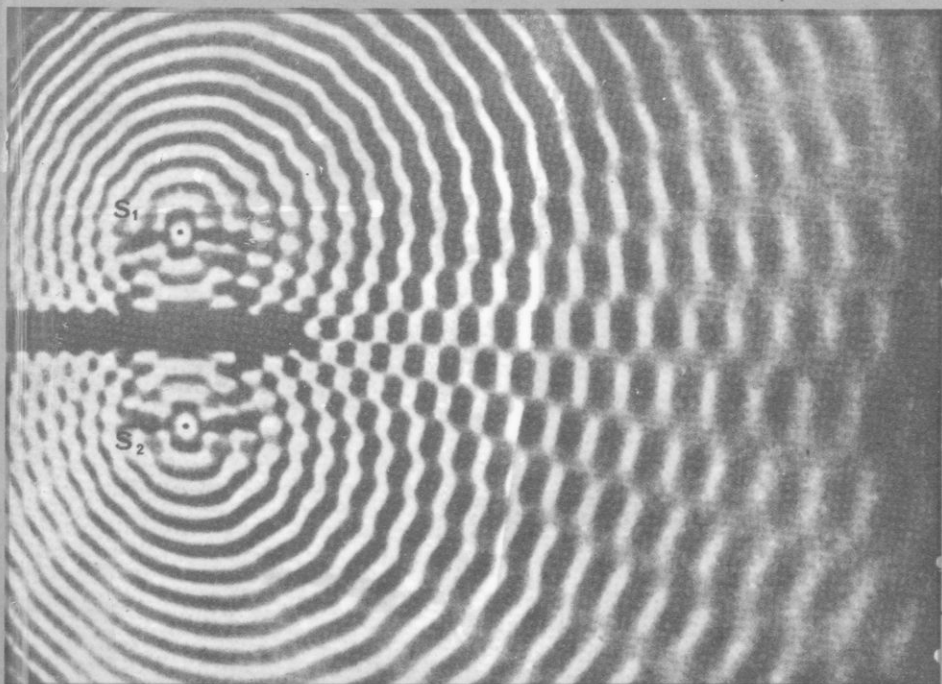


ΑΛΚΙΝΟΟΥ Ε. ΜΑΖΗ

ΦΥΣΙΚΗ

Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ



19668

Φ Υ Σ Ι Κ Η

Μέ απόφαση τῆς Ἑλληνικῆς Κυβερνήσεως τά
διδασκτικά βιβλία τοῦ Δημοτικοῦ, Γυμνασίου
καί Λυκείου τυπώνονται ἀπό τόν Ὄργανισμό
Ἐκδόσεως Διδακτικῶν Βιβλίων καί μοιράζον-
ται ΔΩΡΕΑΝ.

ΦΥΣΙΚΗ

Με έγκριση της Ελληνικής Κυβερνήσεως τα
εγκυκλιωτικά βιβλία του Δημοτικού Σχολείου
και Λυκείου εκδόθηκαν από τον Οργανισμό
Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων και κυριάζον-
τα ΔΕΡΕΛΙ.

ΑΛΚΙΝΟΟΥ Ε. ΜΑΖΗ

Φ Υ Σ Ι Κ Η

Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΘΗΝΑ 1979

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

ΜΗΧΑΝΙΚΗ

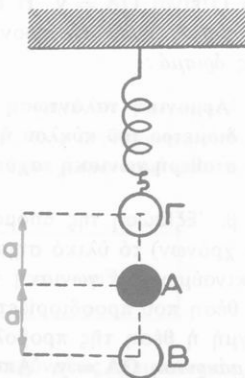
Άρμονική ταλάντωση

1. Άρμονική ταλάντωση μεταλλικής σφαίρας

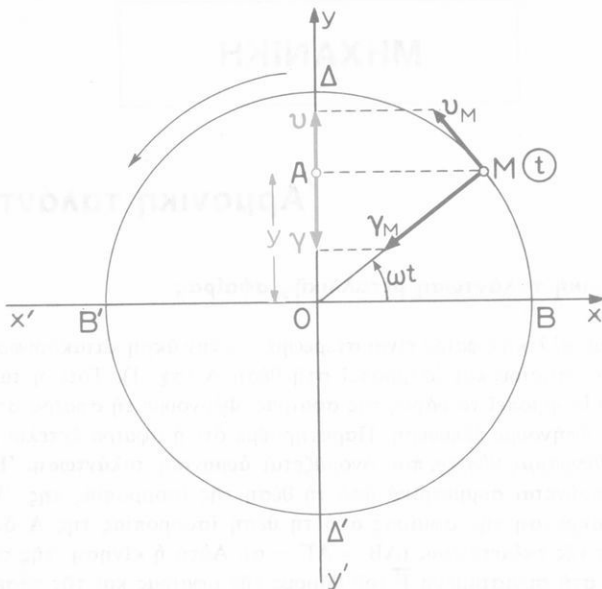
Μιά μεταλλική σφαίρα είναι στερεωμένη στην άκρη κατακόρυφου σπειροειδούς ελατηρίου και ισορροπεί στη θέση Α (σχ. 1). Τότε η τάση του ελατηρίου ισορροπεί το βάρος της σφαίρας. Φέρνουμε τη σφαίρα στη θέση Β και την αφήνουμε ελεύθερη. Παρατηρούμε ότι η σφαίρα εκτελεί μία *περιοδική εὐθύγραμμη κίνηση*, που ονομάζεται *άρμονική ταλάντωση*. Ἡ σφαίρα απομακρύνεται συμμετρικά από τη θέση της ισορροπίας της. Ἡ μέγιστη απομάκρυνση της σφαίρας από τη θέση ισορροπίας της Α, ονομάζεται *πλάτος της ταλαντώσεως* ($AB = AG = a$). Αὐτή η κίνηση της σφαίρας οφείλεται στη συνισταμένη \vec{F} του βάρους της σφαίρας και της τάσεως του ελατηρίου. Σέ κάθε στιγμή η δύναμη \vec{F} τείνει νά επαναφέρει τη σφαίρα στη θέση ισορροπίας της.

2. Μελέτη της άρμονικής ταλαντώσεως

α. Ὅρισμός. Ἡ άρμονική ταλάντωση είναι μία κίνηση ειδικής μορφής, που προκύπτει από την ομαλή κυκλική κίνηση ως εξής: Ὄταν ένα υλικό σημείο Μ (σχ. 2) κινείται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα (ω) πάνω σε περιφέρεια κύκλου που έχει ακτίνα a , τότε η προβολή Α του κινητού Μ πάνω στη διάμετρο ΔΔ εκτελεί *άρμονική ταλάντωση*, που έχει πλάτος a και περίοδο T , ίση με την περίοδο της κινήσεως του κινητού Μ. Στή διάρκεια μιᾶς περιόδου T τό κινητό Α διατρέχει δύο φορές τή διάμετρο ΔΔ. Ὡς άρχή τῶν διαστημάτων παίρνουμε τό σημείο Ο, δηλαδή τή μέση θέση ισορροπορίας του κινη-



Σχ. 1. Ἡ σφαίρα εκτελεί άρμονική ταλάντωση.



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

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

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

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

$$OA = OM \cdot \eta\mu \omega t \quad \text{ή} \quad y = a \cdot \eta\mu \omega t$$

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

γεθος ω ονομάζεται *κυκλική συχνότητα* του κινητού Α και είναι ίση με $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$, όπου T και ν είναι αντίστοιχα *ἡ περίοδος* και *ἡ συχνότητα* τῆς κινήσεως του κινητού Α. Ἄρα ἡ *ἀπομάκρυνση* του κινητού Α δίνεται ἀπό τὴν ἐξίσωση:

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

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

$$v = v_M \cdot \text{συν } \omega t$$

Ἐπειδὴ εἶναι $v_M = a\omega$, βρίσκουμε ὅτι ἡ ταχύτητα του κινητού Α δίνεται ἀπό τὴν ἐξίσωση:

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

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

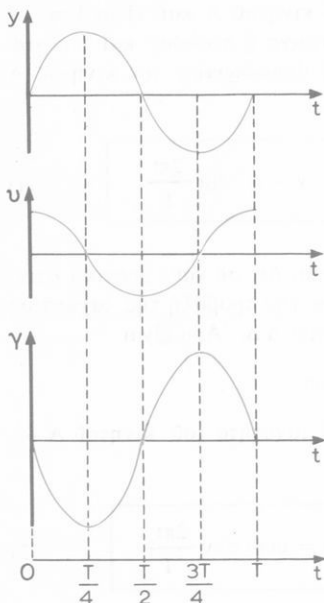
$$\gamma = -\gamma_M \cdot \eta\mu \omega t$$

Τό ἀρνητικό σημεῖο φανεράνει ὅτι κατὰ τὴ χρονική στιγμή t ἡ φορά του ἀνύσματος $\vec{\gamma}$ εἶναι ἀρνητική. Ἡ κεντρομόλος ἐπιτάχυνση του ὑλικού σημείου Μ εἶναι $\gamma_M = a\omega^2$. Ἐπομένως ἡ *ἐπιτάχυνση* του κινητού Α δίνεται ἀπό τὴν 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 ἄνυσμα $\vec{\gamma}$ τῆς ἐπιταχύνσεως ἔχει πάντοτε φορά πρὸς τὴ μέση Ο τῆς διαδρομῆς του κινητού Α.

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



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

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

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

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

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

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

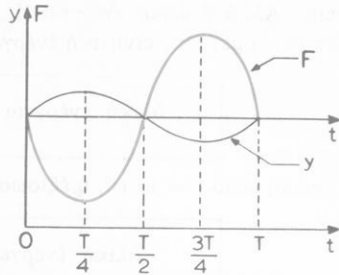
$$\text{δύναμη } F = -m \cdot \omega^2 \cdot y \quad (4)$$

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

ερίοδος της άρμονικής ταλάντωσης του κινήτου Α δίνεται από την εξίσωση :

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

ζ. Διερεύνηση των εξισώσεων της άρμονικής ταλάντωσης. Άς θεωρήσουμε τις χρονικές στιγμές 0, T/4, T/2, 3T/4 και T. Άν στις εξισώσεις της άρμονικής ταλάντωσης αντικαταστήσουμε τό t με τις 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. Ό πίνακας πού σχηματίζουμε είναι ό εξής:



Σχ. 4. Ήμιτονοειδής μεταβολή της δύναμεις επαναφοράς F σε συνάρτηση με τό χρόνο. Σε κάθε στιγμή ή δύναμη F και ή απόμάκρυνση y είναι έτερόσημες.

Χρόνος t	Φάση ωt	Απομάκρυνση y	Ταχύτητα v	Έπιτάχυνση γ	Δύναμη F
0	0	0	αω	0	0
T/4	π/2	α	0	-αω ²	-μαω ²
T/2	π	0	-αω	0	0
3T/4	3π/2	-α	0	αω ²	μαω ²
T	2π	0	αω	0	0

η. Ένέργεια του ύλικού σημείου. Όταν τό ύλικό σημείο Α περνάει από τή θέση της ίσοροπίας του (y = 0), τότε ή ταχύτητά του έχει τή μέγιστη απόλυτη τιμή v = αω (βλ. πίνακα). Έκεινή τή στιγμή τό ύλικό σημείο Α έχει τή μέγιστη κινητική ενέργεια :

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

Όταν τό ύλικό σημείο φτάνει στίς άκραιοές θέσεις της διαδρομής του (y = ± α), τότε ή ταχύτητά του είναι ίση με μηδέν (v = 0) και όλη ή κινητική ενέργειά του έχει μετατραπεί σε δυναμική ενέργεια (E_{δυν} = E_{κιν}). Σε κάθε άλλη θέση τό ύλικό σημείο Α έχει κινητική και δυναμική ένερ-

γεια. Άλλα η *ολική ενέργεια* ($E_{ολ}$) του υλικού σημείου A είναι πάντοτε ίση με τη μέγιστη κινητική ενέργεια του υλικού σημείου. Ωστε είναι:

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

Επειδή είναι $f = m \cdot \omega^2$, η εξίσωση (7) γράφεται και ως εξής:

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

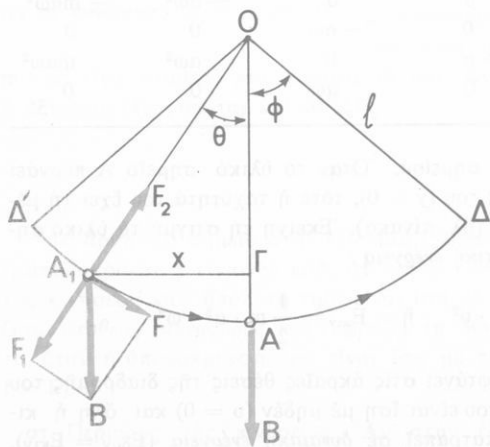
Από τα παραπάνω καταλήγουμε στο ακόλουθο συμπέρασμα:

Η *ολική ενέργεια* ενός υλικού σημείου που εκτελεί αρμονική ταλάντωση διατηρείται σταθερή σε όλη τη διαδρομή του υλικού σημείου και είναι ανάλογη με τη σταθερή επαναφοράς (f) και με το τετράγωνο του πλάτους (a) της ταλάντωσης.

Εφαρμογή της αρμονικής ταλάντωσης έχουμε στο άπλο εκκρεμές.

3. Άπλο εκκρεμές

Το *άπλο εκκρεμές* 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 ασήμαντη μάζα σχετικά με τη μάζα m της σφαίρας. Το μήκος $OA = l$ ονομάζεται *μήκος* του εκκρεμούς. Απομακρύνουμε το εκκρεμές από τη θέση ισορροπίας κατά γωνία ϕ και το αφήνουμε ελεύθερο. Το εκκρεμές εκτελεί μία σειρά *αιωρήσεων*. Η γωνία ϕ ονομάζεται *πλάτος* της αιωρήσεως.



Σχ. 5. Άπλο εκκρεμές

Σε μία οποιαδήποτε θέση αναλύουμε τό βάρος $\vec{B} = m \cdot \vec{g}$ τής σφαιρας στις δύο συνιστώσες \vec{F} και \vec{F}_1 . Από αυτές ή συνιστώσα \vec{F}_1 είναι αντίθετη μέ τήν τάση \vec{F}_2 του νήματος, ενώ ή συνιστώσα \vec{F} , πού έχει τή διεύθυνση τής εφαπτομένης τής τροχιάς κινεί τό ύλικό σημείο και προσπαθεί νά τό ξαναφέρει στη θέση ισορροπίας του, δηλαδή είναι δύναμη επαναφοράς. Από τά όμοια τρίγωνα $OA_1\Gamma$ και A_1BF βρίσκουμε τή σχέση:

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

Αν ή γωνία θ είναι πολύ μικρή (2° ως 3°), τότε μπορούμε νά θεωρήσουμε ότι ή απόσταση x και τό τόξο A_1A συμπίπτουν. Σ' αυτή τήν περίπτωση ή εξίσωση (1) δείχνει ότι ή δύναμη επαναφοράς F είναι ανάλογη μέ τήν απομάκρυνση x του ύλικού σημείου από τή θέση ισορροπίας του A . Έτσι καταλήγουμε στό ακόλουθο συμπέρασμα:

Όταν τό πλάτος τής αιώρησης του άπλου εκκρεμοϋς είναι πολύ μικρό, τότε ή κίνηση του εκκρεμοϋς είναι κατά μεγάλη προσέγγιση άρμονική ταλάντωση.

Επομένως ή δύναμη επαναφοράς (F) κατ' απόλυτη τιμή δίνεται από τήν εξίσωση:

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

Από τίς εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε ότι είναι:

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

Η περίοδος του άπλου εκκρεμοϋς δίνεται από τήν εξίσωση:

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

Αν στην τελευταία εξίσωση βάλουμε τήν τιμή του f , βρίσκουμε ότι ή περίοδος του άπλου εκκρεμοϋς δίνεται από τήν εξίσωση:

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

4. Άμείωτη και φθίνουσα ταλάντωση

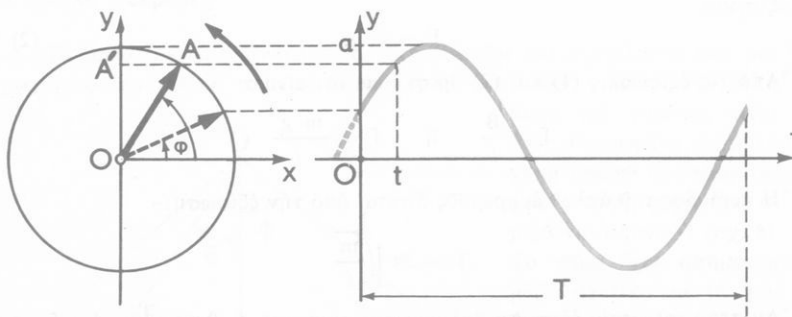
Όταν ένα ύλικό σημείο εκτελεί άρμονική ταλάντωση πού έχει πλά-

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

και γι' αυτό η ταλάντωση ονομάζεται τότε **ἀμείωτη**. Ἀλλά στην πραγματικότητα κατά την κίνηση του υλικού σημείου ενεργούν διάφορες αντίστροφες, που στη διάρκεια μιάς περιόδου απορροφούν ένα μέρος από την ενέργεια του υλικού σημείου. Ἐτσι η ενέργεια του υλικού σημείου *διαρκῶς ἐλαττώνεται* και ἔπειτα ἀπό ὀρισμένο χρόνο γίνεται ἴση με μηδέν ($E_{ολ} = 0$). Τότε τὸ υλικὸ σημεῖο σταματᾷ. Ἐπειδὴ ἡ ἐνέργεια τοῦ υλικού σημείου *διαρκῶς ἐλαττώνεται*, γι' αὐτὸ τὸ πλάτος τῆς ταλάντωσης γίνεται *διαρκῶς μικρότερο* και τελικὰ γίνεται ἴσο με μηδέν. Ἡ περίοδος ὁμως T τῆς ταλάντωσης διατηρεῖται *σταθερή* (*). Αὐτὴ ἡ ταλάντωση, πού τὸ πλάτος τῆς *διαρκῶς ἐλαττώνεται*, ὀνομάζεται **φθίνουσα**.

5. Προβολὴ πάνω σὲ σταθερὸ ἄξονα ἀνύσματος στρεφόμενου ὀμαλά

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



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

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

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

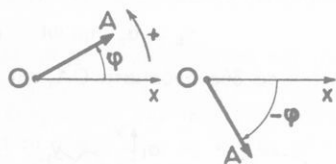
(*) Γιατί εἶναι $f = m \cdot \omega^2 = m \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} = \text{σταθ.}$

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

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

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

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

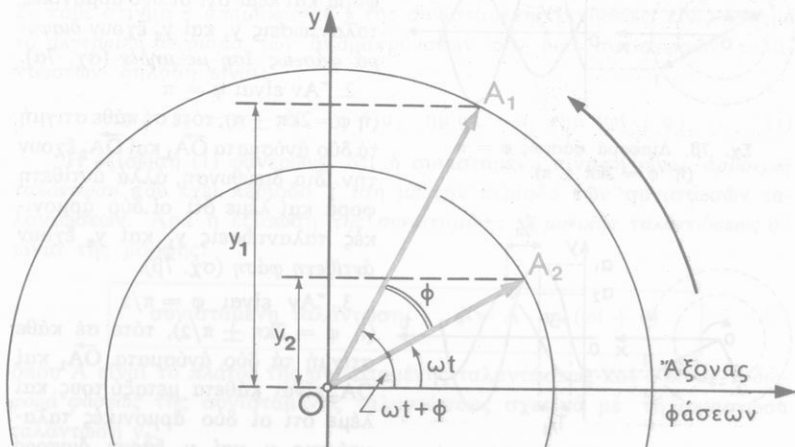


Σχ. 6α. ‘Η άρχική φάση ϕ μπορεί νά είναι θετική ή άρνητική.

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

6. Διαφορά φάσεως και σύνθεση δύο άρμονικών ταλαντώσεων

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

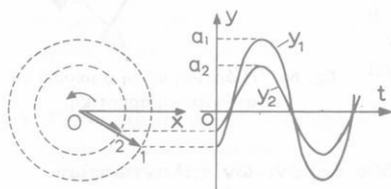


Σχ. 7. ‘Η γωνία ϕ είναι ή διαφορά φάσεως.

φάσεων Ox . Τό άνυσμα \vec{OA}_1 προηγείται πάντοτε από τό άνυσμα \vec{OA}_2 κατά μία σταθερή γωνία φ πού ονομάζεται *διαφορά φάσεως* μεταξύ τών κινήσεων τών δύο άνυσμάτων. Κατά μία χρονική στιγμή t ή θέση τών άνυσμάτων \vec{OA}_2 και \vec{OA}_1 σχετικά μέ τόν άξονα τών φάσεων Ox προσδιορίζεται αντίστοιχα από τίς γωνίες ωt και $\omega t + \varphi$. Κατά τήν ίδια χρονική στιγμή t οι προβολές τών δύο άνυσμάτων πάνω στον άξονα Oy καθορίζονται αντίστοιχα από τίς εξισώσεις:

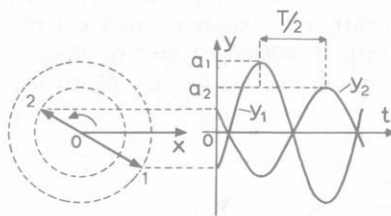
$$y_2 = a_2 \cdot \eta\mu \omega t \quad \text{και} \quad y_1 = a_1 \cdot \eta\mu (\omega t + \varphi)$$

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



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

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



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

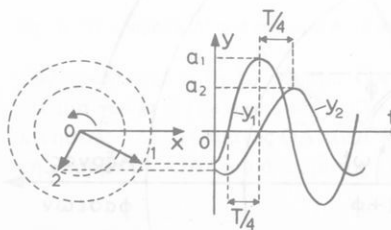
Μερικές περιπτώσεις 1. Άν είναι $\varphi = 0$ (ή $\varphi = 2k\pi$), τότε σε κάθε στιγμή τά δύο άνύσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 έχουν τήν ίδια διεύθυνση και φορά και λέμε ότι οι δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 έχουν *διαφορά φάσεως ίση μέ μηδέν* (σχ. 7α).

2. Άν είναι $\varphi = \pi$

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

3. Άν είναι $\varphi = \pi/2$

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



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

Διαφορά φάσεως και χρονική καθυστέρηση. Στήν παράσταση των στρεφόμενων άνυσμάτων \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 (σχ. 7) παρατηρούμε ότι στή διαφορά φάσεως φ αντιστοιχεί μιά *χρονική καθυστέρηση* ίση μέ τό χρόνο τ πού χρειάζεται τό στρεφόμενο άνυσμα \vec{OA}_2 γιά νά πάει από τή θέση πού βρίσκεται στή θέση πού είναι τώρα τό άνυσμα \vec{OA}_1 . Άρα είναι $\tau = \varphi/\omega$. Στή γραφική παράσταση των δύο άρμονικών ταλαντώσεων y_1 και y_2 ή *χρονική καθυστέρηση* τ τής μιās ταλαντώσεως σχετικά μέ τήν άλλη μετριέται πάνω στόν άξονα των χρόνων Ot (σχ. 7β, 7γ).

α. Σύνθεση δύο άρμονικών ταλαντώσεων μέ τήν ίδια διεύθυνση και τήν ίδια περίοδο. Οί δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 πού αντιστοιχούν στά δύο στρεφόμενα άνύσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 έχουν τήν ίδια διεύθυνση, τήν ίδια περίοδο T, διαφορά φάσεως φ και τά πλάτη τους a_1 και a_2 είναι αντίστοιχα ίσα μέ τό μέτρο των άνυσμάτων \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 (σχ. 7).

Σέ πολλές περιπτώσεις ένα ύλικό σημείο μέ τήν επίδραση δύο ή περισσότερων αιτίων αναγκάζεται νά εκτελέσει ταυτόχρονα δύο ή περισσότερες άρμονικές ταλαντώσεις. Τότε τό ύλικό σημείο εκτελεί μιά *συνισταμένη κίνηση* πού προκύπτει από τήν άρχή τής ανεξαρτησίας των κινήσεων, άν θεωρήσουμε μικρές μετατοπίσεις του ύλικού σημείου.

Έστω ότι ένα ύλικό σημείο αναγκάζεται νά εκτελέσει ταυτόχρονα τίς δύο άρμονικές ταλαντώσεις y_1 και y_2 πού αντιστοιχούν στά δύο στρεφόμενα άνύσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 και εκφράζονται από τίς εξισώσεις:

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

Σέ κάθε στιγμή ή *άπομάκρυνση* y τής συνισταμένης κινήσεως είναι ίση μέ τό *άλγεβρικό άθροισμα* των άπομακρύνσεων των δύο συνιστωσών ταλαντώσεων, δηλαδή είναι:

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

Η εξίσωση (1) φανερώνει ότι ή συνισταμένη κίνηση είναι *άρμονική ταλάντωση* πού έχει περίοδο T ίση μέ τήν περίοδο των συνιστωσών ταλαντώσεων. Άρα ή εξίσωση τής *συνισταμένης άρμονικής ταλαντώσεως* θά είναι τής μορφής:

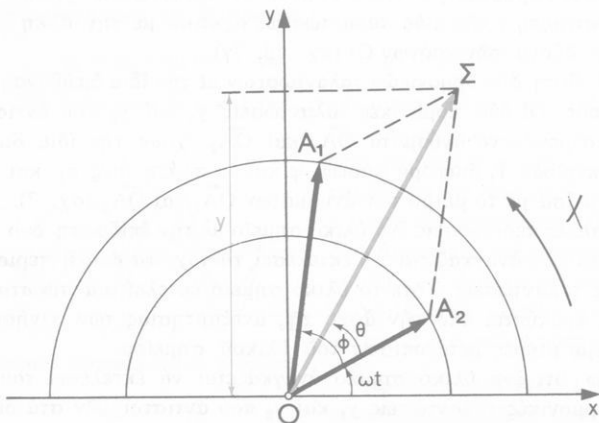
$$\text{συνισταμένη ταλάντωση} \quad y = A \cdot \eta\mu (\omega t + \theta) \quad (2)$$

όπου A είναι τό πλάτος τής συνισταμένης ταλαντώσεως και θ είναι ή *διαφορά φάσεως* τής συνισταμένης ταλαντώσεως σχετικά μέ τή συνιστώσα ταλάντωση y_2 .

Σέ κάθε στιγμή τά δύο στρεφόμενα άνύσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 έχουν συνισταμένη τό *γεωμετρικό άθροισμα* \vec{OS} των δύο άνυσμάτων (σχ. 8). Τό άνυσμα

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

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



Σχ. 8. Τά άνύσματα \vec{OA}_1 και \vec{OA}_2 έχουν συνισταμένη τό άνυσμα \vec{OS} .

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

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

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

Έτσι παίρνουμε αντίστοιχα τίσ εξισώσεις:

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

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

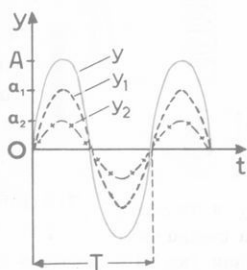
Άν διαιρέσουμε κατά μέλη τίσ εξισώσεις (5) και (6) βρίσκουμε ότι ή διαφορά φάσεως θ τής συνισταμένης άρμονικής ταλαντώσεως δίνεται από τήν εξίσωση:

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

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

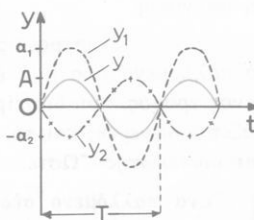
1. αν είναι $\varphi = 0$ (ή $\varphi = 2k\pi$), τότε είναι: $A = a_1 + a_2$
2. αν είναι $\varphi = \pi$ (ή $\varphi = 2k\pi \pm \pi$), τότε είναι: $A = a_1 - a_2$

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



Γενικό συμπέρασμα. Από τα παραπάνω καταλήγουμε στο ακόλουθο συμπέρασμα:

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



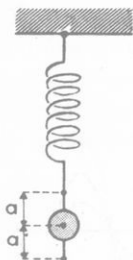
Σχ. 8α. Σύνθεση δύο άρμονικών ταλαντώσεων y_1 και y_2 και η συνισταμένη ταλάντωση y ($\varphi = 0$, $\varphi = \pi$)

Σημείωση. Τα στρεφόμενα άνυσματα $\vec{O\bar{A}}_1$ και $\vec{O\bar{A}}_2$ που θεωρήσαμε παραπάνω μπορεί να αντιστοιχούν σε οποιοδήποτε φυσικό μέγεθος που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς σε συνάρτηση με το χρόνο t . Σε άλλα κεφάλαια θα γνωρίσουμε τέτοια φυσικά μεγέθη.

7. Έλεύτερη και εξαναγκασμένη ταλάντωση

α. Έλεύτερη ταλάντωση. Η μιά άκρη σπειροειδούς ελατηρίου είναι σταθερά στερεωμένη, ενώ στην άλλη άκρη του υπάρχει μιά μεταλλική σφαίρα (σχ. 9). Απομακρύνουμε τη σφαίρα κατακόρυφα προς τα κάτω από τη θέση ισορροπίας της και την αφήνουμε ελεύθερη. Η σφαίρα εκτελεί άρμονική ταλάντωση. Η συχνότητα ν_0 της ταλάντωσης είναι σταθερή και ονομάζεται *ιδιοσυχνότητα* του παλλόμενου συστήματος «σφαίρα - ελατήριο».

Όταν απομακρύνουμε τη σφαίρα από τη θέση ισορροπίας της, το παλλόμενο σύστημα αποκτά ένα απόθεμα δυναμικής ενέργειας. Τό σύστημα, όταν τό αφήσουμε ελεύθερο, κινείται ώσπου νά εξαντληθεί τό άρχικό απόθεμα της δυναμικής ενέργειας, εξαιτίας των αντίστασεων



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

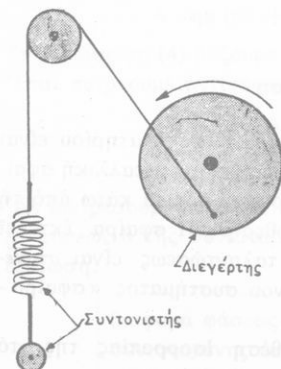
πού δημιουργεί τό εξωτερικό περιβάλλον. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι τό παλλόμενο σύστημα εκτελεί **ελεύθερη ταλάντωση**. Ωστε:

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

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

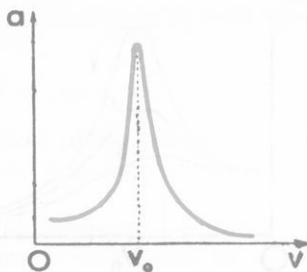
“Ένα παλλόμενο σύστημα (συντονιστής) πού έχει ιδιοσυχνότητα ν_0 , μπορεί νά εκτελέσει και έξαναγκασμένη ταλάντωση με συχνότητα ν ίση με τή συχνότητα πού έχει κάθε φορά ό διεγέρτης.

γ. Συντονισμός. Όταν ή συχνότητα ν του διεγέρτη (στρεφόμενος τροχός) διαφέρει πολύ από τήν ιδιοσυχνότητα ν_0 του συντονιστή (παλλόμενο σύστημα), τό πλάτος τής έξαναγκασμένης ταλάντωσης είναι πολύ μικρό. Αν όμως ή συχνότητα ν του διεγέρτη συνεχώς πλησιάζει πρός τήν ιδιοσυχνότητα ν_0 του συντονιστή, τότε τό πλάτος των έξαναγκασμένων ταλαντώσεων του συντονιστή *συνεχώς αύξάνει* και όταν ή συχνότητα ν του διεγέρτη γίνει *ίση με τήν ιδιοσυχνότητα ν_0* του συντονιστή, τό πλάτος τής έξαναγκασμένης ταλαντώσεως του συντονιστή γίνεται *μέγιστο*. Τότε λέμε ότι ό διεγέρτης και ό συντονιστής βρίσκονται σέ **συντονισμό**. Αν ή συχνότητα ν του διεγέρτη παίρνει τιμές συνεχώς μεγαλύτερες από τήν ιδιοσυχνότητα



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

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



Σχ. 11. Μεταβολή του πλάτους a τῆς ἐξαναγκασμένης ταλαντώσεως σέ συνάρτηση μέ τή συχνότητα ν .

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

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

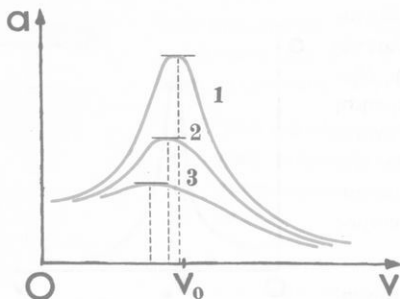
I. Ὄταν ἡ ἀπόσβεση του συντονιστή εἶναι πολύ μικρή, ὁ συντονιστής διεγείρεται μόνο ἀπό μία πολύ μικρή περιοχή συχνοτήτων καί τό πλάτος τῆς ἐξαναγκασμένης ταλαντώσεως εἶναι πολύ μεγάλο (ἄξυς συντονισμός).

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

Ἐφαρμογές του συντονισμοῦ. Ἀναφέρουμε μερικά παραδείγματα συντονισμοῦ:

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

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



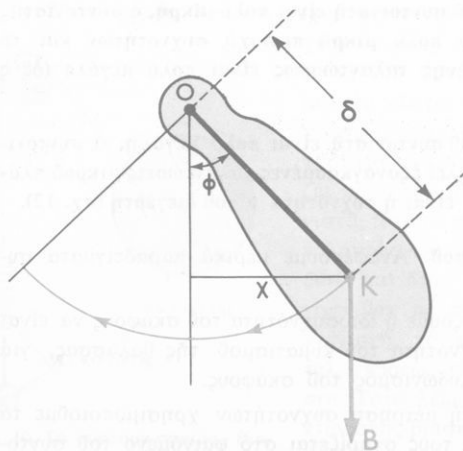
Σχ. 12. Ἡ καμπύλη συντονισμοῦ, ὅταν ἡ ἀπόσβεση τοῦ συντονιστῆ εἶναι μικρή (1), μέτρια (2) ἢ μεγάλη (3).

3) Συντονιστές με πολύ μεγάλη ἀπόσβεση εἶναι τό τύμπανο τοῦ αὐτιοῦ μας καί ἡ μεμβράνη τοῦ ἀκουστικοῦ τοῦ τηλεφώνου, τοῦ μικροφώνου καί τοῦ μεγαφώνου. Αὐτοί οἱ συντονιστές ἔχουν πολύ μεγάλη ἰδιοσυχνότητα γιά νά διεγείρονται ἀπό μεγάλη κλίμακα συχνοτήτων. Τό πλάτος τῆς ἐξαναγκασμένης ταλαντώσεως εἶναι μικρό, ἀλλά εἶναι σχεδόν ἀνεξάρτητο ἀπό τή συχνότητα τοῦ διεγέρτη (σχ. 12).

Παρατήρηση. Τά φαινόμενα τῶν ἐξαναγκασμένων ταλαντώσεων καί τοῦ συντονισμοῦ εἶναι εἰδικά φαινόμενα τῶν ταλαντώσεων, πού ἐμφανίζονται σέ ὀρισμένα παλλόμενα μηχανικά συστήματα (*μηχανικές ταλαντώσεις*) καί σέ ὀρισμένα ἠλεκτρικά κυκλώματα (*ἠλεκτρικές ταλαντώσεις*).

8. Φυσικό ἔκκρεμές

Ὀνομάζουμε *φυσικό ἔκκρεμές* ἕνα στερεό σῶμα πού μπορεῖ νά στρέφεται γύρω ἀπό ὀριζόντιο ἄξονα O πού δέν περνάει ἀπό τό κέντρο βάρους K τοῦ σώματος (σχ. 13). Ἀπομακρύνουμε τό σῶμα ἀπό τή θέση ἰσορροπίας του



Σχ. 13. Φυσικό ἔκκρεμές.

κατά μιά γωνία φ καί ἔπειτα τό ἀφήνουμε ἐλεύθερο. Παρατηροῦμε ὅτι τό σῶμα ἐκτελεῖ *αἰωρήσεις*. Ὑποθέτουμε ὅτι τό κέντρο βάρους K τοῦ σώματος κινεῖται πάντοτε πάνω στό ἴδιο κατακόρυφο ἐπίπεδο, πού περνάει ἀπό τό φορέα τοῦ βάρους \vec{B} τοῦ σώματος καί ἀπό τό σημεῖο O . Ἡ ἀπόσταση τοῦ κέντρου βάρους K ἀπό τόν ἄξονα περιστροφῆς O εἶναι $OK = \delta$.

