερίκιο Am	99 Άϊνστάνιο Es	103 Λαρέντσιο Lw
96 Κιούριο Cm	100 Φέρμιο Fm	104

128. 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 ύπερουράνια ισότοπα παθαίνουν *αυτόματη σχάση*, χωρίς νά προηγηθεί βομβαρδισμός τους μέ σωματίδια. Ωστε ή σχάση εΐναι ένα φαινόμενο πού εμφανίζεται κυρίως στους βαριούς πυρήνες. Ίδιατερη σημασία έχει ή σχάση του πυρήνα ούρανιου.

Σχάση του πυρήνα ούρανιου. Τό ούράνιο πού βρίσκουμε στή Φύση αποτελείται από τά τρία ισότοπα U^{238} , U^{235} καί U^{234} . Τό ούράνιο 238 ύπάρχει σέ μεγάλη αναλογία (99,3%), τό ούράνιο 235 σέ πολύ μικρή αναλογία (0,7%) καί τό ούράνιο 234 σέ άσήμαντη αναλογία (0,006%).

Όταν οί πυρήνες ούρανιού 238 καί ούρανιού 235 συλλάβουν ένα νετρόνιο, τότε συμβαίνει *σχάση* αυτών των δύο πυρήνων. Τά νετρόνια πού μποροϋν νά προκαλέσουν τή σχάση των δύο πυρήνων ούρανιου, κατατάσσονται στίς εξής δύο κατηγορίες:

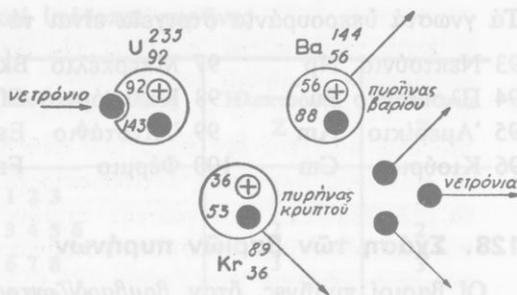
1) Τά νετρόνια πού έχουν μεγάλη ταχύτητα καί ονομάζονται **νετρόνια ψηλής ενέργειας**, γιατί έχουν πολύ μεγάλη ενέργεια ($E > 1 \text{ MeV}$).

2) Τά νετρόνια πού έχουν μικρή ταχύτητα καί ονομάζονται **θερμικά νετρόνια**, γιατί έχουν μικρή ενέργεια (0,025 eV) ίση μέ τήν ενέργεια πού έχουν τά μόρια των αερίων εξαιτίας τής θερμικής κίνησης τους. Άποδείχτηκε ότι:

I. Ό πυρήνας ούρανιού 235 παθαίνει σχάση κυρίως μέ θερμικά νετρόνια.

II. Ό πυρήνας ούρανιού 238 παθαίνει σχάση μόνο μέ νετρόνια

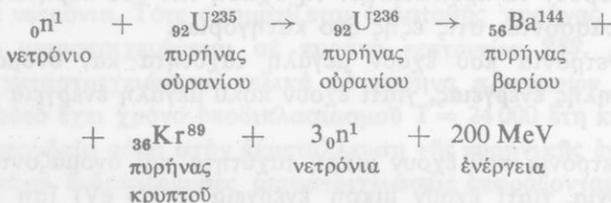
ψηλής ενέργειας, ενώ με τα θερμικά νετρόνια μεταστοιχείωνεται σε πυρήνα νεπτουνίου (Np) και τελικά σε πυρήνα πλουτωνίου (Pu).



Σχάση του πυρήνα ουρανίου 235

Σχ. 168. Σχηματική παράσταση της σχάσεως του πυρήνα ουρανίου 235

α. Προϊόντα της σχάσεως. Η σχάση του πυρήνα ουρανίου με τα θερμικά νετρόνια έχει σήμερα μεγάλες εφαρμογές. Όταν ο πυρήνας ουρανίου 235 συλλάβει ένα θερμικό νετρόνιο, τότε σχηματίζεται ο πυρήνας ουρανίου 236 που είναι άσταθής και άμέσως διασπάται σε δύο μικρότερους πυρήνες που ο καθένας έχει μάζα περίπου ίση με τη μισή μάζα του αρχικού πυρήνα. Ταυτόχρονα ελευθερώνονται μερικά νετρόνια (σχ. 168). Οί δύο νέοι πυρήνες εκτοξεύονται με μεγάλη ταχύτητα και επομένως έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια, ή οποία τελικά μετατρέπεται σε θερμότητα. Οί δύο νέοι πυρήνες είναι ραδιενεργοί και με μία σειρά διαδοχικών μεταστοιχειώσεων καταλήγουν σε σταθερούς πυρήνες. Η επόμενη πυρηνική αντίδραση εκφράζει έναν τρόπο σχάσεως του πυρήνα ουρανίου 235:



Από τα παραπάνω βγάζουμε τό εξής συμπέρασμα:

Ο πυρήνας ουρανίου 235, όταν συλλάβει ένα θερμικό νετρόνιο, μεταβάλλεται σε άσταθή 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 άμεσα να 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 άμεσα σε εκμεταλλεύσιμη θερμότητα.

γ. Προέλευση της πυρηνικής ενέργειας. Η ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση του πυρήνα ονομάζεται *πυρηνική ενέργεια*. Θα εξετάσουμε από πού προέρχεται αυτή η ενέργεια. Όπως ξέρουμε, μιά μάζα m ισοδυναμεί με ενέργεια $E = mc^2$. Κατά τη σχάση ενός πυρήνα ουρανίου 235 βρίσκουμε ότι τό άθροισμα των μαζών όλων των προϊόντων της σχάσεως είναι *μικρότερο* από τη μάζα του άσταθους πυρήνα ουρανίου 236 (βλ. πυρηνική αντίδραση σχάσεως). Ωστε, όταν συμβαίνει σχάση του πυρήνα ουρανίου 235 παρουσιάζεται μιά *άπώλεια μαζας* Δm . Αυτή η μάζα Δm μετατρέπεται σε *ισοδύναμη ενέργεια* (πυρηνική ενέργεια) σύμφωνα με την εξίσωση

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

Είδαμε ότι από κάθε διασπώμενο πυρήνα ουρανίου 235 ελευθερώνεται ενέργεια 200 MeV. Αυτή η ενέργεια είναι τεράστια. Εύκολα βρίσκουμε ότι κατά τη διάσπαση των πυρήνων που περιέχονται σε ένα γραμμάριο ουρανίου 235 ελευθερώνεται ενέργεια ίση με $8,2 \cdot 10^{10}$ Joule (δηλαδή περίπου 23 000 kWh). Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

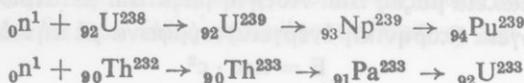
- I. Η πυρηνική ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση των πυρήνων ουρανίου 235 προέρχεται από τη μετατροπή ελάχιστης πυρηνικής μάζας σε ισοδύναμη ενέργεια.
- II. Η πυρηνική ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση του πυρήνα ουρανίου 235 είναι τεράστια ($8,2 \cdot 10^{10}$ Joule κατά γραμμάριο).

δ. Άλλοι πυρήνες διασπώμενοι με θερμικά νετρόνια. Από τη σχάση των πυρήνων ουρανίου 235 παίρνουμε εκμεταλλεύσιμη πυρηνική ενέργεια. Άλλά το ουράνιο 235 είναι ένα σπάνιο φυσικό ισότοπο. Πειραματικώς αποδείχτηκε ότι:

Με θερμικά νετρόνια παθαίνουν σχάση μόνο οι πυρήνες του ουρανίου 235, του πλουτωνίου 239 και του ουρανίου 233.

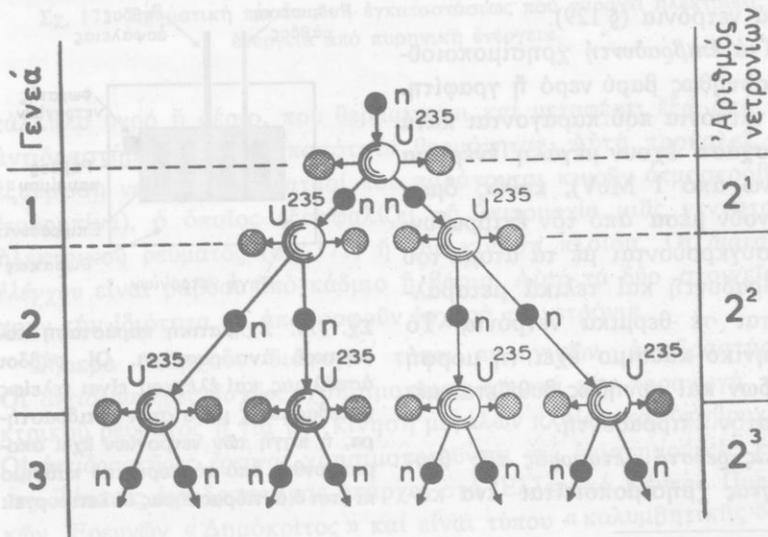
Τό πλουτώνιο 239 και τό ούράνιο 233 δέν υπάρχουν στή Φύση καί τά δημιουργούμε μέ ορισμένες πυρηνικές αντιδράσεις. Τό πλουτώνιο 239 σχηματίζεται, όταν τό ούράνιο 238 (πού είναι άφθονο) βομβαρδίζεται μέ νετρόνια κατάλληλης ενέργειας. Αυτό συμβαίνει μέσα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες καί έτσι μπορούμε νά έχουμε αρκετό πλουτώνιο, πού είναι μακρόβιο ($T = 24\ 000$ έτη). Τό άλλο σχάσιμο ισότοπο, δηλαδή τό ούράνιο 233, πού καί αυτό είναι μακρόβιο ($T = 163\ 000$ έτη), τό παίρνουμε βομβαρδίζοντας μέ νετρόνια τό φυσικό ισότοπο θόριο 232.