Ὅταν τό σῶμα ἔχει ἀπομακρυνθεῖ ἀπό τή θέση

ισορροπίας του κατά γωνία φ , τότε τό βάρος \vec{B} τοῦ σώματος δημιουργεῖ μιὰ ροπή ἐπαναφορᾶς τοῦ σώματος στή θέση ἰσορροπίας. Ἡ ροπή ἐπαναφορᾶς ἔχει μέτρο:

$$M = B \cdot x \quad \text{ἢ} \quad M = B \cdot \delta \cdot \eta \mu \varphi$$

Ἡ ροπή ἐπαναφορᾶς M μεταβάλλεται περιοδικά σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο t . Αὐτή ἡ κίνηση τοῦ φυσικοῦ ἐκκρεμοῦς ὀνομάζεται *στροφική ταλάντωση*.

Ὅταν δέν ὑπάρχουν τριβές τό πλάτος τῆς αἰωρήσεως διατηρεῖται σταθερό, γιατί διαδοχικά ὄλη ἡ δυναμική ἐνέργεια μετατρέπεται σέ κινητική ἐνέργεια καί ἀντίστροφα.

Τό σῶμα ἔχει μάζα m , ροπή ἀδράνειας Θ ὡς πρός τόν ἄξονα περιστροφῆς. Ἀποδεικνύεται ὅτι ἡ περίοδος T τοῦ φυσικοῦ ἐκκρεμοῦς δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

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

α. Ἰσόχρονο ἀπλό ἐκκρεμές. Τά ἐκκρεμή πού χρησιμοποιοῦμε εἶναι φυσικά ἐκκρεμή, πού εὐκόλα ὁμως ἀνάγονται σέ ἀπλά ἐκκρεμή. Ἐνα φυσικό ἐκκρεμές ἔχει περίοδο T , πού ὀρίζεται ἀπό τήν ἐξίσωση (1). Ἐνα ἀπλό ἐκκρεμές πού ἔχει *τήν ἴδια περίοδο* T μέ τό φυσικό ἐκκρεμές ἔχει μήκος l καί *ἰσχύει* ἡ ἐξίσωση:

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

Ἀπό τίς ἐξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε ὅτι τό μήκος l τοῦ ἀπλοῦ ἐκκρεμοῦς πού εἶναι ἰσόχρονο μέ τό φυσικό ἐκκρεμές εἶναι:

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

β. Ἐφαρμογές τοῦ ἐκκρεμοῦς. Ἐπειδή οἱ αἰωρήσεις μικροῦ πλάτους εἶναι ἰσόχρονες, γι' αὐτό χρησιμοποιοῦμε τό ἐκκρεμές γιά *τή μέτρηση τοῦ χρόνου* (ρολόγια μέ ἐκκρεμή). Ἐξαιτίας τῶν ἀντιστάσεων τό πλάτος τῆς αἰωρήσεως διαρκῶς ἐλαττώνεται (*φθίνουσα ταλάντωση*) καί ἔπειτα ἀπό λίγο χρόνο τό ἐκκρεμές σταματᾷ. Γιά νά διατηρήσουμε σταθερό τό πλάτος τῆς αἰωρήσεως, φροντιζοῦμε μέ ἕναν κατάλληλο μηχανισμό (συνήθως μέ

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

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

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



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

μική ενέργεια, που προσφέρεται ρυθμικά στον αιώρητή, για να διατηρεί σταθερό τό πλάτος τής ταλαντώσεώς του.

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

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

Παρατήρηση. Στά συνηθισμένα χρονόμετρα (ρολόγια) υπάρχει ειδικό σύστημα που ονομάζεται *αιωρητής* και εκτελεί στροφική ταλάντωση (σχ. 14). 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.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

α. Άρμονική ταλάντωση

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

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

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

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

5. Νά βρεθεί 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 εκτελεί 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 εκτελεί 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 εκτελεί 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 εκτελεί άρμονική ταλάντωση πού έχει πλάτος $0,05 \text{ m}$ και συχνότητα 10 Hz . Νά βρεθεί ή μέγιστη τιμή πού έχει ή δύναμη επαναφοράς 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 εκτελεί 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 την 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. Άπλό έκκρεμές

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

13. Ένα άπλό έκκρεμές εκτελεί 60 αιωρήσεις κατά λεπτό. Κατά πόσα εκατοστόμετρα πρέπει νά ελαττωθεί τό μήκος του, γιά νά εκτελεί 90 αιωρήσεις κατά λεπτό;

14. Ένα άπλό έκκρεμές έχει μήκος 98 cm και περίοδο 2 sec . Πόση είναι ή τιμή του g στόν 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 έκκρεμές έχει μήκος l και περίοδο 2 sec σε έναν τόπο Α, όπου είναι $g = 980 \text{ cm/sec}^2$. Πόση είναι ή περίοδος αυτού του έκκρεμου στον ίσημερινό ($g_{\sigma} = 978 \text{ cm/sec}^2$) και στον πόλο ($g_{\pi\omicron\lambda} = 983 \text{ cm/sec}^2$);

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

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

γ. Σύνθεση ταλαντώσεων

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

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

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

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

δ. Φυσικό εκκρεμές

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

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

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

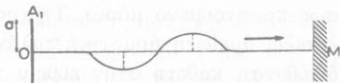
9. Διάδοση ενέργειας με κύματα

Σέ ένα στερεό ελαστικό σώμα όλα τά ύλικά σημεία του, δηλαδή τά μόρια του, είναι όμοια μεταξύ τους καί καθένα από αυτά συνδέεται μέ όλα τά γύρω του μόρια μέ δυνάμεις ελαστικότητας (μοριακές δυνάμεις). *Αν ένα μόριο Α του σώματος εκτελεί *άρμονική ταλάντωση* μέ συχνότητα ν , τότε εξαιτίας των συνδέσεων πού υπάρχουν, όλα τά μόρια γύρω από τό μόριο Α αναγκάζονται νά εκτελέσουν τήν ίδια *άρμονική ταλάντωση* πού εκτελεί καί τό μόριο Α. Καθένα από αυτά τά μόρια αναγκάζει τά γειτονικά του μόρια νά κινηθούν καί έτσι μέσα στό ελαστικό σώμα συμβαίνει *διάδοση μιᾶς ταλαντώσεως* από τό ένα μόριο στό άλλο. *Αλλά κατά τή διάδοση αὐτή *μεταφέρεται ἐνέργεια* από τό ένα στό άλλο μόριο του σώματος. *Όταν μέσα στό ελαστικό μέσο συμβαίνει μετάδοση ἐνέργειας από τό ένα στό άλλο μόριο μέ τέτοιο τρόπο, τότε λέμε ὅτι μέσα στό ελαστικό σώμα διαδίδεται *ένα κύμα ελαστικότητας* ἢ *μηχανικό κύμα*. *Ἡ πιό σημαντική κατηγορία κυμάτων είναι τά *άρμονικά ἢ ἡμιτονοειδή κύματα* στά ὁποῖα όλα τά σημεία του ελαστικού μέσου εκτελοῦν ἄρμονική ταλάντωση συχνότητας ν . *Από τά παραπάνω καταλήγουμε στό ἐξῆς συμπέρασμα:

Κύμα ὀνομάζουμε τό μηχανισμό διαδόσεως μιᾶς ταλαντώσεως μέσα σέ ένα ελαστικό μέσο καί μέ αὐτό τόν τρόπο γίνεται μεταφορά ἐνέργειας ἀπό τό ένα στό άλλο σημείο του ελαστικού μέσου (κύμα ελαστικότητας).

10. Ἐγκάρσια καί διαμήκη κύματα

α. Ἐγκάρσια κύματα. Τή μιᾶ ἄκρη μακριᾶς χορδῆς ἀπό καουτσούκ τή στερεώνουμε σταθερά καί τήν ἄλλη ἄκρη τήν κρατοῦμε μέ τό χέρι μας (σχ. 15). Τεντώνουμε ελαφρά τή χορδή καί γρήγορα ἀναγκάζουμε τήν ἄκρη Ο τῆς χορδῆς νά εκτελέσει γιά μιᾶ φορά τή διαδρομή OA_1A_2O . Παρατηροῦμε ὅτι κατά μήκος τῆς χορδῆς διαδίδεται μιᾶ κυματοειδῆς ελαστική παραμόρφωση. Αὐτό συμβαίνει γιατί τά μόρια τῆς χορδῆς, ἐξαιτίας των ελαστικῶν συνδέσεων πού υπάρχουν, ἀναγκάζονται νά εκτελέσουν *διαδοχικά* τήν ἴδια κίνηση πού ἔκαμε τό σημείο Ο. *Ὡστε κατά μήκος τῆς χορδῆς διαδίδεται *ένα κύμα*. *Ἡ διατάραξη προχωρεῖ



Σχ. 15. Διάδοση ἐγκάρσιου κύματος

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

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

β. Διαμήκη κύματα. Τή μιá άκρη σπειροειδούς ελατηρίου τή στερεώνουμε σταθερά καί τήν άλλη άκρη τήν κρατάμε με τό χέρι μας (σχ. 16). "Όταν διατηρούμε τό ελατήριο ελαφρά τεντωμένο, προκαλούμε άπότομα συμπίεση καί έπειτα άραιώση τών πρώτων σπειρών. Παρατηρούμε ότι ή διατάραξη πού προκαλέσαμε στις πρώτες σπείρες διαδίδεται κατά μήκος του ελατηρίου με *ορισμένη ταχύτητα* (c). Καθεμιá σπείρα διαδοχικά πάλλεται παράλληλα με τή διεύθυνση διαδόσεως του κύματος. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι



Σχ. 16. Στο τεντωμένο ελατήριο διαδίδονται διαμήκη κύματα.

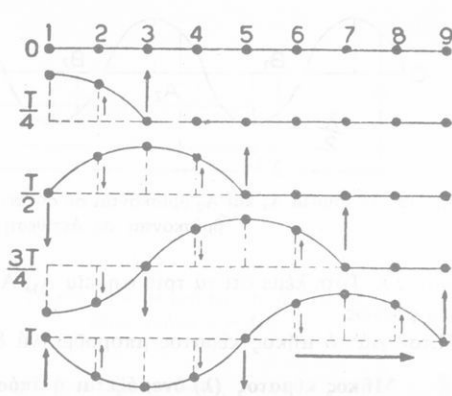
κατά μήκος του ελατηρίου διαδίδονται *διαμήκη κύματα*.

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

II. Μήκος κύματος καί έξίσωση τών κυμάτων

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

τή χρονική στιγμή $t = T$ όλα τὰ μόρια από τὸ 1 ὠς τὸ 9 κινούνται. Ἐκείνη τή στιγμή τὸ μόριο 3 ἔχει ἐκτελέσει τὰ τρία τέταρτα τῆς ταλαντώσεως, τὸ μόριο 5 ἔχει ἐκτελέσει τὴ μισή ταλάντωση καὶ τὸ μόριο 7 ἔχει ἐκτελέσει τὸ ἓνα τέταρτο τῆς ταλαντώσεως. Στὸ σχῆμα 17 τὰ βέλη δείχνουν τὴ φορά τῆς κινήσεως τῶν μορίων καὶ κατὰ προσέγγιση τὸ μέγεθος τῆς ταχύτητάς τους. Παρατηρούμε ὅτι στὴ διάρκεια μιᾶς περιόδου (T) ἡ ἀρμονικὴ ταλάντωση διαδίδεται μὲ σταθερὴ ταχύτητα (c) σὲ ὀρισμένη ἀπόσταση ποῦ ὀνομάζεται *μῆκος κύματος* (λ). Ἔτσι ἔχουμε τὸν ἑξῆς ὀρισμὸ :



Σχ. 17. Διάδοση τοῦ εγκάρσιου κύματος στὴ διάρκεια μιᾶς περιόδου.

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

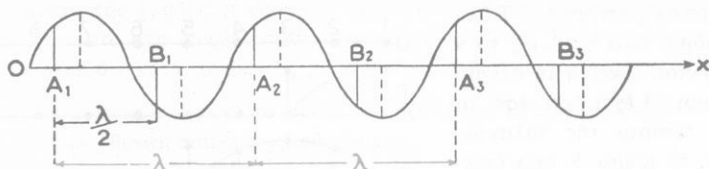
$$\text{μῆκος κύματος} \quad \lambda = c \cdot T$$

Ἐπειδὴ εἶναι $T = 1/\nu$, ἀπὸ τὴν προηγούμενη σχέση βρῖσκουμε τὴ θεμελιώδη ἐξίσωση τῶν κυμάτων :

$$\text{θεμελιώδης ἐξίσωση} \quad c = \nu \cdot \lambda$$

τῶν κυμάτων

β. Διαφορὰ φάσεως μεταξύ δύο σημείων τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου. Ὄταν ἡ πηγὴ τοῦ κύματος ἐκτελεῖ ἀμείωτη ἀρμονικὴ ταλάντωση, τότε κατὰ μῆκος τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου διαδίδεται συνεχῶς ἓνα εγκάρσιο ἀρμονικὸ κύμα, ποῦ τὴ στιγμή $t = 3T$ ἔχει τὴ μορφή ποῦ δείχνει τὸ σχῆμα 18. Ἐκείνη τή στιγμή τὰ σημεία A_1, A_2, A_3 τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου ἔχουν τὴν ἴδια ἀπομάκρυνση. Ἐπειτα ἀπὸ ὀρισμένο χρόνο τὰ τρία αὐτὰ σημεία θὰ ἔχουν ἄλλη ἀπομάκρυνση, ποῦ θὰ εἶναι ὅμως ἡ ἴδια καὶ γιὰ τὰ τρία σημεία. Σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση ἡ κίνηση τῶν σημείων A_2 καὶ A_3 σχετικὰ μὲ τὴν κίνηση τοῦ σημείου A_1 παρουσιάζει *διαφορὰ φάσεως* ἀντίστοιχα ἴση μὲ $\varphi = 2\pi$ καὶ $\varphi = 2(2\pi)$. Καθεμιὰ ἀπὸ τίς δύο ἀποστάσεις A_1A_2 καὶ A_2A_3 εἶναι ἴση μὲ ἓνα *μῆκος κύ-*



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

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

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

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

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

Γενικότερα μπορούμε νά διατυπώσουμε τό εξής συμπέρασμα:

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

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

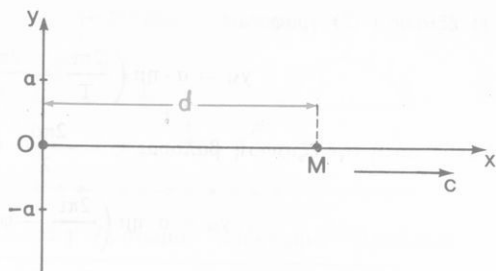
$$\begin{array}{ll} \text{σε συμφωνία φάσεως} & d = \kappa \cdot \lambda \\ \varphi = 2\kappa\pi & \end{array}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Ἡ ἐξίσωση (2) γράφεται:

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

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

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

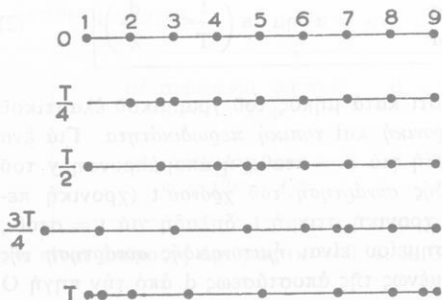
Ὡστε ἡ κίνηση τοῦ ὕλικου σημείου M σχετικὰ μὲ τὴν κίνηση τῆς πηγῆς O τῶν κυμάτων ἔχει μιά *διαφορὰ φάσεως* φ ἴση μὲ:

διαφορὰ φάσεως σχετικά μὲ τὴν πηγὴ	$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{ (rad)}$
---------------------------------------	--------------------------------------------------

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

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

δ. Διαμήκη κύματα. Ἄς θεωρήσουμε πάλι μιά σειρά μορίων τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου (σχ. 20) πού ἰσορροποῦν πάνω σὲ μιά εὐθεία καὶ συνδέονται μεταξύ τους ὀπως καὶ στὴν περίπτωση τοῦ σχήματος 17. Τὴ χρονικὴ στιγμή $t = 0$ τὸ μόριο 1 ἀρχίζει νὰ ἐκτελεῖ ἄρμονικὴ ταλάντωση κατὰ τὴ διεύθυνση τῆς εὐθείας στὴν ὁποία ἰσορροποῦν τὰ μόρια. Τότε ὅλα



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

τά μόρια θὰ ἐκτελέσουν διαδοχικὰ τὴν ἴδια ἀκριβῶς ἄρμονικὴ ταλάντωση πού ἔκανε τὸ μόριο 1. Παρατηροῦμε ὅτι κάθε μόριο τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου διαδοχικὰ πλησιάζει καὶ ἀπομακρύνεται ἀπὸ τὰ δύο γειτονικά του μόρια. Ἔτσι δημιουργοῦνται *πυκνώματα* καὶ *ἀραιώματα* τοῦ ἐλαστικοῦ μέσου πού διαδίδονται κατὰ μῆκος τοῦ γραμμικοῦ ἐλαστικοῦ μέσου. Σ' αὐτὴ τὴν περι-



Σχ. 21. Ἡ διάδοση τῶν ἐγκάρσιων καὶ τῶν διαμήκων κυμάτων. Στὰ διαμήκη κύματα σχηματίζονται διαδοχικὰ πυκνώματα καὶ ἀραιώματα. Στὸ μέσο δείχνονται τὰ ὄλικα σημεῖα τοῦ γραμμικοῦ ἐλαστικοῦ μέσου, ὅταν ἰσορροποῦν.

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

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

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

12. Διάδοση τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας μέσα στὴν ὕλη

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

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

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

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

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

13. Κύματα στό χῶρο καί στήν ἐπιφάνεια ὑγροῦ

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

(*) Ἡ ἐπιφάνεια κύματος λέγεται καί ἰσοφασική ἐπιφάνεια.

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

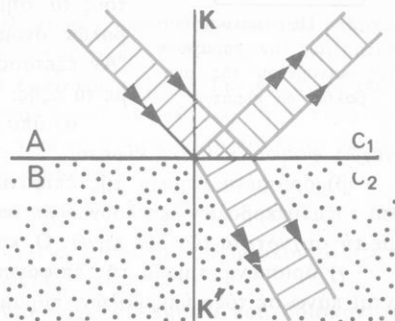
β. Κύματα στην επιφάνεια ενός υγρού. Όταν στην επιφάνεια νερού που ήρεμει πέσει μία πέτρα, τότε στο σημείο της επιφάνειας που έπεσε ή πέτρα προκαλείται μία διατάραξη της επιφανειακής μάζας του νερού και στην επιφάνεια του νερού σχηματίζονται όμοκεντρα υψώματα και κοιλώματα που διαδίδονται προς όλες τις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

14. 'Ανάκλαση και διάθλαση των κυμάτων ελαστικότητας

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

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

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

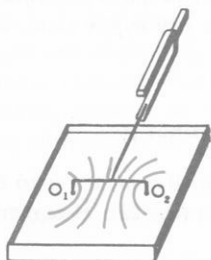


Σχ. 22. 'Ανάκλαση και διάθλαση επίπεδου κύματος ελαστικότητας.

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

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



Σχ. 23. Πειραματικὴ διάταξη γιὰ τὴν παραγωγὴ τοῦ φαινομένου τῆς *συμβολῆς* τῶν κυμάτων.

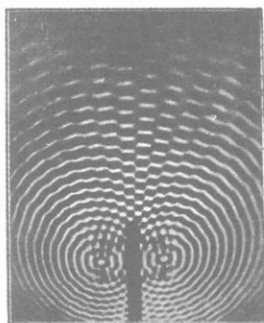
Μὲ ἓναν ἠλεκτρομαγνήτη ἀναγκάζουμε τὸ διαπασῶν νὰ πάλλεται. Τότε τὰ σημεῖα O_1 καὶ O_2 ἐκτελοῦν ἀμείωτες *ἀρμονικὲς ταλαντώσεις*, ποὺ ἔχουν τὴν ἴδια συχνότητα, τὸ ἴδιο πλάτος καὶ τὴν ἴδια φάση. Ἐτσι τὰ σημεῖα O_1 καὶ O_2 εἶναι δύο *σύγχρονες πηγές* παραγωγῆς κυκλικῶν κυμάτων ποὺ διαδίδονται στὴν ἐπιφάνεια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

α) ἀπὸ τὶς δύο πηγές κυμάτων O_1 καὶ O_2 συνεχῶς *φεύγουν* κυκλικὰ κύματα:

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

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

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



Σχ. 24. Οί κροσσοί συμβολής.

σεις που έχουν την ίδια διεύθυνση, την ίδια συχνότητα (ν) και τό ίδιο πλάτος a . Όπως ξέρουμε, τό πλάτος (A) τής συνισταμένης ταλαντώσεως εξαρτάται

από τή διαφορά φάσεως (φ) που έχουν οί δύο συνιστώσες ταλαντώσεις. Άς πάρουμε ένα σημείο Γ τής επιφάνειας του ύγρου (σχ. 25), που οί αποστάσεις του από τά σημεία O_1 και O_2 έχουν διαφορά ίση με άκέραιο άριθμό κυμάτων, δηλαδή είναι :

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

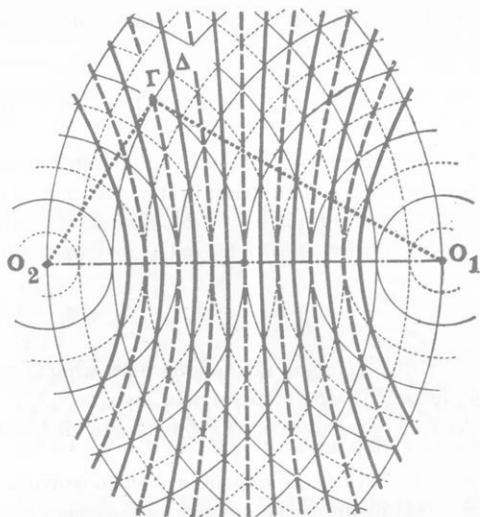
Έπομένως οί δύο άρμονικές ταλαντώσεις που φτάνουν στό σημείο Γ έχουν συμφωνία φάσεως και γι' αυτό τό σημείο Γ έκτελεί συνισταμένη ταλάντωση, που έχει πλάτος $A = 2a$ (μέγιστο πλάτος). Γενικά, άν οί αποστάσεις ενός σημείου τής επιφάνειας του ύγρου από τίς δύο πηγές κυμάτων O_1 και O_2 είναι αντίστοιχα d_1 και d_2 , τότε τό σημείο αυτό πάλλεται με μέγιστο πλάτος ($A = 2a$), όταν ισχύει ή εξίσωση:

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

Γιά $\kappa = 0$ ή εξίσωση (1) αντιστοιχεί στά σημεία που βρίσκονται στην ευθεία που είναι κάθετη στό μέσο τής $O_1 O_2$.

Γιά $\kappa = 1, 2, 3, \dots$ ή εξίσωση (1) αντιστοιχεί σε σημεία που βρίσκονται πάνω σε τόξα *υπερβολών*, που έχουν ως έστίες τίς δύο σύγχρονες πηγές O_1 και O_2 .

Σέ ένα άλλο σημείο Δ τής επιφάνειας του ύγρου, που οί αποστάσεις



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

του από τα σημεία O_1 και O_2 έχουν διαφορά ίση με *περιττό αριθμό ήμικυμάτων*, δηλαδή είναι:

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

οι δύο ταλαντώσεις φτάνουν με *αντίθετη φάση* ($\varphi = 180^\circ$) και επομένως η συνισταμένη ταλάντωση έχει πλάτος *ίσο με μηδέν*, $A = 0$ (*ελάχιστο πλάτος*). Έτσι το σημείο Δ είναι *ακίνητο*. Γενικά, ένα σημείο της επιφάνειας του υγρού μένει *ακίνητο* ($A = 0$), όταν ισχύει η εξίσωση:

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

Καί η εξίσωση (2) προσδιορίζει σημεία που βρίσκονται πάνω σε *τόξα υπερβολών* με έστιες τα σημεία O_1 και O_2 .

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

I. "Ένα υλικό σημείο, στο οποίο φτάνουν δύο αρμονικά κύματα, εκτελεί συνισταμένη αρμονική ταλάντωση που έχει την ίδια διεύθυνση και την ίδια συχνότητα με τις δύο σύγχρονες πηγές των κυμάτων, τό πλάτος όμως της συνισταμένης ταλαντώσεως εξαρτάται από τη διαφορά των αποστάσεων του θεωρούμενου σημείου από τις δύο πηγές των κυμάτων.

II. Τό πλάτος της συνισταμένης ταλαντώσεως :

— είναι μέγιστο στά σημεία που η διαφορά των αποστάσεών τους από τις δύο πηγές των κυμάτων είναι ίση με μηδέν ή είναι ίση με άκεραιο αριθμό μηκών κύματος·

— είναι ίσο με μηδέν στά σημεία που η διαφορά των αποστάσεών τους από τις δύο πηγές των κυμάτων είναι ίση με περιττό αριθμό ήμικυμάτων.

III. Τά σημεία που πάλλονται με μέγιστο πλάτος ή μένουν ακίνητα διατάσσονται πάνω σε αντίστοιχα τόξα υπερβολών (κροσσοί συμβολής).

"Όλα τά άλλα σημεία, εκτός από εκείνα που πάλλονται με μέγιστο πλάτος ή μένουν ακίνητα, εκτελούν ταλαντώσεις με διάφορα μικρότερα πλάτη.

16. Περίθλαση των κυμάτων

Στήν επιφάνεια υδραργύρου δημιουργούμε κυκλικά κύματα με διαπασών που πάλλεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρομαγνήτη. Κάθετα στήν επιφάνεια

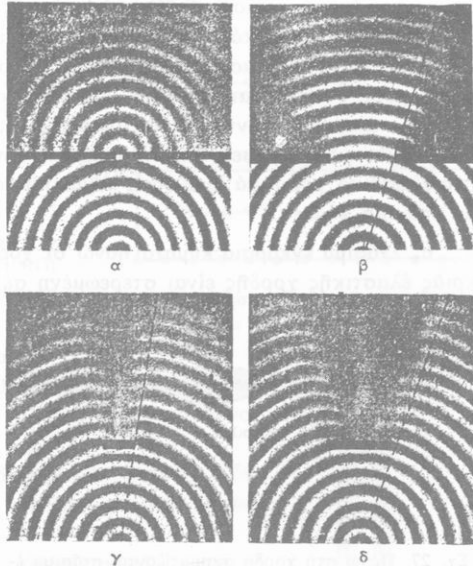
του ύδραργύρου υπάρχει διάφραγμα πού έχει μιά πολύ λεπτή σχισμή (ή πολύ μικρή τρύπα). Οί διαστάσεις τής σχισμής είναι τής τάξεως του μήκους κύματος (λ) των κυμάτων. Παρατηρούμε ότι πίσω από τό διάφραγμα σχηματίζονται νέα κυκλικά κύματα πού πηγή τους είναι ή σχισμή (σχ. 26α). Τό φαινόμενο αυτό ονομάζεται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

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

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

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

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



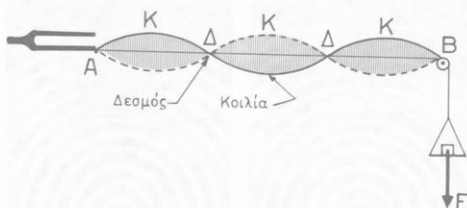
Σχ. 26. Περίθλαση κυκλικών κυμάτων πού πέφτουν πάνω σε λεπτή σχισμή ή πολύ μικρό αντικείμενο.

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

17. Στάσιμα κύματα

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

α. Στάσιμα εγκάρσια κύματα πάνω σε χορδή. Η μία άκρη A μιας μακριάς ελαστικής χορδής είναι στερεωμένη σε διαπασών που εκτελεί αμείωτες αρμονικές ταλαντώσεις (σχ. 27). Η χορδή περνάει από μία τροχαλία και στην άκρη της χορδής κρέμεται μικρός δίσκος που πάνω του μπορούμε να τοποθετούμε βάρη, ώστε να μεταβάλλουμε την τάση της χορδής. Τότε πάνω στη χορδή διαδίδονται εγκάρσια κύματα που προ-



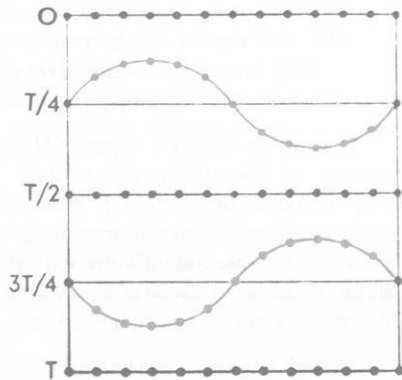
Σχ. 27. Πάνω στη χορδή σχηματίζονται στάσιμα εγκάρσια κύματα (ανάκλαση σε ανένδοτο εμπόδιο).

χωρούν από την άκρη A προς την άκρη B της χορδής. Η τροχαλία αποτελεί ένα ανένδοτο εμπόδιο στη διάδοση των κυμάτων. Εκεί τα κύματα ανακλώνται και διαδίδονται από την άκρη B προς την άκρη A της χορδής. Έτσι σε κάθε σημείο της χορδής φτάνουν συνεχώς τα προσπίπτοντα και τα ανακλώμενα κύματα, τα οποία συμβάλλουν. Για μία ορισμένη τάση της χορδής παρατηρούμε ότι πάνω στη χορδή σχηματίζεται ορισμένος αριθμός ατράκτων που έχουν το ίδιο μήκος. Η εμφάνιση των ατράκτων οφείλεται στο μεταίσθημα.

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

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

2. Το μέσο κάθε ατράκτου πάλλεται με μέγιστο πλάτος. Τά σημεία αυτά ονομάζονται *κοιλίες*.
3. Όλα τά σημεία της χορδής, εκτός από τούς δεσμούς, πάλλονται με τήν ίδια συχνότητα ίση με τή συχνότητα της πηγής τών κυμάτων.
4. Τά σημεία πού είναι μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών κινούνται με τήν ίδια φορά καί βρίσκονται πάντοτε σέ συμφωνία φάσεως.
5. Τά σημεία πού είναι από τό ένα καί από τό άλλο μέρος ενός δεσμού κινούνται με αντίθετη φορά καί βρίσκονται πάντοτε σέ αντίθεση φάσεως.
6. Όλα τά κινούμενα σημεία περνούν ταυτόχρονα από τή θέση τής ισορροπίας τους καί αποκτούν ταυτόχρονα τή μέγιστη απόμακρυνσή τους (σχ. 28).
7. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών ή δύο διαδοχικών κοιλιών είναι σταθερή καί ίση με μισό μήκος κύματος ($\lambda/2$).
8. Στο σημείο πού γίνεται ή ανάκλαση τών κυμάτων σχηματίζεται δεσμός.



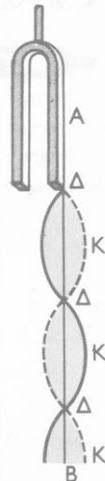
Σχ. 28. Η κίνηση τών υλικών σημείων στάσιμα εγκάρσια κύματα.

Τό φαινόμενο πού παρατηρούμε πάνω στή χορδή ονομάζεται *στάσιμα εγκάρσια κύματα*.

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

Από τά παραπάνω συνάγονται τά ακόλουθα συμπεράσματα:

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



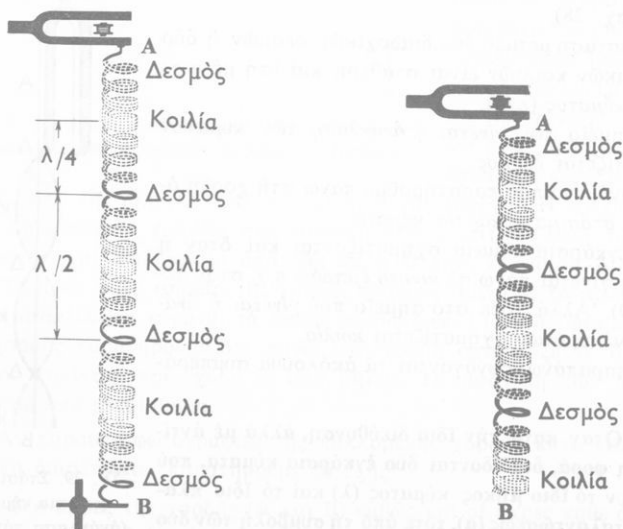
Σχ. 29. Στάσιμα εγκάρσια κύματα (ανάκλαση πάνω σέ κινητό εμπόδιο).

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

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

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

Δεσμοὶ καὶ κοιλιές συμπίεσεως. Ἡ σπείρα πού ἀποτελεῖ *τὴν κοιλία* τοῦ στάσιμου κύματος ἐκτελεῖ ταλάντωση πού ἔχει μέγιστο πλάτος. Ἀπὸ τὸ ἓνα καὶ ἀπὸ τὸ ἄλλο μέρος αὐτῆς τῆς σπείρας οἱ γειτονικὲς σπείρες κινουῦνται πάντοτε μὲ *τὴν ἴδια φορά* καὶ ἐκτελοῦν ταλαντώσεις, πού τὸ πλάτος τους πρακτικὰ εἶναι ἴσο μὲ τὸ πλάτος ταλαντώσεως τῆς κοιλιακῆς σπείρας. Ἔτσι στὴν περιοχὴ τῆς κοιλίας ἡ ἀπόσταση τῆς μῆς σπείρας ἀπὸ τὴν



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

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

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

Στά στάσιμα διαμήκη κύματα στῖς κοιλίες τῆς κινήσεως ἢ συμπίεση διατηρεῖται σταθερή, ἐνῶ στοὺς δεσμούς τῆς κινήσεως περιοδικά γίνεται πύκνωση καὶ ἀραίωση.

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

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

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

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

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

29. 'Από την άκρη A μιᾶς εὐθείας AB μήκους 10 m φεύγει ἕνα κύμα πού ἔχει μήκος κύματος 40 cm. Μὲ πόσα μήκη κύματος εἶναι ἴση ἡ εὐθεία AB καί μέσα σέ πόσες περιόδους τὸ κύμα φτάνει στὴν ἄκρη B τῆς εὐθείας;

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

31. Κατὰ μήκος ἑνὸς σπειροειδοῦς ἐλατηρίου διαδίδονται διαμήκη κύματα μὲ ταχύτητα 4 m/sec. Τὸ μήκος κύματος εἶναι 80 cm καί τὸ 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 μιὰ στοιχειώδη μάζα τοῦ ἐλατηρίου ἴση μὲ 0,016 gr;

32. 'Η ἄκρη A μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς ἐκτελεῖ ἁρμονικὴ ταλάντωση, πού ἔχει ἐξίσωση $y = 0,04 \cdot \eta\mu 20\pi t$. Τὰ διάφορα μεγέθη μετριοῦνται σέ μονάδες MKS. 1) Νά βρεθοῦν τὸ πλάτος a , ἡ συχνότητα ν καί ἡ περίοδος T τῆς κινήσεως τῆς ἄκρης τῆς χορδῆς. 2) 'Η ταλάντωση διαδίδεται κατὰ μήκος τῆς χορδῆς μὲ ταχύτητα 25 m/sec. Νά βρεθεῖ τὸ μήκος κύματος καί νά γραφεῖ ἡ ἐξίσωση τῆς κινήσεως ἑνὸς σημείου M τῆς χορδῆς, πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση 6,25 m ἀπὸ τὴν ἄκρη A τῆς χορδῆς.

33. Οἱ δύο ἄκρες μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς AB εἶναι σταθερά στερεωμένες. 'Η χορδὴ ἔχει μήκος 120 cm καί πάνω της διαδίδονται κύματα πού ἔχουν μήκος κύματος 40 cm καί ἀπὸ τῆ συμβολή τους σχηματίζονται στάσιμα ἐγκάρσια κύματα. 1) Πόσο εἶναι τὸ μήκος τοῦ στάσιμου κύματος καί πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται πάνω στὴ χορδὴ; 2) Νά σημειωθοῦν οἱ ἀποστάσεις τῶν κοιλιῶν ἀπὸ τὴν ἄκρη A τῆς χορδῆς.

34. 'Η ἄκρη A μιᾶς ἐλαστικῆς χορδῆς εἶναι σταθερά στερεωμένη, ἐνῶ ἡ ἄλλη ἄκρη της B εἶναι ἐλεύθερη. 'Η χορδὴ ἔχει μήκος 90 cm καί πάνω της σχηματίζονται στάσιμα ἐγκάρσια κύματα. Τὸ μήκος κύματος εἶναι 40 cm. 1) Πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται; 2) Νά σημειωθοῦν οἱ ἀποστάσεις τῶν κοιλιῶν ἀπὸ τὴν ἄκρη A τῆς χορδῆς.

35. 'Ενα διαπασῶν ἐκτελεῖ ταλαντώσεις, πού ἔχουν συχνότητα $\nu = 120$ Hz, καί δημιουργεῖ στὴν ἐπιφάνεια ἑνὸς ὑγροῦ δύο σύγχρονες πηγές O_1 καί O_2 ἐγκάρσιων κυμάτων, πού διαδίδονται μὲ ταχύτητα $c = 48$ cm/sec. Τὸ πλάτος ταλαντώσεως τῶν μορίων τοῦ ὑγροῦ εἶναι $a = 5$ mm καί ὑποθέτουμε ὅτι δέν ὑπάρχουν ἀπώλειες ἐνέργειας. 1) Πόσο εἶναι τὸ πλάτος A τῆς ταλαντώσεως σέ ἕνα σημεῖο B τῆς ἐπιφάνειας τοῦ ὑγροῦ, πού οἱ ἀποστάσεις του ἀπὸ τὶς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι $O_1B = 8$ cm καί $O_2B = 6$ cm; 2) Πόσο εἶναι τὸ πλάτος A τῆς ταλαντώσεως σέ ἕνα ἄλλο σημεῖο Γ, πού οἱ ἀποστάσεις του ἀπὸ τὶς δύο πηγές τῶν κυμάτων εἶναι $O_1\Gamma = 10$ cm καί $O_2\Gamma = 7$ cm;

36. Στὶς δύο ἄκρες ἑνὸς γραμμικοῦ ἐλαστικοῦ μέσου, πού ἔχει μήκος 6 m, δύο πηγές O_1 καί O_2 κατὰ τὴ χρονικὴ στιγμή $t = 0$ ἀρχίζουν νά ἐκτελοῦν ταλαντώσεις μὲ συχνότητα $\nu = 5$ Hz καί πλάτος $a = 3$ mm. 1) Σέ ποιές χρονικὲς στιγμές t_1 καί t_2 φτάνουν τὰ δύο ἐγκάρσια κύματα σέ ἕνα σημεῖο B, πού ἡ ἀπόστασή του ἀπὸ τὴν πηγὴ O_1 εἶναι $O_1B = 80$ cm; 2) Πόσο εἶναι τὸ πλάτος τῆς ταλαντώσεως στὸ σημεῖο B καί πόσο σέ ἕνα ἄλλο σημεῖο Γ, πού ἡ ἀπόστασή του ἀπὸ τὴν πηγὴ O_1 εἶναι $O_1\Gamma = 2,50$ m; 'Η ταχύτητα διαδόσεως τῶν κυμάτων εἶναι $c = 2$ m/sec.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

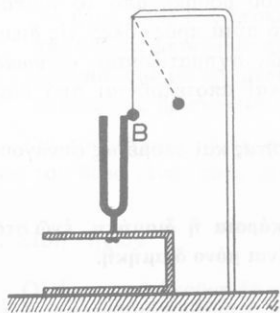
Ήχητικά κύματα

18. Παραγωγή του ήχου

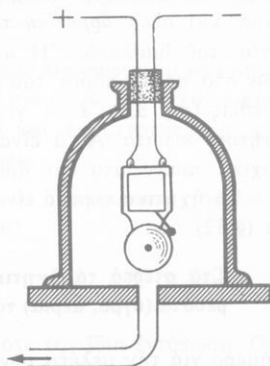
Τό φυσικό αίτιο πού διεγείρει τό αϊθητήριο όργανο τής άκοής μας τό όνομάζουμε γενικά ήχο. Μιά μικρή σφαίρα άπό χάλυβα κρέμεται μέ νήμα άπό σταθερό σημείο καί βρίσκεται σέ έπαφή μέ διαπασών πού ήρεμεί (σχ. 31). "Αν χτυπήσουμε έλαφρά τό διαπασών, τότε άκούμε ήχο καί ταυτόχρονα βλέπουμε ότι ή σφαίρα άναπηδά κάθε φορά πού έρχεται σέ έπαφή μέ τό διαπασών. "Ωστε, όταν τό διαπασών έκτελεί *ταλάντωση*, τότε τό διαπασών παράγει ήχο. Εύκολα διαπιστώνουμε ότι *πηγές ήχων* μπορεί νά είναι διάφορα στερεά πού πάλλονται (χορδές, πλάκες, μεμβράνες) ή μάζες άερίων πού πάλλονται (ό άέρας μέσα σέ πνευστό όργανο). "Ωστε:

Ήχος παράγεται άπό ένα σώμα πού έκτελεί ταλαντώσεις.

Μιά ήχητική πηγή παράγει άκουστό ήχο, όταν ή συχνότητα καί τό



Σχ. 31. Τό παλλόμενο διαπασών παράγει ήχο.



Σχ. 32. Ό ήχος δέ διαδίδεται μέσα στό κενό.

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

19. Διάδοση τοῦ ἤχου

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

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

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

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

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

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

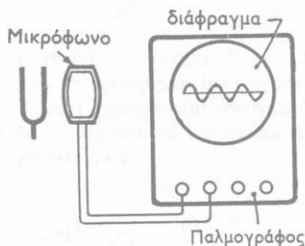
Σήμερα γιά τήν μελέτη τῶν ἠχητικῶν κυμάτων χρησιμοποιοῦμε τόν *ἠλεκτρονικό παλμογράφο* (τῆ λειτουργία του θά τῆ μάθουμε στόν Ἡλεκτρισμό). Τά ἠχητικά κύματα πού φτάνουν στό μικρόφωνο δημιουργοῦν μέσα σέ ἕνα



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

ειδικό κύκλωμα ηλεκτρικές ταλαντώσεις. Αυτές προκαλούν μετακινήσεις μιᾶς φωτεινῆς κηλίδας πάνω στο διάφραγμα (δθόνη) τοῦ παλμογράφου και τότε βλέπουμε μιᾶ καμπύλη γραμμῆ πού ἔχει τήν ἴδια μορφή, τήν ἴδια περίοδο και πλάτος ἀνάλογο μέ τή μηχανική ταλάντωση πού δημιουργοῦν στο μικρόφωνο τά ἠχητικά κύματα πού φτάνουν σ' αὐτό (σχ. 34).

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



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

Ὁ ἤχος εἶναι μιᾶ ὑποκειμενική ἐντύπωση πού δημιουργεῖται στό αὐτί μας ἀπό τίς μεταβολές πίεσεως πού προκαλεῖ μιᾶ μηχανική ταλάντωση, ἡ ὁποία διαδίδεται μέσα σέ ἐλαστικό ὑλικό και ἡ συχνότητα και τό πλάτος της βρίσκονται μέσα σέ ὀρισμένα ὄρια.

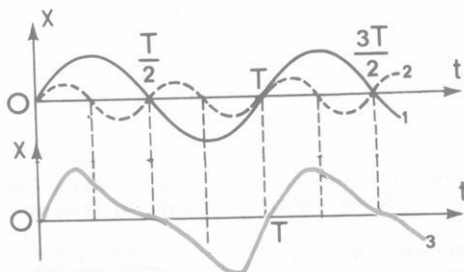
Γιά τοὺς ἤχους μέ τή συνηθισμένη ἐνταση οἱ διακυμάνσεις τῆς πίεσεως τοῦ αἵρα εἶναι πολύ μικρές (10^{-6} ὠς 10^{-7} at).

20. Εἶδη ἤχων

Οἱ ἤχοι πού ἀκοῦμε δέ μᾶς προκαλοῦν πάντοτε τήν ἴδια ἐντύπωση. Οἱ ἀκουστοί ἤχοι διακρίνονται σέ τόνους, φθόγγους, θορύβους και κρότους. Στά ἐργαστήρια μέ κατάλληλες διατάξεις (π.χ. μέ τόν παλμογράφο) καταγράφουμε τά ἠχητικά κύματα πού ἀντιστοιχοῦν στό κάθε εἶδος ἤχου. Ἔτσι



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



Σχ. 36. 'Η καμπύλη 3 αντιστοιχεί σε σύνθετο ήχο (φθόγγο) και παριστάνει τή συνισταμένη δύο άπλων αρμονικών ταλαντώσεων 1 και 2.

'Η καμπύλη 3 αντιστοιχεί σε μή ήμιτονοειδή περιοδική κίνηση.



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

τήν πρόσθεση άπλων ήχων με συχνότητες οί όποιες είναι άκέραια πολλαπλάσια μιās άρχικης συχνότητας (ν).

'Ο θόρυβος αντιστοιχεί σε άκανόνιστα ήχητικά κύματα πού δέν παρουσιάζουν καμιά περιοδικότητα (σχ. 37α). Τέλος ό κρότος αντιστοιχεί σε μιιά άπτόμη και ίσχυρή δόνηση του άερα, όπως π.χ. συμβαίνει, όταν ένα όπλο έκπυρσοκροτεί (σχ. 37β).

'Από τά παραπάνω καταλήγουμε στα έξής:

I. Οί ήχοι πού μās ενδιαφέρουν περισσότερο είναι ό τόνος και ό φθόγγος.

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

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

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

21. Ταχύτητα διαδόσεως των ήχητικών κυμάτων

α. Στόν άερα. Στόν άερα διαδίδονται μόνο διαμήκη ήχητικά κύματα και για τή μέτρηση τής ταχύτητας (c), μέ τήν όποία διαδίδονται, εφαρμόζουμε διάφορες μεθόδους (άμεσες και έμμεσες). Έτσι βρήκαμε ότι:

Η ταχύτητα διαδόσεως του ήχου στόν άερα είναι άνεξάρτητη από τή συχνότητα του ήχου και τήν άτμοσφαιρική πίεση, και αύξάνει όταν αύξάνει ή θερμοκρασία του άερα.

Άπό τίς μετρήσεις βρίσκουμε ότι είναι:

ταχύτητα του ήχου στόν άερα	σε 0° C	$c_0 \approx 331$ m/sec
	σε 15° C	$c \approx 340$ m/sec

Άποδεικνύεται ότι ή ταχύτητα (c) του ήχου, όταν ό άέρας έχει απόλυτη θερμοκρασία T , δίνεται από τήν εξίσωση:

$$\text{ταχύτητα του ήχου στόν άερα} \quad c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}} \quad (1)$$

σε $T^\circ \text{ K}$

όπου $1/273 \text{ grad}^{-1}$ είναι ό θερμικός συντελεστής των άερίων. Η εξίσωση (1) φανερώνει ότι:

Η ταχύτητα του ήχου στόν άερα είναι άνάλογη μέ τήν τετραγωνική ρίζα τής απόλυτης θερμοκρασίας του άερα.

Άπόδειξη τής εξίσώσεως (1). Στά άέρια τά διαμήκη κύματα διαδίδονται μέ ταχύτητα (c) που δίνεται από τήν εξίσωση:

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

όπου ρ είναι ή πυκνότητα του άερίου, p ή πίεσή του και γ είναι ό λόγος των δύο ειδικών θερμοτήτων του άερίου ($\gamma = c_p/c_v$).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

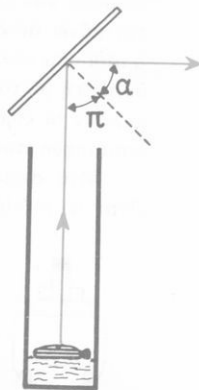
Η ταχύτητα του ήχου στα υγρά είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου στα αέρια και στα στερεά είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου στα υγρά.

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

22. 'Ανάκλαση τών ήχητικῶν κυμάτων

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

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



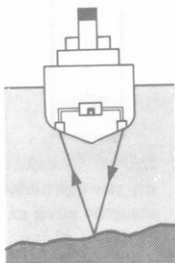
Σχ. 38. Ἀνάκλαση τῶν ἡχητικῶν κυμάτων πάνω σέ γυάλινη πλάκα.

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

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

κείμενα καί γ) ἤχητικά κύματα ἀπό τήν « κανονική » ἀνάκλαση, πού γίνεται πάνω σέ διάφορα ἐμπόδια (τοῖχοι, ὄροφή, κολῶνες κ.λ.). Γιά νά ἔχει ἡ αἰθουσα καλή « ἀκουστική », πρέπει τά ἤχητικά κύματα πού φτάνουν στόν ἀκροατή μέ τούς δύο τελευταίους τρόπους νά ἐνισχύουν τόν ἦχο πού προκαλοῦν τά κύματα πού φτάνουν ἀπευθείας στόν ἀκροατή. Γι' αὐτό τό σκοπό διαμορφώνεται κατάλληλα ἡ αἰθουσα.

Μιά σημαντική ἐφαρμογή τῆς ἀνακλάσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων εἶναι τό *βυθόμετρο*, πού τό χρησιμοποιοῦμε γιά νά μετράμε τό βάθος τῆς θάλασσας. Στά ὕφαλα τοῦ σκάφους ὑπάρχει ἕνας πο-



Σχ. 39. Βυθόμετρο

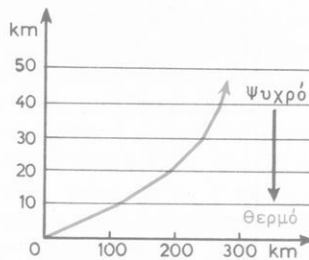
μπός ἤχητικῶν κυμάτων μεγάλης συχνότητας. Αὐτός ἐκπέμπει ἕνα ἤχητικό σήμα, δηλαδή ἕνα συρμό ἤχητικῶν κυμάτων, πού ἀνακλῶνται πάνω στό βυθό καί ἐπιστρέφουν σέ ἕνα δέκτη, πού βρίσκεται καί αὐτός στά ὕφαλα τοῦ σκάφους (σχ. 39). Ἡ ἀναχώρηση τῶν κυμάτων ἀπό τόν πομπό καί ἡ ἐπιστροφή τους στό δέκτη καταγράφονται αὐτόματα καί ἔτσι εἶναι ἀμέσως γνωστή ἡ διάρκεια t τῆς διαδρομῆς τῶν ἤχητικῶν κυμάτων. Ἄν c εἶναι ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στή θάλασσα, τότε τό βάθος s εἶναι $s = c \cdot t/2$.

23. Διάθλαση τῶν ἤχητικῶν κυμάτων

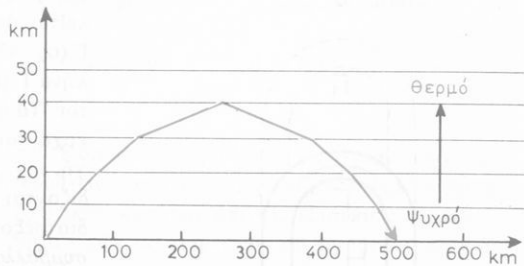
Ὄταν τά ἤχητικά κύματα περνοῦν ἀπό τήν ἐπιφάνεια πού διαχωρίζει δύο διαφορετικά ἐλαστικά μέσα, τότε τά ἤχητικά κύματα διαθλῶνται σύμφωνα μέ τούς νόμους τῆς διαθλάσεως τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας (§ 14).

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 τά στρώματα τοῦ ἀέρα ἔχουν διαφορετική θερμοκρασία καί ἐπομένως ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στά διάφορα στρώματα τοῦ ἀέρα εἶναι διαφορετική. Συνήθως τά στρώματα τοῦ ἀέρα πού βρίσκονται κοντά στήν ἐπιφάνεια τοῦ ἐδάφους εἶναι θερμότερα ἀπό τά ἄλλα στρώματα πού βρίσκονται πιο ψηλά. Μιά ἤχητική ἀκτίνα πού διευθύνεται πλάγια πρὸς τά πάνω μβαίνει ἀπό θερμότερα σέ ψυχρότερα στρώματα ἀέρα, δηλαδή μβαίνει σέ στρώματα ἀέρα στά ὁποῖα ἡ ταχύτητα τῶν ἤχητικῶν κυμάτων γίνεται διαρκῶς μικρότερη (σχ. 40). Τότε ἡ γωνία διαθλάσεως εἶναι μικρότερη ἀπό τή γωνία προσπτώσεως. Ἐτσι ἡ ἤχητική ἀκτίνα μεταβάλλεται σέ καμπύλη γραμμῆ. Σέ μερικές ὁμως περιπτώσεις καί κυρίως τῆ νύχτα μπορεῖ τά στρώματα τοῦ ἀέρα, πού βρί-

σκονται κοντά στο έδαφος, να γίνουν ψυχρότερα από τα άλλα στρώματα που βρίσκονται πιο ψηλά. Τότε η ήχητική ακτίνα μπαίνει από ψυχρότερα σε θερμότερα στρώματα και η γωνία διαθλάσεως είναι μεγαλύτερη από τη γωνία προσπτώσεως (σχ. 41). Η ήχητική ακτίνα μπορεί σε όρισμένο ύψος να πάθει ολική ανάκλαση και τότε ακολουθώντας μία συμμετρική πορεία ξαναγυρίζει στο έδαφος. Έτσι εξηγείται γιατί σε μερικές περιπτώσεις ο ήχος που παράγεται από μία ισχυρή έκρηξη μπορεί να γίνει ακουστός σε τόπους που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση (ως 500 km) από τον τόπο της έκρηξης, ενώ δεν είναι ακουστός σε άλλους τόπους που βρίσκονται πιο κοντά στον τόπο της έκρηξης.



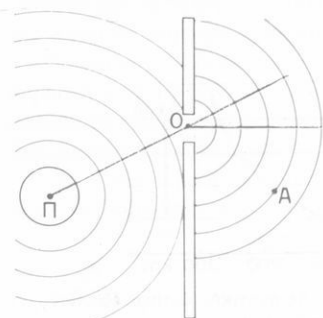
Σχ. 40. Καμπύλωση της ήχητικής ακτίνας εξαιτίας διαδοχικών διαθλάσεων.



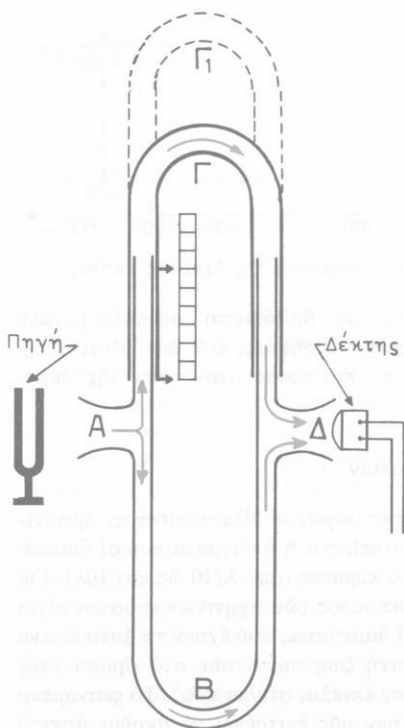
Σχ. 41. Όλικη ανάκλαση της ήχητικής ακτίνας.

24. Περιθλάση των ήχητικών κυμάτων

Τά φαινόμενα της περιθλάσεως των κυμάτων ελαστικότητας εμφανίζονται, όταν τά κύματα συναντούν αντικείμενα ή ανοίγματα που οί διαστάσεις τους είναι της τάξεως του μήκους κύματος (από $\lambda/10$ ως και 10λ). Για την όμιλία και τη μουσική τό μήκος κύματος των ήχητικών κυμάτων είναι από 30 cm ως 3 m. Τόσες είναι και οί διαστάσεις που έχουν τά αντικείμενα και τά ανοίγματα που στην καθημερινή ζωή συναντούν στο δρόμο τους τά ήχητικά κύματα (πόρτες, παράθυρα, έπιπλα, στύλοι κ.λ.). Τό φαινόμενο της περιθλάσεως των ήχητικών κυμάτων μάς επιτρέπει να άκοιμε άρκετά



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



καθαρὰ μιά ἤχητικὴ πηγὴ, χωρὶς νὰ φτάνουν ἀπευθείας σὲ μᾶς οἱ ἤχητικὲς ἀκτίνες πού φεύγουν ἀπὸ τὴν ἤχητικὴ πηγὴ (σχ. 42).

25. Συμβολὴ τῶν ἤχητικῶν κυμάτων

Τὰ ἤχητικά κύματα προκαλοῦν φαινόμενα *συμβολῆς*. Θὰ ἐξετάσουμε αὐτὰ τὰ φαινόμενα μὲ μιά διάταξη, πού ὀνομάζεται *σωλήνας τοῦ König* καὶ ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο σωλῆνες B καὶ Γ (σχ. 43). Ἀνυψώνοντας τὸ σωλήνα Γ μεταβάλλουμε τὸ μήκος του. Τὰ ἤχητικά κύματα πού προέρχονται ἀπὸ μιά ἤχητικὴ πηγὴ, π.χ. ἓνα διαπασῶν, διακλαδίζονται στὸ σημεῖο A καί, ἀφοῦ διατρέξουν τοὺς δύο σωλῆνες, *συμβάλλουν* στὸ σημεῖο Δ, ὅπου ὑπάρχει ἓνας δέκτης τῶν ἤχητικῶν κυμάτων (τὸ αὐτὶ μας ἢ μικρόφωνο πού συνδέεται μὲ παλμογράφο). Οἱ ἄρμονικὲς ταλαντώσεις πού ἐκτελεῖ τὸ διαπασῶν ἔχουν συχνότητα ν . Ἄν c εἶναι ἡ ταχύτητα διαδόσεως τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στὸν ἀέρα, τότε τὸ μήκος κύματος τῶν ἤχητικῶν κυμάτων στὸν ἀέρα τῶν σωλῆνων εἶναι $\lambda = c/\nu$. Ὄταν οἱ δύο δρόμοι ABΔ καὶ AΓΔ τῶν ἤχητικῶν κυμάτων πού διαδίδο-

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

Ἔνταση τοῦ ἤχου (I) σέ ἓνα σημεῖο μιᾶς ἠχητικῆς ἀκτίνας ὀνομάζεται τό πηλίκο τῆς μηχανικῆς ἰσχύος (P), πού περνάει ἀπό μιᾶ ἐπιφάνεια κάθετη στήν ἠχητική ἀκτίνα, διά τοῦ ἐμβαδοῦ (S) τῆς ἐπιφάνειας.

$$\text{ένταση τοῦ ἤχου} \quad I = \frac{P}{S}$$

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

Στό σύστημα MKS μονάδα ἐντάσεως τοῦ ἤχου εἶναι τό $1 \text{ Watt}/m^2$. Στήν πράξη ὡς μονάδα ἐντάσεως τοῦ ἤχου παίρνουμε συνήθως τό $1 \text{ W}/cm^2$.

β. Μεταβολή τῆς ἐντάσεως τοῦ ἤχου μέ τήν ἀπόσταση ἀπό τήν ἠχητική πηγή. Μιά ἠχητική πηγή, πού γιά εὐκολία τή θεωροῦμε ὡς ὄλικο σημεῖο, ἐκπέμπει ὁμοιόμορφα πρὸς ὄλες τῖς διευθύνσεις μηχανική ἰσχύ $P_{ολ}$ καί ὑποθέτουμε ὅτι ἡ ἰσχύς αὐτή διαδίδεται μέσα στὸν ἀέρα χωρὶς καμιά ἀπώλεια. Γύρω ἀπὸ τήν πηγή σχηματίζονται σφαιρικά κύματα. Σ' ἓνα σημεῖο M , πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση R ἀπὸ τήν ἠχητική πηγή, ἡ ἐπιφάνεια κύματος ἔχει ἐμβαδὸ $S = 4\pi R^2$ καί ἐπομένως στό σημεῖο M ἡ ἐνταση (I) τοῦ ἤχου εἶναι:

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

Παρατηροῦμε ὅτι:

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

γ. Σχέση μεταξύ τῆς ἐντάσεως τοῦ ἤχου καί τοῦ πλάτους τῆς ταλαντώσεως. Σέ ἓνα σημεῖο M μέσα στὸν ἀέρα ἡ ἐνταση τοῦ ἤχου εἶναι I καί ἡ συχνότητα ν τῶν ἠχητικῶν κυμάτων εἶναι σταθερή. Ἀποδεικνύεται ὅτι :

Ἡ ἐνταση (I) ἑνὸς ἤχου ($\nu = \text{σταθ.}$) εἶναι ἀνάλογη μέ τό τετράγωνο τοῦ πλάτους (a) τῆς ταλαντώσεως.

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

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

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

πού διαδίδεται μέ τό ήχητικό κύμα είναι $\alpha = 3,6 \cdot 10^{-10}$ cm. Αυτό τό πλάτος είναι περίπου τό ένα εκατοστό τής διαμέτρου του ατόμου (10^{-8} cm). Από τό παράδειγμα αυτό φαίνεται ή εξαιρετική εδαισθησία του αυτιου μας

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

37. Σέ θερμοκρασία 0° C ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 331 m/sec. Σέ ποιά θερμοκρασία του άέρα ή ταχύτητα του ήχου είναι 350 m/sec;

38. Σέ θερμοκρασία 15° C ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 340 m/sec. Πόση είναι ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα, όταν ή θερμοκρασία του είναι 10° C.

39. Ένας ήχος συχνότητας 400 Hz διαδίδεται μέσα στον άέρα και μέσα σε μία ράβδο από χάλυβα. Η ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 340 m/sec και στο χάλυβα είναι 5000 m/sec Πόσο είναι τό μήκος κύματος μέσα σ' αυτά τά δύο ύλικά;

40. Νά μετρηθεί τό μήκος μιās ευθείας AB = 10 m σε μήκη κύματος ενός ήχου πού έχει συχνότητα 440 Hz και διαδίδεται στον άέρα μέ ταχύτητα 340 m/sec.

41. Για τόν ξηρό άέρα είναι $\gamma = 1,41$. Στή θερμοκρασία $T_0 = 273^{\circ}$ K (δηλαδή 0° C) ή πυκνότητα του άέρα είναι $\rho_0 = 1,293$ kg/m³. Η κανονική πίεση $p_0 = 76$ cm Hg είναι $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ N/m². Πόση είναι ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα;

42. Ένας παρατηρητής βρίσκεται μέσα σε μία κοιλάδα πού τή σχηματίζουν δύο παράλληλα βουνά μέ απότομες πλαγιές. Ο παρατηρητής πυροβολεί και άκούει μία πρώτη ήχώ 0,5 sec μετά τόν πυροβολισμό και μία δεύτερη ήχώ 1 sec μετά τόν πυροβολισμό. 1) Πόση είναι ή απόσταση μεταξύ των δύο βουνών; 2) Μπορεί ό παρατηρητής νά άκούσει και τρίτη ήχώ; Ταχύτητα του ήχου στον άέρα 340 m/sec.

43. Ένα πλοίο σε καιρό ομίχλης βρίσκεται εμπρός από μία βραχώδη άκτή και εκπέμπει προς τήν άκτή ένα ήχητικό σήμα. Από τήν ανάκλαση του ήχου πάνω στην άκτή φτάνουν στο πλοίο δύο ήχοι πού χρονικά απέχουν μεταξύ τους 13 sec. Η ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 340 m/sec και στή θάλασσα 1440 m/sec Πόση είναι ή απόσταση του πλοίου από τήν άκτή;

44. Για νά μετρήσουμε τήν ταχύτητα του ήχου στον άέρα μέ τό σωλήνα του Κόπιν, χρησιμοποιούμε ήχητική πηγή πού έχει συχνότητα $\nu = 262$ Hz. Για νά αντιληφθούμε δύο διαδοχικές καταργήσεις του ήχου, πρέπει νά αυξηθεί τό μήκος του ενός σωλήνα κατά 130 cm. Πόση είναι ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα;

45. Μιά πολύ μικρή ήχητική πηγή εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τίες διευθύνσεις ήχητική ισχύ μέ σταθερό ρυθμό $P = 1,5$ W. Νά βρεθεί ή ένταση του ήχου σε ένα σημείο πού απέχει 25 m από τήν πηγή στίς εξής περιπτώσεις : α) όταν δε συμβαίνει άπορρόφηση ήχητικής ενέργειας, και β) όταν κάθε 5 m τά 2 % τής ήχητικής ενέργειας άπορροφούνται.

46. Ήχητική πηγή μέ μικρές διαστάσεις εκπέμπει ήχητική ισχύ P ομοιόμορφα προς όλες τίες διευθύνσεις. Σε απόσταση 100 m από τήν πηγή ή ένταση του ήχου είναι $I = 5 \cdot 10^{-8}$ W/cm². Αν δε συμβαίνει άπορρόφηση τής ήχητικής ενέργειας, πόση είναι ή ήχητική ισχύς πού εκπέμπει ή πηγή; Πόση ήχητική ένέργεια (E) εκπέμπει ή πηγή μέσα σε χρονικό διάστημα $t = 10$ sec;

Φυσιολογικά χαρακτηριστικά του ήχου

27. Φυσιολογικά χαρακτηριστικά των μουσικών ήχων

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

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

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

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

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

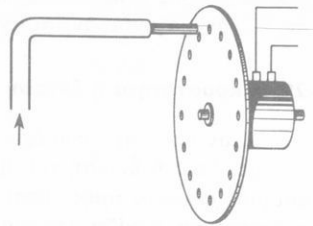
Καθένα από τά τρία *υποκειμενικά γνωρίσματα*, πού τό αυτί μας άναγνωρίζει σέ έναν ήχο, *αντιστοιχεί* σέ ένα *αντικειμενικό γνώρισμα* των ήχητικών κυμάτων, πού είναι ένα όρισμένο *φυσικό μέγεθος*. Αυτό τό μέγεθος μπορούμε νά τό μετρήσουμε. Θά εξετάσουμε ποιά σχέση υπάρχει μεταξύ ενός *υποκειμενικού* γνωρίσματος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

28. Ύψος του ήχου

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

(*) Loudness, intensité physiologique, Lautstärke.

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



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

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

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

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

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

μελιώδης ἤχος ἢ πρῶτος ἄρμονικός, ἐνῶ οἱ ἤχοι μέ τις συχνότητες 2ν, 3ν, 4ν, ... ὀνομάζονται ἀντίστοιχα δεύτερος, τρίτος, τέταρτος ἄρμονικός κ.ο.κ.

29. Ἀκουστότητα ἢ ἔνταση τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος

Ἐναν ἄπλο ἤχο πού ἔχει ὀρισμένη συχνότητα (π.χ. $\nu = 1000$ Hz) τόν ἀκοῦμε, ὅταν ἡ ἔνταση τοῦ ἤχου περιλαμβάνεται μεταξύ μιᾶς ἐλάχιστης καί μιᾶς μέγιστης τιμῆς. Ἐτσι γιά κάθε συχνότητα ὑπάρχει ἕνα πεδίο ἀκουστότητας πού ἀρχίζει ἀπό μιᾶ ἐλάχιστη ἔνταση ἤχου, ἡ ὁποία ὀνομάζεται κατώφλι ἀκουστότητας, καί τελειώνει σέ μιᾶ μέγιστη ἔνταση ἤχου, ἡ ὁποία ὀνομάζεται ὄριο πόνου. Ὅταν ἡ ἔνταση τοῦ ἤχου εἶναι μικρότερη ἀπό τό κατώφλι ἀκουστότητας, τό αὐτί μας δέν ἀκούει τόν ἤχο. Ὅταν 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 πολὺ 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* βασίζεται στό νόμο *Weber - Fechner*. Στόν παρακάτω πίνακα ἀναφέρονται μερικά παραδείγματα ἀκουστότητας (σέ *decibel*).

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

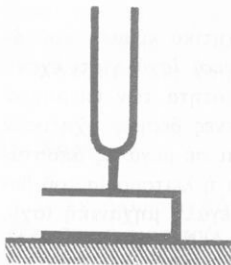
Κατώφλι ακουστότητας	0 dB
Ψίθυρος, κήπος ήρεμος	20 dB
Συνηθισμένη όμιλία	60 dB
Κομπρεσέρ	100 dB
Άπογείωση αεριωθούμενου (σέ απόσταση 100 m)	125 dB
Όριο πόνου	140 dB

30. Χροιά του ήχου

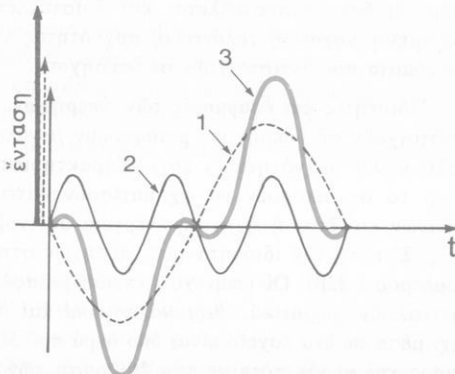
Ένα διαπασών παράγει ήχο που έχει ορισμένη συχνότητα ν (σχ. 46). Αν εξετάσουμε αυτό τον ήχο με ένα ηλεκτρονικό παλμογράφο, όταν το διαπασών δέ στηρίζεται στο άντηχειό του, βλέπουμε μία *ήμιτονοειδή* καμπύλη. Ο ήχος του διαπασών είναι ένας *άπλος ήχος* που για τó αυτί μας είναι *άχρωμος*, ούτε *δυσάρεστος*,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



Σχ. 46. Τó διαπασών παράγει *άπλό ήχο*.



Σχ. 47. Τó διαπασών που στηρίζεται στο άντηχειό του παράγει *φθόγγο* (σύνθετο ήχο).



Σχ. 48. Ο φθόγγος προκύπτει από τή σύνθεση *άπλων ήχων*. Στο σχήμα ó φθόγγος (3) προκύπτει από τή σύνθεση τού πρώτου (1) καί τού τρίτου *άρμονικου* (2).

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

Ἡ χροιά ἑνός σύνθετου ἦχου ἐξαρτᾶται ἀπό τόν ἀριθμό καί τή σχετική ἔνταση τῶν ἁρμονικῶν ἦχων πού προσθέτονται στό θεμελιώδη.

31. Ὑπέρηχοι

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

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

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

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

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

Πηγές τῶν μουσικῶν ἤχων

32. Μουσικοί ἤχοι

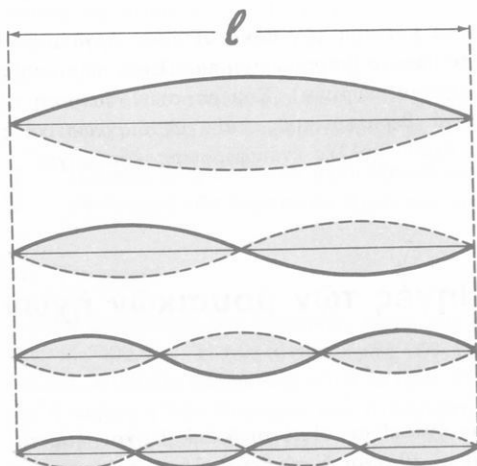
Ξέρομε (§ 20) ὅτι *μουσικοί ἤχοι* εἶναι οἱ τόνοι ἢ ἀπλοῖ ἤχοι πού παράγονται ἀπό τὰ διαπασῶν καί οἱ φθόγγοι ἢ σύνθετοι ἤχοι πού παράγονται ἀπό τὰ μουσικά ὄργανα καί τό φωνητικό σύστημα τοῦ ἀνθρώπου. Ἐνας φθόγγος χαρακτηρίζεται μέ τή συχνότητα τοῦ θεμελιώδους ἤχου. Στή Μουσική δέ χρησιμοποιοῦνται ὅλοι οἱ ἀκουστοί ἤχοι, ἀλλά μόνο μιὰ σειρά φθόγγων πού ὀνομάζεται **μουσική κλίμακα**. Οἱ συχνότητες τῶν φθόγγων τῆς κλίμακας ἀυξάνονται, 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 συχνότητων τους ἔχει ὀρισμένες τιμές. Ὁ λόγος τῶν συχνότητων τῶν δύο φθόγγων ὀνομάζεται *μουσικό διάστημα*.

33. Χορδές

Στήν Ἀκουστική ὀνομάζουμε *χορδή* ἕνα 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 τενωμένη. Οἱ χορδές πού χρησιμοποιοῦμε στά μουσικά ὄργανα εἶναι μεταλλικές ἢ ἔχουν ζωϊκή προέλευση. Ἄν ἀπομακρύνουμε ἀπό τή θέση ἰσορροπίας του ἕνα σημεῖο τῆς χορδῆς, τότε αὐτό τό σημεῖο



Σχ. 49. Διάδοση δύο εγκάρσιων κυμάτων πάνω στή χορδή.