Σχηματικά η παραγωγή του πλουτωνίου 239 και του ουρανίου 233 έχει ως εξής:



130. Άλυσιδωτή αντίδραση

Κατά τή σχάση ενός πυρήνα ούρανιου 235 ελευθερώνονται δύο ως τρία νετρόνια. Άς δεχθούμε ότι μέσα σέ μιά μάζα ούρανιου 235 ελευθερώνονται 2 νετρόνια (πρώτη γενεά) από έναν πυρήνα ούρανιου πού άρχικά διασπάται. Άν αυτά τά 2 νετρόνια συναντήσουν δύο πυρήνες ούρανιου 235, θά προκαλέσουν δύο καινούριες σχάσεις καί τότε θά ελευθερωθούν 4 νετρόνια ή 2² νετρόνια (δεύτερη γενεά). Αλλά τά 4 νετρόνια θά προκαλέσουν τέσσερις καινούριες σχάσεις καί έτσι θά σχηματιστούν 2³ νετρόνια (τρίτη γενεά) κ.ο.κ. Ωστε ή έβδομηκοστή γενεά θά άποτελείται από 2⁷⁰ νετρόνια (12·10²⁰ νετρόνια), πού θά προκαλέσουν ισάριθμες σχάσεις. Αύτή ή αυτοσυντηρούμενη πυρηνική αντίδραση ονομάζεται άλυσιδωτή αντίδραση (σχ. 169). Ο χρόνος πού μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών γενεών νετρονίων είναι ελάχιστος (τής τάξεως του 10⁻⁹ sec). Έπομένως, οί παραπάνω έβδομηκοντα γενεές νετρονίων παράγονται μέσα σέ χρονικό διάστημα μικρότερο από τό ένα έκατομμυριοστό του δευτερολέπτου. Άλλά μέσα σέ αυτό τό ελάχιστο χρονικό διάστημα ελευθερώνεται



Σχ. 169. Άλυσιδωτή αντίδραση συμβαίνει, όταν τά νετρόνια κάθε γενεάς προκαλούν καινούριες σχάσεις πυρήνων ούρανιου 235.

τεράστια ποσότητα ενέργειας, δηλαδή συμβαίνει έκρηξη (ατομική βόμβα). Αν όμως, μπορέσουμε να επιδράσουμε στην εξέλιξη των σχάσεων έτσι, ώστε έπειτα από κάθε σχάση πυρήνα ουρανίου 235 ένα και μόνο νετρόνιο να προκαλεί καινούρια σχάση, τότε ο αριθμός των σχάσεων διατηρείται σταθερός και η αλυσιδωτή αντίδραση είναι ελεγχόμενη. Αυτό το πετυχαίνουμε στον πυρηνικό αντιδραστήρα.

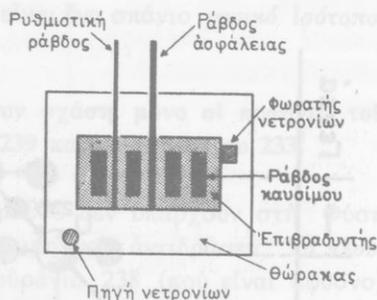
131. Πυρηνικός αντιδραστήρας

Κάθε πυρηνικός αντιδραστήρας αποτελείται από τὰ ἑξῆς κυρίως στοιχεία: α) τὸ πυρηνικὸ καύσιμο, β) τὸν ἐπιβραδυντὴ τῶν νετρονίων, γ) τὸ ρευστὸ πὺ παίρνει καὶ μεταφέρει ἔξω ἀπὸ τὸν ἀντιδραστήρα τὴ θερμότητα πὺ ἐλευθερώνεται, καὶ δ) τὶς διατάξεις ἐλέγχου, μὲ τὶς ὁποῖες ρυθμίζουμε τὸν ἀριθμὸ τῶν σχάσεων κατὰ δευτερόλεπτο (σχ. 170).

Ὡς πυρηνικὸ καύσιμο (*) χρησιμοποιοῦμε συνήθως τὸ φυσικὸ ἰσότοπο οὐράνιο 235 ἢ τὸ τεχνητὸ ἰσότοπο πλουτόνιο 239. Αὐτὰ τὰ δύο ἰσότοπα διασπῶνται μὲ θερμικὰ νετρόνια (§ 129).

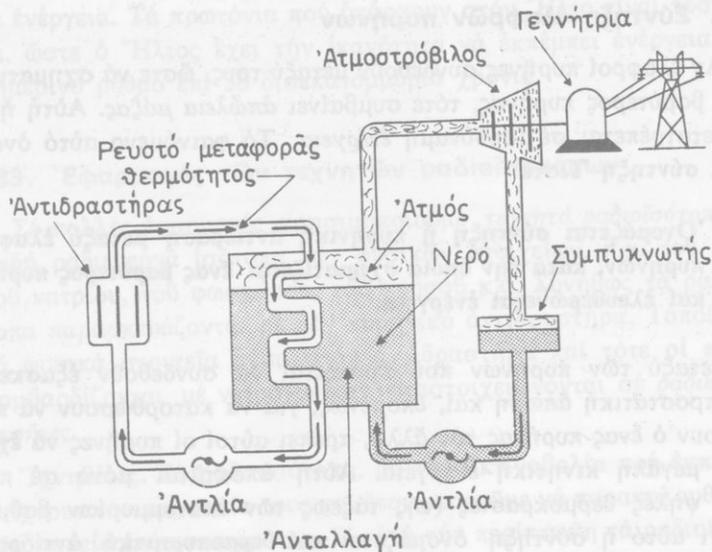
Γιὰ ἐπιβραδυντὴ χρησιμοποιοῦμε συνήθως βαρὺ νερὸ ἢ γραφίτη. Τὰ νετρόνια πὺ παράγονται κατὰ τὴ σχάση ἔχουν μεγάλη ἐνέργεια (πάνω ἀπὸ 1 MeV), καθὼς ὅμως περνοῦν μέσα ἀπὸ τὸν ἐπιβραδυντὴ συγκρούονται μὲ τὰ ἄτομα τοῦ ἐπιβραδυντὴ καὶ τελικὰ μεταβάλλονται σὲ θερμικὰ νετρόνια. Τὸ πυρηνικὸ καύσιμο ἔχει τὴ μορφή ράβδων καὶ συνήθως βυθίζεται μέσα στὸν ἐπιβραδυντὴ.

Ὡς ρευστὸ μεταφορᾶς τῆς θερμότητας χρησιμοποιεῖται ἓνα κα-



σχ. 170. Σχηματικὴ παράσταση πυρηνικοῦ ἀντιδραστήρα. Οἱ ράβδοι ἀσφάλειας καὶ ἐλέγχου εἶναι τελειῶς κατεβασμένες μέσα στὸν ἀντιδραστήρα, ἢ πηγὴ τῶν νετρονίων ἔχει ἀπομακρυνθεῖ ἀπὸ τὸ πυρηνικὸ καύσιμο κι ἔτσι ὁ ἀντιδραστήρας δὲ λειτουργεῖ.

(*) Κατ' ἀναλογία μὲ τὶς κλασσικὲς πηγὲς παραγωγῆς θερμικῆς ἐνέργειας (γαϊάνθρακας, πετρέλαιο, γαϊαέρια κ.ἄ.).



Σχ. 171. Σχηματική παράσταση εγκατάστασης που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνική ενέργεια.

τάλληλο υγρό ή αέριο, που θερμαίνεται και μεταφέρει έξω από τον αντιδραστήρα τεράστια ποσότητα θερμότητας. Αυτή προκαλεί την εξαέρωση νερού. Οι υδρατμοί που παράγονται κινούν ατμοστρόβιλο (τουρμπίνα), ο οποίος εξασφαλίζει τη λειτουργία μιᾶς γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος (σχ. 171) ή την κίνηση πλοίου. Οι διατάξεις ελέγχου είναι ράβδοι από κάδμιο ή βόριο. Αυτά τα δύο στοιχεία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν ισχυρά τα νετρόνια.

Σήμερα υπάρχουν διάφοροι τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων. Οι αντιδραστήρες ισχύος χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή για την κίνηση μεγάλων πλοίων και υποβρυχίων. Οι αντιδραστήρες 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.

132. Σύντηξη ελαφρών πυρήνων

Αν ελαφροί πυρήνες συνδεθούν μεταξύ τους, ώστε να σχηματιστεί ένας βαρύτερος πυρήνας, τότε συμβαίνει *απώλεια μάζας*. Αυτή η μάζα μετατρέπεται σε *ισοδύναμη ενέργεια*. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *σύντηξη*. Ωστε:

Όνομάζεται σύντηξη ή πυρηνική αντίδραση μεταξύ ελαφρών πυρήνων, κατά την οποία σχηματίζεται ένας βαρύτερος πυρήνας και ελευθερώνεται ενέργεια.

Μεταξύ των πυρήνων που πρόκειται να συνδεθούν εξασκείται ηλεκτροστατική άπωση και, επομένως, για να κατορθώσουν να πλησιάσουν ο ένας πυρήνας τόν άλλο, πρέπει αυτοί οι πυρήνες να έχουν πολύ μεγάλη κινητική ενέργεια. Αυτή αποκτάται μόνο σε πάρα πολύ ψηλές θερμοκρασίες (της τάξεως των εκατομμυρίων βαθμών) και γι' αυτό η σύντηξη ονομάζεται και *θερμοπυρηνική αντίδραση*. Μιά τέτοια αντίδραση είναι ο σχηματισμός ενός πυρήνα ήλιου (${}^4_2\text{He}$) από τη σύντηξη τεσσάρων πυρήνων υδρογόνου (${}^1_1\text{H}$).



Η παραγωγή των δύο ποζιτρονίων οφείλεται στο ότι δύο από τα τέσσερα πρωτόνια μεταβάλλονται σε νετρόνια.

Εφαρμογή των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων έχουμε σήμερα μόνο σε όρισμένες βόμβες (*βόμβα υδρογόνου*). Σ' αυτή την περίπτωση η αντίδραση δεν είναι ελεγχόμενη και συμβαίνει *εκρηξη*. Καταβάλλονται μεγάλες προσπάθειες, για να γίνει και η θερμοπυρηνική αντίδραση ελεγχόμενη, όπως συμβαίνει με τη σχάση των πυρήνων ουρανίου και πλουτωνίου.

Προέλευση της αστρικής ενέργειας. Στο εσωτερικό του Ήλιου και των άπλανδων αστερών επικρατούν πολύ ψηλές θερμοκρασίες, που διευκολύνουν τη σύντηξη των πρωτονίων. Τότε σχηματίζονται πυρήνες ήλιου (${}^4_2\text{He}$) και ελευθερώνεται τεράστια ενέργεια, που προέρχεται από τη μετατροπή μέρους της μάζας των τεσσάρων πρωτονίων σε *ισοδύναμη ενέργεια*. Υπολογίζεται ότι στον Ήλιο κάθε δευτερόλεπτο 4,5 εκατομμύρια τόνοι ήλιακής μάζας μετατρέπονται

σέ ενέργεια. Τά πρωτόνια πού υπάρχουν στόν Ήλιο εἶναι τόσο πολλά, ὥστε ὁ Ήλιος ἔχει τήν ἰκανότητα νά ἐκπέμπει ἐνέργεια μέ τό σημερινό ρυθμό ἐπί 30 δισεκατομμύρια χρόνια.

133. Ἐφαρμογές τῶν τεχνητῶν ραδιοϊσοτόπων

Σέ πολλές ἐφαρμογές χρησιμοποιοῦμε *τεχνητά ραδιοϊσότοπα*, δηλαδή ραδιενεργά ἰσότοπα τῶν φυσικῶν στοιχείων, π.χ. τοῦ ἰωδίου, τοῦ νατρίου, τοῦ φωσφόρου, τοῦ χρυσοῦ κ.ἄ. Συνήθως τά ραδιοϊσότοπα παρασκευάζονται μέ τόν πυρηνικό ἀντιδραστήρα. Τοποθετοῦμε τά φυσικά στοιχεῖα μέσα στόν ἀντιδραστήρα καί τότε οἱ πυρῆνες βομβαρδίζονται μέ νετρόνια καί μεταστοιχειώνονται σέ *ραδιενεργούς πυρῆνες*.

Ἰχνηθέτες. Τά ραδιοϊσότοπα, μέ τήν ἀκτινοβολία πού ἐκπέμπουν, δείχνουν τήν παρουσία τους καί ἔτσι μπορούμε νά παρακολουθήσουμε τήν πορεία ἑνός φαινομένου. Σ' αὐτή τήν περίπτωση τά ραδιοϊσότοπα ὀνομάζονται *ἰχνηθέτες*. Μέ αὐτούς μπορούμε π.χ. νά παρακολουθήσουμε τή ροή ἑνός ὑγροῦ ἢ τή μετακίνηση τῆς ἄμμου σέ ἕναν κόλπο κ.ἄ. Ἰχνηθέτες χρησιμοποιοῦν καί οἱ βιομηχανίες πού κατεργάζονται μίγματα (ὅπως εἶναι τά ὑλικά τοῦ τσιμέντου, τῶν λιπασμάτων, τοῦ γυαλιοῦ κ.ἄ.). Στήν ἰατρική χρησιμοποιοῦνται ἰχνηθέτες γιά τή διάγνωση παθήσεων. Στή βιολογική ἔρευνα χρησιμοποιοῦνται ἰχνηθέτες, γιά νά βρεθεῖ πῶς κυκλοφορεῖ τό κάθε στοιχεῖο πού μπαίνει μέσα στόν ὄργανισμό. Ἄν π.χ. ἕνα φυτό μαζί μέ τά ἄλλα θρεπτικά συστατικά πάρει καί ραδιενεργό φωσφόρο 32 ($T = 14,3$ ἡμέρες), τότε τό φυτό ἀφομοιώνει καί τό ραδιενεργό φωσφόρο, ὅπως καί τό φυσικό. Ἔτσι, μέ τήν ἀκτινοβολία πού ἐκπέμπει ὁ ραδιενεργός φωσφόρος μπορούμε νά μελετήσουμε πῶς κατανέμεται ὁ φωσφόρος στά διάφορα μέρη τοῦ φυτοῦ (σχ. 172).

Χρονικοί προσδιορισμοί. Ἀπό τά φαινόμενα τῆς ραδιενέργειας πού παρουσιάζουν σήμερα τά ὀρυκτά ἢ τά λείψανα ὀργανισμῶν (κόκκαλα, ἀπολιθώματα, ξύλο, στάχτη), μπορούμε νά προσδιορίσουμε πότε σχηματίστηκαν αὐτά τά ὀρυκτά ἢ πότε ἔζησαν ὀρισμένα ζῶα καί φυτά. Ἔτσι ἀπό τό ρυθμό μέ τόν ὁποῖο τό οὐράνιο 238 (U^{238}) μεταστοιχειώνεται τελικά σέ σταθερό μόλυβδο 206 (Pb^{206}) βρίσκου-

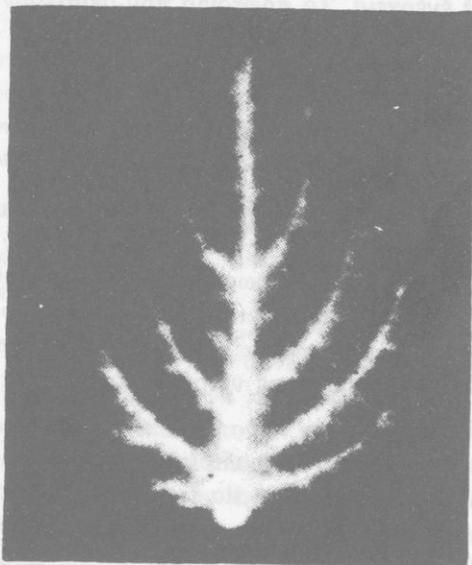
με ότι ή πιθανή ήλικία τής Γής είναι 4,5 δισεκατομμύρια έτη και ότι ο στερεός φλοιός τής Γής σχηματίστηκε πριν από 3,5 δισεκατομμύρια έτη.

Γιά νά προσδιορίσουμε μέ ακρίβεια τήν ήλικία πού έχουν όρισμένα αρχαιολογικά εύρηματα, στηριζόμαστε στην ραδιενέργεια του άνθρακα 14 (C^{14}) πού βρίσκεται στό διοξείδιο του άνθρακα τής ατμόσφαιρας και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 5600$ έτη. Ο άνθρακας 14 σχηματίζεται (*), όταν οι πυρήνες άζώτου (N^{14}) βομβαρδίζονται μέ νετρόνια των κοσμικών ακτίνων. Ο άνθρακας 14 άφομοιώνεται από τά φυτά, όπως και ο φυσικός άνθρακας 12.

Μετά τό θάνατο του οργανισμού ή ποσότητα του άνθρακα 14, πού ύπάρχει μέσα στά λείψανα του οργανισμού, αρχίζει νά ελαττώνεται σύμφωνα μέ τό νόμο τής ραδιενέργειας.

Βιομηχανικές εφαρμογές. Οι άκτινοβολίες πού εκπέμπουν τά ραδιοϊσότοπα, όταν περνούν μέσα από τά διάφορα υλικά, παθαίνουν απορρόφηση. Έτσι μπορούμε νά ελέγξουμε τό πάχος πού έχουν φύλλα ή πλάκες από αυτά τά υλικά (χαρτί, πλαστικές ύλες, νήματα κ.λ.) ή άν ένα υλικό έχει σταθερή πυκνότητα και επομένως δέν περιέχει άλλα υλικά.