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

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

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

Παραγωγή ἤχου ἀπό τή χορδή. Ἡ παλλόμενη χορδή χτυπάει περιοδικά τόν ἀέρα πού βρίσκεται σέ ἐπαφή μαζί της καί ἔτσι δημιουργοῦνται στὸν ἀέρα ἠχητικά κύματα. Αὐτὰ ἀντιστοιχοῦν σέ ἕναν ἤχο, πού ἔχει *συχρότητα* ν ἴση μέ τή *συχρότητα* ταλαντώσεως ν τῆς χορδῆς. Ἄν ἡ χορδή ἔχει μάζα m , ἡ γραμμική πυκνότητά της εἶναι $\mu = m/l$. Ἀποδεικνύεται ὅτι γιά τόν παραγόμενο ἤχο ἰσχύουν οἱ ἐξῆς *νόμοι τῶν χορδῶν*:

I. Ἡ *συχρότητα* (ν_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἡ χορδή εἶναι ἀντιστρόφως ἀνάλογη μέ τό μῆκος (l) τῆς χορδῆς, ἀνάλογη μέ τήν τετραγωνική ρίζα τῆς δυνάμεως (F) πού τείνει τή χορδή καί

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

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

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

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

όπου $k = 1, 2, 3, \dots$ Για $k = 1$ στή χορδή σχηματίζεται ένα στάσιμο κύμα (σχ. 62) και η χορδή παράγει τό θεμελιώδη ήχο (ή πρώτο αρμονικό). Για $k = 2$ σχηματίζονται δύο στάσιμα κύματα και η χορδή παράγει τό δεύτερο αρμονικό κ.ο.κ. "Ωστε ό άκέραιος αριθμός k φανερώνει πόσα στάσιμα κύματα σχηματίζονται πάνω στή χορδή και τή σειρά τού αρμονικού ήχου πού παράγει ή χορδή. "Αν ρ είναι ή πυκνότητα τής χορδής και $2r$ ή διάμετρος τής τομής της, τότε ή γραμμική πυκνότητα τής χορδής είναι $\mu = \pi r^2 \cdot \rho$ και ή εξίσωση (3) γράφεται ώς εξής:

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

Εύρεση τής εξισώσεως (3). 'Η ταχύτητα c διαδόσεως τών κυμάτων έλαστικότητας πάνω στή χορδή δίνεται από τήν εξίσωση:

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

όπου F είναι ή δύναμη πού τείνει τή χορδή και μ είναι ή γραμμική πυκνότητα τής χορδής.

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

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

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

Παρατήρηση. "Όλα τά συνηθισμένα μουσικά όργανα παράγουν σύνθετους ήχους (φθόγγους). 'Ως συχνότητα v τού ήχου πού παράγει ένα μουσικό όργανο θεωρούμε τή συχνότητα τού θεμελιώδους πού άντιστοιχεί σ' αυτό τό σύνθετο ήχο.

34. Συντονισμός δύο ήχητικῶν πηγῶν. Ἄντηχεῖα

Δύο ὅμοια διαπασῶν Α καὶ Β ἔχουν τὴν ἴδια ἰδιοσυχνότητα (ν_0) καὶ ἐπομένως παράγουν τὸν ἴδιο ἀπλό ἤχο (π.χ. τὸ la_3). Τὰ δύο διαπασῶν εἶναι τὸ ἓνα λίγο μακρύτερα ἀπὸ τὸ ἄλλο. Ἄν χτυπήσουμε ελαφρὰ τὸ διαπασῶν Α, αὐτὸ παράγει ἤχο. Τότε καὶ τὸ διαπασῶν Β διαγειρείται καὶ παράγει τὸν ἴδιο ἤχο, γιατί μεταξύ τῶν δύο διαπασῶν ὑπάρχει *συντονισμός*. Ἄν ἀκουμπήσουμε τὸ δάχτυλό μας στὸ διαπασῶν Α, αὐτὸ παύει νὰ πάλλεται καὶ ἀκοῦμε μόνο τὸν 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 ἔγχορδα ὄργανα ἔχουν εἰδικὰ ἀντηχεῖα, πού συντονίζονται μὲ τὶς παλλόμενες χορδές καὶ παράγουν ἤχο πού ἔχει χαρακτηριστικὴ χροιά.

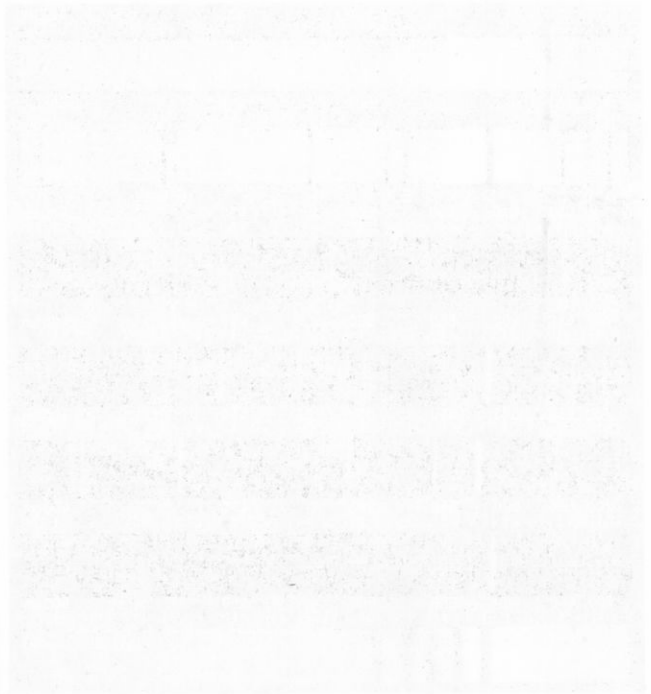
35. Ἡχητικοὶ σωλήνες

Στὴν Ἄκουστικὴ ὀνομάζουμε *ἠχητικὸ σωλήνα* ἓναν κυλινδρικό ἢ πρισματικὸ σωλήνα (ἀπὸ ξύλο ἢ μέταλλο) πού περιέχει μιά *στήλη ἀέρα*. Μέσα σ' αὐτὸ τὸν ἀέρα μποροῦν νὰ διαδοθοῦν ἠχητικὰ κύματα. Τὰ τοιχώματα τοῦ σωλήνα ἔχουν ἄρκετὸ πάχος, γιὰ νὰ μὴ πάλλονται. Ἡ διέγερση τῆς στήλης τοῦ ἀέρα γίνεται μὲ μιά εἰδικὴ διάταξη, πού κοντὰ στὴ μιά ἄκρη τοῦ σωλήνα προκαλεῖ περιοδικές μεταβολές τῆς πίεσεως τοῦ ἀέρα. Συνήθως ἡ διέγερση τοῦ ἠχητικοῦ σωλήνα γίνεται μὲ *στόμιο* (σχ. 51). Τὸ ρεῦμα τοῦ ἀέρα πού διοχετεύουμε στὸ στόμιο σπάζει πάνω σὲ μιά λεπτὴ αἰχμὴ καὶ τότε σχηματίζονται δύο συστήματα στροβίλων τοῦ ἀέρα. Τὸ σύστημα πού σχηματίζεται μέσα στὸ σωλήνα δημιουργεῖ *διαμήκη κύματα*, πού διαδίδονται μέσα στὴ στήλη τοῦ ἀέρα. Ἡ ἄκρη τοῦ σωλήνα πού εἶναι ἀπέναντι ἀπὸ τὸ στόμιο εἶναι κλειστὴ ἢ ἀνοικτὴ. Ἔτσι οἱ ἠχητικοὶ σωλήνες διακρίνονται σὲ *κλειστούς* καὶ *ἀνοικτούς σωλήνες*.



Σχ. 51. Διέγερση ἠχητικοῦ σωλήνα μὲ στόμιο.

α. Κλειστοὶ ἠχητικοὶ σωλήνες. Μέσα στὸν ἀέρα τοῦ σωλήνα δημιουργοῦνται *διαμήκη κύματα* πού *ἀνακλῶνται* στὴν κλειστὴ ἄκρη τοῦ σωλήνα (ἀκίνητο ἐμπόδιο). Ὄταν ὑπάρχουν οἱ κατάλληλες συνθήκες (μῆκος τοῦ σωλήνα, συχνότητα διεγέρσεως), τότε ἀπὸ τὴ συμβολὴ τῶν δύο κυμάτων πού διαδίδονται μὲ ἀντίθετη φορά, σχηματίζονται μέσα στὸ σωλήνα *στάσιμα*

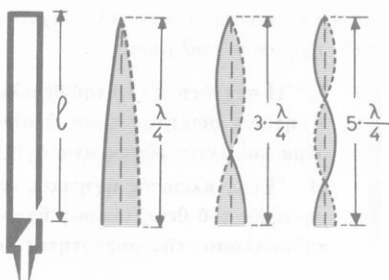


ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ "ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ"

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ "ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ"



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Οί εξισώσεις (2) και (3) δείχνουν ότι ισχύουν οί εξής νόμοι τῶν κλειστών ἤχητικῶν σωλήνων :

I. Ἡ συχνότητα (ν_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἕνας κλειστός ἤχητικός σωλήνας εἶναι ἀνάλογη μέ τήν ταχύτητα (c) τοῦ ἤχου στόν ἀέρα καί ἀντιστρόφως ἀνάλογη μέ τό μήκος (l) τοῦ σωλήνα.

II. Ἕνας κλειστός ἤχητικός σωλήνας μπορεῖ νά δώσει μόνο τούς ἄρμονικούς τοῦ θεμελιώδους ἤχου, πού οί συχνότητές τους εἶναι περιτό πολλαπλάσιο τῆς συχνότητας τοῦ θεμελιώδους ($\nu = 3\nu_1, 5\nu_1, 7\nu_1, \dots$).

β. Ἄνοιχτοί ἤχητικοί σωλήνες. Ἡ στήλη τοῦ ἀέρα πού εἶναι μέσα στοῦς ἀνοιχτούς ἤχητικούς σωλήνες συγκοινωνεῖ ἐλεύθερα μέ τήν ἀτμόσφαιρα καί ἡ ἀνάκλαση τῶν κυμάτων (σχ. 54) γίνεται στήν ἀνοιχτή ἄκρη τοῦ σωλήνα (κινητό ἐμπόδιο). Ἐπομένως καί στίς δύο ἄκρες τοῦ ἀνοιχτοῦ ἤχητικοῦ σωλήνα σχηματίζονται δύο κοιλίες (σχ. 55). Τό μήκος τοῦ σωλήνα εἶναι l καί τό μήκος ἑνός στάσιμου κύματος εἶναι $\lambda/2$. Ἄρα, ὅταν σχηματίζονται στάσιμα κύματα μέσα σέ ἕναν ἀνοιχτό σωλήνα, ἰσχύει ἡ σχέση:

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

Ἄπό τήν εξίσωση $c = \nu \cdot \lambda$ καί τήν εξίσωση (4) βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2l}{k} \quad \text{ἄρα}$$

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

Σχ. 54. Στίς δύο ἄκρες τοῦ ἀνοιχτοῦ ἤχητικοῦ σωλήνα σχηματίζονται κοιλίες.

Σχ. 55. Ὁ ἀνοιχτός ἤχητικός σωλήνας δίνει ὅλη τή σειρά τῶν ἄρμονικῶν τοῦ θεμελιώδους ἤχου.

Γιά $k = 1$ ὁ ἀνοιχτός ἠχητικός σωλήνας δίνει τό θεμελιώδη ἤχο (ἢ πρῶτο ἄρμονικό), πού ἔχει συχνότητα:

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

Γιά $k = 2, k = 3$ ὁ ἀνοιχτός ἠχητικός σωλήνας δίνει ἀντίστοιχα τό δεύτερο ἄρμονικό (v_2), τόν τρίτο ἄρμονικό (v_3):

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

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

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

I. Ἡ συχνότητα (v_1) τοῦ θεμελιώδους ἤχου πού παράγει ἀνοιχτός ἠχητικός σωλήνας εἶναι ἀνάλογη μέ τήν ταχύτητα (c) τοῦ ἤχου στόν ἄερα καί ἀντιστρόφως ἀνάλογη μέ τό μήκος (l) τοῦ σωλήνα.

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

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

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

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

49. Ὁ δίσκος μιᾶς σειρήνας ἔχει δύο ὁμόκεντρες σειρές ἀπό τρύπες. Ἡ ἐξωτερική σειρά ἔχει 40 τρύπες. Πόσες τρύπες πρέπει νά ἔχει ἡ ἐσωτερική σειρά, ὥστε οἱ συχνότητες τῶν δύο ἤχων πού ἀκοῦμε νά ἔχουν λόγο 3/2;

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

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

52. Μιά χορδή ἔχει μήκος 2 m, μάζα $2 \cdot 10^{-2}$ kgf καί τείνεται ἀπό δύναμη 1600 N.

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

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

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

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

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

57. Σέ ένα μουσικό όργανο δύο χορδές A και B έχουν τό ίδιο μήκος l , είναι από τό ίδιο ύλικό, τείνονται 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 A είναι $\delta_1 = 0,4 \text{ mm}$, πόση είναι ή διάμετρος δ_2 τής χορδής B; 2) 'Αν είναι $\nu_1 = 440 \text{ Hz}$, πόση είναι ή συχνότητα ν_2 ;

58. Σέ ένα βιολί μία χορδή του έχει μήκος $l_1 = 33 \text{ cm}$ και δίνει τό θεμελιώδη ήχο συχνότητας $\nu_1 = 440 \text{ Hz}$ (τό la_2). Σέ πόση απόσταση από τήν άνωτερη άκρη τής χορδής πρέπει ό βιολιστής να πιέσει μέ τό δάχτυλό του τή χορδή, ώστε τό υπόλοιπο τμήμα τής χορδής να δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_2 και να ισχύει ή σχέση $\nu_2/\nu_1 = 3/2$; Πόση είναι ή συχνότητα ν_2 ;

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

60. 'Ενας κλειστός ήχητικός σωλήνας δίνει θεμελιώδη ήχο πού έχει συχνότητα $\nu_0 = 400 \text{ Hz}$, όταν μέσα στό σωλήνα υπάρχει 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_0 , όταν, ή θερμοκρασία του άερα είναι 5° C . Πόση πρέπει να είναι ή ύψωση $\Delta\theta$ τής θερμοκρασίας ώστε ό σωλήνας να δίνει θεμελιώδη ήχο συχνότητας ν_0 και να ισχύει ή σχέση $\nu_0/\nu_5 = 1,059$; Τό μήκος του σωλήνα διατηρείται σταθερό.

62. 'Ενας μακρός γυάλινος σωλήνας διατηρείται κατακόρυφος και ή μία άκρη του είναι βυθισμένη μέσα σε νερό. 'Εμπρός από τήν άλλη άκρη του σωλήνα πάλλεται ένα διαπασών πού παράγει ήχο συχνότητας 512 Hz. Παρατηρούμε ότι υπάρχει 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 ενδιάμεση 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 άνοιχτοú σωλήνα οί όποίοι παράγουν τόν ίδιο θεμελιώδη ήχο συχνότητας $\nu = 174$ Hz, όταν ό άέρα μέσα στους δύο σωλήνες έχει θερμοκρασία 0°C και ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 331 m/sec.

64. Ένας άνοιχτός και ένας κλειστός σωλήνας έχουν τό ίδιο μήκος $l = 85$ cm και παράγουν τό θεμελιώδη ήχο, όταν ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 340 m/sec. 1) Άν ν_K και ν_A είναι οί συχνότητες των δύο ήχων, νά βρεθεί ό λόγος ν_K/ν_A . Ποίο γενικό συμπέρασμα βγαίνει για τούς κλειστούς και τούς άνοιχτούς σωλήνες; 2) Πόσο πρέπει νά είναι τό μήκος l_K του κλειστού σωλήνα, ώστε αυτός νά δίνει τόν ίδιο θεμελιώδη ήχο πού δίνει και ό άνοιχτός σωλήνας;

65. Ένας κλειστός ήχητικός σωλήνας έχει μήκος 1,5 m και παράγει τόν πέμπτο άρμονικό, όταν ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα είναι 342 m/sec. 1) Νά βρεθούν οί αποστάσεις των κοιλιών άπό τήν κλειστή άκρη του σωλήνα. 2) Νά εξετασθεί τό ίδιο θέμα, άν ό σωλήνας είναι άνοιχτός και έχει τό ίδιο μήκος μέ τόν κλειστό σωλήνα.

66. Ένας μακρύς σωλήνας ΒΓ είναι κλειστός στή μιá άκρη του Γ και περιέχει ένα άέριο, στό όποίο ή ταχύτητα του ήχου είναι 547 m/sec. Στήν άλλη άκρη Β του σωλήνα ύπάρχει μιá ήχητική πηγή πού παράγει ήχο συχνότητας ν . Μέσα στό σωλήνα σχηματίζονται στάσιμα κύματα και ή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών είναι $14/3$ m. 1) Πόση είναι ή συχνότητα ν του ήχου; 2) Τό πλάτος τής ταλαντώσεως τής ήχητικής πηγής είναι $a = 5$ mm. Πόσο είναι τό πλάτος Α τής ταλαντώσεως ενός λεπτού στρώματος άερίου πού βρίσκεται σέ απόσταση d άπό τήν κλειστή άκρη του σωλήνα ίση μέ $d = 0$ m, $7/3$ m και $14/3$ m; 3) Πόση είναι ή μέγιστη κινητική ενέργεια πού έχει μιá μάζα $m = 1$ gr του άερίου πού βρίσκεται σέ απόσταση $d = \lambda/4$ άπό τήν κλειστή άκρη του σωλήνα;

ΟΠΤΙΚΗ

Κυματική φύση του φωτός

36. Φυσική Όπτική

Στή *Γεωμετρική Όπτική* εξετάσαμε διάφορα οπτικά φαινόμενα, χωρίς να είναι απαραίτητο να ξέρουμε ποιά είναι η φύση του φωτός. Άλλά για να εξηγήσουμε πολλά άλλα οπτικά φαινόμενα, πρέπει πρώτα να διατυπώσουμε μία θεωρία για τη φύση του φωτός. Κατά το δέκατο έβδομο αιώνα διατυπώθηκαν οι πρώτες *φυσικές θεωρίες* για το φως και διαμορφώθηκε η **Φυσική Όπτική** που εξετάζει όλα γενικά τα οπτικά φαινόμενα με βάση μία θεωρία για τη φύση του φωτός.

37. Θεωρία της έκπομπης

Η *θεωρία της έκπομπης* διατυπώθηκε από το Νεύτωνα (1669), ο οποίος δέχτηκε ότι το φως που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή αποτελείται από μικρότατα *σωματίδια*, που είναι τελείως *ελαστικά* και διαδίδονται *εθύγραμμα*. Όταν ένα τέτοιο σωματίδιο πέσει πάνω στην επιφάνεια ενός καθρέφτη, τότε το σωματίδιο αυτό *ανακλάται*, όπως συμβαίνει και με μία τελείως ελαστική σφαίρα. Γενικά για τη *θεωρία της έκπομπης* συνάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- I. Η θεωρία της έκπομπης δέχεται ότι το φως είναι *άκτινοβολία σωματιδίων* (*σωματιδιακή άκτινοβολία*) και εξηγεί την *εθύγραμμη διάδοση*, την *ανάκλαση*, τη *διάθλαση* και την *ανάλυση* του λευκού φωτός.
- II. Η θεωρία της έκπομπης αποδεικνύει ότι η *ταχύτητα* (c) του φωτός *στά* οπτικώς πυκνότερα διαφανή μέσα (*νερό, γυαλί*) είναι *μεγαλύτερη* από την *ταχύτητα* (c_0) του φωτός *στό* κενό ή *στόν* αέρα (*δηλαδή είναι* $c > c_0$).

38. Θεωρία τών κυμάτων ελαστικότητας

Ο Huygens (1677) σχεδόν ταυτόχρονα με το Νεύτωνα διατύπωσε ότι το φως είναι κύματα ελαστικότητας που διαδίδονται διά μέσου του αιθέρα. Σύμφωνα με τη θεωρία του Huygens ο αιθέρας είναι ένα χωρίς βάρος διαφανές μέσο, απόλυτα ελαστικό που γεμίζει όλο το χώρο του Σύμπαντος και το χώρο που υπάρχει μεταξύ των μορίων των σωμάτων. Γενικά για την κυματική θεωρία του Huygens συνάγονται τὰ ἑξῆς συμπεράσματα:

I. Ἡ θεωρία τοῦ Huygens δέχεται ὅτι τὸ φῶς εἶναι κύματα ελαστικότητας, πού διαδίδονται σέ ἕνα ὑποθετικό ελαστικό μέσο, τόν αἰθέρα. Ἡ θεωρία αὐτή ἐξηγεῖ ὅλα τὰ ὀπτικά φαινόμενα πού ἐξηγεῖ καί ἡ θεωρία τῆς ἐκπομπῆς, ἀλλά ἐξηγεῖ καί τὰ φαινόμενα τῆς συμβολῆς, τῆς πολώσεως 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 ἄερα (δηλαδή εἶναι $c < c_0$).

Πειραματικά ἐπιβεβαιώνεται ὅτι ἡ ταχύτητα (c) τοῦ φωτός π.χ. στό νερό εἶναι μικρότερη ἀπό τήν ταχύτητα (c_0) τοῦ φωτός στόν ἄερα καί ἐπομένως ἐπαληθεύεται ἡ θεωρία τοῦ Huygens. Ἀλλά ἡ θεωρία αὐτή προϋποθέτει ὅτι τὸ ἀστρικό διάστημα εἶναι γεμάτο μέ τόν αἰθέρα. Μὲ ἀκριβῆ πειράματα ἀποδείχθηκε ὅτι ὁ αἰθέρας δέν ὑπάρχει.

39. Ἡ φύση τοῦ φωτός

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

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

β. Θεωρία τῶν κβάντα. Τό φῶς ἐκπέμπεται καί ἀπορροφᾶται ἀπό τὰ ἄτομα τῆς ὕλης. Ἀπό τήν παρατήρηση καταλήγουμε στό συμπέρασμα ὅτι τὰ ἄτομα ἐκπέμπουν καί ἀπορροφοῦν τίς ἀκτινοβολίες *συνεχῶς*. Αὐτή ὁμως ἡ ἀντίληψη γιά τήν ἐκπομπή καί τήν ἀπορρόφηση τῶν ἀκτινοβολιῶν δέν μπορεῖ νά ἐξηγήσει ὀρισμένα φαινόμενα πού παρατηροῦμε, ὅταν συμβαίνει κάποια δράση μεταξύ τῆς ἀκτινοβολίας καί τῆς ὕλης, ὅπως π.χ. συμβαίνει στό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο πού θά γνωρίσουμε στόν Ἡλεκτρισμό. Ὁ Planck (1900) γιά νά ἐξηγήσει μερικά ἀπό τὰ παραπάνω φαινόμενα διατύπωσε τή **θεωρία τῶν κβάντα**, τήν ὁποία ἀργότερα γενίκευσαν ὁ Einstein, ὁ Bohr καί ἄλλοι. Ἡ θεωρία τῶν κβάντα ἀποδείχτηκε ὅτι εἶναι μιὰ 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 ὁμάδες κυμάτων (*κυματοσυσρομοί*), πού καθεμιὰ ἀπό αὐτές ἀποτελεῖ *ἓνα φωτόνιο* καί κλείνει μέσα τῆς ὀρισμένη ἐνέργεια E . Ὄταν ἡ φωτεινή ἀκτινοβολία πέφτει πάνω στήν ὕλη, τό κάθε ἄτομο *ἀπορροφᾷ ἀσυνεχῶς* τήν ἀκτινοβολία, δηλαδή ἀπορροφᾷ ξεχωριστά φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιᾶς ἀκτινοβολίας, πού ἔχει συχνότητα ν , κλείνει μέσα του ἐνέργεια E πού εἶναι ἴση μέ:

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

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

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

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

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

Στά οπτικά φαινόμενα που θα εξετάσουμε παρακάτω θεωρούμε μόνο ότι το φως είναι *εγκάρσια κύματα*. Τά φωτόνια θά τά συναντήσουμε σέ άλλα φαινόμενα (*).

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

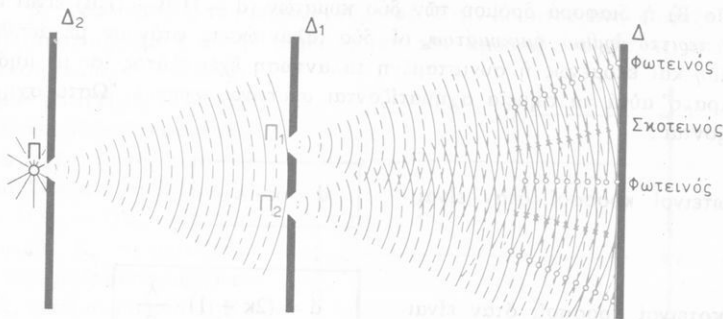
$$E = h \cdot \nu = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec} \cdot 4 \cdot 10^{14} \text{ sec}^{-1}$$

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

40. Συμβολή τοῦ φωτός

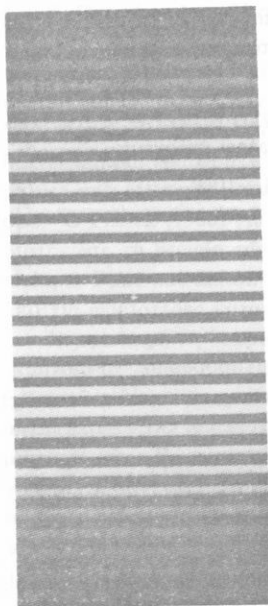
Τό φαινόμενο τῆς *συμβολῆς τοῦ φωτός* τό παρατηροῦμε μέ τή διάταξη που δίδει τό σχῆμα 56 (*σχισμές τοῦ Young*). Τό *μονοχρωματικό φῶς* μιᾶς ἰσχυρῆς φωτεινῆς πηγῆς περνάει ἀπό μιᾶ λεπτή σχισμῆ Π καί πέφτει πάνω σ' ἕνα διάφραγμα Δ_1 . Αὐτό ἔχει δύο πολύ λεπτές σχισμές Π_1 καί Π_2 που εἶναι παράλληλες μέ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

Ἡ σχηματισμός τῶν κροσσῶν συμβολῆς ἐξηγείται εὐκολα (σχ. 58).

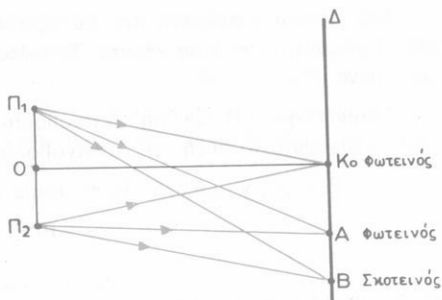


Σχ. 56. Διάταξη γιά τήν παραγωγή τοῦ φαινομένου τῆς συμβολῆς (σχισμές τοῦ Young).

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



Σχ. 57. Κροσσοί συμβολής.



Σχ. 58 Ὁ σχηματισμός φωτεινοῦ ἢ σκοτεινοῦ κροσσοῦ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τῆ διαφορά τῶν δρόμων τῶν δύο κυμάτων.

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

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

φωτεινοὶ κροσσοί, ὅταν εἶναι

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

σκοτεινοὶ κροσσοί, ὅταν εἶναι

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

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

I. Τό μήκος κύματος (λ) των όρατων ακτινοβολιών του φάσματος του λευκού φωτός ελαττώνεται συνεχώς, όσο προχωρούμε από την ερυθρή προς την ιώδη ακτινοβολία.

II. Τό μήκος κύματος των όρατων ακτινοβολιών περιλαμβάνεται μεταξύ $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ και $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

μήκος κύματος όρατων ακτινοβολιών	
ερυθρή ακτινοβολία :	λερυθρή = $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 8000 \text{ \AA}$
ιώδης ακτινοβολία :	λιώδης = $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 4000 \text{ \AA}$

Συχνότητα των όρατων ακτινοβολιών. Ή ταχύτητα του φωτός στο κενό ή στον άερα είναι $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$. Από την εξίσωση των κυμάτων $c = v \cdot \lambda$ βρίσκουμε ότι η συχνότητα των ακραίων όρατων ακτινοβολιών είναι:

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

καί

$$v_{\text{ερυθρή}} = 375 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$$

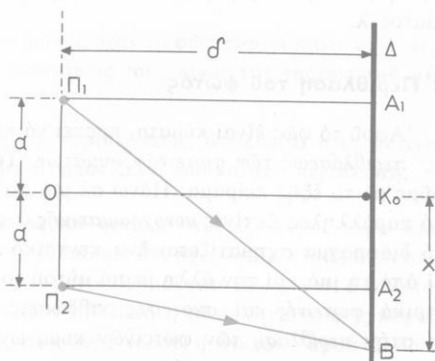
$$v_{\text{ιώδης}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}}{0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}}$$

καί

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

Ωστε η συχνότητα των όρατων ακτινοβολιών του φάσματος του λευκού φωτός *αυξάνει συνεχώς*, όσο προχωρούμε από την ερυθρή προς την ιώδη ακτινοβολία.

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



Σχ. 59. Για τή μέτρηση του μήκους κύματος λ μιάς ακτινοβολίας.

νοχρωματική ακτινοβολία που εκπέμπουν οι δύο φωτεινές πηγές Π_1 και Π_2 έχει μήκος κύματος λ . Σέ ένα σημείο B του διαφράγματος σχηματίζεται φωτεινός κροσσός, γιατί ή διαφορά δρόμου d των δύο κυμάτων είναι ίση μέ άκέραιο άριθμό κ κυμάτων, δηλαδή είναι :

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

Άπό τά όρθογώνια τρίγωνα $\Pi_1 A_1 B$ και $\Pi_2 A_2 B$ βρίσκουμε ότι είναι:

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

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

Άν αφαιρέσουμε κατά μέλη τίς εξισώσεις (2) και (3), έχουμε:

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

Έπειδή ή απόσταση $OK_0 = \delta$ είναι πολύ μεγάλη σχετικά μέ τήν απόσταση $K_0 A_2 = a$, μπορούμε νά λάβουμε $\Pi_1 B + \Pi_2 B = 2\delta$ και έπομένως ή εξίσωση (4) γράφεται:

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

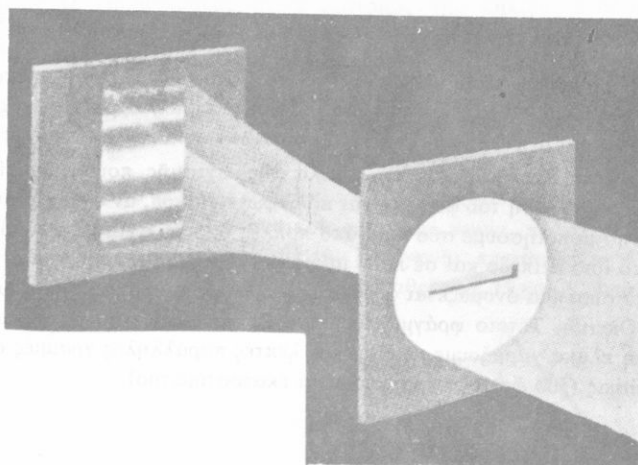
Άπό τίς εξισώσεις (1) και (5) βρίσκουμε ότι τό μήκος κύματος (λ) τής μονοχρωματικής ακτινοβολίας είναι:

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

Τό κ φανερώνει τόν αύξοντα άριθμό του φωτεινού κροσσού (στόν κεντρικό φωτεινό κροσσό αντιστοιχεί $\kappa = 0$) και τό x φανερώνει τήν απόσταση του κ τάξεως φωτεινού κροσσού από τόν κεντρικό φωτεινό κροσσό. Έτσι τά μεγέθη που είναι στό δεύτερο μέλος τής εξίσωσης (6) μπορούν νά μετρηθούν μέ ακρίβεια και έτσι μπορούμε νά υπολογίσουμε τό μήκος κύματος λ .

41. Περίθλαση του φωτός

Άφου τό φώς είναι κύματα, πρέπει νά παρουσιάζεται και τό φαινόμενο τής περιθλάσεως των φωτεινών κυμάτων. Τό φαινόμενο αυτό τό παρατηρούμε μέ τό εξής πείραμα: Πάνω σε μία πολύ λεπτή σχισμή πέφτει δέσμη από παράλληλες ακτίνες μονοχρωματικής ακτινοβολίας (σχ. 60). Τότε πάνω στό διάφραγμα σχηματίζεται ένα κεντρικό φωτεινό είδωλο τής σχισμής και από τή μία και τήν άλλη μεριά αυτού του ειδώλου σχηματίζονται συμμετρικά φωτεινές και σκοτεινές ραβδώσεις. Τό φαινόμενο αυτό όφείλεται στην περιθλάση των φωτεινών κυμάτων που πέφτουν πάνω στην λεπτή σχισμή. Φαινόμενα περιθλάσεως παρατηρούμε και όταν τό φώς πέφτει πάνω σε πολύ μικρά αντικείμενα ή πολύ λεπτές άκμές.



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

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

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

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

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

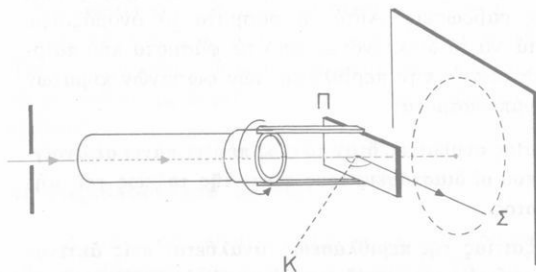
Το φαινόμενο της περιθλάσεως του φωτός έχει επίδραση στις παρα-

τηρήσεις 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 περιθλάση τοῦ φωτός καθορίζει ἕνα ὄριο *στή διαχωριστική ικανότητα* τῶν ὀπτικῶν ὀργάνων.

Φράγματα περιθλάσεως. Τά εἰδῶλα τῆς σχισμῆς πού σχηματίζονται ἀπό τήν περιθλάση τοῦ φωτός εἶναι πολύ φωτεινότερα, ἂν ἀντί γιά μιά σχισμή χρησιμοποιήσουμε σύστημα ἀπό πολλές ὁμοῖες 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, ἂν πάνω σέ μιά γυάλινη πλάκα χαραῖσουμε μέ διαμάντι λεπτές παράλληλες γραμμές σέ ἴσες ἀποστάσεις (500 ὡς 1000 γραμμές κατὰ ἑκατοστόμετρο).

42. Πόλωση τοῦ φωτός

α. Συμμετρία ἀπό περιστροφή τοῦ φυσικοῦ φωτός. Τό φῶς, πού προέρχεται ἀπό μιά φωτεινή πηγῆ, ἂν δέν ἔχει πάθει ἀνάκλαση ἢ διάθλαση, ὀνομάζεται *φυσικό φῶς*. Μιά γυάλινη πλάκα Π, πού ἡ μιά ἐπιφάνειά της ἔχει σκεπαστεῖ μέ ἕνα στρώμα καπνιάς (αἰθάλης) χρησιμοποιεῖται ὡς καθρέφτης¹. Ἀφήνουμε νά πέσει πλάγια πάνω στόν καθρέφτη Π μιά ἀκτίνα



Σχ. 61. Ὁ φωτισμός τῆς κηλίδας Σ δέ μεταβάλλεται.

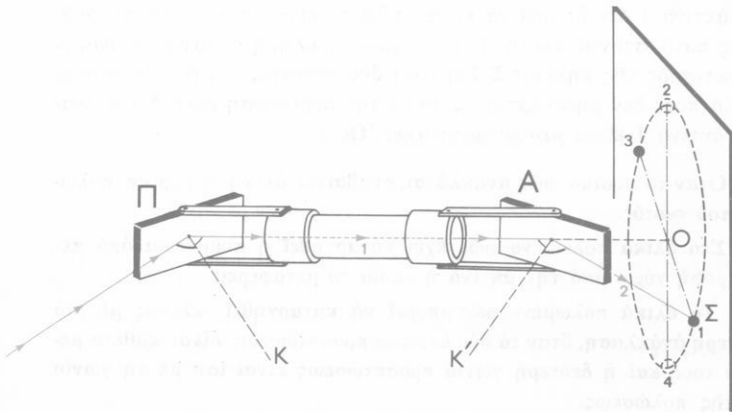
(δηλαδή μιά πολύ λεπτή δέσμη) φυσικοῦ φωτός (σχ. 61). Πάνω στό διάφραγμα σχηματίζεται μιά μικρή φωτεινή κηλίδα Σ. Περιστρέφουμε τόν καθρέφτη Π γύρω ἀπό τήν προσπίπτουσα ἀκτίνα, πού τήν παίρνουμε ὡς ἄξονα περιστροφῆς,

¹ Ἡ δέσμη φωτός, πού πέφτει στήν πλάκα Π δίνει μιά ἀνακλώμενη δέσμη καί μιά διαθλώμενη δέσμη πού ἀπορροφᾶται ἀπό τό στρώμα τῆς καπνιάς.