Μέ άκτίνες γ παίρνουμε πάνω σέ φωτογραφικές πλάκες ραδιογραφήματα κομματιών μετάλλων (ραδιομεταλλογραφία) και εξετά-

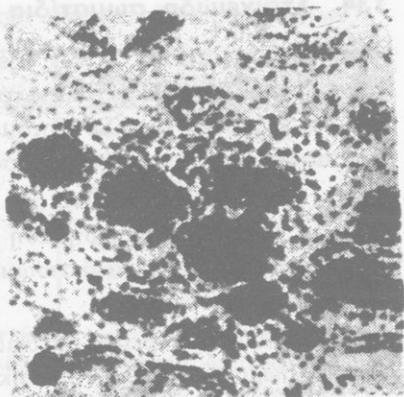


Σχ. 172. Αυτόραδιογράφημα φύλλου έπειτα από τήν άφομοίωση του ραδιενεργού φωσφόρου

(*) Ο άνθρακας 14 σχηματίζεται και μεταστοιχείωνεται ως εξής:



ζουμε τή δομή ενός ύλικού (π.χ. αν 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.



Σχ. 173. Συγκέντρωση του ιδίου 131 στο έσωτερικό των λοβών του θυρεοειδή αδένα

Αποστείρωση καί ραδιοθεραπεία. Τά βιολογικά αποτελέσματα των πυρηνικών ακτινοβολιών έχουν εφαρμογές στήν αποστείρωση καί τή ραδιοθεραπεία. Τό γάλα καί τό κρέας πού πρόκειται νά διατηρηθούν αποστειρώνονται μέ ακτίνες γ, οί όποιες σταματούν τίς ζυμώσεις, χωρίς νά καταστρέφουν τίς βιταμίνες. Οί ακτίνες γ έμποδίζουν τίς πατάτες νά βλαστήσουν καί έτσι μπορούν νά διατηρηθούν γιά πολλά χρόνια. Μέ τίς ακτίνες γ λύθηκε τό πρόβλημα τής αποστείρωσεως όρισμένων φαρμακευτικών προϊόντων καί ιδίως των αντιβιοτικών.

Γιά τή ραδιοθεραπεία μέ ακτινοβολία ακτίνων γ χρησιμοποιείται τό κοβάλτιο 60, αντί γιά τό πανάκριβο ράδιο. Σέ μερικές περιπτώσεις μέσα στους όγκους πού δημιουργούνται στό σώμα, βάζουν μικρή ποσότητα από ένα κατάλληλο ραδιενεργό ισότοπο, π.χ. ιρίδιο 192, χρυσό 198, ιώδιο 131 (σχ. 173).

Πρόκληση μεταλλάξεων. Οί πυρηνικές ακτινοβολίες προκαλούν τροποποιήσεις στά γονίδια, πού είναι οί φορείς των κληρονομικών ιδιοτήτων, καί έτσι προκαλούν μεταλλάξεις. Μέ αυτό τόν τρόπο δημιουργήθηκαν καινούριες ποικιλίες φυτών, πού έχουν νέες ιδιότητες (π.χ. άντέχουν περισσότερο στις ασθένειες ή μπορούν νά αναπτυχθούν σέ περισσότερο ψυχρά ή θερμά κλίματα). Ό νέος αυτός κλάδος τής γενετικής δέν ξέρουμε τί μπορεί νά μάς δώσει στό μέλλον.

134. Στοιχειώδη σωματίδια

α. Αντισωματίδια. Όπως ξέρουμε, μέσα στο άτομο υπάρχουν τρία στοιχειώδη σωματίδια, το ηλεκτρόνιο (e^-), το πρωτόνιο (p) και το νετρόνιο (n). Σέ όρισμένες πυρηνικές αντιδράσεις εμφανίζονται άλλα τρία στοιχειώδη σωματίδια, το ποζιτρόνιο (e^+), το νετρίνιο (ν) και το αντινετρίνιο ($\bar{\nu}$). Τό ποζιτρόνιο είναι ένα ηλεκτρόνιο, αλλά μέ θετικό φορτίο, δηλαδή είναι ένα **αντιηλεκτρόνιο**. Λέμε ότι τό ποζιτρόνιο είναι ένα **αντισωματίδιο**. Επίσης τό αντινετρίνιο είναι **αντισωματίδιο**.

Η πειραματική έρευνα απέδειξε ότι σέ κάθε σωματίδιο αντιστοιχεί ένα αντισωματίδιο. Έτσι βρέθηκε ότι τό πρωτόνιο p έχει αντισωματίδιο τό **αντιπρωτόνιο** \bar{p} , πού είναι ένα πρωτόνιο, αλλά μέ **αρνητικό** φορτίο. Αντισωματίδια έχουν όχι μόνο τά σωματίδια πού έχουν ηλεκτρικό φορτίο, αλλά και τά ουδέτερα σωματίδια. Έτσι τό νετρόνιο n έχει αντισωματίδιο τό **αντινετρόνιο** \bar{n} , πού διαφέρει από τό νετρόνιο ως πρós τή μαγνητική ροπή. Τά αντισωματίδια συμβολίζονται μέ μία μικρή γραμμή πάνω από τό σύμβολο του σωματιδίου. Όσπε πειραματικώς βρήκαμε ότι:

Όλα τά σωματίδια έχουν αντισωματίδια.

β. Κατηγορίες σωματιδίων. Όλα τά γνωστά σωματίδια και αντισωματίδια κατατάσσονται σέ τρείς κατηγορίες, τά **λεπτόνια**, τά **μεσόνια** και τά **βαρυόνια**.

Στά **λεπτόνια** ανήκουν τό νετρίνιο, τό αντινετρίνιο, τό ηλεκτρόνιο, τό ποζιτρόνιο και τά **μύονια** (ή **μ μεσόνια**). Αύτά έχουν μάζα 207 φορές μεγαλύτερη από τή μάζα (m_e) του ηλεκτρονίου και φορτίο θετικό ή αρνητικό ίσο μέ ένα στοιχειώδες φορτίο (μ^+ και μ^- μύονιο).

Στά **μεσόνια** ανήκουν τά **πύονια** ή **π μεσόνια**, τά **καόνια** ή **K μεσόνια** και τό **η μεσόνιο**. Τά μεσόνια έχουν μάζα μεγαλύτερη από τή μάζα των μιονίων, αλλά μικρότερη από τή μάζα των νουκλεονίων. Τά πύονια και τά καόνια έχουν φορτίο θετικό ή αρνητικό ίσο μέ ένα στοιχειώδες φορτίο ή είναι ουδέτερα (π^+ , π^- , π^0 μεσόνιο και K^+ , K^- , K^0 μεσόνιο). Τό η μεσόνιο είναι ουδέτερο (η^0).

Τά **βαρυόνια** υποδιαιρούνται σέ **νουκλεόνια** και **ύπερβόνια**. Στά

νουκλεόνια ανήκουν τό πρωτόνιο, τό νετρόνιο καί τά άντισωματίδιά τους. Τά ύπερόνια έχουν μάζα μεγαλύτερη από τή μάζα τών νουκλεονίων καί φορτίο θετικό ή άρνητικό ίσο μέ ένα στοιχειώδες φορτίο ή είναι ουδέτερα. Διακρίνονται σε ύπερόνια Λ, Σ, Ξ καί Ω (βλ. πίνακα).

Τά μίονια, τά μεσόνια καί τά ύπερόνια εμφανίζονται σε όρισμένες πυρηνικές αντιδράσεις καί στίς κοσμικές άκτίνες, είναι άσταθή καί διασπώνται πολύ γρήγορα.

γ. Άντιύλη. Τό πρώτο άντισωματίδιο πού άνακαλύψαμε είναι τό ποζιτρόνιο, πού, όπως είδαμε, δέν μπορεί νά ζήσει μέσα στό δικό μας κόσμο, πού είναι γεμάτος από ήλεκτρόνια καί γρήγορα εξαφανίζεται. Τό ίδιο συμβαίνει μέ κάθε άντισωματίδιο, π.χ. τό αντιπρωτόνιο. Τά άντισωματίδια γενικά τά όνομάζουμε **άντιύλη**.

Τό αντιπρωτόνιο είναι ό πυρήνας του άτόμου ύδρογόνου, αλλά μέ ένα άρνητικό στοιχειώδες ήλεκτρικό φορτίο. Άς υποθέσουμε ότι γύρω από τό αντιπρωτόνιο περιφέρεται ένα ποζιτρόνιο, όπως στό άτομο ύδρογόνου τό ήλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τό πρωτόνιο. Αυτό τό άτομο πού φανταστήκαμε είναι ένα άτομο **άντιυδρογόνου** στό όποιο ισχύουν όλοι οί γνωστοί μας νόμοι. Άλλά αυτό τό άτομο δέν μπορεί νά επιζήσει στό δικό μας κόσμο, όπως συμβαίνει μέ όλα τά άντισωματίδια, πού άναγκαστικά εμφανίζονται καί άμέσως εξαφανίζονται. Είναι όμως πιθανό, μερικές άπομακρυσμένες περιοχές του Σύμπαντος νά αποτελούνται από άντιύλη. Άς υποθέσουμε ότι σήμερα δεχόμαστε τίς άκτινοβολίες πού εκπέμπουν αυτά τά άπομακρυσμένα άτομα άντιυδρογόνου. Ποτέ δέ θά μπορούσαμε νά άνακα-

Κατάταξη τών στοιχειωδών σωματιδίων

Κατηγορία		Στοιχειώδη σωματίδια
Λεπτόνια		νεutrino, άντινεutrino ήλεκτρόνιο, ποζιτρόνιο μίονια (μ)
Μεσόνια		πιόνια (π μεσόνια) καόνια (Κ μεσόνια) η μεσόνιο
Βαρυόνια	Νουκλεόνια	πρωτόνιο, αντιπρωτόνιο νεutrino, άντινεutrino
	Ύπερόνια	ύπερόνια Λ, ύπερόνια Σ ύπερόνια Ξ, ύπερόνια Ω

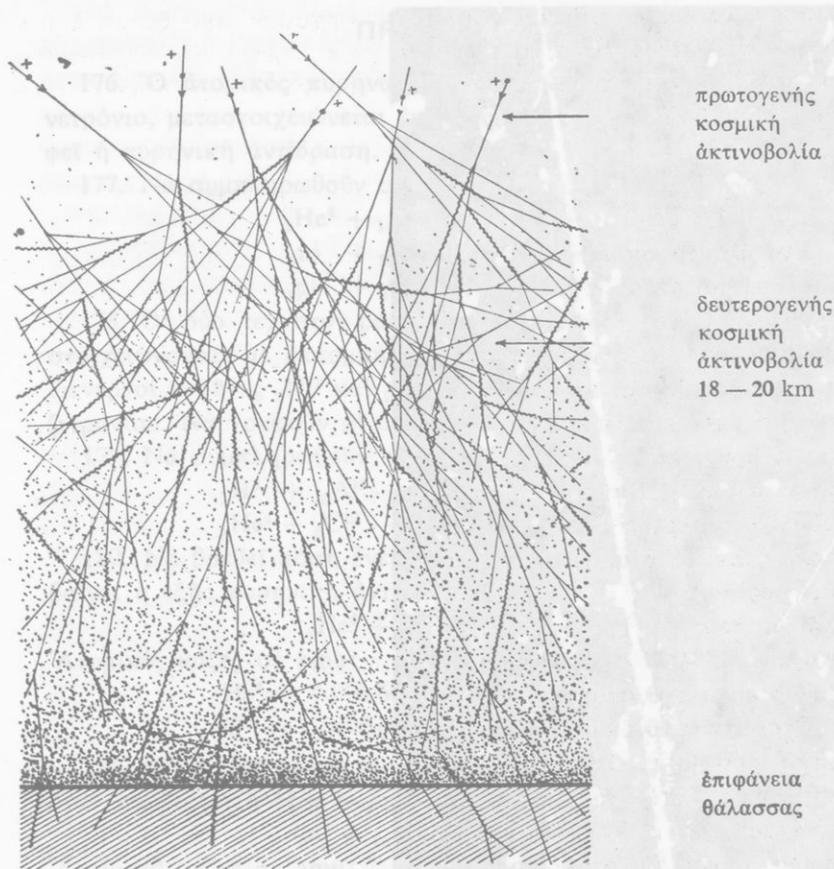
λύσουμε ότι αυτές οι ακτινοβολίες προέρχονται από άτομα αντιδρόγону, γιατί και σ' αυτά τὰ άτομα τὰ πηδήματα τῶν ποζιτρονίων προκαλοῦν ἐκπομπή φωτονίων ($h\nu$), σύμφωνα μέ τίς γνωστές συνθήκες τοῦ Bohr.

135. Κοσμικές ἀκτίνες

Ἐνα ἠλεκτροσκόπιο πού ἔχει θετικό ἢ ἀρνητικό φορτίο, δταν μένει μέσα στόν ἀέρα, χάνει τό φορτίο του, γιατί, ὅπως ξέρουμε, πάντοτε μέσα στόν ἀέρα ὑπάρχουν ἰόντα. Ὁ διαρκής ἰονισμός τοῦ ἀέρα ὀφείλεται σέ ακτινοβολίες πού προέρχονται ἀπό τό κοσμικό διάστημα καί ὀνομάζονται **κοσμικές ἀκτίνες** ἢ **κοσμική ἀκτινοβολία**. Στά ἀνώτατα στρώματα τῆς ἀτμόσφαιρας φτάνουν ἀπό ὄλες τίς διευθύνσεις **οἱ πρωτογενεῖς κοσμικές ἀκτίνες**, πού ἀποτελοῦνται κυρίως ἀπό **πρωτόνια** (85%), ὑπάρχουν ὅμως σ' αυτές καί ἠλεκτρόνια, φωτόνια, σωματίδια α καί μερικοί βαρύτεροι πυρήνες (ἄνθρακα, ἀζώτου, σιδήρου κ.ἄ.). Τά σωματίδια τῶν πρωτογενῶν κοσμικῶν ἀκτίνων ἔχουν συνήθως **πολύ μεγάλη ἐνέργεια**, πού μπορεῖ νά φτάσει ὡς 10^{10} GeV (ἐνῶ μέ τούς σύγχρονους ἐπιταχυντές μας δίνουμε στά σωματίδια ἐνέργεια ὡς 400 GeV). Αὐτή ἡ ἐνέργεια συγκεντρωμένη σέ ἕνα σωματίδιο εἶναι τεράστια.

Ὅταν ἕνα πρωτόνιο τῶν πρωτογενῶν κοσμικῶν ἀκτίνων μπεῖ μέσα στήν ἀτμόσφαιρα, τό πρωτόνιο **συγκρούεται** μέ ἕνα πυρήνα ἀζώτου ἢ ὀξυγόνου. Τότε ὁ πυρήνας αὐτός **διαμελίζεται** σέ πολλά νουκλεόνια πού ἔχουν μεγάλη ἐνέργεια καί καθῶς κατεβαίνουν μέσα στήν ἀτμόσφαιρα προκαλοῦν καινούριες **πυρηνικές ἀντιδράσεις**. Ἐνα μεγάλο ὅμως μέρος ἀπό τήν ἐνέργεια πού εἶχε τό πρωτογενές πρωτόνιο μεταβάλλεται κατά τή σύγκρουσή του σέ ἀσταθεῖς μορφές ὕλης, πού εἶναι **μεσόνια** καί κυρίως **πιόνια**. Αὐτά ἀμέσως διασπῶνται καί σχηματίζονται ἠλεκτρόνια, ποζιτρόνια καί φωτόνια γ . Ἐτσι στά κατώτερα στρώματα τῆς ἀτμόσφαιρας φτάνουν **οἱ δευτερογενεῖς κοσμικές ἀκτίνες**, πού ἀποτελοῦνται ἀπό μόνια (75%), ἠλεκτρόνια, ποζιτρόνια, νουκλεόνια, μερικά σωματίδια α καί φωτόνια γ (σχ. 174).

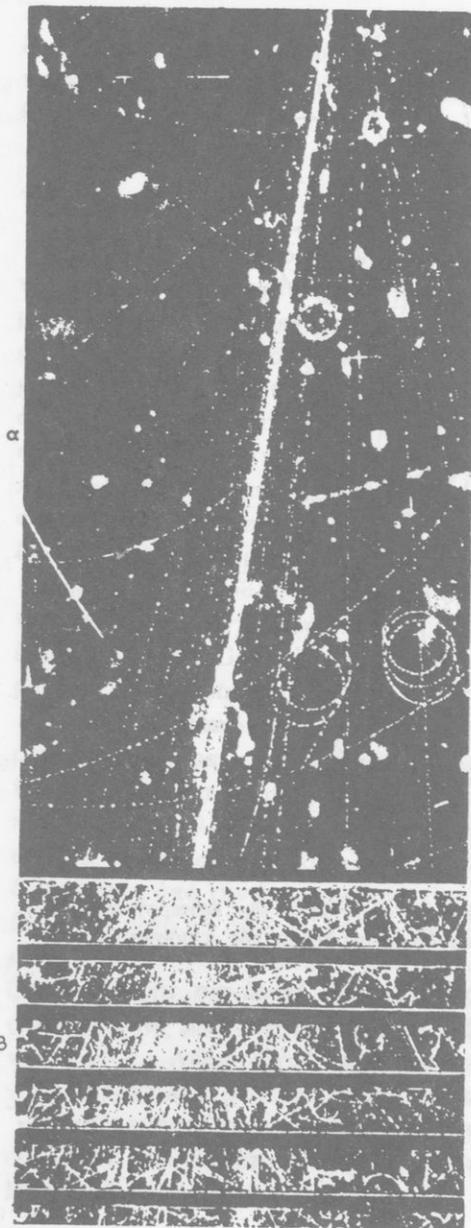
Ἐπολογίζεται ὅτι κάθε δευτερόλεπτο σέ κάθε τετραγωνικό ἑκατοστόμετρο τῆς ἐπιφάνειας τῆς Γῆς φτάνει ἕνα κοσμικό σωματίδιο. Μερικά πρωτογενή κοσμικά σωματίδια πού ἔχουν πάρα πολύ μεγάλη



Σχ. 174. Σχηματική παράσταση της παραγωγής των δευτερογενών κοσμικών ακτίνων μέσα στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας

ενέργεια κατορθώνουν να φτάσουν ως την επιφάνεια της Γης (σχ. 175). Αυτά τα κοσμικά σωματίδια με την ενέργειά τους ίσως να εξασκούν επίδραση σε ορισμένα κύτταρα των οργανισμών.