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

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

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



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

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

— είναι μέγιστος, όταν τά δύο επίπεδα προσπτώσεως συμπίπτουν (θέσεις της κηλίδας 1 και 3).

— είναι ίσος μέ μηδέν, όταν τά δύο επίπεδα προσπτώσεως είναι κάθετα μεταξύ τους (θέσεις της κηλίδας 2 και 4).

Από τό πείραμα αυτό συνάγεται ότι ή άκτίνα I, πού προκύπτει από τήν *ανάκλαση* του φυσικού φωτός, δέν έχει τίς ίδιες ιδιότητες μέ τήν άκτίνα του φυσικού φωτός, γιατί ή ανακλώμενη άκτίνα I μπορεί *νά καταργηθεί τελείως* μέ μιá δευτέρα *ανάκλαση*. Τότε λέμε ότι ή ανακλώμενη άκτίνα I είναι άκτίνα *πολωμένου φωτός*. Η όρισμένη γωνία (57°), μέ τήν όποία πρέπει *νά πέσει* ή άκτίνα του φυσικού φωτός πάνω στον καθρέφτη Π, για *νά πάθει πόλωση*, ονομάζεται *γωνία όλικής πολώσεως*. Ο πρώτος καθρέφτης Π πού προκαλεί τήν πόλωση, ονομάζεται *πολωτής*, ενώ ό δευτερος καθρέφτης Α ονομάζεται *αναλύτης*.

Αν ή άκτίνα του φυσικού φωτός πέσει πάνω στον πολωτή Π μέ γωνία διαφορετική από τή γωνία όλικής πολώσεως, τότε παρατηρούμε ότι ή ανακλώμενη άκτίνα I δέν μπορεί *νά καταργηθεί τελείως* μέ μιá δευτέρα *ανάκλαση* της πάνω στον αναλύτη Α. Κατά μιá όλόκληρη στροφή του αναλύτη Α ό φωτισμός της κηλίδας Σ λαβαίνει δύο μέγιστες και δύο ελάχιστες τιμές, αλλά ποτέ δέν μηδενίζεται. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι ή ανακλώμενη άκτίνα I είναι *μερικά πολωμένη*. Ωστε:

I. Όταν τό φυσικό φώς ανακλάται, συμβαίνει *όλική ή μερική πόλωση* του φωτός.

II. Στο *όλικά πολωμένο φώς* έχει καταργηθεί ή *συμμετρία* από περιστροφή γύρω από τήν άκτίνα ή όποία τό μεταφέρει.

III. Τό *όλικά πολωμένο φώς* μπορεί *νά καταργηθεί τελείως* μέ μιá δευτέρα *ανάκλαση*, όταν τά δύο επίπεδα προσπτώσεως είναι *κάθετα* μεταξύ τους και ή δευτέρα γωνία προσπτώσεως είναι *ίση* μέ τή γωνία *όλικής πολώσεως*.

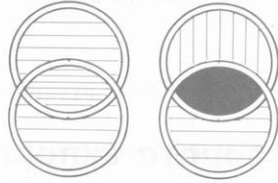
γ. Πόλωση του φωτός από διάθλαση. Πάνω σε μιá γυάλινη πλάκα αφήνουμε *νά πέσει* μιá λεπτή δέσμη φυσικού φωτός υπό γωνία προσπτώσεως *ίση* μέ τή γωνία *όλικής πολώσεως*. Τότε ένα μέρος (τά 8%) του φωτός *ανακλάται* και είναι *όλικά πολωμένο*. Τό υπόλοιπο μέρος (92%) του φωτός *διαθλάται*. Μέ έναν αναλύτη βρίσκουμε ότι τό διαθλώμενο φώς είναι *μερικά πολωμένο*. Ωστε μέ τό πείραμα βρίσκουμε ότι:

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

Σημείωση. Μέ διάθλαση μπορούμε *νά πετύχουμε* *όλική πόλωση* του φυσικού φωτός, αν χρησιμοποιήσουμε μιá δέσμη από 10 ως 20 *επάλληλες πλάκες*.

δ. Polaroid. Για τήν εύκολη παραγωγή *πολωμένου φωτός* χρησιμοποιούμε ένα τεχνητά παρασκευαζόμενο σωμα πού ονομάζεται *polaroid* (πο-

λωτικό σῶμα). Τό polaroid ἀποτελεῖται ἀπὸ ἓνα λεπτὸ διαφανές στρώμα ζελατίνης πού πάνω του ὑπάρχουν πάρα πολλοὶ μικρότατοι κρύσταλλοι μιᾶς οὐσίας πού λέγεται ἐραπαθίτης (εἶναι ἔνωση τῆς κινίνης). Τό polaroid τοποθετεῖται ἀνάμεσα σέ δύο λεπτές γυάλινες πλάκες. Αὐτὴ ἡ διάταξη ἀποτελεῖ ἓναν πολωτῆ. Μιά ἄλλη ὅμοια διάταξη μπορεῖ νά χρησιμοποιηθεῖ ὡς ἀναλύτης (σχ. 63). Τά polaroid χρησιμοποιοῦνται σέ πολλές ἐφαρμογές (ὅταν θέλουμε νά μετριάσουμε τὴν ἔνταση τοῦ φωτός πού μπαίνει στό μάτι μας, σέ φωτογραφικὰ φίλτρα, σέ ὀπτικά ὄργανα, σέ pare - brise κ.ἄ.).



Σχ. 63. Δίσκοι polaroid.

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_1 αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μέσα στό γυαλί, ἂν ὁ δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιοῦ γι' αὐτὴ τὴν 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, ἂν ὁ δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιοῦ ὡς πρὸς τὸν ἀέρα εἶναι $n = 3/2$.

69. Στό πείραμα τῆς συμβολῆς τοῦ φωτός μέ τίς σχισμές τοῦ Young βρίσκουμε ὅτι τό μήκος κύματος λ τῆς ἀκτινοβολίας δίνεται ἀπὸ τὴν 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 ἀπὸ τό διάφραγμα, x ἡ ἀπόσταση τοῦ k τάξεως φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπὸ τὸν κεντρικὸ φωτεινὸ κροσσὸ K . Σέ ἓνα τέτοιο πείραμα εἶναι $2a = 4 \text{ mm}$ καί $d = 60 \text{ cm}$. 1) Ἡ ἐρυθρὴ ἀκτινοβολία πού χρησιμοποιοῦμε ἔχει μήκος κύματος $\lambda_E = 4 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$. Πόση εἶναι ἡ ἀπόσταση x_E τοῦ πρώτου φωτεινοῦ κροσσοῦ ἀπὸ τὸν κεντρικὸ φωτεινὸ κροσσὸ K ; 2) Πόση εἶναι ἡ ἀπόσταση x_I τοῦ πρώτου φωτεινοῦ κροσσοῦ, ἂν χρησιμοποιήσουμε ἰώδη ἀκτινοβολία, πού ἔχει μήκος κύματος $\lambda_I = 8 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$:

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

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

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

73. Τό κάθε φωτόνιο μιᾶς ἰσῶδους ἀκτινοβολίας μεταφέρει ἐνέργεια $E_1 = 5 \cdot 10^{-19}$ Joule. Πόσα φωτόνια αὐτῆς τῆς ἀκτινοβολίας μεταφέρουν τήν ἐνέργεια E , πού χρειάζεται γιά νά ἀνυψοθεῖ μιᾶ μάζα $m = 10^{-3}$ gr σέ ὕψος $h = 1$ mm; $g = 10$ m/sec².

Φάσματα ἐκπομπῆς καί ἀπορροφήσεως

43. Φάσματα ἐκπομπῆς

Μέ τό φασματοσκόπιο ἐξετάζουμε τό φάσμα τοῦ φωτός πού ἐκπέμπουν οἱ διάφορες φωτεινές πηγές. Τά φάσματα αὐτά ὀνομάζονται *φάσματα ἐκπομπῆς*. Ἔτσι βρίσκουμε ὅτι τό φῶς πού ἐκπέμπει ἕνα *διάπυρο στερεό ἢ ὑγρό σώμα* σχηματίζει ἕνα *συνεχές φάσμα* πού ἀποτελεῖται ἀπό μιᾶ συνεχή σειρά ὀρατῶν ἀκτινοβολιῶν χωρίς καμιᾶ διακοπή. Τέτοιο φάσμα δίνουν π.χ. τό διάπυρο σύρμα τοῦ ἠλεκτρικοῦ λαμπτήρα, τό ἠλεκτρικό τόξο, ἢ φλόγα ἑνός κεριοῦ κ.λ. (βλ. ἐγχρωμη εἰκόνα ἐκτός κειμένου). Γιά νά πάρουμε τό φάσμα ἐκπομπῆς πού δίνουν οἱ διάπυροι ἀτμοί τῶν μετάλλων, βάζουμε μέσα στή φλόγα τοῦ λύχνου Bunsen ἕνα μικρό κομμάτι ἀπό τό μέταλλο ἢ ἀπό ἕνα ἄλας αὐτοῦ τοῦ μετάλλου. Ἔτσι π.χ. βρίσκουμε ὅτι οἱ *διάπυροι ἀτμοί* νατρίου δίνουν ἕνα φάσμα ἐκπομπῆς πού ἀποτελεῖται μόνο ἀπό *δύο κίτρινες γραμμές*, πού εἶναι ἢ μιᾶ πολύ κοντά στήν ἄλλη καί ἀντιστοιχοῦν σέ δύο ἀκτινοβολίες πού ἔχουν ὀρισμένο μήκος κύματος. Αὐτό τό φάσμα ἐκπομπῆς εἶναι *χαρακτηριστικό* τῶν διάπυρων ἀτμῶν νατρίου.

Τά σώματα πού στή συνθησιμένη θερμοκρασία εἶναι ἀέρια (π.χ. τό ὑδρογόνο, τό ὀξυγόνο, τό ἥλιο) τά ἀναγκάζουμε νά γίνουν φωτεινές πηγές μέ τό *σωλήνα Geissler* (σχ. 64). Αὐτός εἶναι γυάλινος σωλήνας, πού στίς δύο ἄκρες του ἔχει δύο ἠλεκτρόδια καί περιέχει ἀέριο μέ μικρῆ πίεση. Ὄταν μέσα στό σωλήνα παράγονται ἠλεκτρικές ἐκκενώσεις, τότε τό ἀέριο ἐκπέμπει φῶς καί ἰδιαίτερα φωτοβολεῖ τό ἀέριο πού εἶναι στό στενότερο τμήμα τοῦ σωλήνα. Ἔτσι βρίσκουμε ὅτι τό φάσμα ἐκπομπῆς τοῦ ὑδρογόνου ἀποτελεῖται μόνο ἀπό *τέσσερις φωτεινές γραμ-*



Σχ. 64 Σωλήνας Geissler γιά τή διεγερση τῆς φωτοβολίας ἀερίων.

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

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

II. Τά διάπυρα στερεά και υγρά σώματα δίνουν συνεχή φάσματα και έπομένως τό φώς πού εκπέμπουν αυτά τά σώματα άποτελείται από άκτινοβολίες, πού αντιστοιχούν σέ όλα τά μήκη κύματος των όρατων άκτινοβολιων.

III. Τά αέρια και οι άτμοί, όταν έχουν μικρή πίεση και φωτοβολούν, δίνουν γραμμικά φάσματα και έπομένως τό φώς πού εκπέμπουν άποτελείται μόνο από όρισμένες άκτινοβολίες, πού είναι *χαρακτηριστικές* για τό άτομο του καθενός στοιχείου.

44. Φάσματα απορροφήσεως

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

Στή συνηθισμένη θερμοκρασία κάθε διαφανές υλικό απορροφά όρισμένες άκτινοβολίες, πού είναι *χαρακτηριστικές* για τό κάθε διαφανές υλικό.

(*) Τά μήκη κύματος των τεσσάρων άκτινοβολιων πού υπάρχουν στο φάσμα έκπομπής του ύδρογόνου είναι:

0,658 μm 0,486 μm 0,434 μm 0,410 μm

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

“Ένα διάπυρο αέριο (ή ατμός) απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες που είναι ακριβώς ίδιες μέ τις ακτινοβολίες τις όποιες αυτό τό αέριο εκπέμπει.

β. Ήλιακό φάσμα. Μέ τό φασματοσκόπιο παρατηρούμε τό φάσμα του ήλιακού φωτός. Τότε βλέπουμε ότι τό ήλιακό φάσμα είναι ένα *ασυνεχές φάσμα* στό όποιο υπάρχουν πάρα πολλές σκοτεινές γραμμές (βλ. έγχρωμη εικόνα εκτός κειμένου). “Όστε τό ήλιακό φάσμα είναι ένα φάσμα απορροφήσεως. Μερικές από τις σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος όφείλονται στό ότι ή *ατμόσφαιρα τής Γής* απορροφά όρισμένες ακτινοβολίες του ήλιακού φωτός. Αυτές οι σκοτεινές γραμμές είναι ζωηρότερες, όταν ό Ήλιος βρίσκεται στόν όρίζοντα και εξασθενίζουν, όσο ό Ήλιος πλησιάζει πρός τό ζενίθ. Τις ίδιες σκοτεινές γραμμές παρατηρούμε και στό φάσμα του φωτός που εκπέμπει ένας φάρος που βρίσκεται σέ μεγάλη απόσταση από μάς.

Οι περισσότερες όμως σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος διατηρούν σταθερή ένταση, ανεξάρτητα από τήν τροχιά που διατρέχει τό ήλιακό φώς μέσα στήν ατμόσφαιρα τής Γής. “Αρα ή απορρόφηση των ακτινοβολιών που λείπουν από τό ήλιακό φώς συμβαίνει *πάνω στόν Ήλιο*. Πολλές από τις σκοτεινές γραμμές του ήλιακού φάσματος βρίσκονται ακριβώς στή θέση των φωτεινών γραμμών που δίνουν όρισμένα διάπυρα αέρια.” Έτσι π.χ. στό ήλιακό φάσμα υπάρχουν δύο σκοτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν στις δύο ακτινοβολίες που εκπέμπουν οι διάπυροι ατμοί του νατρίου. Ήπίσης υπάρχουν τέσσερις σκοτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν στό φάσμα έκπομπής του υδρογόνου. Από τή μελέτη του ήλιακού φάσματος κατέλη-

ξαν στό συμπέρασμα ὅτι στόν ἥλιο πρέπει νά διακρίνουμε δύο περιοχές πού ἀντίστοιχα ὀνομάζονται *φωτόσφαιρα* καί *χρωμόσφαιρα*. Ἡ *φωτόσφαιρα* ἀποτελεῖ τό ἐσωτερικό τμήμα τοῦ ἥλιου καί ἐκπέμπει ὅλη τή σειρά τῶν ἀκτινοβολιῶν τοῦ συνεχοῦς φάσματος, πού ἀντιστοιχεῖ στό λευκό φῶς. Ἡ *χρωμόσφαιρα* περιβάλλει τή φωτόσφαιρα καί ἀποτελεῖ τήν ἀτμόσφαιρα τοῦ ἥλιου. Αὐτή εἶναι ἕνα στρώμα ἀπό ἀέρια πού ἔχουν πολύ ψηλή θερμοκρασία. Σύμφωνα μέ τό νόμο τοῦ Kirchhoff τό λευκό φῶς πού ἐκπέμπει ἡ φωτόσφαιρα, καθώς περνάει μέσα ἀπό τή χρωμόσφαιρα, χάνει ὀρισμένες ἀκτινοβολίες, γιατί *τίς ἀπορροφῶν τά ἄτομα τῶν στοιχείων* πού βρίσκονται στή χρωμόσφαιρα. Ἔτσι στό φάσμα τοῦ ἡλιακοῦ φωτός πού φτάνει σέ μᾶς, ἐμφανίζονται σκοτεινές γραμμές. Ἐπειδῆ στό ἡλιακό φάσμα ἀναγνωρίζουμε τό χαρακτηριστικό *φάσμα ἀπορροφήσεως* ἑνός στοιχείου (π.χ. τοῦ νατρίου ἢ τοῦ ὕδρογόνου), συμπεραίνουμε ὅτι στή χρωμόσφαιρα ὑπάρχουν ἄτομα αὐτοῦ τοῦ στοιχείου. Ἔτσι ἀπό τή συστηματική μελέτη τοῦ ἡλιακοῦ φάσματος βρήκαμε ὅτι στή χρωμόσφαιρα τοῦ ἥλιου ὑπάρχουν μέ τή μορφή ἐλεύθερων ἀτόμων ὄλα τά γνωστά μας στοιχεῖα. Καί μάλιστα μερικά στοιχεῖα, ὅπως π.χ. *τό ἥλιο*, πρῶτα ἀνακαλύψαμε ἀπό τό χαρακτηριστικό τους φάσμα ἀπορροφήσεως ὅτι ὑπάρχουν στόν ἥλιο 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 ἄτομα ὄλων τῶν γνωστῶν στοιχείων.

45. Ἡ φασματοσκοπική ἔρευνα

Τά φάσματα έκπομπής καί ἀπορροφήσεως προσφέρουν μεγάλες ὑπερσίες. 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

46. Τρόποι παραγωγῆς φωτός

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

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

47. Φωταύγεια

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

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

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

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

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

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

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

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

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

48. Τό χρῶμα τοῦ οὐρανοῦ

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

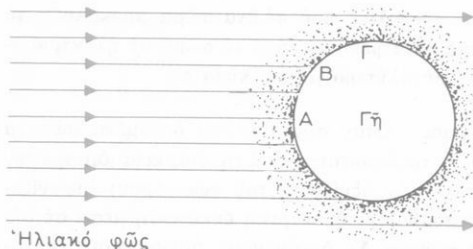
Διάχυση τοῦ φωτός προκαλοῦν καί τά μόρια τῶν ἀερίων καί γενικότερα τά μικρότατα ἄχρωμα σωματίδια πού εἶναι ἄτακτα διασκορπισμένα μέσα σέ ἓνα διαφανές ὕλικο, π.χ. μέσα στόν ἀτμοσφαιρικό ἀέρα. Πειραματικά βρήκαμε ὅτι σ' αὐτή τήν περίπτωση ἰσχύει ὁ ἐξῆς *νόμος τοῦ Rayleigh* :

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

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

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

Τό *κυνό χρώμα* του ούρανοῦ οφείλεται *στη διάχυση* του ἡλιακοῦ φωτός, που τήν προκαλοῦν τά μόρια τῶν συστατικῶν τῆς ἀτμόσφαιρας καί τά μικρότατα ἄχρωμα σωματίδια που αἰωροῦνται μέσα σ' αὐτή. Ὄταν ὁ Ἥλιος βρίσκεται ψηλά σχετικὰ μέ τόν ὀρίζοντα, τότε ἡ ἔνταση τῶν ἀκτινοβολιῶν που διαχέονται εἶναι πολύ μεγαλύτερη γιά τίς ἀκτινοβολίες που ἔχουν τά μικρότερα μήκη κύματος, δηλαδή γιά τίς κυανές καί τίς ιώδεις ἀκτινοβολίες (σχ. 64α). Ἔτσι στό φῶς που διαχέεται ἀπό τήν ἀτμόσφαιρα



Σχ. 64α. Τά μόρια τοῦ ἀέρα καί τά αἰωρούμενα μέσα σ' αὐτόν μικρά σωματίδια προκαλοῦν ἰσχυρότερη διάχυση τῆς κυανῆς ἀκτινοβολίας που ἔχει μικρότερο μήκος κύματος.

ἐξαιτίας τῆς διαχύσεως, τό μεγαλύτερο μέρος ἀπό τίς κυανές καί τίς ιώδεις ἀκτινοβολίες του. Ἔτσι τό φῶς που φτάνει σέ μᾶς ἔχει ἕνα *ἐρυθροκίτρινο χρώμα*, που οφείλεται στήν ἀνάμιξη τῶν ὑπόλοιπων ἀκτινοβολιῶν τοῦ ἡλιακοῦ φωτός. Ὄστε:

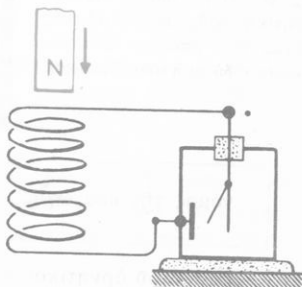
Τό *κυνό χρώμα* τοῦ οὔρανοῦ κατά τήν ἡμέρα καί οἱ *ἐρυθροκίτρινες ἀποχρώσεις* τοῦ οὔρανοῦ κατά τήν ἀνατολή καί τή δύση τοῦ Ἥλιου οφείλονται στήν ἰσχυρότερη διάχυση που παθαίνουν μέσα στήν ἀτμόσφαιρα οἱ κυανές καί οἱ ιώδεις ἀκτινοβολίες τοῦ ἡλιακοῦ φωτός, γιατί ἔχουν τά μικρότερα μήκη κύματος.

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Έπαγωγικά ρεύματα

49. Έπαγωγή

Τίς δύο άκρες ενός πηνίου με πολλές σπείρες τις συνδέουμε με ευαίσθητο ηλεκτρόμετρο (σχ. 65). Έτσι σχηματίζεται ένα ανοιχτό κύκλωμα. Πλησιάζουμε γρήγορα προς το πηνίο το βόρειο πόλο ενός μαγνήτη. Παρατηρούμε ότι το ηλεκτρόμετρο 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 άγωγου με τόν τρόπο που εξετάσαμε παραπάνω ονομάζεται **έπαγωγή**.

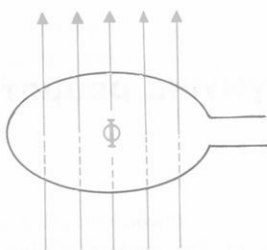


Σχ. 65. Στις άκρες του πηνίου ανάπτυσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από έπαγωγή.

α. Έξήγηση του φαινομένου της έπαγωγής. Είναι φανερό ότι αίτία του φαινομένου της έπαγωγής είναι ή κίνηση του μαγνήτη σχετικά με το πηνίο. Τότε μεταβάλλεται ή **μαγνητική ροή** (Φ) που περνάει από τις σπείρες του πηνίου. Σ' αυτή την περίπτωση αποδεικνύεται ότι το μετακινούμενο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσει σε κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο του άγωγού μία **ηλεκτρομαγνητική δύναμη** (F) που φέρνει το ηλεκτρόνιο στή μία άκρη του άγωγού. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του άγωγού συγκεντρώνονται στή μία άκρη του και έπομένως στις δύο άκρες του άγωγού εμφανίζεται **διαφορά δυναμικού από έπαγωγή** ($U_{\epsilon\pi\alpha\gamma\eta}$) ή άλλως **έπαγωγική τάση**.

Όσο χρόνο διαρκεί ή μεταβολή της μαγνητικής ροής, το πηνίο συμπεριφέρεται σαν **γεννήτρια**. Αυτή δέν δίνει ρεύμα στό κύκλωμα, αλλά διατηρεί μεταξύ των δύο πόλων της μία **διαφορά δυναμικού** ($U_{\epsilon\pi\alpha\gamma\eta}$), που είναι ίση με την **ηλεκτρεγερτική δύναμη έπαγωγής** ($E_{\epsilon\pi\alpha\gamma\eta}$), ή οποία χαρακτηρίζει αυτή τή γεννήτρια. Όστε:

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



Σχ. 66. Ή μεταβολή της μαγνητικής ροής δημιουργεί στις άκρες της σπείρας ήλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή.

β. Νόμος της επαγωγής. Άς θεωρήσουμε έναν άγωγο που δέν είναι κλειστός (σχ. 66). Στη διάρκεια του ελάχιστου χρόνου Δt ή μαγνητική ροή που περνάει από τον άγωγο μεταβάλλεται κατά $\Delta\Phi$. Σέ όλη τή διάρκεια του χρόνου Δt στις δύο άκρες του άγωγού αναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής ($E_{επαγ}$), για τήν όποια ισχύει ό εξής νόμος της επαγωγής :

Ή ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής, ή όποια αναπτύσσεται στις άκρες άγωγού που άποτελεί μιά σπείρα, είναι άνάλογη μέ τήν ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής.

$$\text{νόμος της επαγωγής} \quad E_{επαγ} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ σε Wb} \\ \Delta t \text{ σε sec} \\ E \text{ σε V} \end{array} \right. \quad (1)$$

Τή σημασία του άρνητικού σημείου θά μάθουμε παρακάτω. Άν ένα πηνίο έχει n σπείρες, τότε ό νόμος της επαγωγής δίνεται από τήν εξίσωση:

$$\text{νόμος της επαγωγής} \quad E_{επαγ} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot n$$

(για πηνίο)

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

γ. Μονάδα μαγνητικής ροής. Άπό τήν εξίσωση (1) έχουμε:

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

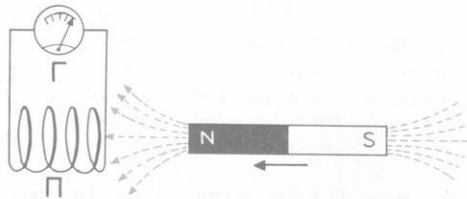
$$1 \text{ Weber} = 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ sec} \quad \text{ή} \quad 1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{sec}$$

Όστε για τή μονάδα μαγνητικής ροής στό σύστημα MKSA ισχύει ό εξής όρισμός:

1 Weber είναι ή μαγνητική ροή ή όποια, όταν περνάει από μία σπειρα και μέσα σε 1 δευτερόλεπτο ελαττώνεται ομοιόμορφα ως τήν τιμή μηδέν, αναπτύσσει ήλεκτρεγερτική δύναμη έπαγωγής ίση με 1 Volt.

50. Έπαγωγικά ρεύματα

Τίς δύο άκρες ενός πηνίου τίς συνδέουμε με ένα ευπαθές γαλβανόμετρο (σχ. 67). Έτσι σχηματίζεται ένα κλειστό κύκλωμα, αλλά στο κύκλωμα αυτό δέν υπάρχει γεννήτρια. Στή μία άκρη του πηνίου πλησιάζουμε γρήγορα τό βόρειο πόλο ευθύγραμμου μαγνήτη. Παρατηρούμε ότι τό κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, πού διαρκεί όσο διαρκεί καί ή κίνηση του μαγνήτη. Αν τώρα απομακρύνουμε γρήγορα τό βόρειο πόλο του μαγνήτη από τό πηνίο, τό κύκλωμα διαρρέεται πάλι από ρεύμα, πού έχει μικρή διάρκεια καί φορά αντίθετη με τή φορά πού είχε τό προηγούμενο ρεύμα. Τα ρεύματα πού παράγονται με αυτό τόν τρόπο μέσα σε ένα κλειστό κύκλωμα ονομάζονται **έπαγωγικά ρεύματα**.

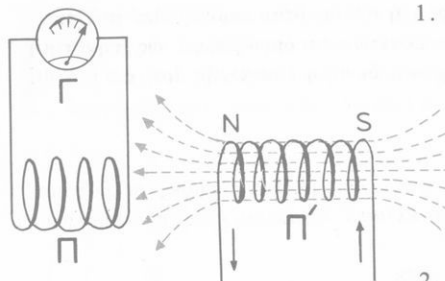


Σχ. 67. Η κίνηση του μαγνήτη σχετικά με τό πηνίο δημιουργεί μέσα στο κύκλωμα του πηνίου έπαγωγικά ρεύματα.

α. Αίτια παραγωγής των έπαγωγικών ρευμάτων. Όταν ο μαγνήτης πλησιάζει στο πηνίο ή απομακρύνεται από αυτό, τότε μεταβάλλεται ή **μαγνητική ροή** πού περνάει από τίς σπείρες του πηνίου καί επομένως στίς άκρες του πηνίου αναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική δύναμη από έπαγωγή ($E_{επαγ}$). Έπειδή τό κύκλωμα είναι κλειστό, γι' αυτό μέσα στο κύκλωμα κυκλοφορεί ένα **έπαγωγικό ρεύμα**. Ωστε τό έπαγωγικό ρεύμα είναι αποτέλεσμα του **φαινόμενου της έπαγωγής**. Σχετικά λοιπόν με τήν παραγωγή των έπαγωγικών ρευμάτων μπορούμε νά διατυπώσουμε τό εξής συμπέρασμα :

Όταν με όποιοδήποτε τρόπο μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή πού περνάει από ένα κλειστό κύκλωμα, τότε παράγονται μέσα στο κύκλωμα έπαγωγικά ρεύματα, πού διαρκούν όσο διαρκεί καί ή μεταβολή της μαγνητικής ροής.

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



Σχ. 68. Ἡ μετακίνηση τοῦ πηνίου Π' σχετικά μέ τό πηνίο Π ἢ ἡ μεταβολή τῆς ἐντάσεως I τοῦ ρεύματος στό πηνίο Π' δημιουργεῖ ἐπαγωγικό ρεύμα στό κύκλωμα τοῦ πηνίου Π.

1. Πλησιάζουμε στό πηνίο Π ἢ ἀπομακρύνουμε ἀπό αὐτό ἕναν εὐθύγραμμο μαγνήτη ἢ ἕνα ἄλλο πηνίο Π' πού διαρρέεται ἀπό ρεύμα (σχ. 68). Τό πηνίο Π' ἰσοδυναμεῖ μέ εὐθύγραμμο μαγνήτη. Καί στίς δύο περιπτώσεις μέσα στό κύκλωμα τοῦ πηνίου Π παράγονται ἐπαγωγικά ρεύματα.

2. Τά δύο πηνία Π καί Π' εἶναι ἀκίνητα καί τό ἕνα κοντά στό ἄλλο. Τότε τό πηνίο Π βρίσκεται μέσα στό μαγνητικό πεδίο πού δημιουργεῖ τό πηνίο Π', ἐπειδή αὐτό τό πηνίο διαρρέεται ἀπό ρεύμα ἐντάσεως I .

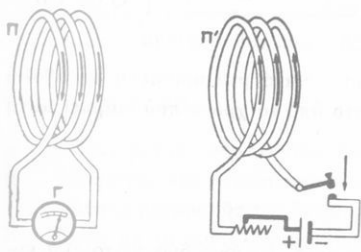
Κάθε μεταβολή τῆς ἐντάσεως I τοῦ ρεύματος στό πηνίο Π' προκαλεῖ μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ἐπαγωγῆς (B) τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου καί, ἐπομένως, προκαλεῖ μεταβολή τῆς μαγνητικῆς ροῆς πού περνάει ἀπό τό πηνίο Π. Ἐτσι κάθε μεταβολή τῆς ἐντάσεως I τοῦ ρεύματος στό πηνίο Π' δημιουργεῖ ἐπαγωγικό ρεύμα στό κύκλωμα τοῦ πηνίου Π.

3. Διατηροῦμε ἀκίνητο τό πηνίο Π (σχ. 67) καί περιστρέφουμε τόν εὐθύγραμμο μαγνήτη γύρω ἀπό ἕναν ἄξονα πού εἶναι κάθετος στόν ἄξονα τοῦ μαγνήτη καί περνάει ἀπό τό κέντρο τοῦ μαγνήτη. Τότε ἡ μαγνητική ροή πού περνάει ἀπό τό πηνίο Π μεταβάλλεται διαδοχικά μεταξὺ μιᾶς μέγιστης τιμῆς καί τῆς τιμῆς μηδέν.

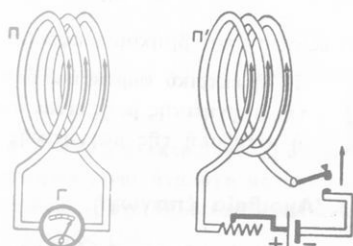
γ. Φορά τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος. Στή μιά ἄκρη τοῦ πηνίου Π (σχ. 67) πλησιάζουμε τό βόρειο πόλο (N) τοῦ μαγνήτη. Τότε τό ἐπαγωγικό ρεύμα μέσα στό πηνίο Π ἔχει τέτοια φορά, ὥστε σ' αὐτή τήν ἄκρη τοῦ πηνίου ἐμφανίζεται βόρειος πόλος. Ἀντίθετα, ὅταν ἀπομακρύνουμε τό βόρειο πόλο (N) τοῦ μαγνήτη, τό ἐπαγωγικό ρεύμα 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 έπαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε τό μαγνητικό πεδίο του νά αντίδρα στην αίτια πού προκαλεί τήν παραγωγή του έπαγωγικού ρεύματος.

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



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



Σχ. 70. Διακοπή ή ελάττωση της έντάσεως του ρεύματος δημιουργεί όμορροπο έπαγωγικό ρεύμα.

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

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

51. Ένταση του έπαγωγικού ρεύματος

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

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

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

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

52. Ήλεκτρικό φορτίο αναπτυσσόμενο από επαγωγή

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

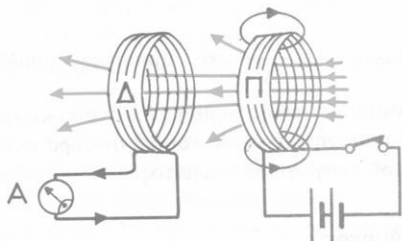
$$Q = I \cdot \Delta t = \frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t} \cdot \Delta t \quad \text{άρα} \quad Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ σε Wb} \\ R \text{ σε } \Omega \\ Q \text{ σε Cb} \end{array} \right.$$

Ή εξίσωση πού βρήκαμε εκφράζει τόν εξής νόμο τοῦ *Neumann* :

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

53. Άμοιβαία επαγωγή

α. Τό φαινόμενο τής άμοιβαίας επαγωγής. Έχουμε δύο γειτονικά κυκλώματα (σχ. 71). Τό κύκλωμα τοῦ πηνίου Π διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I , ένώ στό κύκλωμα τοῦ πηνίου Δ δέν υπάρχει γεννήτρια. Άν στό πηνίο Π μεταβληθεί ή ένταση τοῦ ρεύματος κατά ΔI , μεταβάλλεται και ή μαγνητική επαγωγή (B) τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τοῦ πηνίου Π . Τότε στό πηνίο Δ μεταβάλλεται ή μαγνητική ροή κατά $\Delta\Phi$ και έπομένως στίς άκρες τοῦ πηνίου Δ αναπτύσσεται ήλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής ($E_{\text{επαγ}}$). Αυτό τό φαινόμενο



Σχ. 71. Πειραματική απόδειξη τής άμοιβαίας επαγωγής.

νο ονομάζεται **άμοιβαία επαγωγή**. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μεταξύ τών δύο πηνίων (Π και Δ) υπάρχει **επαγωγική σύζευξη**.

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

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

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

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

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

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

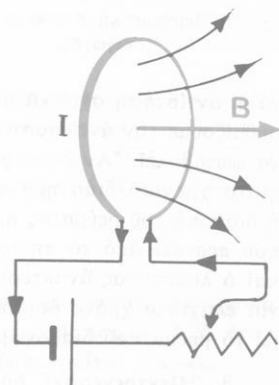
Τό αρνητικό σημείο δικαιολογείται από τό νόμο του Lenz. Ή εξίσωση (3) φανερώνει ότι:

Όταν μεταξύ δύο πηνίων υπάρχει σύζευξη, ή ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής που αναπτύσσεται στό ένα πηνίο είναι ανάλογη μέ τήν ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος στό άλλο πηνίο και ανάλογη μέ τό συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής (M).

Παρατήρηση. ΞΑν στόν εξίσωση (3) είναι $\Delta I = 1 \text{ A}$ και $\Delta t = 1 \text{ sec}$, τότε έχουμε: $|E_{επαγ}| = M$. ΞΑρα ό συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M εκφράζει τήν ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής που αναπτύσσεται στίς άκρες του πηνίου Δ , όταν στό άλλο πηνίο Π ή ταχύτητα μεταβολής τής έντάσεως του ρεύματος είναι 1 A/sec .

54. Αυτεπαγωγή

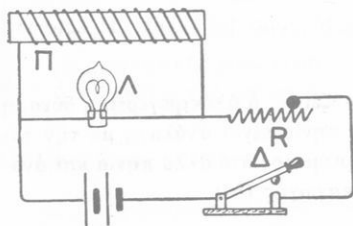
α. Τό φαινόμενο τής αυτεπαγωγής. ΞΕνας κυκλικός άγωγός άποτελεί μιά σπείρα και διαρρέεται άπό ρεύμα έντάσεως I (σχ. 72). Γύρω άπό τόν άγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο και άπό τήν επιφάνεια του άγωγού περνάει μαγνητική ροή Φ , που όφείλεται στό μαγνητικό πεδίο του ρεύματος. ΞΑν μεταβληθεί ή ένταση του ρεύματος κατά ΔI , τότε με-



Σχ. 72. ΞΗ μεταβολή τής έντάσεως I του ρεύματος προκαλεί μεταβολή τής μαγνητικής επαγωγής B και έτσι δημιουργείται μεταβολή τής μαγνητικής ροής που περνάει άπό τή σπείρα.