Οι κοσμικές ακτίνες βοήθησαν σημαντικά στην εξέλιξη της Πυρηνικής Φυσικής, γιατί στις κοσμικές ακτίνες ανακαλύψαμε για πρώτη φορά τό ποζιτρόνιο (Anderson 1932), και πολλά από τα άλλα στοιχειώδη σωματίδια (μιόνια, πιόνια, υπερόνια) που ήταν άγνωστα ως τότε.



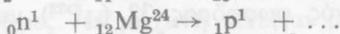
...από άτομα αντι-
...τα πρώτα των κοχλιοειδών
...μεταλλικών μενίσκων, συν-

Σχ. 175. Ένα πρωτογενές κοσμικό σωματίδιο με ενέργεια πολλών εκατομμυρίων MeV μπήκε μέσα στον πρώτο θάλαμο Wilson (α) και έπειτα μπήκε σε δεύτερο θάλαμο Wilson που είχε πολλές παράλληλες μεταλλικές πλάκες (β). Έκεί το σωματίδιο διαμελίζοντας πυρήνες των ατόμων του μετάλλου δημιούργησε πάρα πολλά σωματίδια και φωτόνια γ μεγάλης ενέργειας.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

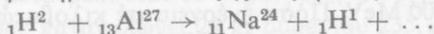
176. Ο άτομικός πυρήνας άζώτου ${}^7\text{N}^{14}$, όταν βομβαρδίζεται με νετρόνιο, μεταστοιχειώνεται εκπέμποντας δύο σωματίδια α. Νά γραφεί ή πυρηνική αντίδραση.

177. Νά συμπληρωθούν οι επόμενες πυρηνικές αντιδράσεις:

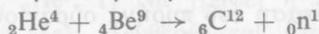


178. Οι δύο τεχνητοί ραδιενεργοί πυρήνες ${}^9\text{F}^{20}$ και ${}^{28}\text{Ni}^{65}$ μεταστοιχειώνονται με έκπομπή ήλεκτρονίου, ενώ οι δύο τεχνητοί ραδιενεργοί πυρήνες ${}^7\text{N}^{13}$ και ${}^{19}\text{K}^{38}$ μεταστοιχειώνονται με έκπομπή ποζιτρονίου. Νά γραφούν οι αντιδράσεις της μεταστοιχειώσεως.

179. Νά συμπληρωθούν οι εξής πυρηνικές αντιδράσεις:



180. Νά βρεθεί πόση ενέργεια σε Joule ελευθερώνεται, όταν συμβαίνει ή εξής πυρηνική αντίδραση:



Ατομικές μάζες σε amu:

$$\text{He}^4 = 4,002\ 604$$

$$\text{Be}^9 = 9,012\ 186$$

$$\text{C}^{12} = 12,000\ 000$$

$$\text{n}^1 = 1,008\ 665$$

181. Νά βρεθεί πόση εξωτερική ενέργεια σε Joule απορροφάται, όταν συμβαίνει ή εξής πυρηνική αντίδραση:



Ατομικές μάζες σε amu:

$$\text{n}^1 = 1,008\ 665$$

$$\text{Ne}^{20} = 19,992\ 440$$

$$\text{O}^{17} = 16,999\ 133$$

$$\text{He}^4 = 4,002\ 604$$

182. Όταν ο πυρήνας λιθίου 7 (${}^3\text{Li}^7$) βομβαρδίζεται με πρωτόνιο που έχει κινητική ενέργεια $E_p = 0,25\ \text{MeV}$, 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;

$$\text{H}^1 = 1,007\ 825\ \text{amu}, \quad \text{Li}^7 = 7,016\ 004\ \text{amu}, \quad \text{He}^4 = 4,002\ 604\ \text{amu}$$

183. Στο σώμα του ανθρώπου υπάρχουν περίπου 0,3 gr ραδιενεργού καλίου 40 (${}^{40}\text{K}^{40}$), 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 μετα-

στοιχειώνεται με έκπομπή ηλεκτρονίου. 1) Νά γραφεί η εξίσωση της διασπάσεως. 2) Πόσες διασπάσεις συμβαίνουν κάθε δευτερόλεπτο μέσα στο σώμα του ανθρώπου;

184. Το ραδιενεργό βρώμιο $82\text{ }({}_{35}\text{Br}^{82})$ έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 36\text{ h}$. Από μία αρχική μάζα βρωμίου έπειτα από πόσο χρονικό διάστημα θά έχει απομείνει τό $1/32$ ή τό $1/2^{10}$ της αρχικής μάζας m_0 ;

185. Ο ραδιενεργός φωσφόρος $32\text{ }({}_{15}\text{P}^{32})$ μεταστοιχειώνεται με έκπομπή ηλεκτρονίου και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 14$ ημέρες. Με μία κατάλληλη διάταξη (άπαριθμητή Geiger) βρίσκουμε ότι ένα διάλυμα φωσφόρου 32 εκπέμπει 1000 ηλεκτρόνια κατά λεπτό. Αν επαναλάβουμε τό πείραμα έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 28$ ημέρες, πόσα ηλεκτρόνια θά καταμετρηθούν κατά λεπτό;

186. Κατά τή διάσπαση ενός πυρήνα ουρανίου $235\text{ }(\text{U}^{235})$ έλευθερώνεται ένέργεια 200 MeV . Πόση ένέργεια σέ κιλοβατάρια έλευθερώνεται, όταν διασπώνται οί πυρήνες πού υπάρχουν μέσα σέ 1 gr ουρανίου; Πόσος είναι ό συντελεστής άποδόσεως σ ατή τήν περίπτωση; Πυρήνες ουρανίου $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr.

187. Κατά τή διάσπαση του πυρήνα ουρανίου $235\text{ }({}_{92}\text{U}^{235})$ σχηματίζονται δύο νέοι πυρήνες πού ό καθένας έχει άτομικό αριθμό $Z = 92/2$ και άκτίνα $6 \cdot 10^{-15}\text{ m}$. Γιά μία στιγμή οί δύο νέοι πυρήνες βρίσκονται σέ έπαφή. Πόση είναι τότε ή άπωση πού αναπτύσσεται μεταξύ των δύο νέων πυρήνων;

188. Από τή διάσπαση του πυρήνα ουρανίου 235 μπορεί νά σχηματιστούν άμέσως δύο σταθεροί πυρήνες, σύμφωνα με τήν αντίδραση:



1) Πόση ένέργεια σέ MeV έλευθερώνεται, όταν συμβαίνει ατή ή αντίδραση; 2) Πόση ένέργεια σέ Joule έλευθερώνεται κατά γραμμάριο ουρανίου; $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr.

Άτομικές μάζες σέ amu:

$${}_0^1\text{n} = 1,009 \quad \text{U}^{235} = 235,044 \quad \text{Mo}^{98} = 97,905 \quad \text{Xe}^{136} = 135,917.$$

189. Κατά τήν έκρηξη μιās βόμβας ουρανίου 235 ένας από τους νέους πυρήνες είναι ό ραδιενεργός πυρήνας ξένου 143 , ${}_{54}\text{Xe}^{143}$. Αυτός ό πυρήνας με διαδοχικές έκπομπές ενός ηλεκτρονίου μεταστοιχειώνεται τελικά σέ σταθερό πυρήνα νεοδύμιου 143 , ${}_{60}\text{Nd}^{143}$. Νά γραφεί παραστατικά ή σειρά των διαδοχικών μεταστοιχειώσεων του αρχικού πυρήνα ${}_{54}\text{Xe}^{143}$.

190. Βρέθηκε ότι κατά την έκρηξη μιᾶς βόμβας οὐρανίου ^{235}U διασπῶνται $n = 5 \cdot 10^{23}$ πυρῆνες οὐρανίου μέσα σέ χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,001 \text{ sec}$. 1) Πόση ἐνέργεια σέ Joule ἐλευθερώνεται κατά τὴν έκρηξη, ἂν ἀπὸ κάθε ἕναν πυρήνα οὐρανίου ἐλευθερώνεται ἐνέργεια 200 MeV ; 2) Πόση εἶναι κατὰ μέσο ὄρο ἡ ἰσχύς πού ἐλευθερώνεται;

191. Μιά μηχανή σιδηροδρόμου ἀναπτύσσει σταθερὴ ἰσχύ $P = 1200 \text{ kW}$ ἐπὶ 10 ὥρες. Ἡ μηχανή κινεῖται μὲ πυρηνικὸ ἀντιδραστήρα, πού τροφοδοτεῖται μὲ οὐράνιο ^{235}U καὶ ἔχει συντελεστὴ ἀποδόσεως $\eta = 0,20$. Πόση μάζα οὐρανίου θά καταναλωθεῖ γι' αὐτὴ τὴ διαδρομὴ; Πυρῆνες οὐρανίου $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρῆνες/gr. Ἐνέργεια πού ἐλευθερώνεται 180 MeV/πυρήνα .