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

Έξαιτίας της αυτεπαγωγής δημιουργούνται μέσα στον άγωγο ρεύματα, που ονομάζονται **ρεύματα αυτεπαγωγής** και διαρκούν όσο διαρκεί ή μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον άγωγο. Σύμφωνα με το νόμο του Lenz, όταν *αυξάνει* ή ένταση του ρεύματος, το ρεύμα αυτεπαγωγής είναι *αντίρροπο* με το κύριο ρεύμα και προσπαθεί να εμποδίσει την αύξηση της έντασης του κύριου ρεύματος. Αντίθετα, όταν *ελαττώνεται* ή ένταση του ρεύματος, το ρεύμα αυτεπαγωγής είναι *όμόρροπο* με το κύριο ρεύμα και προσπαθεί να εμποδίσει την ελάττωση της έντασης του κύριου ρεύματος.



Σχ. 73. Πειραματική απόδειξη της αυτεπαγωγής.

Πειραματική απόδειξη της αυτεπαγωγής. Με τη διάταξη που δείχνει το σχήμα 73 μπορούμε να αποδείξουμε πειραματικά το φαινόμενο της αυτεπαγωγής. Το πηνίο έχει πυρήνα από μαλακό σίδηρο. Παράλληλα με το πηνίο συνδέεται ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας που έχει με-

γάλη αντίσταση σχετικά με την αντίσταση του πηνίου. Με ένα ροοστάτη ρυθμίζουμε την αντίσταση του κυκλώματος έτσι, ώστε ο λαμπτήρας μόλις να φωτοβολεί. Αν διακόψουμε άπτομα το ρεύμα, ο λαμπτήρας για ελάχιστο χρονικό διάστημα φωτοβολεί πολύ δυνατά. Αυτό συμβαίνει, γιατί ή διακοπή του ρεύματος προκαλεί άπτομη μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει από το πηνίο. Έτσι στο κύκλωμα που αποτελούν το πηνίο και ο λαμπτήρας αναπτύσσεται *ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής*, που για ελάχιστο χρόνο δημιουργεί ένα ισχυρό *ρεύμα αυτεπαγωγής*, όμορροπο με το ρεύμα που διακόψαμε.

β. Ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτεπαγωγής. Η μεταβολή $\Delta\Phi$ της μαγνητικής ροής που περνάει από την επιφάνεια του άγωγου είναι *ανάλογη* με τη μεταβολή ΔI της έντασης του ρεύματος, δηλαδή ισχύει ή σχέση:

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

δπου L είναι ένας συντελεστής αναλογίας, που ονομάζεται *συντελεστής αυτεπαγωγής* του άγωγου και εξαρτάται από *τό σχήμα* του άγωγου και

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Έτσι έχουμε τόν εξής όρισμό :

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

Στήν πράξη χρησιμοποιούμε συνήθως τά ύποπολλαπλάσια τής μονάδας Henry:

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

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

δ. Συντελεστής αὐτεπαγωγῆς πηνίου. Ἐνα πηνίο ἔχει μῆκος l καὶ ἀπότελεται ἀπὸ N σπείρες, πού καθεμιά ἔχει ἐμβαδὸ S . Ἀποδεικνύεται ὅτι ὁ συντελεστὴς αὐτεπαγωγῆς L_0 τοῦ πηνίου δίνεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση:

συντελεστής αὐτεπαγωγῆς
πηνίου χωρὶς πυρήνα

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

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

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

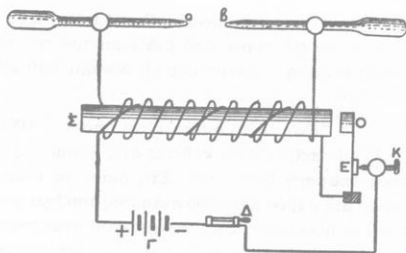
Τὸ φαινόμενο τῆς αὐτεπαγωγῆς εἶναι ἰδιαίτερα ἔντονο στὴν περίπτωσι πηνίου, γιατί αὐτὸ ἔχει πολλές σπείρες καὶ ἡ μεταβολὴ $\Delta\Phi$ τῆς μαγνητικῆς ροῆς εἶναι μεγάλη. Ἄν μάλιστα τὸ πηνίο ἔχει πυρήνα ἀπὸ μαλακὸ σίδηρο, τότε ἡ μεταβολὴ τῆς μαγνητικῆς ροῆς εἶναι ἀκόμη μεγαλύτερη.

55. Ἐπαγωγικὸ πηνίο

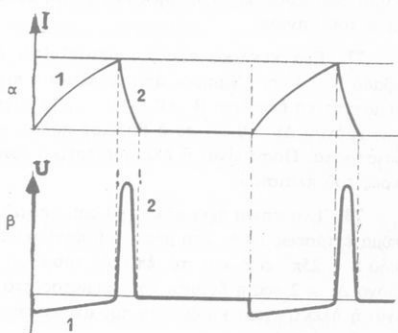
Τὸ *ἐπαγωγικὸ πηνίο* ἢ *πηνίο τοῦ Ruhmkorff* (σχ. 74) ἀποτελεῖται ἀπὸ ἕναν πυρήνα μαλακοῦ σιδήρου γύρω ἀπὸ τὸν ὁποῖο εἶναι τυλιγμένες οἱ λίγες σπείρες ἑνὸς πηνίου Π (πρωτεύον πηνίο). Αὐτὸ τὸ πηνίο Π βρίσκεται μέσα σὲ ἕνα ἄλλο πηνίο Δ (δευτερεύον πηνίο) πού ἀποτελεῖται ἀπὸ πολλές σπείρες ἑνὸς λεπτοῦ σύρματος.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

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

Τό έπαγωγικό πηνίο τό χρησιμοποιούσαν για να παράγουν ψηλές τάσεις. Σήμερα η χρήση του είναι περιορισμένη. Μιά μορφή έπαγωγικού πηνίου είναι ό *πολλαπλασιαστής*, που χρησιμοποιούμε στο αυτοκίνητο για τήν παραγωγή του ηλεκτρικού σπινθήρα στο βενζινοκινητήρα.



Σχ. 74. Έπαγωγικό πηνίο (σχηματική παράσταση)



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

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

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

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

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

76. Ένα πηνίο αποτελείται από $n = 1000$ σπείρες που καθεμία έχει έμβαδό $S = 50$ cm^2 . Οί σπείρες είναι κάθετες στις δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου που έχει μαγνητική επαγωγή $B = 2,8$ T. Στη διάρκεια ενός χρόνου $\Delta t = 0,04$ sec βάζουμε μέσα στο πηνίο μία ράβδο μαλακού σιδήρου, που έχει μαγνητική διαπερατότητα $\mu = 1240$. 1) Πόση είναι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του πηνίου; 2) Τό πηνίο έχοντας μέσα του τόν πυρήνα μαλακού σιδήρου στρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου, ώσπου οί σπείρες νά γίνουν παράλληλες μέ τίς δυναμικές γραμμές του πεδίου. Άν ή στροφή του πηνίου γίνει μέσα σε χρόνο $\Delta t = 0,01$ sec, πόση είναι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του πηνίου;

77. Ένα κυκλικό πλαίσιο αποτελείται από $n = 100$ σπείρες, που καθεμία έχει έμβαδό $S = 4$ cm^2 . Έμπρός από τό πλαίσιο περιστρέφεται ένας μαγνήτης, που δημιουργεί μαγνητική επαγωγή $B = 0,2 \cdot 10^{-4}$ T. Ό μαγνήτης περιστρέφεται έτσι, ώστε στη διάρκεια χρόνου $\Delta t = 0,25$ sec ό βόρειος πόλος νά παίρνει τή θέση του νότιου πόλου και αντίστροφα. Πόση είναι ή 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 έντάσεως 10 A. Στη μέση του πηνίου υπάρχει ένας κυκλικός άγωγός που έχει έμβαδό $S = 25\pi^2$ cm^2 και τό επίπεδό του είναι κάθετο στον άξονα του πηνίου. Μέσα σε χρόνο $\Delta t = 2$ sec ή ένταση του ρεύματος στο πηνίο αδέξνει από 10 A σε 15 A. Πόση είναι ή ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από επαγωγή στις άκρες του κυκλικού άγωγού; $\pi^2 \approx 10$.

79. Ένα κυκλικό πλαίσιο έχει άκτίνα 10 cm, αποτελείται από $n = 100$ σπείρες, έχει αντίσταση $R = 6,28$ Ω και άρχικά τό επίπεδό του ταυτίζεται μέ τό επίπεδο του μαγνητικού μεσημβρινού. Απότομα στρέφουμε τό πλαίσιο κατά 180° . Πόσο ηλεκτρικό φορτίο αναπτύχθηκε από επαγωγή στο πλαίσιο; Όριζόντια συνιστώσα τής μαγνητικής επαγωγής του γήινου μαγνητικού πεδίου $B_0 = 0,2 \cdot 10^{-4}$ T.

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

81. Ένα κυκλικό πλαίσιο αποτελείται από 100 σπείρες, που καθεμία έχει έμβαδό $S = 1$ m^2 . Τό πλαίσιο έχει αντίσταση $R = 1$ Ω και οί σπείρες του είναι κάθετες στις δυναμικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου. Οί δύο άκρες του πλαισίου συνδέονται μέ βαλλιστικό γαλβανόμετρο, που έχει αντίσταση $r = 9$ Ω και δείχνει τό ηλεκτρικό φορτίο που περνάει από τό κύκλωμα. Στρέφουμε απότομα τό πλαίσιο κατά 90° , ώστε τό επίπεδό του νά γίνει παράλληλο μέ τίς δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Τότε από τό γαλβανόμετρο περνάει ηλεκτρικό φορτίο $1/2500$ Cb. 1) Πόση είναι ή μαγνητική επαγωγή B του γήινου μαγνητικού πεδίου;

82. Οι δύο παράλληλες ράβδοι μιάς οριζόντιας και εθύγραμμης σιδηροδρομικής γραμμής στη μιά άκρη τους συνδέονται μεταξύ τους με άλλη μεταλλική ράβδο. Η απόσταση των δύο ράβδων της γραμμής είναι 144 cm. Πάνω στη γραμμή κινείται μιά σιδηροδρομική μηχανή με ταχύτητα 100 km/h. Νά βρεθεί η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή που αναπτύσσεται στις δύο άκρες ενός άξονα των τροχών της μηχανής. Κατακόρυφη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής του γήινου μαγνητικού πεδίου $B_K = 5 \cdot 10^{-4}$ T.

83. Ένα ρεύμα έντασεως 12 A διαρρέει πηνίο που έχει συντελεστή αυτεπαγωγής 0,2 H. Μέσα σε χρόνο 0,04 sec η ένταση του ρεύματος ελαττώνεται σε 3 A. 1) Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από αυτεπαγωγή στις άκρες του πηνίου; 2) Πόσο πρέπει να μεταβληθεί η ένταση του ρεύματος, για να είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή ίση με 30 V;

84. Ένα πηνίο έχει συντελεστή αυτεπαγωγής 0,063 H και διαρρέεται από ρεύμα έντασεως 2 A. Αν το ρεύμα διακοπεί μέσα σε χρόνο $\Delta t = 0,02$ sec, πόση ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή αναπτύσσεται στις άκρες του πηνίου;

85. Μεταξύ δύο κυκλωμάτων υπάρχει επαγωγική σύζευξη. Όταν στο πρώτο κύκλωμα η ένταση του ρεύματος μεταβάλλεται από $I_1 = 1000$ A σε $I_2 = 200$ A μέσα σε χρόνο $\Delta t = 1$ sec, τότε στο δεύτερο κύκλωμα αναπτύσσεται από επαγωγή ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 5$ V. 1) Πόσος είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M των δύο κυκλωμάτων; 2) Σε πόσο χρόνο πρέπει να γίνει η ίδια μεταβολή της έντασεως του ρεύματος, αν θέλουμε να είναι $E = 100$ V;

86. Ένα πηνίο έχει μήκος $l = 1$ m και αποτελείται από $n = 100$ σπείρες/cm. Κάθε σπείρα έχει ακτίνα $r = 6$ cm. 1) Πόσος είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής L του πηνίου; 2) Το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντασεως $I = 10$ A. Αν το ρεύμα διακοπεί μέσα σε χρόνο $\Delta t = 0,5$ sec, πόση ηλεκτρεγερτική δύναμη αναπτύσσεται από αυτεπαγωγή στις άκρες του πηνίου; 3) Αν μέσα στο πηνίο βάλουμε πυρήνα μαλακού σιδήρου, που έχει μαγνητική διαπερατότητα $\mu = 1000$, πόσος γίνεται ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από αυτεπαγωγή, όταν το ρεύμα έντασεως 10 A καταργείται μέσα σε 0,5 sec;

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

'Εναλλασσόμενο ρεύμα

56. 'Εξισώσεις του έναλλασσόμενου ρεύματος

α. Μεταβολή τής μαγνητικής ροής. Ένα ορθογώνιο πλαίσιο από χάλκινο σύρμα, πού ή επιφάνειά του έχει έμβαδό S, στρέφεται μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο, πού έχει μαγνητική έπαγωγή B (σχ. 76). 'Ο 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 εξίσωση:

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

όπου α είναι ή γωνία πού σχηματίζει ή διεύθυνση τής μαγνητικής έπαγωγής \vec{B} μέ τήν κάθετο στήν επιφάνεια του πλαισίου. 'Όταν τό πλαίσιο είναι κάθετό στις δυναμικές γραμμές του πεδίου ($\alpha = 0$, $\alpha = \pi$), τότε ή μαγνητική ροή έχει τή μέγιστη απόλυτη τιμή:

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

Καί 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 τιμή t ή γωνία α είναι ίση μέ $\alpha = \omega t$.

Σχ. 76. 'Η όμαλή περιστροφή του πλαισίου μέσα στο όμογενές μαγνητικό πεδίο δημιουργεί στις άκρες του πλαισίου ήμιτονοειδή τάση $U_0 = U_0 \cdot \eta\mu \omega t$

'Επομένως ή εξίσωση (1) γράφεται :

μεταβολή τής μαγνητικής ροής	$\Phi = B \cdot S \cdot \sigma\upsilon\upsilon\omega t$	$\left\{ \begin{array}{l} B \text{ σε T, } S \text{ σε m}^2 \\ \Phi \text{ σε Wb} \end{array} \right. \quad (2)$
---------------------------------	---------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

'Η εξίσωση (2) φανερώνει ότι:

'Όταν τό πλαίσιο στρέφεται όμαλά, ή μαγνητική ροή πού περνάει από τό πλαίσιο είναι άρμονική συνάρτηση του χρόνου.

Τό μέγεθος ω όνομάζεται *γωνιακή συχνότητα* και συνδέεται μέ τήν περίοδο T και τή συχνότητα ν μέ τή γνωστή σχέση $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$.

β. 'Εναλλασσόμενη τάση. 'Όταν τό πλαίσιο στρέφεται, ή μαγνητική ροή πού περνάει από αυτό συνεχώς μεταβάλλεται σύμφωνα μέ τήν εξίσωση

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

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

Όταν γίνεται $\eta \mu \omega t = \pm 1$, τότε η επαγωγική τάση αποκτά τη μέγιστη απόλυτη τιμή U_0 , που ονομάζεται **πλάτος της τάσεως** και έχει μέτρο ίσο με:

πλάτος της τάσεως $U_0 = \omega \cdot B \cdot S$	$\begin{cases} B \text{ σε T, } S \text{ σε m}^2 \\ U_0 \text{ σε V} \end{cases}$
--------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------

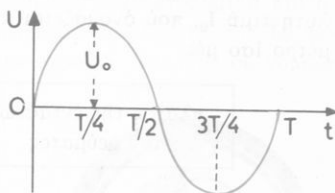
Όστε η εξίσωση (3) που δίνει τη στιγμιαία τάση γράφεται:

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

Η εξίσωση (4) φανερώνει ότι:

Όταν ένα συμπαγές πλαίσιο στρέφεται ομαλά μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, τότε στις δύο άκρες του πλαισίου αναπτύσσεται επαγωγική τάση, που το μέτρο της είναι ήμιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου.

Αυτή η επαγωγική τάση ονομάζεται ήμιτονοειδής έναλλασσόμενη τάση ή και απλά **έναλλασσόμενη 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 77. Από τις εξισώσεις (2) και (4) σχηματίζουμε τον εξής πίνακα:



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

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

(*) Από τα Μαθηματικά ξέρουμε ότι η συνάρτηση $y = a \cdot \sin \omega x$ έχει παράγωγο $\frac{dy}{dx} = a \omega \cdot \cos \omega x$ όπου a είναι σταθερός παράγοντας.

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

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

γ. Τό ρεύμα στο έξωτερικό κύκλωμα. Οί άκρες του πλαισίου συνδέονται με δύο μονωμένους δακτυλίους που είναι στερεωμένοι στον άξονα περιστροφής και στρέφονται μαζί με τό πλαίσιο (σχ. 76).

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

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

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

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

Όστε ή εξίσωση (5) γράφεται:

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

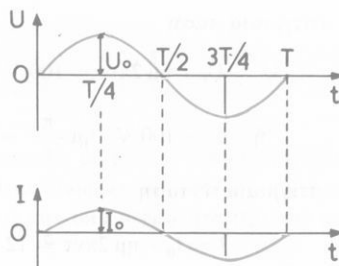
Ή εξίσωση (6) φανερώνει ότι:

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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



Σχ. 79. Μονοφασικός έναλλακτηράς

ή στιγμιαία τάση

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

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

ή στιγμιαία ένταση

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

57. 'Αποτελέσματα του έναλλασσόμενου ρεύματος

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

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

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

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

58. Ένεργός ένταση έναλλασσόμενου ρεύματος

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

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

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

Αποδεικνύεται ότι:

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

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

Η ένεργός ένταση του έναλλασσόμενου ρεύματος μετριέται άμέσως μέ τό θερμικά άμπερόμετρα.

59. Ένεργός τάση

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

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

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

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

Τή στιγμή πού στίς άκρες τής αντίστασεως R ή έναλλασσόμενη τάση έχει τήν τιμή U_0 , τότε ισχύει ή εξίσωση:

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

Έτσι από τίς εξισώσεις (1) καί (2) βρίσκουμε ότι:

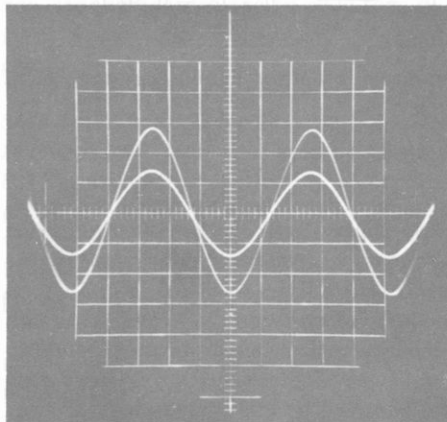
Ή **ένεργός τάση** ($U_{εν}$) μιās **έναλλασσόμενης τάσεως** είναι ίση μέ τό **πηλίκο του πλάτους τής τάσεως** (U_0) **διά τής τετραγωνικής ρίζας του 2**.

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

60. Ό νόμος του Ohm σε κύκλωμα μέ ωμική αντίσταση

Ένα κύκλωμα αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R καί στίς άκρες τής εφαρμόζεται ή έναλλασσόμενη τάση:

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



Σχ. 80. Παρατήρηση στόν παλμογράφο. Οί καμπύλες τής τάσεως U καί τής έντάσεως ρεύματος I έχουν τήν ίδια φάση.

Στό έναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας ή αντίσταση R συμπεριφέρεται όπως καί στό συνεχές ρεύμα, δηλαδή όλη ή ήλεκτρική ένέργεια μετατρέπεται πάνω στήν αντίσταση R σε θερμότητα. Ή αντίσταση R διαρρέεται από έναλλασσόμενο ρεύμα πού ή στιγμιαία έντασή του, σύμφωνα μέ τό νόμο του Ohm, είναι:

$$I = \frac{U}{R}$$

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

Οί εξισώσεις (1) καί (2) δείχνουν ότι ή τάση (U) καί ή ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε **τήν ίδια φάση** (σχ. 80). Από τήν εξίσωση (2) βρίσκουμε ότι τό πλάτος (I_0) τής έντάσεως του ρεύματος είναι :

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

Ξέρουμε ότι είναι:

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

*Αν βάλουμε αυτές τις τιμές των I_0 και U_0 στην εξίσωση (3), βρίσκουμε ότι σ' αυτή την περίπτωση ο νόμος του Ohm δίνεται από την εξίσωση:

νόμος του Ohm
$$I_{ev} = \frac{U_{ev}}{R}$$

*Από τα παραπάνω συνάγονται τα εξής συμπεράσματα:

I. Σέ κύκλωμα πού αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R ή τάση (U) καί ή ένταση (I) του ρεύματος έχουν πάντοτε την ίδια φάση.

II. Η ενεργός ένταση του ρεύματος (I_{ev}) είναι ίση με τό πηλίκο τής ενεργού τάσεως (U_{ev}) διά τής ωμικής αντιστάσεως (R) του κυκλώματος.

Παρατήρηση. Σέ ένα κύκλωμα έναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί νά υπάρχουν ωμική αντίσταση R , πηνίο μέ συντελεστή αυτεπαγωγής L καί πυκνωτής μέ χωρητικότητα C . Σ' αυτή την περίπτωση ο νόμος του Ohm εκφράζεται μέ διαφορετική εξίσωση.

61. Μέση Ισχύς του έναλλασσόμενου ρεύματος

*Έχουμε ένα κύκλωμα πού αποτελείται μόνο από ωμική αντίσταση R . *Αν στίς άκρες του κυκλώματος εφαρμόσουμε μιá σταθερή τάση U , τό κύκλωμα διαρρέεται από συνεχές ρεύμα πού έχει σταθερή ένταση I . *Επειδή τά μεγέθη U καί I είναι σταθερά, ή ισχύς $P = U \cdot I$ του συνεχούς ρεύματος είναι σταθερή.

*Αν όμως στίς άκρες του κυκλώματος εφαρμόσουμε μιá έναλλασσόμενη τάση $U = U_0 \cdot \eta\mu \omega t$, τότε τό κύκλωμα διαρρέεται από έναλλασσόμενο ρεύμα πού έχει στιγμιαία ένταση $I = I_0 \cdot \eta\mu \omega t$. *Επομένως στή διάρκεια μιáς περιόδου T ή ισχύς $P = U \cdot I$ του έναλλασσόμενου ρεύματος συνεχώς μεταβάλλεται. Στή διάρκεια μιáς περιόδου T τό κύκλωμα παίρνει από τή γεννήτρια ενέργεια E_T . *Αρα στή διάρκεια μιáς περιόδου T ή μέση ισχύς P_M του έναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

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

*Αποδεικνύεται ότι:

Σέ κύκλωμα πού άποτελείται μόνο άπό ώμική αντίσταση (R) ή μέση ισχύς (P_M) του έναλλασσόμενου ρεύματος είναι άνάλογη μέ τήν ένεργό τάση ($U_{εν}$) και τήν ένεργό ένταση ($I_{εν}$) του ρεύματος.

μέση ισχύς έναλλασ-
σόμενου ρεύματος

$$P_M = U_{εν} \cdot I_{εν}$$

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

Ένεργεια του έναλλασσόμενου ρεύματος. Στίς άκρες ενός κυκλώματος πού άποτελείται μόνο άπό ώμική αντίσταση R έφαρμόζεται ένεργός τάση $U_{εν}$. Τότε τό έναλλασσόμενο ρεύμα έχει ένεργό ένταση $I_{εν} = U_{εν}/R$ και μέση ισχύ $P_M = U_{εν} \cdot I_{εν}$. Άν τό ρεύμα διαρρέει τό κύκλωμα επί χρόνο t , τότε τό ρεύμα μεταφέρει *ήλεκτρική ένεργεια* ($E_{ηλεκ}$) πού είναι ίση μέ :

$$\text{ήλεκτρική ένεργεια } E_{ηλεκ} = P_M \cdot t \quad \text{ή} \quad E_{ηλεκ} = U_{εν} \cdot I_{εν} \cdot t \quad (2)$$

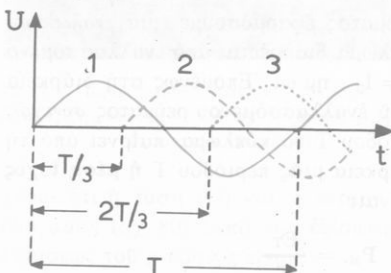
Έπειδή τό κύκλωμα άποτελείται μόνο άπό ώμική έντίσταση (R), όλη αυτή ή ήλεκτρική ένεργεια μετατρέπεται πάνω στήν αντίσταση R σέ *θερμότητα*.

Σύμφωνα μέ τό νόμο του Ohm είναι $U_{εν} = I_{εν} \cdot R$. Άρα οί εξισώσεις (1) και (2) γράφονται και έτσι:

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

62. Τριφασικό ρεύμα

α. Όρισμός. Οί μονοφασικοί έναλλακτήρες παράγουν έναλλασσόμενο ρεύμα, πού όνομάζεται *μονοφασικό ρεύμα*. Άν τό έξωτερικό κύκλωμα άποτελείται μόνο άπό ώμική αντίσταση (R), τότε οί εξισώσεις του έναλλασσόμενου ρεύματος είναι:



Σχ. 81. Τρία όμοια ρεύματα έχουν τό ένα μέ τό άλλο διαφορά φάσεως 120° ή $T/3$.

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

Άς θεωρήσουμε *τρία μονοφασικά ρεύματα* πού έχουν τήν ίδια περίοδο T , τό ίδιο πλάτος τάσεως U_0 , τό ίδιο πλάτος έντάσεως ρεύματος I_0 , αλλά παρουσιάζουν μεταξύ τους *διαφορά φάσεως* 120° . Αυτό σημαίνει ότι σέ καθένα άπό αυτά τά τρία ρεύματα ή τάση (U) και ή ένταση (I) του ρεύματος άποκτούν τή μέγιστη τιμή τους (U_0

καί I_0) με καθυστέρηση ίση με ένα τρίτο της περιόδου ($T/3$) σχετικά με το προηγούμενο (σχ. 81). Τότε γι' αυτά τὰ τρία ρεύματα θά ισχύουν αντίστοιχα οί εξισώσεις :

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

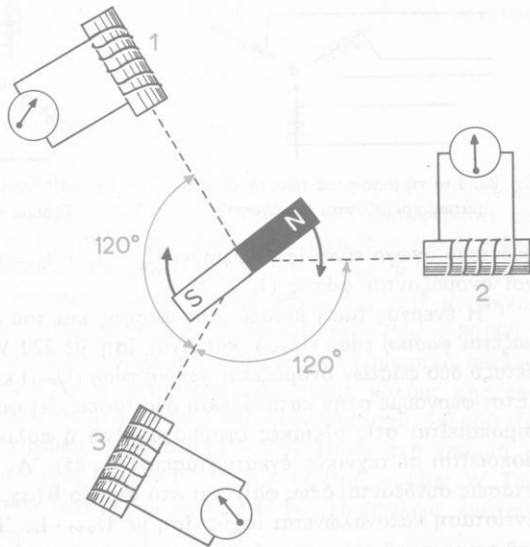
$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 \cdot \eta\mu \omega t \\ I_2 &= I_0 \cdot \eta\mu (\omega t + 120^\circ) \\ I_3 &= I_0 \cdot \eta\mu (\omega t + 240^\circ) \end{aligned} \right\} (2)$$

Αυτό τὸ σύστημα τῶν τριῶν ρευμάτων ὀνομάζεται *τριφασικὸ ρεῦμα*. Ὡστε :

Τριφασικὸ ρεῦμα εἶναι ἓνα σύστημα ἀπὸ τρία ἑναλλασσόμενα ρεύματα, πού ἔχουν τὸ ἴδιο πλάτος τάσεως (U_0) καὶ ἐντάσεως ρεύματος (I_0) καὶ τὴν ἴδια περίοδο (T), ἀλλὰ τὸ καθένα παρουσιάζει διαφορὰ φάσεως 120° σχετικά με καθένα ἀπὸ τὰ ἄλλα δύο, δηλαδή παρουσιάζει μιὰ χρονικὴ διαφορὰ ἴση με $T/3$.

β. Παραγωγή τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος. Γιά τὴν παραγωγή τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος χρησιμοποιοῦμε τὸν *τριφασικὸ ἑναλλακτήρα*, πού ἡ λειτουργία του στηρίζεται στὴν ἐξῆς ἀρχή: Τρία ὅμοια πηνία (ἐπαγωγίμο) τοποθετοῦνται πάνω

σὲ ὀριζόντιο ἐπίπεδο ἔτσι, ὥστε οἱ ἄξονές τους νά σχηματίζουν μεταξὺ τους γωνίες 120° (σχ. 82). Πάνω στό ἴδιο ἐπίπεδο περιστρέφεται με σταθερὴ γωνιακὴ ταχύτητα εὐθύγραμμος μαγνήτης ἢ ηλεκτρομαγνήτης (*ἐπαγωγέας*). Τότε στὶς ἄκρες κάθε πηνίου ἀναπτύσσεται ἑναλλασσόμενη τάση. Ὄταν ὁμοῦς ἡ τάση ἀποκτᾷ τὴ μέγιστη τιμὴ της (U_0) στό πηνίο 1, τότε στό ἐπόμενο πηνίο 2 ἡ τάση ἀποκτᾷ τὴ μέγιστη

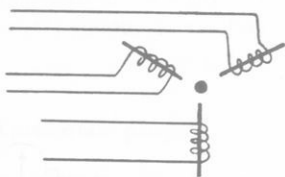


Σχ. 82. Σχηματικὴ παράσταση γιὰ τὴν ἐξήγηση τῆς παραγωγῆς τοῦ τριφασικοῦ ρεύματος.

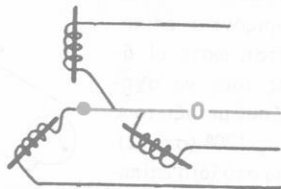
τιμή της μέ καθυστέρηση ίση με $T/3$, δηλαδή ή τάση στο πηνίο 2 παρουσιάζει διαφορά φάσεως 120° σχετικά με την τάση στο πηνίο 1. Τό ίδιο συμβαίνει μεταξύ των πηνίων 2 και 3. Έτσι σε μία χρονική στιγμή t ή στιγμιαία τάση στις άκρες των τριών πηνίων είναι U_1, U_2, U_3 και εκφράζονται από τις εξισώσεις (1). Αν οι άκρες των τριών πηνίων συνδεθούν με τρεις ίσες ώμικές αντιστάσεις (R), τότε σχηματίζονται τρία κυκλώματα, στά όποια κυκλοφορούν τρία εναλλασσόμενα ρεύματα που αποτελούν τό τριφασικό ρεύμα. Στη χρονική στιγμή t ή στιγμιαία ένταση των τριών ρευμάτων είναι I_1, I_2, I_3 και εκφράζονται από τις εξισώσεις (2).

Αν προσθέσουμε κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε: $U_1 + U_2 + U_3 = 0$ και $I_1 + I_2 + I_3 = 0$. Άρα στο τριφασικό ρεύμα τό άθροισμα των στιγμιαίων τάσεων καθώς και τό άθροισμα των στιγμιαίων εντάσεων των τριών ρευμάτων είναι σε κάθε στιγμή ίσο με μηδέν.

γ. Μεταφορά του τριφασικού ρεύματος. Γιά τή μεταφορά του τριφασικού ρεύματος φαίνεται ότι χρειάζονται έξι άγωγοί (σχ. 83). Αν όμως ή μία άκρη κάθε πηνίου συνδεθεί με τόν ίδιο άγωγό, που ονομάζεται ουδέτερος άγωγός (0), τότε γιά τή μεταφορά του τριφασικού ρεύματος χρειάζονται μόνο τέσσερις άγωγοί (σχ. 84). Η όλική ένταση του ρεύματος στον



Σχ. 83. Γιά τή μεταφορά των τριών ρευμάτων χρειάζονται έξι άγωγοί.

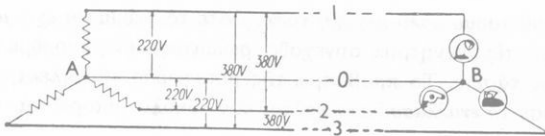


Σχ. 84. Αντί γιά τούς τρεις άγωγούς έχουμε τόν ουδέτερο άγωγό (0).

ουδέτερο άγωγό είναι ίση με μηδέν ($I_1 + I_2 + I_3 = 0$). Οί άλλοι τρεις άγωγοί ονομάζονται φάσεις (1, 2, 3).

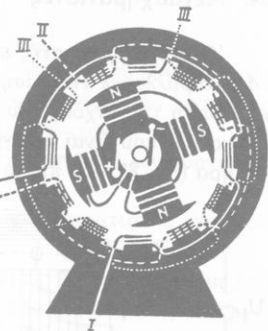
Η ενεργός τάση μεταξύ μιάς φάσεως και του ουδέτερου άγωγού ονομάζεται φασική τάση ($U_{φασ}$) και είναι ίση με 220 V. Ένώ ή ενεργός τάση μεταξύ δύο φάσεων ονομάζεται πολική τάση ($U_{πολ}$) και είναι ίση με 380 V. Έτσι φέρνουμε στήν κατανάλωση δύο τάσεις. Η φασική τάση 220 V χρησιμοποιείται στις οικιακές εφαρμογές, ενώ ή πολική τάση 380 V χρησιμοποιείται σε τεχνικές εγκαταστάσεις (σχ. 85). Αν τρεις ίσες ώμικές αντιστάσεις συνδέονται όπως φαίνεται στο σημείο Β (σχ. 85), τότε πάνω σε κάθε αντίσταση καταναλώνεται ισχύς ίση με $U_{φασ} \cdot I_{εν}$. Επομένως ή μέση ισχύς του τριφασικού ρεύματος σ' αυτή τήν περίπτωση είναι:

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



Σχ. 85. Πώς χρησιμοποιούμε τό τριφασικό ρεύμα (σχηματική παράσταση).

Στις γεννήτριες τριφασικού ρεύματος, πού χρησιμοποιεί ή βιομηχανία, ό άριθμός τών πηνίων (έπαγωγίμο) είναι *τριπλάσιος* από τόν άριθμό τών μαγνητικών πόλων (έπαγωγέας). Στο σχήμα 86 φαίνεται ή άρχή τής λειτουργίας μιās τριφασικής γεννήτριας (I, I — II, II — III, III είναι οί άκρες τοῦ συστήματος τών τριών κυκλωμάτων τοῦ έπαγωγίμου).



Σχ. 86. Τριφασικός έναλλακτήρας (ή τριφασική γεννήτρια).

δ. Κινητήρες έναλλασσόμενου ρεύματος. Ό κινητήρας τοῦ συνεχούς ρεύματος μπορεϊ νά λειτουργήσει καί μέ μονοφασικό έναλλασσόμενο ρεύμα. Σήμερα όμως χρησιμοποιούμε κυρίως *τούς τριφασικούς κινητήρες*, πού λειτουργοῦν μέ τριφασικό ρεύμα.

63. Ἡ μεταφορά τής ηλεκτρικής ενέργειας

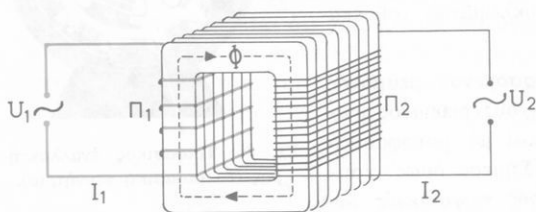
Μιά γεννήτρια συνεχούς ρεύματος έχει στους πόλους της *σταθερή τάση* $U = 10\ 000\ \text{V}$. Τό ρεύμα έχει ένταση $I = 20\ \text{A}$ καί μεταφέρεται στόν τόπο τής κατανώσεως μέ γραμμή πού έχει αντίσταση $R = 300\ \Omega$. Ἡ γεννήτρια δίνει στό έξωτερικό κύκλωμα ισχύ $P = U \cdot I$, ἄρα $P = 200\ 000\ \text{W}$. Πάνω στή γραμμή *μετατρέπεται* *σέ θερμότητα* ισχύς $P_{\text{θερ}} = I^2 \cdot R$, δηλαδή $P_{\text{θερ}} = 120\ 000\ \text{W}$. Ἔτσι στήν κατανάλωση φτάνει ισχύς $P_{\text{κατ}} = 80\ 000\ \text{W}$. Ὡστε τά 60 % τής ισχύος πού δίνει ή γεννήτρια στό έξωτερικό κύκλωμα είναι *άπώλεια* *ένέργειας*. Ἄν ή γεννήτρια έχει στους πόλους της τάση $U = 100\ 000\ \text{V}$ καί δίνει στό έξωτερικό κύκλωμα τήν ἴδια ισχύ, δηλαδή είναι $P = 200\ 000\ \text{W}$, τότε τό ρεύμα έχει ένταση $I = 2\ \text{A}$. Πάνω στή γραμμή *μετατρέπεται* *σέ θερμότητα* ισχύς $P_{\text{θερμ}} = I^2 \cdot R$, δηλαδή $P_{\text{θερμ}} = 1200\ \text{W}$. Τώρα στήν κατανάλωση φτάνει ισχύς $P_{\text{κατ}} = 198\ 800\ \text{W}$. Ἡ *άπώλεια* *ένέργειας* είναι σχεδόν *άσήμαντη*.