192. Σέ ἕναν πυρηνικὸ ἀντιδραστήρα τὰ $8/10\,000$ τῆς μάζας τοῦ οὐρανίου ^{235}U μετατρέπονται σέ ἰσοδύναμη ἐνέργεια. Ἄν κάθε ἡμέρα ὁ ἀντιδραστήρας καταναλῶνει 24 gr οὐρανίου ^{235}U , πόση εἶναι ἡ ἰσχύς τοῦ ἀντιδραστήρα;

193. Ἀπὸ τὴ σύντηξη τεσσάρων πρωτονίων, $^1\text{H}^1$, σχηματίζεται ἕνας πυρήνας ἡλίου, $^4\text{He}^4$. 1) Νά γραφεῖ ἡ πυρηνικὴ ἀντίδραση. 2) Πόση ἐνέργεια σέ MeV ἐλευθερώνεται, ὅταν σχηματίζεται ἕνας πυρήνας ἡλίου; 3) Πόση ἐνέργεια σέ Joule ἐλευθερώνεται, ὅταν σχηματίζεται 1 gr ἡλίου;

Ἄτομικὲς μάζες σέ amu:

$$^1\text{H}^1 = 1,007\,825, \quad ^4\text{He}^4 = 4,002\,604, \quad N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ ἄτομα/gr-atom.}$$

194. Ἀπὸ τὴ σύντηξη δύο δευτερονίων, $^2\text{H}^2$, σχηματίζεται ἕνας πυρήνας ἡλίου $^4\text{He}^4$. 1) Νά γραφεῖ ἡ πυρηνικὴ ἀντίδραση. 2) Πόση ἐνέργεια σέ MeV ἐλευθερώνεται, ὅταν σχηματίζεται ἕνας πυρήνας ἡλίου; 3) Πόση ἐνέργεια σέ Joule ἐλευθερώνεται, ὅταν σχηματίζεται 1 gr ἡλίου; $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ ἄτομα/gr-atom.

Ἄτομικὲς μάζες σέ amu:

$$^2\text{H}^2 = 2,0141, \quad ^4\text{He}^4 = 4,0026$$

195. Ὄταν ἀπὸ τὴ σύντηξη τεσσάρων πυρηνῶν ὕδρογόνου σχηματίζεται ἕνας πυρήνας ἡλίου, τότε τὰ $7/1000$ τῆς μάζας τοῦ ὕδρογόνου μετατρέπονται σέ ἰσοδύναμη ἐνέργεια. Πόση ἐνέργεια σέ κιλοβατῶρια μποροῦμε νά ἔχουμε ἀπὸ 1 kg ὕδρογόνου πού τό ὑποβάλλουμε σέ σύντηξη;

196. Σέ 1 gr ραδίου υπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες και ή σταθερή διασπάσεως του ραδίου είναι:

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \quad \text{ή} \quad \lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

Πόσες διασπάσεις τό δευτερόλεπτο συμβαίνουν μέσα στή μάζα 1 gr ραδίου; Ποιά σχέση έχουν αυτές οί διασπάσεις μέ τή μονάδα έντάσεως ραδιενεργείας 1 κιουρί (1 Ci);

197. Τό ραδιενεργό κοβάλτιο 58 ($_{27}\text{Co}^{58}$) έχει χρόνο ύποδιπλασιασμού $T = 72$ ήμέρες. Πόση μάζα m από αυτό τό ραδιοϊσότοπο έχει ένταση ραδιενέργειας ίση μέ 1 μιλικιουρί (1 mCi);

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ άτομα/gr-atom.}$$

198. Στή διάρκεια ενός δευτερολέπτου μιά μάζα οϋρανίου 238 έκπέμπει 18 500 σωματίδια α . Πόση είναι σέ μικροκιουρί (μCi) ή ένταση ραδιενέργειας γι' αυτή τή μάζα του οϋρανίου;

199. Πόση μάζα m από ραδιενεργό κοβάλτιο 55 ($_{27}\text{Co}^{55}$) έχει ένταση ραδιενέργειας ίση μέ 10 μιλικιουρί (mCi); Χρόνος ύποδιπλασιασμού $T = 18$ h.

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ άτομα/gr-atom.}$$

200. Τό αίμα ενός άσθενή έχει όγκο 3500 cm^3 . Στο αίμα αυτού του άσθενή εισάγεται μιά ποσότητα ραδιενεργού φωσφόρου 32 ($_{15}\text{P}^{32}$), ή όποία έχει ένταση ραδιενέργειας $A = 5 \text{ mCi}$. Ό φωσφόρος 32 έχει χρόνο ύποδιπλασιασμού $T = 14$ ήμέρες. Άν έπειτα από χρόνο $t = 28$ ήμέρες πάρουμε από αυτόν τόν άσθενή 1 cm^3 αίματος, πόσες διασπάσεις τό δευτερόλεπτο θά βρούμε ότι συμβαίνουν;

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	96490 Cb/γραμμαμοῖσοδύναμο
Σταθερή Planck	h	$6,6256 \cdot 10^{-34}$ Joule·sec
Στοιχειώδες ἠλεκτρικό φορτίο	e	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Cb
Μονάδα ατομικής μάζας	1 amu	$1,6604 \cdot 10^{-27}$ kg
Ἡλεκτρονιοβόλτ	1 eV	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Joule
Ἀκτίνα 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 ἡρεμίας στοιχειωδῶν σωματιδίων

Ἡλεκτρόνιο m_e	Πρωτόνιο m_p	Νετρόνιο m_n
0,000 548 amu	1,007 825 amu	1,008 665 amu
$9,109 \cdot 10^{-31}$ kg	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg
0,511 MeV	938,26 MeV	939,55 MeV

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Μετατροπές μονάδων ενέργειας

Μονάδα	gr	amu	erg	MeV	Joule	cal
1 gr	$\boxed{1}$	$6,02 \cdot 10^{23}$	$9 \cdot 10^{20}$	$5,62 \cdot 10^{26}$	$9 \cdot 10^{13}$	$2,15 \cdot 10^{13}$
1 amu	$1,66 \cdot 10^{-24}$	$\boxed{1}$	$1,49 \cdot 10^{-8}$	931	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$3,56 \cdot 10^{-11}$
1 erg	$1,11 \cdot 10^{-21}$	671	$\boxed{1}$	$6,24 \cdot 10^5$	10^{-7}	$2,59 \cdot 10^{-8}$
1 MeV	$1,78 \cdot 10^{-27}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$\boxed{1}$	$1,60 \cdot 10^{-13}$	$3,83 \cdot 10^{-14}$
1 Joule	$1,11 \cdot 10^{-14}$	$6,71 \cdot 10^9$	10^7	$6,24 \cdot 10^{13}$	$\boxed{1}$	0,239
1 cal	$5,65 \cdot 10^{-14}$	$2,81 \cdot 10^{10}$	$4,18 \cdot 10^7$	$2,61 \cdot 10^{13}$	4,18	$\boxed{1}$
1 kWh	$4 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{16}$	$3,60 \cdot 10^{13}$	$2,25 \cdot 10^{19}$	$3,60 \cdot 10^6$	$0,86 \cdot 10^6$

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

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 αὐτεπαγωγῆς	1 Henry	1 H = 1 V·sec/A = = 1 J/A ² = 1 Ω·sec
Ποσότητα μαγνητισμοῦ	1 Ampère·m	1 A·m
Μαγνητική ροή	1 Weber	1 Wb = 1 V·sec = = 1 J/A
Μαγνητική ἐπαγωγή	1 Tesla	1 T = 1 N/(A·m) = 1 Wb/m ²
Ένταση μαγνητικού πεδίου	1 Ampère/m	1 A/m
Μαγνητική ροπή	1 Ampère·m ²	1 A·m ²

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

Τά ισότοπα των 30 πρώτων φυσικών στοιχείων

(*Όσα σημειώνονται με μαύρα στοιχεία είναι φυσικά ή τεχνητά ραδιοϊσότοπα)

Z	Στοιχείο		Μαζικός αριθμός A
1	Υδρογόνο	H	1 2 3
2	Ήλιο	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	Άνθρακας	C	10 11 12 13 14
7	Άζωτο	N	12 13 14 15 16 17
8	Όξυγόνο	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	Άργίλιο	Al	25 26 27 28 29
14	Πυρίτιο	Si	27 28 29 30 31
15	Φωσφόρος	P	29 30 31 32 33
16	Θείο	S	31 32 33 34 35 36 37
17	Χλώριο	Cl	33 34 35 36 37 38 39
18	Άργό	A	35 36 37 38 39 40 41
19	Κάλιο	K	37 38 39 40 41 42 43 44
20	Άσβέστιο	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	Χρώμιο	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 62 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. — Ἀμείωτῃ καὶ φθίνουσα ταλάντωση. — Ἄπλό ἔκκρεμές. — Φυσικὸ ἔκκρεμές. — Διαφορὰ φάσεως μεταξύ δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων. — Σύνθεσι δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων μετ' ἑνὴν ἴδια περίοδο. — Ἀνάλυσι περιοδικῆς ταλαντώσεως κατὰ Fourier. — Ἐλεύθερη καὶ ἐξαναγκασμένη ταλάντωση.	Σελ. 5 - 21
---	----------------