Ἀπό τό παράδειγμα αὐτό φαίνεται ὅτι γιά νά μεταφέρουμε *σέ μεγάλη* *άπόσταση* *μιά μεγάλη* *ηλεκτρική* *ισχύ* μέ μικρές *άπώλειες* *πάνω* *στή* *γραμμή*,

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

64. 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. 87). Τό πηνίο Π_1 , ονομάζεται *πηνίο χαμηλής τάσεως ή πρωτεύον*



Σχ. 87. Σχηματική παράσταση του μετασχηματιστή

πηνίο Π_2 ονομάζεται *πηνίο υψηλής τάσεως ή δευτερεύον πηνίο* και αποτελείται από πολλές σπείρες λεπτού σύρματος. Τό πηνίο Π_2 έχει n_2 σπείρες και οι άκρες του συνδέονται με ένα κύκλωμα (*δευτερεύον κύκλωμα*).

α. Λειτουργία του μετασχηματιστή. Η γεννήτρια δημιουργεί στις άκρες του πρωτεύοντος πηνίου Π_1 ενεργό τάση U_1 με συχνότητα ν . Τό κύκλωμα του πρωτεύοντος πηνίου διαρρέεται από ρεύμα (*πρωτεύον ρεύμα*) που έχει 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 κλειστό *μαγνητικό κύκλωμα*.

Όταν τό κύκλωμα του δευτερεύοντος πηνίου Π_2 είναι *ανοιχτό*, λέμε ότι ο μετασχηματιστής λειτουργεί *στό κενό*. Η συνεχής μεταβολή του μαγνητικού πεδίου προκαλεί συνεχή μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει από τις σπείρες του πηνίου Π_2 . Τότε εξαιτίας της άμοιβαίας επαγωγής αναπτύσσεται στις άκρες του δευτερεύοντος πηνίου Π_2 *εναλλασσόμενη τάση* που έχει συχνότητα ν .

β. Έξιώσεις του μετασχηματιστή. Ό μετασχηματιστής λειτουργεί στο κενό (τό κύκλωμα του πηνίου Π_2 άνοιχτό). Άν τότε μετρήσουμε τήν ένεργό τάση U_1 και U_2 στις άκρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου βρίσκουμε ότι ισχύει ή άκόλουθη έξιωση:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

όπου n_1 και n_2 είναι αντίστοιχα ό αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Ό λόγος n_2/n_1 ονομάζεται *λόγος μετασχηματισμοῦ* και είναι χαρακτηριστικός για τό μετασχηματιστή.

Άν είναι $n_2 > n_1$, τότε $U_2 > U_1$ και ό μετασχηματιστής λειτουργεί ώς *μετασχηματιστής ύψωσης τής τάσεως*.

Άν είναι $n_2 < n_1$, τότε είναι $U_2 < U_1$ και ό μετασχηματιστής λειτουργεί ώς *μετασχηματιστής ύποβιβασμοῦ τής τάσεως*.

Όταν τό κύκλωμα του δευτερεύοντος πηνίου Π_2 είναι *κλειστό*, λέμε ότι ό μετασχηματιστής λειτουργεί *μέ φορτίο*. Άν τότε μετρήσουμε τήν ένεργό τάση U_1 και U_2 στις άκρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου, βρίσκουμε ότι ισχύει πάλι ή έξιωση (1).

Στό πρωτεῦον και στό δευτερεῦον κύκλωμα ή ένεργός ένταση του ρεύματος είναι I_1 και I_2 . Η γεννήτρια παρέχει στό πρωτεῦον πηνίο Π_1 ισχύ $P_1 = U_1 \cdot I_1$. Τό δευτερεῦον πηνίο Π_2 παρέχει στό κύκλωμά του ισχύ $P_2 = U_2 \cdot I_2$.

Κατά μεγάλη προσέγγιση μπορούμε νά δεχτοῦμε ότι στό μετασχηματιστή οι άπώλειες ένεργειας είναι *άσήμαντες*. Τότε σύμφωνα μέ τήν αρχή τής διατηρήσεως τής ένεργειας ισχύει ή έξιωση:

$$P_1 = P_2 \quad \text{άρα} \quad \frac{U_1 \cdot I_1}{U_2 \cdot I_2} = 1 \quad (2)$$

Σ' αὐτή τήν περίπτωση όλη ή ισχύς πού προσφέρεται στό πρωτεῦον πηνίο μεταφέρεται μέ τό μαγνητικό πεδίο στό δευτερεῦον πηνίο.

Άπό τίς έξιώσεις (1) και (2) βρίσκουμε τήν έξιωση:

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

Η έξιωση (3) φανερώνει ότι ό λόγος των ένεργων έντάσεων I_1 και I_2 των ρευμάτων στά δύο κυκλώματα του μετασχηματιστή *διατηρείται σταθερός*.

Παράδειγμα. Σέ ένα μετασχηματιστή είναι $n_1 = 10$ σπείρες, $n_2 = 500$ σπείρες, $U_1 = 1000$ V καί $I_1 = 500$ A. Τότε γιά τό δευτερευον ρεύμα είναι: ένεργός τάση

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

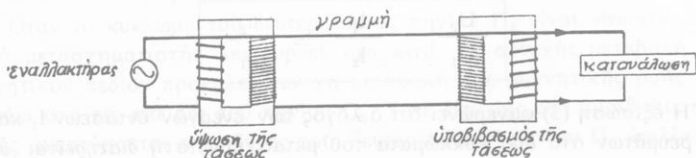
ένεργός ένταση τοῦ ρεύματος:

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

Αὐτός ὁ μετασχηματιστής λειτουργεῖ ὡς μετασχηματιστής *ὕψωσης τῆς τάσεως*.

γ. Ἐφαρμογές τῶν μετασχηματιστῶν. Οἱ μετασχηματιστές ἔχουν πολύ σημαντικές ἐφαρμογές. Στήν πράξη ἔχουμε κυκλώματα ἐναλλασσόμενου ρεύματος, στά ὁποῖα χρειαζόμαστε *ψηλές τάσεις* καί ἄλλα κυκλώματα, στά ὁποῖα χρειαζόμαστε *μεγάλες ἐντάσεις ρεύματος*. Οἱ μετασχηματιστές μᾶς ἐπιτρέπουν νά κάνουμε στό ἐναλλασσόμενο ρεύμα τοὺς μετασχηματισμούς πού θέλουμε, π.χ. γιά τή λειτουργία τῶν σωλήνων πού παράγουν τίς ἀκτίνες Röntgen χρειαζόμαστε τάσεις πού μετριοῦνται σέ δεκάδες χιλιάδες βόλτ καί τότε χρησιμοποιοῦμε μετασχηματιστές πού *ὕψωνουν τήν τάση* τοῦ δικτύου διανομῆς τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας (220 V).

Ἰδιαίτερη ὁμως σημασία ἔχει ἡ παραγωγή ψηλῶν τάσεων γιά τή μεταφορά τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. Σέ κάθε ἐργοστάσιο ἠλεκτροπαραγωγῆς (θερμοηλεκτρικό ἢ ὕδροηλεκτρικό) ὑπάρχει ἕνας μετασχηματιστής πού *ὕψωνει τήν τάση* σέ ἑκατοντάδες χιλιάδες βόλτ (ὡς 500 000 V). Τό ρεύμα ψηλῆς τάσεως μεταφέρεται στόν τόπο καταναλώσεως τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας (π.χ. ἀπό τήν Πτολεμαῖδα στήν Ἀθήνα). Στόν τόπο τῆς καταναλώσεως ὑπάρχουν μετασχηματιστές, πού διαδοχικά *ὑποβιβάζουν τήν τάση* (σχ. 88). Σέ πολλές ἄλλες ἐφαρμογές χρησιμοποιοῦμε σήμερα τοὺς μετασχηματιστές, π.χ. σέ ἐπιστημονικά ἐργαστήρια, σέ βιομηχανικές ἐγκαταστάσεις, στό ἠλεκτρικό κουδούνι κ.ἄ.

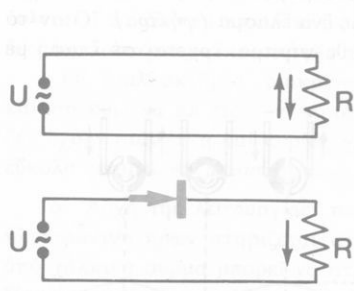


Σχ. 88. Μεταφορά τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος μέ ψηλῆ τάση

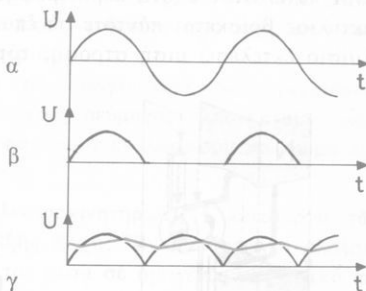
Γενικά στους μετασχηματιστές οι απώλειες ενέργειας είναι πολύ μικρές (ως 5 %) και οφείλονται στην παραγωγή θερμότητας στα σύρματα των πηνίων και στον πυρήνα του μαλακού σιδήρου. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν απόδοση που φτάνει ως 99 %.

65. Άνορθωση του έναλλασσόμενου ρεύματος

Σε πολλές εφαρμογές (ηλεκτρόλυση, φόρτιση συσσωρευτών κ.ά.) χρειαζόμαστε συνεχές ρεύμα. Είναι λοιπόν απαραίτητο να μετατρέψουμε το έναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα. Αυτή η μετατροπή ονομάζεται *άνορθωση* του έναλλασσόμενου ρεύματος και γίνεται με ειδικές διατάξεις, που ονομάζονται *άνορθωτές* (σχ. 89). Γενικά ο άνορθωτής είναι μία διάταξη, που, όταν είναι στο κύκλωμα έναλλασσόμενου ρεύματος, επιτρέπει στο ρεύμα να περνάει μόνο κατά τη μία φορά (*αγωγή φορά*), ενώ δεν επιτρέπει κατά την αντίθετη φορά (*ανάσταλτική φορά*). Έτσι από τον άνορθωτή περνάει το ρεύμα μόνο κατά τη μία ήμπερίοδο (σχ. 90). Το ρεύμα που διαρρέει τότε μία αντίσταση R έχει *σταθερή φορά*, αλλά παρουσιάζει περιοδικές διακοπές, που καθεμιά διαρκεί μισή περίοδο (*ήμιανόρθωση*). Με κατάλληλες διατάξεις μπορούμε να έκμεταλλευόμαστε με τη μορφή συνεχούς ρεύματος και τις δύο ήμπεριόδους του έναλλασσόμενου ρεύματος (*πλήρης άνορθωση*).



Σχ. 89. Ο άνορθωτής καταργεί τη μία έναλλαγή του ρεύματος και αφήνει να περάσει μόνο το ρεύμα που έχει ορισμένη φορά.



Σχ. 90. α. Έναλλασσόμενη τάση. β. Ήμιανόρθωση της τάσεως. γ. Πλήρης άνορθωση της τάσεως. Η τεθλασμένη γραμμή δείχνει τις διακομάνσεις της συνεχούς τάσεως.

66. Ήλεκτρικέσ μηχανέσ

Όνομάζουμε *ήλεκτρικέσ μηχανέσ* τίσ γεννήτριεσ ήλεκτρικού ρεύματοσ καί τούσ ήλεκτροκινητήρεσ.

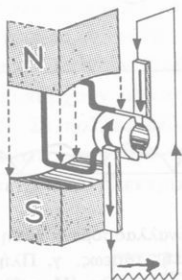
α. Ήρχή τήσ λειτουργίασ τών γεννητριών. Ή λειτουργία τών γεννητριών στηρίζεται στην έξήσ άρχή: Όταν ή μαγνητική ροή (Φ) πού περνάει από ένα πλαίσιο ή πηνίο μεταβάλλεται άρμονικά σέ συνάρτηση μέ τό χρόνο (σχ. 76), τότε στίσ άκρεσ του πλαισίου ή του πηνίου αναπτύσσεται ήλεκτρογενετική δύναμη ή έπαγωγική τάση πού έκφράζεται μέ τήν έξίσωση:

$$U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t \quad \text{ή καί} \quad U = U_0 \cdot \eta \mu 2\pi n t$$

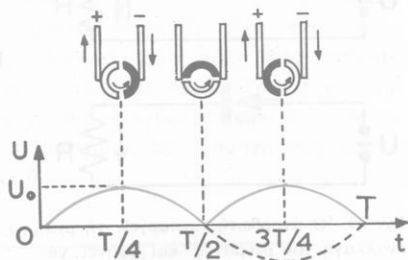
όπου U_0 είναι τό πλάτοσ τήσ τάσεωσ καί n ή συχνότητα τήσ έναλλασσόμενής τάσεωσ.

Τό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται κυρίωσ από ήλεκτρομαγνήτη (έπαγωγέασ) πού τροφοδοτείται μέ συνεχέσ ρεύμα. Για νά αύξηθει ή μαγνητική ροή πού περνάει από τό πλαίσιο ή τό πηνίο (έπαγόγισμο), τυλίγουμε τό πλαίσιο ή τό πηνίο γύρω από πυρήνα μαλακού σιδήρου.

β. Γεννήτριεσ συνεχούσ ρεύματοσ. Έχουμε ένα όρθογώνιο πλαίσιο από χάλκινο σύρμα πού στρέφεται μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα $\omega = 2\pi n$ μέσα σέ όμογενέσ μαγνητικό πεδίο γύρω από άξονα κάθετο στίσ δυναμικέσ γραμμέσ του μαγνητικού πεδίου (σχ. 91). Οί δύο άκρεσ του πλαισίου συνδέονται μέ δύο μονωμένουσ ήμιδακτυλίουσ (συνλέκτησ) πού είναι στερεωμένοι πάνω στόν άξονα περιστροφής καί στρέφονται μαζί του. Κάθε ήμιδακτύλιος βρίσκεται πάντοτε σέ έπαφή μέ ένα έλασμα (ψήκτρα). Όταν τό πλαίσιο εκτελέσει μισή στροφή, τότε κάθε ψήκτρα έρχεται σέ έπαφή μέ



Σχ. 91. Ήρχή τήσ λειτουργίασ γεννήτριασ συνεχούσ ρεύματοσ. Οί άκρεσ του στρεφόμενου πλαισίου συνδέονται μέ τούσ δύο ήμιδακτυλίουσ (συνλέκτησ).



Σχ. 92. Ήξήγηση τήσ λειτουργίασ του συνλέκτη. Τό ρεύμα βγαίνει στό έξωτερικό κύκλωμα έχοντας πάντοτε τήν ίδια φορά.

τόν άλλο ήμιδακτύλιο. Αυτό συμβαίνει, όταν τό πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή όταν αντιστρέφεται ή τάση. Έτσι τό ρεύμα βγαίνει στο έξωτερικό κύκλωμα έχοντας τήν ίδια πάντοτε φορά (σχ. 92). Η τάση (U) πού αναπτύσσεται στους πόλους τής γεννήτριας είναι *συνεχής*, αλλά ή απόλυτη τιμή της κυμαίνεται περιοδικά μεταξύ τών τιμών 0 και U_0 . Στο έξωτερικό κύκλωμα κυκλοφορεί *συνεχές* ρεύμα.

Οί γεννήτριες συνεχούς ρεύματος πού χρησιμοποιούμε στις εφαρμογές ονομάζονται *δυναμοηλεκτρικές μηχανές* (dynamo) και αποτελούνται από τά εξής μέρη :

1. Από τόν *επαγέα* πού είναι *ακίνητος* ήλεκτρομαγνήτης.
2. Από τό *επαγωγίμο* πού είναι σύστημα πολλών πλαισίων από σύρμα. Όλο αυτό τό σύστημα *στρέφεται* μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα μέσα στο μαγνητικό πεδίο πού δημιουργεί ό επαγωγέας.
3. Από τό *συλλέκτη* πού είναι σύστημα από πολλά μονωμένα έλάσματα στά όποια καταλήγουν τά σύρματα τών πλαισίων.

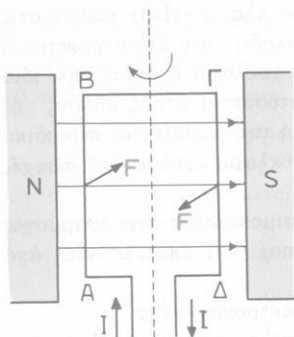
γ. Γεννήτριες έναλλασσόμενου ρεύματος. Οί γεννήτριες έναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζονται *έναλλακτῆρες* και αποτελούνται από τά εξής μέρη :

1. Από τόν *επαγωγέα*, πού είναι ένας ήλεκτρομαγνήτης, ό όποιος *στρέφεται* μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα.
2. Από τό *επαγωγίμο* πού είναι σύστημα πηνίων, τά όποια είναι *ακίνητα* και έχουν κοινό πυρήνα από μαλακό σίδηρο (σχ. 79). Τό ίδιο σύρμα τυλίγεται σέ όλα τά πηνία και οί δύο άκρες του σύρματος αποτελούν τούς δύο *έναλλασσόμενους πόλους* τής γεννήτριας.

Οί έναλλακτῆρες διακρίνονται σέ *μονοφασικούς* και *τριφασικούς* και συγκριτικά μέ τίς γεννήτριες συνεχούς ρεύματος πλεονεκτούν, γιατί δέν έχουν συλλέκτη και κυρίως γιατί παράγουν έναλλασσόμενο ρεύμα πού εύκολα μπορεί νά *μετασχηματιστεί*.

δ. Αρχή τής λειτουργίας τών ήλεκτροκινητήρων. Η λειτουργία τών ήλεκτροκινητήρων στηρίζεται στην εξής αρχή: Ένα όρθογώνιο πλαίσιο από χάλκινο σύρμα μπορεί νά στρέφεται μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο γύρω από άξονα κάθετο στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Αν στο πλαίσιο διαβιάσουμε ρεύμα, τότε στις δύο άπέναντι πλευρές του πλαισίου αναπτύσσονται δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις, δηλαδή αναπτύσσεται ένα ζεύγος δυνάμεων πού αναγκάζει τό πλαίσιο νά *στρέφεται* (σχ. 93).

Η λειτουργία τών *κινητήρων συνεχούς ρεύματος* στηρίζεται στο γεγονός ότι οί γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι *μηχανές αντιστρεπτές*.



Σχ. 93. Πάνω στο πλαίσιο αναπτύσσεται ζεύγος δυνάμεων που αναγκάζει το πλαίσιο να στρέφεται.

τους βασίζεται σε μία ιδιότητα που έχει το μαγνητικό πεδίο του τριφασικού ρεύματος.

Όταν δηλαδή διαβιβάσουμε συνεχές ρεύμα στο επαγωγίμο, τότε το μαγνητικό πεδίο του επαγωγέα αναπτύσσει πάνω στο επαγωγίμο ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που αναγκάζουν το επαγωγίμο να στρέφεται. Η μηχανή λειτουργεί τότε ως *κινητήρας* συνεχούς ρεύματος.

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος μπορεί να λειτουργήσει και με μονοφασικό έναλλασσόμενο ρεύμα (*μονοφασικός κινητήρας*), αρκεί τά κυκλώματα του επαγωγέα και του επαγωγίμου να συνδέονται κατά σειρά.

Σήμερα όμως χρησιμοποιούνται κυρίως *οι τριφασικοί κινητήρες* που η λειτουργία

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

88. Ένα έναλλασσόμενο ρεύμα έχει πλάτος τάσεως $U_0 = 100 \text{ V}$ και πλάτος έντασης $I_0 = 20 \text{ A}$. 1) Πόση είναι η ένεργός τάση και η ένεργός ένταση του ρεύματος; 2) Πόση είναι η τάση U και η ένταση I τη στιγμή που ή φάση (ωt) παίρνει τις τιμές 30° , 60° και 150° ;

89. Η στιγμήαία ένταση ενός έναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται από την εξίσωση $I = 10 \cdot \eta\mu 314t$. Νά βρεθεί τό πλάτος της έντάσεως I_0 , ή περίοδος T , ή συχνότητα ν , ή κυκλική συχνότητα ω και ή ένεργός ένταση του ρεύματος.

90. Ένα έναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει μία όμική αντίσταση $R = 5 \Omega$, που είναι βυθισμένη μέσα σε θερμιδόμετρο. Αυτό έχει θερμοχωρητικότητα 1000 cal/grad και μέσα σε 1 λεπτό ή θερμοκρασία του ύψώνεται κατά 10° C . Πόση είναι ή ένεργός ένταση του ρεύματος;

91. Ένα έναλλασσόμενο ρεύμα έχει συχνότητα $\nu = 50 \text{ Hz}$, ένεργό τάση $U_{\text{εν}} = 30 \text{ V}$ και ένεργό ένταση $I_{\text{εν}} = 5 \text{ A}$. Νά γραφούν οι εξισώσεις που δίνουν ή στιγμήαία τάση U και ή στιγμήαία ένταση ρεύματος I .

92. Ένα έναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει μία όμική αντίσταση $R = 12,26 \Omega$ και μέσα σε κάθε λεπτό αναπτύσσει πάνω της θερμότητα $Q_{\text{θερμ}} = 2816 \text{ cal}$. Πόσο είναι τό πλάτος της έντάσεως του ρεύματος; $J = 4,18 \text{ Joule/cal}$.

93. Στη μία άκρη A ενός σύρματος AB φτάνει ένα συνεχές ρεύμα που έχει σταθερή ένταση $I_{\Sigma} = 3 \text{ A}$ και ένα έναλλασσόμενο ρεύμα που έχει ένεργό ένταση $I_{\text{Ε}} = 4 \text{ A}$. Πόση

είναι η ενεργός ένταση του ρεύματος που σχηματίζεται από την πρόσθεση των δύο ρευμάτων;

94. Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως έχει ισχύ 25 cd, αντίσταση $R = 440 \Omega$ και τροφοδοτείται με έναλλασσόμενο ρεύμα, που έχει ενεργό τάση $U_{\text{εν}} = 220 \text{ V}$. 1) Πόσο είναι το πλάτος U_0 της τάσεως και το πλάτος I_0 της εντάσεως του ρεύματος; 2) Πόση μέση ισχύς καταναλώνεται κατά candelas;

95. Στις άκρες μιάς ώμικης αντίστασεως $R = 12 \Omega$ εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_{\text{εν}} = 120 \text{ V}$ 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 μιά κατάλληλη διάταξη (άνορθωτή) καταργηθεί η μιά από τις δύο έναλλαγές του ρεύματος ή αν άνορθωθεί και η δεύτερη έναλλαγή;

96. Σέ ένα υδροηλεκτρικό έργοστάσιο πέφτουν στον υδροστρόβιλο 150 m^3 νερό τό λεπτό από ύψος 120 m . Ο υδροστρόβιλος έχει απόδοση 78% και τροφοδοτεί έναν έναλλακτήρα, που έχει απόδοση 92% και στους πόλους του δημιουργεί έναλλασσόμενη τάση, που δίνεται από την εξίσωση $U = 2828 \cdot \eta \mu 314 t$. 1) Νά βρεθούν σε κιλοβάτ: α) η ισχύς $P_{\text{υδ}}$ την οποίαν δίνει η υδατόπτωση στον υδροστρόβιλο· β) η ισχύς $P_{\text{στ}}$ την οποία δίνει ο υδροστρόβιλος στον έναλλακτήρα και γ) η ηλεκτρική ισχύς $P_{\text{ηλ}}$ την οποία δίνει ο έναλλακτήρας. 2) Νά βρεθεί η συχνότητα ν του ρεύματος και η ενεργός ένταση $I_{\text{εν}}$ του ρεύματος που μπορεί νά δώσει αυτός ο έναλλακτήρας. $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$.

97. Θέλουμε νά υποβιβάσουμε την ενεργό τάση από $U_1 = 220 \text{ V}$ σε $U_2 = 5 \text{ V}$. 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 υποβιβασμού της 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, που έχει αντίσταση $R_1 = 0,03 \Omega$, διαβιβάζεται ρεύμα που έχει ενεργό τάση $U_1 = 110 \text{ V}$ και ενεργό ένταση $I_1 = 100 \text{ A}$. 1) Πόση είναι η απόδοση του μετασχηματιστή και πόση είναι στό κύκλωμα ψηλής τάσεως η ενεργός ένταση I_2 του ρεύματος, αν η 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 της τάσεως η ενεργός τάση στά δύο πηνία του αντίστοιχα είναι $U_1 = 5000 \text{ V}$ και $U_2 = 220 \text{ V}$. Στό κύκλωμα ψηλής τάσεως η ισχύς είναι $P_1 = 200 \text{ kW}$ και η απόδοση του μετασχηματιστή είναι 97% . Πόση είναι η ενεργός ένταση I_1 και I_2 του ρεύματος στό καθένα κύκλωμα;

101. Ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού της τάσεως έχει αντίστοιχα στά δύο πηνία του $n_1 = 4500$ σπείρες και $n_2 = 150$ σπείρες. Στό πηνίο ψηλής τάσεως εφαρμόζεται ενεργός τάση $U_1 = 3000 \text{ V}$ και στό κύκλωμα χαμηλής τάσεως όλη η ισχύς, που είναι $P = 9 \text{ kW}$, μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω σε μιά αντίσταση R . Η απόδοση του μετασχηματιστή είναι ίση με τί μονάδα. Πόση είναι η ενεργός ένταση I_1 στό κύκλωμα ψηλής τάσεως και πόση είναι η αντίσταση R ;

102. Μιά ισχύς $P = 110 \text{ kW}$ θά μεταφερθεί από τό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στον τόπο κατανώσεως με σύρμα που έχει αντίσταση $R = 0,08 \Omega$. 1) Αν η ισχύς P μεταφερθεί

μέ συνεχές ρεύμα και μέ τάση $U_{\Sigma} = 220 \text{ V}$, πόση είναι ή πτώση τάσεως πάνω στό σύρμα και σέ πόσο τοίς εκατό φτάνει ή απώλεια ισχύος πάνω στό σύρμα; 2) 'Η ίδια ισχύς P μεταφέρεται μέ εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά στό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής ή ενεργός τάση ύψώνεται από 220 V σέ $22\,000 \text{ V}$ και αντίθετα στόν τόπο καταναλώσεως ή τάση ύποβιβάζεται πάλι σέ 220 V . Πόση είναι τώρα ή πτώση τάσεως πάνω στό σύρμα και σέ πόσο τοίς εκατό φτάνει ή απώλεια ισχύος πάνω στό σύρμα;

103. Μιά ύδατόπτωση τροφοδοτεί έναν ύδροστρόβιλο, ό όποιος κινεί έναν εναλλακτήρα. 'Η απόδοση της 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 ενεργός τάση στις άκρες του πηνίου χαμηλής τάσεως και πόση στους πόλους του εναλλακτήρα; Πόση είναι ή ενεργός ένταση I_1 του ρεύματος πού δίνει ό εναλλακτήρας; 2) Πόση είναι ή ισχύς της ύδατοπτώσεως; 'Η απόδοση του μετασχηματιστή είναι ίση μέ τή μονάδα.

'Αγωγιμότητα τῶν στερεῶν

67. 'Ηλεκτρονική άγωγιμότητα τῶν στερεῶν

Ξέρουμε ότι από τά στερεά σώματα *άγωγοί* είναι κυρίως τά μέταλλα και ότι μέσα σέ κάθε μέταλλο υπάρχουν *τά ελεύθερα ηλεκτρόνια* πού είναι ηλεκτρόνια σθένους και κινούνται σύμφωνα μέ τούς νόμους της κινητικής θεωρίας τῶν αερίων. 'Ο αριθμός τῶν ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι τεράστιος (πάνω από 10^{20} ηλεκτρόνια κατά κυβικό εκατοστόμετρο). 'Αν 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 εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Σ' αυτή τήν περίπτωση μέσα στό σύρμα κυκλοφορεί *συνεχές ρεύμα*. 'Αν στις άκρες του σύρματος, πού έχει μόνο όμική αντίσταση, εφαρμόσουμε *εναλλασσόμενη τάση* $U = U_0 \cdot \eta \mu \omega t$, τότε μέσα στό σύρμα δημιουργείται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, πού *αναγκάζει* κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο του μετάλλου νά εκτελεί *άρμονική ταλάντωση* πού έχει τή συχνότητα ν της τάσεως και κέντρο μιά μέση θέση ισορροπίας του ηλεκτρονίου. Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μέσα στό σύρμα σχηματίζεται *εναλλασσόμενο ρεύμα*. Τά ηλεκτρόνια και στό συνεχές και στό εναλλασσόμενο ρεύμα αποκτούν κινητική ενέργεια εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου. 'Αν τό ρεύμα διαρρέει μόνο όμική αντίσταση, όλη ή κινητική ένερ-

γεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα κατά τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα του μετάλλου (*φαινόμενο Joule*).

Η άγωγιμότητα των στερεών ονομάζεται **ηλεκτρονική άγωγιμότητα** και έρμηνεύεται σε γενικές γραμμές από **τή θεωρία των ελεύθερων ηλεκτρονίων**. Αυτή όμως ή θεωρία δέν μπορεί να εξηγήσει όρισμένες ιδιότητες των μετάλλων ούτε να δικαιολογήσει γιατί τά στερεά διακρίνονται σε *άγωγούς, μονωτές και ήμιαγωγούς*.

Νεώτερες αντίληψεις για τήν ηλεκτρονική άγωγιμότητα των στερεών. Όλα τά στερεά σώματα είναι *κρυσταλλικά σώματα* και επομένως ή ηλεκτρική άγωγιμότητα ενός στερεού συνδέεται με τήν έσωτερική δομή των κρυστάλλων του. Τά τελευταία χρόνια διαμορφώθηκε ή **θεωρία των στερεών** πού έρμηνεύει τίς μηχανικές, θερμικές, όπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών. Αυτή ή νεώτερη θεωρία άποδεικνύει πότε είναι δυνατή ή *κίνηση των ηλεκτρονίων σθένους μέσα σε έναν κρύσταλλο*, δηλαδή πότε τά ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων ενός στερεού μπορούν να γίνουν *ελεύθερα ηλεκτρόνια*.

Οί τρείς κατηγορίες στερεών. Τό αντίστροφο τής ειδικής αντίστασης ρ ενός στερεού ονομάζεται *ηλεκτρική άγωγιμότητα* ($1/\rho$) του στερεού. Τά στερεά, σύμφωνα με τήν ηλεκτρική άγωγιμότητά τους, διακρίνονται σε τρείς κατηγορίες, σε *άγωγούς, μονωτές και ήμιαγωγούς*.

α. **Άγωγοί** είναι τά μέταλλα πού έχουν μικρή ειδική αντίσταση, ή όποία *αυξάνει* με τή θερμοκρασία.

β. Οί **μονωτές** ή **διηλεκτρικά** έχουν πολύ μεγάλη ειδική αντίσταση πού *ελαττώνεται* με τή θερμοκρασία.

γ. Οί **ήμιαγωγοί** έχουν σημαντική ειδική αντίσταση πού *ελαττώνεται* με τή θερμοκρασία, όπως συμβαίνει και στους μονωτές. Ώστε:

Στους άγωγούς (μέταλλα) ή μικρή ειδική αντίστασή τους αυξάνει με τή θερμοκρασία, ενώ αντίθετα στους μονωτές και στους ήμιαγωγούς ή μεγάλη ειδική αντίστασή τους ελαττώνεται με τή θερμοκρασία.

68. Άγωγοί, μονωτές, ήμιαγωγοί

Θά εξετάσουμε πολύ άπλά τή διάκριση των στερεών στίς παραπάνω τρείς κατηγορίες.

α. **Οί άγωγοί.** Στους άγωγούς, δηλαδή στά μέταλλα, τά ηλεκτρόνια σθένους είναι *ευκίνητα* (ελεύθερα ηλεκτρόνια). Με τήν επίδραση έξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τά ελεύθερα ηλεκτρόνια άποκτούν κινητική ενέργεια και, καθώς κινούνται μέσα στό στερεό, συγκρούονται με τά θετικά ιόντα του κρυστάλλου. Έτσι τό μέταλλο θερμαίνεται και τότε αυξάνει τό

πλάτος τῆς ταλαντώσεως πού ἐκτελοῦν τά θετικά ἰόντα τοῦ κρυστάλλου (θερμική κίνηση). Ἐπομένως αὐξάνει καί ὁ ἀριθμός τῶν συγκρούσεων τοῦ κινούμενου ηλεκτρονίου μέ τά θετικά ἰόντα τοῦ κρυστάλλου. Αὐτή ὁμως ἡ αὐξηση τοῦ ἀριθμοῦ τῶν συγκρούσεων τοῦ ηλεκτρονίου ἀντιστοιχεῖ σέ αὐξηση τῆς ἀντιστάσεως τοῦ ἀγωγοῦ.

β. Οἱ μονωτές. Σέ ἕναν ἀπόλυτα καθαρό κρύσταλλο μονωτῆ, πού ἔχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία, ὅλα τά ηλεκτρόνια σθένους εἶναι δεσμευμένα ἀπό τό ἠλεκτρικό πεδίο τοῦ πυρήνα τοῦ ἀτόμου. Ἐτσι σ' αὐτό τόν κρύσταλλο δέν ὑπάρχουν εὐκίνητα ηλεκτρόνια καί γι' αὐτό ὁ κρύσταλλος δέν ἔχει ἀγωγιμότητα. Ὄταν ὁμως αὐξάνει ἡ θερμοκρασία τοῦ κρυστάλλου, λίγα ηλεκτρόνια σθένους ἀποκοτῶν ἐνέργεια καί τότε ἀποδεσμεύονται ἀπό τήν ἔλξη τοῦ πυρήνα καί γίνονται εὐκίνητα, δηλαδή ἐλεύθερα ηλεκτρόνια. Μέ τήν ἐπίδραση ἐξωτερικοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου αὐτά τά ἐλεύθερα ἠλεκτρόνια σχηματίζουν ἕνα πολύ ἀσθενές ρεῦμα. Ἡ ἀγωγιμότητα τοῦ κρυστάλλου αὐξάνει μέ τή θερμοκρασία, γιατί τότε αὐξάνει καί ὁ ἀριθμός τῶν ηλεκτρονίων σθένους πού ἀποδεσμεύονται.

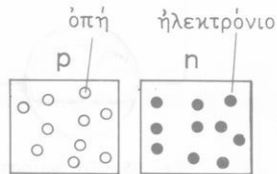
γ. Οἱ ἡμιαγωγοί. Συνηθισμένοι ἡμιαγωγοί εἶναι τό γερμάνιο καί τό πυρίτιο. Σέ ἕναν ἀπόλυτα καθαρό κρύσταλλο ἡμιαγωγοῦ, πού ἔχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία, ὅλα τά ηλεκτρόνια σθένους εἶναι δεσμευμένα, ὅπως συμβαίνει καί στούς μονωτές. Τότε ὁ κρύσταλλος δέν ἔχει ἀγωγιμότητα. Ἀλλά στούς ἡμιαγωγούς τά ηλεκτρόνια σθένους εἶναι πολύ ἀσθενέστερα δεσμευμένα καί μόλις πάρουν τήν ἀπαιτούμενη λίγη ἐνέργεια, ἀμέσως « ἐγκαταλείπουν τή θέση τους » καί γίνονται μέσα στόν κρύσταλλο ἐλεύθερα ηλεκτρόνια. Τά ηλεκτρόνια σθένους παίρνουν τήν ἀπαιτούμενη ἐνέργεια εἴτε ὅταν θερμαίνεται ὁ κρύσταλλος εἴτε ἀπό μιά ἀκτινοβολία πού πέφτει πάνω στόν κρύσταλλο.