Κύματα

Διάδοσι ἐνέργειας μετ' κύματα. — Ἐγκάρσια κύματα. — Διαμήκη κύματα. — Διάδοσι τῶν κυμάτων ἐλαστικότητος μέσα στὴν ὕλη. — Ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων. — Κύματα στὸ χῶρο καὶ στὴν ἐπιφάνεια ὕγροῦ. — Ἀρχὴ τοῦ Huygens. — Ἀνάκλασι τῶν κυμάτων. — Διάθλασι τῶν κυμάτων. — Περίθλασι τῶν κυμάτων. — Συμβολὴ τῶν κυμάτων. — Στάσιμα κύματα.	28 - 44
---	---------

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Ἦχητικὰ κύματα

Παραγωγὴ τοῦ ἤχου. — Διάδοσι τοῦ ἤχου. — Εἶδη ἤχων. — Ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Ὑπερηχητικὲς ταχύτητες. — Ἀνάκλασι τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Διάθλασι τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Περίθλασι τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Συμβολὴ τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. — Ἔντασι τοῦ ἤχου.	50 - 64
--	---------

Φυσιολογικὰ χαρακτηριστικὰ τοῦ ἤχου

Φυσιολογικὰ χαρακτηριστικὰ τῶν μουσικῶν ἤχων. — Ὑψος τοῦ ἤχου. — Ἀκουστότητα ἢ ἔντασι τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος. — Χροιά τοῦ ἤχου. — Ὑπέρηχοι.	67 - 72
---	---------

Πηγὲς τῶν μουσικῶν ἤχων

Μουσικοὶ ἤχοι. — Χορδές. — Συντονισμὸς δύο ἠχητικῶν πηγῶν. Ἄντηξι. — Ἦχητικοὶ σωλῆνες.	73 - 77
---	---------

ΦΥΣΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

Κυματική φύση του φωτός

Φυσική Όπτική. — Θεωρία τής έκπομπής. — Θεωρία τών κυμάτων ελαστικότητας. — Ἡ φύση τοῦ φωτός. — Συμβολή τοῦ φωτός. — Περίθλαση τοῦ φωτός.	Σελ. 84 - 90
--	-----------------

Φάσματα έκπομπής καὶ ἀπορροφήσεως

Φάσματα έκπομπής. — Φάσματα ἀπορροφήσεως — Ἡ φασματοσκοπικὴ ἔρευνα.	93 - 97
--	---------

Φωταύγεια. Χρῶμα τοῦ οὐρανοῦ

Τρόποι παραγωγῆς φωτός. — Φθορισμός. — Φωσφορισμός. — Φωτοφωταύγεια. — Τὸ χρῶμα τοῦ οὐρανοῦ.	97 - 100
---	----------

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Ἐπαγωγικά ρεύματα

Ἐπαγωγή. — Ἐπαγωγικά ρεύματα. — Ἐνταση τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος. — Ρεύματα Foucault. — Ἀμοιβαία ἐπαγωγή. — Αὐτεπαγωγή. — Ἐπαγωγικὸ πηνίον.	102 - 114
--	-----------

Ἐναλλασσόμενο ρεύμα

Παραγωγή ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἀποτελέσματα τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἐξισώσεις τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἐνεργὸς ἔνταση ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἐνεργὸς τάση. — Ὁ νόμος τοῦ Ohm σὲ κύκλωμα μὲ ὠμικὴ ἀντίσταση. — Μέση ἰσχύς τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Τριφασικὸ ρεύμα. — Ἡ μεταφορά τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. — Μετασχηματιστές. — Ἀνόρθωση τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος.	118 - 137
---	-----------

Ἀγωγιμότητα τῶν στερεῶν

Ἡλεκτρονικὴ ἀγωγιμότητα τῶν στερεῶν. — Ἀγωγοί, μονωτές, ἡμιαγωγοί.	141 - 142
---	-----------

Ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων

Ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων. — Ἡλεκτρικὲς ἐκκενώσεις μέσα στὴν ἀτμόσφαιρα. — Ἡλεκτρικὲς ἐκκενώσεις μέσα σὲ ἀραιωμένα ἀέρια. — Καθοδικὲς ἀκτίνες. — Θετικὲς ἀκτίνες.	145 - 158
---	-----------

Ἀγωγιμότητα στό κενό

Ἡ ἀγωγιμότητα στό κενό. — Θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο. — Τρίοδη ἠλεκτρονική λυχνία. — Σωλήνας Braun. — Ἀκτίνες Röntgen. — Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. — Ἡχητικός κινηματογράφος. — Φωτοστοιχείο. — Ἡλεκτρονικό μικροσκόπιο.	Σελ. 161 - 178
--	-------------------

Ἡλεκτρομαγνητικά κύματα

Ἡλεκτρικές ταλαντώσεις. — Φθίνουσα ἠλεκτρική ταλάντωση. — Ἀμείωτη ἠλεκτρική ταλάντωση. — Ἐπαγωγική σύζευξη δύο κυκλωμάτων ταλαντώσεων. — Παλλόμενο ἠλεκτρικό δίπολο. — Ἡλεκτρομαγνητικά κύματα. — Ἡλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία. — Ραδιοτηλεπικοινωνίες. — Πομπός ἑρτζιανῶν κυμάτων. — Δέκτης ἑρτζιανῶν κυμάτων. — Διάδοση τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. — Ραντάρ. — Τηλεόραση. — Ραδιοαστρονομία.	182 - 204
---	-----------

ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Εἰσαγωγή

Ἡ θεωρία τῶν κβάντα. — Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας.	207
--	-----

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Τά ἠλεκτρόνια τοῦ ἀτόμου

Ἀτομική θεωρία τοῦ Δημόκριτου. — Μονάδα ἀτομικῆς μάζας. — Τό ἄτομο καί ὁ πυρήνας του. — Δομή τοῦ ἀτόμου.	211 - 216
---	-----------

Συνθήκες τοῦ Bohr

Στοιχειώδης μελέτη τοῦ ἀτόμου ὕδρογόνου. — Ἄτομα μέ πολλά ἠλεκτρόνια. — Περιοδικό σύστημα τῶν στοιχείων.	222 - 231
---	-----------

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ὁ ἀτομικός πυρήνας

Πυρηνική Φυσική. — Ἴσοτοποι καί ἰσοβαρεῖς πυρήνες. — Ἐλλειμμα μάζας καί ἐνέργεια συνδέσεως.	233 - 236
--	-----------

Φυσική ραδιενέργεια

Ραδιενέργεια. — Φύση τῆς ἀκτινοβολίας τῶν ραδιενεργῶν στοιχείων. — Φυσική μεταστοιχείωση. — Τό ποζιτρόνιο. — Ἐξήγηση
--

τῆς ἐκπομπῆς τῶν ἀκτινοβολιῶν. — Νόμος τῆς ραδιενέργειας. — Βιολογικά ἀποτελέσματα τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν. — Μονάδες ραδιενέργειας. — Οἱ σειρές τῶν φυσικῶν ραδιενεργῶν στοιχείων. — Ἡ μελέτη τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν.	Σελ. 238 - 252
--	-------------------

Πυρηνικές ἀντιδράσεις

Πυρηνικές ἀντιδράσεις. — Τεχνητὴ ραδιενέργεια. — Τὰ ὑπερ-ουράνια στοιχεία. — Σχάση τῶν βαριῶν πυρήνων. — Σχάση τοῦ πυρήνα οὐρανίου 235. — Ἀλυσιδωτὴ ἀντίδραση. — Πυρηνικός ἀντιδραστήρας. — Σύντηξη ἐλαφρῶν πυρήνων. — Ἐφαρμογές τῶν τεχνητῶν ραδιοϊσοτόπων. — Στοιχειώδη σωματίδια. — Κοσμικὲς ἀκτίνες ..	257 - 274
--	-----------

Πίνακες

Φυσικὲς σταθερές. — Μετατροπὲς μονάδων ἐνέργειας. — Οἱ κυριότερες μονάδες τοῦ συστήματος MKSA. — Τὰ ἰσότοπα τῶν 30 πρώτων φυσικῶν στοιχείων.	281 - 284
---	-----------

$$E_k = v \cdot |e| = \dots$$

$$P = v \cdot \sqrt{e} = \dots$$



024000025583

ΕΚΔΟΣΗ ΙΗ' - ΙΘ', 1978 (VI) - ΑΝΤΙΤ. 90.000 - ΣΥΜΒΑΣΗ 3002/31.1.78

ΕΚΤΥΠΩΣΗ - ΒΙΒΛΙΟΔΕΣΙΑ : ΑΦΟΙ Γ. ΡΟΔΗ Α.Ε.