Ὄταν ἕνα ηλεκτρόνιο σθένους ἐγκαταλείψει τή θέση του, τότε σέ ἐκείνη τή θέση δημιουργεῖται μέσα στόν κρύσταλλο μιά « ἀδειανή θέση » ηλεκτρονίου πού ὀνομάζεται ὀπή. Ἀποδεικνύεται ὅτι ἡ ἔλλειψη ηλεκτρονίου σ' αὐτή τή θέση, δηλαδή ἡ ὀπή, ἰσοδυναμεῖ μέ ἕνα στοιχειῶδες θετικό ἠλεκτρικό φορτίο (+e). Ἡ ὀπή μπορεῖ νά συμπληρωθεῖ ἀπό ἕνα ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικοῦ ἀτόμου. Τότε ὁμως δημιουργεῖται ὀπή στό γειτονικό ἄτομο. Ὡστε ἡ ὀπή μπορεῖ νά μετακινεῖται μέσα στόν κρύσταλλο.

Σέ ἕναν καθαρό κρύσταλλο ἡμιαγωγοῦ ὁ ἀριθμός τῶν ἐλεύθερων ηλεκτρονίων εἶναι ἴσος μέ τόν ἀριθμό τῶν ὀπῶν. Ὁ καθαρός κρύσταλλος γερμανίου στή συνηθισμένη θερμοκρασία ἔχει σέ κάθε κυβικό ἑκατοστόμετρο $2,36 \cdot 10^{13}$ ἐλεύθερα ηλεκτρόνια καί ἄλλες τόσες ὀπές. Ἄν συνδέσουμε τίς δύο ἄκρες μιᾶς ράβδου ἀπό γερμάνιο μέ τούς πόλους μιᾶς γεννήτριας, τότε μέσα στόν ἡμιαγωγό δημιουργεῖται ἠλεκτρικό πεδίο, πού ἀνα-

γκάζει τὰ ηλεκτρόνια νά κινούνται πρὸς τὸ θετικό πόλο τῆς γεννήτριας καὶ τὶς ὀπές νά κινούνται πρὸς τὸν ἀρνητικό πόλο τῆς. Ἔτσι μέσα στὸν ἡμιαγωγὸ δημιουργεῖται **ἠλεκτρικὸ ρεύμα**. Ἡ ἔνταση τοῦ ρεύματος εἶναι ἴση μὲ τὸ ἄθροισμα τῶν δύο ἴσων ἐντάσεων, πού ἀντιστοιχοῦν στὰ δύο ρεύματα πού δημιουργοῦνται ἀπὸ τὴν κίνηση τῶν ηλεκτρονίων καὶ τῶν ὀπῶν.

δ. Οἱ ἡμιαγωγοὶ προσμίξεως. Τὸ γερμάνιο καὶ τὸ πυρίτιο εἶναι τετρασθενῆ στοιχεῖα καὶ τὰ ἄτομά τους ἔχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Τίθουμε γερμάνιο καὶ προσθέτουμε σ' αὐτὸ μικρὴ ποσότητα ἀπὸ ἓνα πεντασθενές στοιχεῖο (As, P, Sb) πού στὰ ἄτομά του ὑπάρχουν πέντε ηλεκτρόνια σθένους. Ὄταν αὐτὸ τὸ ὑλικὸ κρυσταλλωθεῖ, παίρνουμε ἓναν **ἡμιαγωγὸ n** πού ἔχει τόσα παραπάνω ἐλεύθερα ηλεκτρόνια, ὅσα εἶναι τὰ ἄτομα τοῦ πεντασθενοῦς στοιχείου στὸν κρύσταλλο. Τὸ σύμβολο n φανερώνει τὴν παρουσία ἐλεύθερων ηλεκτρονίων (ἀπὸ τὸ negativ = ἀρνητικός). Ἀντίθετα, ἂν νοθεύσουμε τὸν κρύσταλλο τοῦ γερμανίου μὲ ἄτομα ἑνὸς τρισθενοῦς στοιχείου (B, Al, Ga) πού στὰ ἄτομά του ὑπάρχουν τρία ηλεκτρόνια σθένους, τότε παίρνουμε ἓναν **ἡμιαγωγὸ p** πού ἔχει τόσες παραπάνω εὐκίνητες ὀπές, ὅσα εἶναι τὰ ἄτομα τοῦ τρισθενοῦς στοιχείου στὸν κρύσταλλο (σχ. 94).



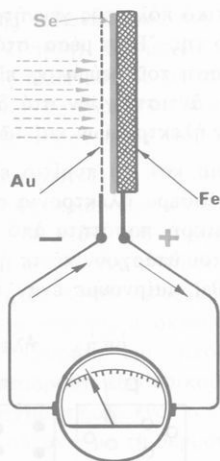
Σχ. 94. Σχηματικὴ παράσταση ἡμιαγωγοῦ p καὶ ἡμιαγωγοῦ n.

Οἱ ἡμιαγωγοὶ προσμίξεως (δηλαδή νοθευμένοι κρύσταλλοι ἡμιαγωγῶν) ἔχουν σήμερα πολλές καὶ σημαντικές ἐφαρμογές, π.χ. χρησιμοποιοῦνται ὡς ξηροὶ ἀνορθωτές, ὡς τρανζίστορ στὰ ραδιόφωνα, στὰ μαγνητόφωνα, στοὺς ηλεκτρονικοὺς ὑπολογιστές κ.ἄ.

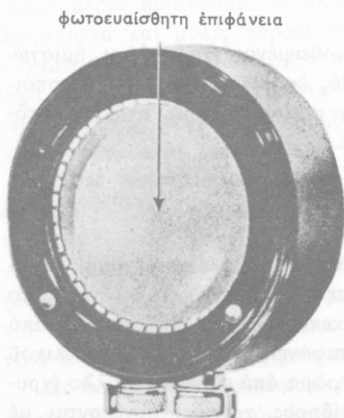
69. Φωτοστοιχεῖο

Τὸ **φωτοστοιχεῖο** εἶναι μιά ἐφαρμογὴ τῶν ἰδιοτήτων πού ἔχουν οἱ ἡμιαγωγοί. Στὴν πράξη τὸ φωτοστοιχεῖο ἀποτελεῖται συνήθως ἀπὸ ἓνα δίσκο σιδήρου πού ἡ μιά ἐπιφάνειά του εἶναι σκεπασμένη μὲ ἓνα στρώμα ἀπὸ ἡμιαγωγὸ ὑλικό (σελήνιο ἢ πυρίτιο). Ἡ ἐπιφάνεια τοῦ ἡμιαγωγοῦ ὑλικοῦ εἶναι σκεπασμένη μὲ ἓνα λεπτὸ διαφανές στρώμα ἀπὸ εὐγενές μέταλλο (χρυσό ἢ λευκόχρυσο). Τὰ δύο ηλεκτρόδια (σίδηρος, χρυσός) συνδέονται μὲ εὐαίσθητο γαλβανόμετρο. (σχ. 95).

Ὄταν πάνω στὸν ἡμιαγωγὸ πέφτει φῶς, τότε μέσα στὸν ἡμιαγωγὸ δημιουργοῦνται *ζεύγη ηλεκτρικῶν φορέων*, δηλαδή ηλεκτρόνια καὶ ὀπές. Τὰ ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στὴ μιά ἄκρη τοῦ ἡμιαγωγοῦ καὶ οἱ ὀπές στὴν



Σχ. 95. Τό φωτοστοιχείο είναι γεννήτρια πού μετατρέπει τή φωτεινή ενέργεια σέ ηλεκτρική ενέργεια.



Σχ. 96. Ή πρόσωση τού φωτοστοιχείου.

φωτοστήλης φτάνει σέ 15%. Σήμερα φωτοστήλες χρησιμοποιούνται κυρίως στους τεχνητούς δορυφόρους καί στά διαστημόπλοια. Αυτές οι φωτο-

άλλη άκρη του. Έτσι στους δύο άκροδέκτες τού φωτοστοιχείου αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού καί τό κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, πού ή έντασή του είναι ανάλογη μέ τή φωτεινή ροή πού πέφτει πάνω στό φωτοστοιχείο. Ωστε :

Τό φωτοστοιχείο λειτουργεί ώς γεννήτρια, στήν όποία ή ένέργεια τών φωτονίων μετατρέπεται άμέσως σέ ηλεκτρική ένέργεια.

Έφαρμογές τού φωτοστοιχείου. Τό φωτοστοιχείο χρησιμοποιείται στή φωτομετρία καί σέ πρακτικές εφαρμογές, όπως π.χ. για τόν προσδιορισμό τού φωτισμού όταν φωτογραφίζουμε, για τή ρύθμιση τής λειτουργίας εγκαταστάσεων, για τήν καταμέτρηση ανθρώπων ή αντικειμένων πού περνούν έμπρός από τό φωτοστοιχείο (σχ. 96). Στήν τελευταία περίπτωση μιá δέσμη φωτεινών ή άόρατων υπέρυθρων ακτίνων πέφτει στό φωτοστοιχείο καί δημιουργεί ένα φωτοηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό καταργείται κάθε φορά πού ένα άδιαφανές σώμα περνάει έμπρός από τό φωτοστοιχείο. Μιá κατάλληλη ηλεκτρομηχανική διάταξη αυτόματα μετράει πόσες φορές καταργείται τό ρεύμα.

Φωτοστήλη. Αν συνδέσουμε κατά σειρά πολλά φωτοστοιχεία σχηματίζουμε μιá φωτοστήλη (ή ήλιακή συστοιχία) πού μπορεί νά μετατρέπει άμέσως τήν ένέργεια τού ήλιακού φωτός σέ ηλεκτρική ένέργεια. Ή απόδοση τής

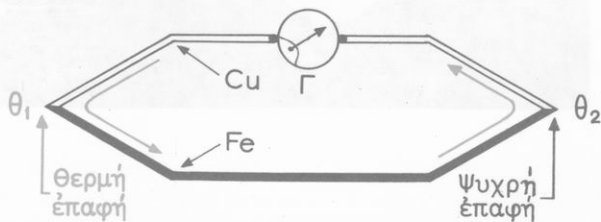
στήλες παράγουν τήν ηλεκτρική ενέργεια πού χρειάζονται οι διάφορες συσκευές για τή λειτουργία τους. Οι φωτοστήλες πού υπάρχουν στο δορυφόρο ή στο διαστημόπλοιο έχουν όλική ισχύ πού φτάνει σε αρκετές εκατοντάδες βάτ.

70. Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

Όταν φέρουμε σε στενή έπαφή δύο διαφορετικά μέταλλα (π.χ. σίδηρο και χαλκό), τότε τά δύο μέταλλα αποκτούν *ετερώονυμα ηλεκτρικά φορτία*. Έτσι μεταξύ των δύο μετάλλων δημιουργείται μιά διαφορά δυναμικού πού ονομάζεται *τάση έπαφής*. Τό φαινόμενο αυτό είναι γενικό και οφείλεται στη μετάβαση όρισμένου αριθμού ηλεκτρονίων από τό ένα μέταλλο στο άλλο. Ωστε:

Όταν έρχονται σε έπαφή δύο διαφορετικά μέταλλα, τότε μεταξύ των δύο μετάλλων *άναπτύσσεται τάση έπαφής*, πού εξαρτάται από τή φύση των μετάλλων και τή θερμοκρασία.

α. Θερμοηλεκτρικό στοιχείο. Σχηματίζουμε κύκλωμα από δύο διαφορετικά μέταλλα, π.χ. από σίδηρο και χαλκό (σχ. 97). Έτσι σε δύο σημεία του κυκλώματος τά δύο μέταλλα βρίσκονται σε έπαφή και έπομένως στά σημεία αυτά *άναπτύσσονται τάσεις έπαφής*. Όταν οι δύο έπαφές έχουν τήν ίδια θερμοκρασία, οι δύο τάσεις έπαφής είναι ίσες και αντίθετες και τό κύκλωμα δέν διαρρέεται από ρεύμα. Άν όμως οι δύο έπαφές έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες θ_1 και θ_2 , τότε οι δύο τάσεις έπαφής είναι *άνισες* και τό κύκλωμα *διαρρέεται από ρεύμα (θερμοηλεκτρικό ρεύμα)*. Σ' αυτή τήν περίπτωση στο κύκλωμα *άναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη* πού ονομάζεται *θερμοηλεκτρική τάση*. Τό ζεύγος των δύο διαφορετικών μετάλλων, πού οι δύο έπαφές τους έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες ονομάζεται *θερμοηλεκτρικό στοιχείο* και αποτελεί μιά *γεννήτρια*. Τό φαινόμενο πού παρατηρούμε στο θερμοηλεκτρικό στοιχείο ονομάζεται *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο*. Ωστε:



Σχ. 97. Θερμοηλεκτρικό στοιχείο.

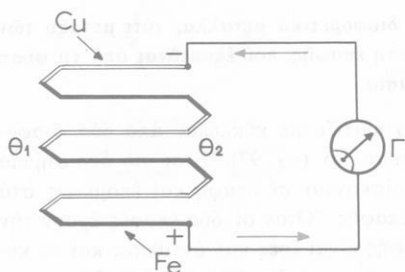
Στό θερμοηλεκτρικό στοιχείο αναπτύσσεται θερμοηλεκτρική τάση ($U_{\text{θερμ}}$) που είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας ($\Delta\theta$) των δύο επαφών και εξαρτάται από τη φύση των δύο μετάλλων.

$$\text{θερμοηλεκτρική τάση } U_{\text{θερμ}} = C \cdot \Delta\theta$$

όπου C είναι ένας συντελεστής που ονομάζεται *συντελεστής θερμοηλεκτρικής τάσεως* και εξαρτάται από τη φύση των δύο μετάλλων. Από την παραπάνω εξίσωση βρίσκουμε $C = U_{\text{θερμ}}/\Delta\theta$. Άρα μονάδα συντελεστή θερμοηλεκτρικής τάσεως είναι 1 Volt/grad. Για τό θερμοηλεκτρικό ζεύγος σίδηρος - χαλκός που πήραμε για παράδειγμα είναι $C = 16 \cdot 10^{-5}$ V/grad.

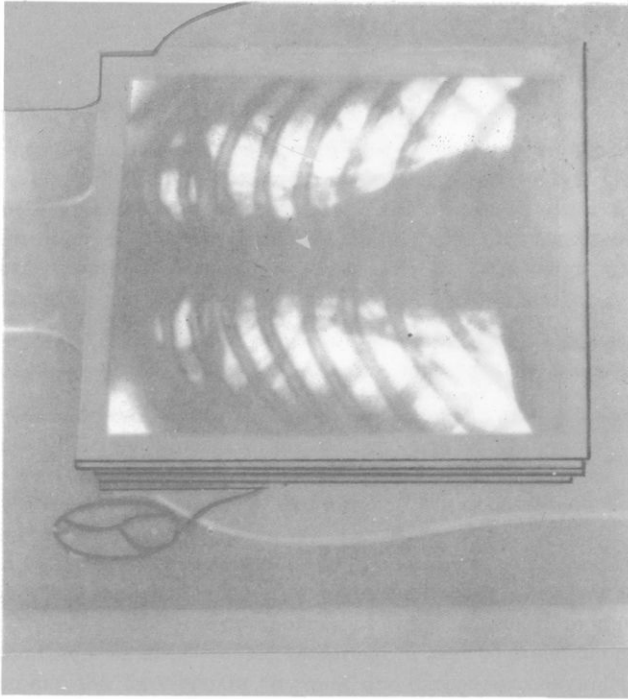
β. Θερμοηλεκτρική στήλη.

Αν συνδέσουμε κατά σειρά πολλά θερμοηλεκτρικά στοιχεία σχηματίζουμε μία *θερμοηλεκτρική στήλη* (σχ. 98). Αυτή, όταν συνδέεται με ευαίσθητο αμπερόμετρο (π.χ. μιλλιαμπερόμετρο), μπορεί να αποδείξει πολύ μικρές διαφορές θερμοκρασίας. Οί θερμοηλεκτρικές στήλες χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακές μετρήσεις και στην

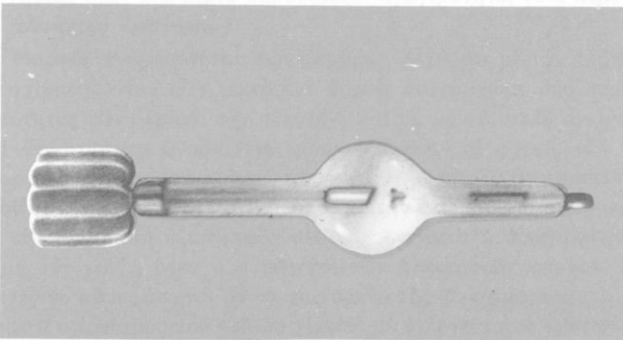


Σχ. 98. Θερμοηλεκτρική στήλη.

τεχνική για τη λειτουργία αυτόματων διατάξεων και για τη μέτρηση θερμοκρασιών (θερμοηλεκτρικά θερμομέτρα).



Άκτινοσκόπηση θώρακα



Σωλήνας Coolidge



Ἄγωγιμότητα τῶν ἀερίων

71. Ἡ ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων

Τά ἀέρια στή συνηθισμένη φυσική τους κατάσταση ἀποτελοῦνται ἀπό οὐδέτερα μόρια ἢ ἄτομα. Ἐνα τέτοιο ἀέριο δέν μπορεῖ νά ἔχει ἠλεκτρική ἀγωγιμότητα, γιατί λείπουν οἱ φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, δηλαδή *τά ἠλεκτρόνια ἢ τά ἰόντα*. Ἐν ὁμως μέσα σέ ἓνα ἀέριο ὑπάρχουν ἐλεύθεροι φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων, τότε αὐτό τό ἀέριο, ὅταν βρεθεῖ μέσα σέ ἠλεκτρικό πεδίο, ἀποκτᾷ *ἀγωγιμότητα*. Ὡστε:

Τά ἀέρια ἀποκοῦν 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 ἓνα ἄτομο ξεφυγε ἓνα ἠλεκτρόνιο, τό ἄτομο μεταβάλλεται σέ *θετικό ἰόν*. Τό ἠλεκτρόνιο πού ξεφυγε συνήθως κολλάει πάνω σέ ἓνα ἄλλο ἄτομο, πού μεταβάλλεται σέ *ἀρνητικό ἰόν*.

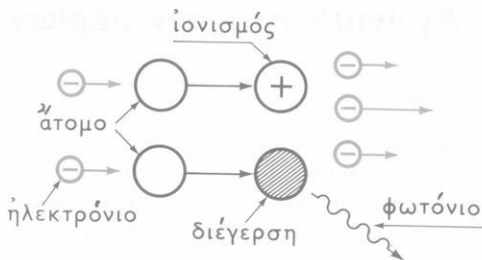
Γιά νά ἰονισθεῖ ἓνα οὐδέτερο ἄτομο (ἢ μόριο), πρέπει τό ἄτομο νά πάρει ὀρισμένη ἐνέργεια, πού ὀνομάζεται *ἐνέργεια ἰονισμοῦ*. Αὐτή τήν ἐνέργεια τήν παίρνει τό ἄτομο, ὅταν συγκρουστεῖ μέ ἓνα ἄλλο σωματίδιο πού ἔχει μεγάλη κινητική ἐνέργεια (*ἰονισμός κρούσεως*), ἢ ὅταν τό ἄτομο ἀπορροφήσει ἐνέργεια ἀπό μιά ἀκτινοβολία (*ἰονισμός ἀπό ἀπορρόφηση ἀκτινοβολίας*).

Συνήθως, ὅταν ἓνα ἀέριο παρουσιάζει ἀγωγιμότητα, τότε λέμε ὅτι συμβαίνει *ἠλεκτρική ἐκκένωση*.

β. Μορφές ἀγωγιμότητας τῶν ἀερίων. Ἀνάλογα μέ τόν τρόπο μέ τόν ὁποῖο σχηματίζονται οἱ ἠλεκτρικοί φορεῖς διακρίνουμε δύο περιπτώσεις ἀγωγιμότητας τῶν ἀερίων, *τήν αὐτοτελή καί τή μὴ αὐτοτελή ἀγωγιμότητα*.

Ἡ ἀγωγιμότητα ὀνομάζεται *αὐτοτελής*, ὅταν οἱ φορεῖς τῶν ἠλεκτρικῶν φορτίων (ἠλεκτρόνια, ἰόντα) παράγονται μέσα στό ἀέριο κατά τή διάρκεια τοῦ φαινομένου τῆς ἀγωγιμότητας μέ τήν ἐπίδραση *ἠλεκτρικοῦ πεδίου*, χωρίς τήν ἐπέμβαση ἐξωτερικοῦ αἰτίου. Ἀντίθετα ἡ ἀγωγιμότητα ὀνομάζεται *μὴ αὐτοτελής*, ὅταν ἡ παραγωγή τῶν ἠλεκτρικῶν φορέων ὀφείλεται σέ *ἐξωτερικά αἶτια*, ἄσχετα μέ τό φαινόμενο τῆς ἀγωγιμότητας. Σ' αὐτή τήν περίπτωση ὁ ἰονισμός τοῦ ἀερίου γίνεται μέ ἐνέργεια πού προσφέρεται στά ἄτομα (ἢ μόρια) τοῦ ἀερίου ἀπέξω. Ὡστε:

Μέσα σέ ἓνα ἀέριο παράγονται φορεῖς ἠλεκτρικῶν φορτίων (ἠλεκτρόνια, ἰόντα) μέ τήν ἐπίδραση ἠλεκτρικοῦ πεδίου (αὐτοτελής ἀγωγιμότητα) ἢ μέ τήν ἐπίδραση ἐξωτερικῶν αἰτίων (μὴ αὐτοτελής ἀγωγιμότητα).



Σχ. 99. Από τη σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο του αερίου προκαλείται η ιονισμός του ατόμου ή διέγερση του ατόμου.

α. Φωτεινά φαινόμενα κατά την αυτοτελή αγωγιμότητα. Συνήθως κατά την αυτοτελή αγωγιμότητα εμφανίζονται φωτεινά φαινόμενα. Η φωτοβολία του αερίου ερμηνεύεται ως εξής: Όταν οι φορείς ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρόνια ή ιόντα) κινούνται μέσα στο αέριο με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, τότε μπορεί να

συμβούν τα ακόλουθα φαινόμενα:

1) Αν ο ηλεκτρικός φορέας, π.χ. ένα ηλεκτρόνιο, έχει μεγάλη κινητική ενέργεια, τότε κατά τη σύγκρουση του ηλεκτρονίου με ένα άτομο (ή μόριο) του αερίου προκαλείται *ιονισμός* του ατόμου, δηλαδή ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια ξεφεύγουν από το άτομο, και έτσι το άτομο μεταβάλλεται σε θετικό ιόν (σχ. 99).

2) Αν το ηλεκτρόνιο δεν έχει μεγάλη κινητική ενέργεια, τότε κατά τη σύγκρουσή του με ένα άτομο του αερίου, το άτομο *παίρνει* ενέργεια E και αποκτά μία κατάσταση *διέγερσης*, δηλαδή μία ασταθή κατάσταση. Αυτή η κατάσταση διαρκεί ελάχιστο χρόνο (περίπου 10^{-8} sec) και το άτομο επανέρχεται στην κανονική του κατάσταση *αποβάλλοντας* την ενέργεια E με τη μορφή *φωτονίου*.

Αν η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου δεν είναι ικανή να προκαλέσει ιονισμό ή διέγερση του ατόμου, τότε η σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο (ή μόριο) του αερίου είναι μία *άπλή ελαστική κρούση*. Ωστε:

Η φωτοβολία του αερίου κατά την αυτοτελή αγωγιμότητα οφείλεται σε διέγερση των ατόμων του αερίου, ή οποία προκαλείται, όταν τα άτομα (ή μόρια) του αερίου συγκρούονται με ηλεκτρόνια ή ιόντα που έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια.

Ένδιαφέρονσα μορφή αυτοτελους αγωγιμότητας είναι η *εκκένωση αΐγλης*.

γ. Διαρκής ιονισμός του αέρα. Αν μέσα στον αέρα αφήσουμε ένα ηλεκτρισμένο και μονωμένο ηλεκτροσκόπιο, παρατηρούμε ότι έπειτα από λίγο χρόνο το ηλεκτροσκόπιο χάνει το θετικό ή αρνητικό φορτίο του. Αυτό συμβαίνει, γιατί πάντοτε μέσα στον αέρα υπάρχουν *θετικά* και *αρνητικά ιόντα*. Ο αριθμός των ιόντων που υπάρχουν μέσα στον αέρα μεταβάλλεται με το ύψος πάνω από την επιφάνεια της Γης. Σε ύψος πάνω από 100 km

υπάρχει ένα στρώμα της ατμόσφαιρας που ονομάζεται **ιονόσφαιρα** και παρουσιάζει ισχυρό ιονισμό. Αυτός οφείλεται στις *υπεριώδεις ήλιακές ακτινοβολίες*, σε *ηλεκτρόνια* που εκπέμπονται από τον Ήλιο και σε μία ιδιαίτερη ακτινοβολία, που φτάνει στον πλανήτη μας από όλα τα σημεία του αστρικού διαστήματος, και ονομάζεται *κοσμική ακτινοβολία* ή *κοσμικές ακτίνες*. Ωστε:

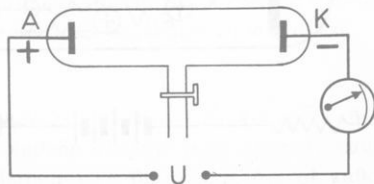
- I. Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι πάντοτε ιονισμένος.
- II. Ο ιονισμός του αέρα οφείλεται σε ιονισμό κρούσεως και σε ιονισμό από απορρόφηση ακτινοβολίας.

72. Ήλεκτρικές εκκενώσεις μέσα σε αραιωμένα αέρια

α. Έκκενωση αΐγλης. Ένας γυάλινος σωλήνας (σχ. 100) έχει στις άκρες του δύο ηλεκτρόδια, που τα ονομάζουμε αντίστοιχα *άνοδο* (A) και *κάθοδο* (K). Εφαρμόζουμε στα δύο ηλεκτρόδια μία ψηλή συνεχή τάση (U) μερικώς χιλιάδων βόλτ. Στην αρχή ο σωλήνας περιέχει αέρα με τη συνηθισμένη ατμοσφαιρική πίεση. Τότε ο αέρας που είναι μέσα στο σωλήνα δεν έχει αγωγιμότητα και στο κύκλωμα δεν κυκλοφορεί ρεύμα. Με μία αεραντλία αρχίζουμε να ελαττώνουμε προοδευτικά την πίεση του αέρα. Όταν η πίεση ελαττωθεί αρκετά (γύρω στα 40 mm Hg), τότε μέσα στο σωλήνα συμβαίνει *ηλεκτρική εκκένωση* και παρατηρούμε ότι μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων σχηματίζονται φωτεινά νήματα, που δίνουν την εντύπωση ηλεκτρικού σπινθήρα (βλ. εικόνα εκτός κειμένου). Η πίεση στην οποία αρχίζει η ηλεκτρική εκκένωση δεν είναι ορισμένη, γιατί εξαρτάται από το μήκος του σωλήνα και την τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.

Αν η πίεση ελαττωθεί ακόμη περισσότερο (γύρω στα 10 mm Hg) τότε τα φωτεινά νήματα γίνονται πλατύτερα και αποτελούν μία φωτεινή στήλη, που λέγεται *θετική στήλη* και γεμίζει όλο το σωλήνα (*αΐγλη*). Τότε ο σωλήνας εκπέμπει ομοιόμορφο φως με χρώμα κοκκινωπό. Σ' αυτή τη φάση της εκκενώσεως ο σωλήνας ονομάζεται *σωλήνας Geissler*. Η θετική στήλη χωρίζεται από την κάθοδο με μία σκοτεινή περιοχή ενώ πολύ κοντά στην κάθοδο υπάρχει ένα φωτεινό στρώμα αέρα με κυανό χρώμα, η *αρνητική αΐγλη*.

Αν εξακολουθήσουμε την αραίωση του αέρα, η θετική στήλη αρχίζει να οπισθοχωρεί προς την άνοδο και εμφανίζονται μέσα στο σωλήνα σκοτεινές περιοχές. Η μορφή της εκκενώσεως που παρατηρούμε με αυτό



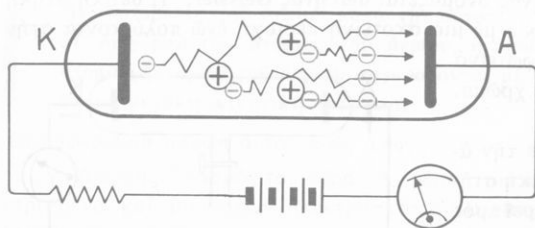
Σχ. 100. Σχηματική διάταξη για τη μελέτη της ηλεκτρικής εκκενώσεως μέσα σε αραιωμένο αέριο.

τό πείραμα ονομάζεται *έκκένωση αΐγλης*.

Όταν ή πίεση του άερα μέσα στό σωλήνα γίνει πολύ μικρή (μικρότερη άπό 0,05 mm Hg), τότε τό ρεύμα έξακολουθεΐ νά κυκλοφορεΐ στό κύκλωμα, αλλά όλα τά φωτεινά φαινόμενα *έξαφανίζονται*. Τό έσωτερικό του σωλήνα είναι σκοτεινό καΐ μόνο τά τοιχώματα του σωλήνα που βρίσκονται άπέναντι άπό τήν κάθοδο *φθορίζουν* καΐ *έκπέμπουν* ένα άσθενές πρασινωπό φώς. Αύτός ό φθορισμός φανερώνει ότι πάνω σ' αυτό τό τμήμα του γυαλιού πέφτουν *άόρατες άκτίνες* που προέρχονται άπό τήν κάθοδο καΐ γι' αυτό ονομάστηκαν *καθοδικές άκτίνες*. Τότε ό σωλήνας ονομάζεται *σωλήνας Crookes*.

Τά ίδια φαινόμενα παρατηρούμε καΐ μέ οποιοδήποτε άλλο άέριο μέ τή διαφορά ότι τό χρώμα που *έκπέμπει* ή θετική στήλη *έξαρτάται* άπό τή φύση του άερίου.

β. Μηχανισμός τής *έκκενώσεως* αΐγλης. Όπως *ξέρουμε* διάφορα αίτια προκαλούν πάντοτε *ιονισμό* του άερα. Έπομένως στον άερα που αρχικά είναι μέσα στό σωλήνα *ύπάρχει* ένας πολύ μικρός αριθμός *θετικών* καΐ *άρνητικών ιόντων* καΐ *ελεύθερων ηλεκτρονίων*. Τό ίδιο συμβαίνει καΐ σέ κάθε άλλο άέριο. Άς θεωρήσουμε ότι μέσα στό σωλήνα *ύπάρχει* ένα άέριο μέ μικρή πίεση καΐ ότι πολύ κοντά στην κάθοδο βρίσκεται ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο (σχ. 100α). Μέ τήν *επίδραση* του ισχυρού *ηλεκτρικού πεδίου* τό ηλεκτρόνιο αρχίζει νά κινείται προς τήν *άνοδο* μέ *επιτάχυνση*. Άλλά στην πορεία του προς τήν *άνοδο συγκρούεται* μέ μόρια του άερίου. Όταν ή *κινητική ενέργεια* του ηλεκτρονίου δέν είναι *άρκετά μεγάλη*, τότε κατά τή σύγκρουσή του μέ τό μόριο προκαλεί μόνο *διέγερση* του μορίου, δηλαδή τό κάνει *ικανό* νά *έκπέμπει* φωτεινή *άκτινοβολία*. Όταν όμως τό ηλεκτρόνιο *άποκτήσει* μεγάλη *κινητική ενέργεια*, τότε κατά τή σύγκρουσή του μέ ένα μόριο προκαλεί *ιονισμό* του μορίου καΐ έτσι *σχηματίζονται* ένα *θετικό* *ίόν* καΐ ένα *ελεύθερο ηλεκτρόνιο*, που μέ τήν *επίδραση*



Σχ. 100α. Άπό τίς συγκρούσεις των ηλεκτρονίων μέ τά άτομα του άερίου προκύπτουν ηλεκτρόνια που κατευθύνονται προς τήν *άνοδο* Α καΐ θετικά *ίόντα* που κατευθύνονται προς τήν *κάθοδο* Κ.

του ηλεκτρικού πεδίου αρχίζει καΐ αυτό νά κινείται προς τήν *άνοδο* προκαλώντας στην πορεία του *διέγερση* των μορίων καΐ *σχηματισμό* νέων *θετικών ιόντων* καΐ *ελεύθερων ηλεκτρονίων*. Έτσι τελικά φτάνει στην *άνοδο* ένας *μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων*.

Μέσα στο άεριο σχηματίστηκαν και πολλά θετικά ιόντα. Αυτά, με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, κινούνται προς την κάθοδο. Έπειδή όμως έχουν μεγάλη μάζα, δέν αποκτούν μεγάλη ταχύτητα και επομένως δέν έχουν την ικανότητα νά προκαλέσουν ιονισμό. Τά θετικά ιόντα, όταν φτάσουν στην κάθοδο, παίρνουν από αυτή ηλεκτρόνια και γίνονται ουδέτερα μόρια. Μερικά όμως θετικά ιόντα κατά τή σύγκρουσή τους με τήν κάθοδο αναγκάζουν μερικά ηλεκτρόνια νά ξεφύγουν από τήν κάθοδο (δευτερογενή ηλεκτρόνια). Αυτά τά ηλεκτρόνια κατά τήν πορεία τους προς τήν άνοδο δημιουργούν τά ίδια πάλι φαινόμενα. Έτσι ή εκκένωση διατηρείται όσο χρόνο ύπάρχει τό ηλεκτρικό πεδίο. Παρατηρούμε ότι οι φορείς των ηλεκτρικών φορτίων (ηλεκτρόνια, θετικά ιόντα) παράγονται κατά τή διάρκεια του φαινομένου τής άγωγιμότητας. Έτσι:

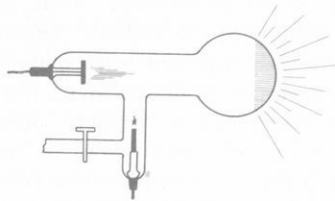
Η εκκένωση αίγλης όφείλεται στον ιονισμό του αερίου, που προκαλείται από τις συνεχείς συγκρούσεις των μορίων του αερίου με ηλεκτρόνια, τά όποια με τήν επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου αποκτούν μεγάλη κινητική ενέργεια.

γ. Έφαρμογές τής εκκενώσεως αίγλης. Η εκκένωση αίγλης είναι μία μορφή άγωγιμότητας των αερίων που έμφανίζεται σε άερια με μικρή πίεση. Σήμερα σε πολλές εφαρμογές εκμεταλλευόμαστε τήν εκκένωση αίγλης. Στή φασματοσκοπία χρησιμοποιούμε ειδικούς σωλήνες Geissler που περιέχουν ένα άεριο με μικρή πίεση (περίπου 5 mm Hg). Τό φως που εκπέμπει τό άεριο δίνει γραμμικό φάσμα, που είναι χαρακτηριστικό για κάθε άεριο. Οι σωλήνες των φωτειών διαφημίσεων είναι σωλήνες Geissler, που περιέχουν διάφορα άερια, ανάλογα με τό χρώμα του φωτός που θέλουμε. Η πίεση του αερίου μέσα στο σωλήνα είναι μικρή (περίπου 10 mm Hg). Έως άσθενείς φωτεινές πηγές χρησιμοποιούνται μικροί λαμπτήρες αίγλης που περιέχουν ένα ευγενές άεριο (νέο) με χαμηλή πίεση. Τά δύο ηλεκτρόδια είναι πολύ κοντά τό ένα με τό άλλο και είναι σπειροειδή ή μικρά πλακίδια (συνήθως σε σχήμα σταυρού). Λειτουργούν με τή συνηθισμένη τάση (220 V), έχουν πολύ μικρή κατανάλωση και χρησιμοποιούνται ως δείκτες σε διάφορες συσκευές, για τόν άσθενή φωτισμό δωματίων τή νύχτα κ.ά.

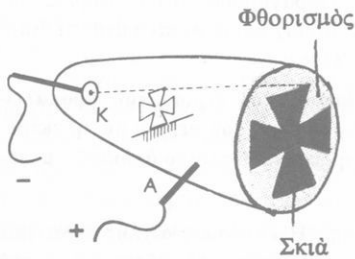
73. Καθοδικές άκτίνες

α. Ιδιότητες των καθοδικών άκτίνων Στο σωλήνα Crookes τό τμήμα του γυαλιού που είναι άπέναντι στην κάθοδο φθορίζει γιατί πέφτουν πάνω του οι καθοδικές άκτίνες (σχ. 101). Πειραματικά βρίσκουμε ότι οι καθοδικές άκτίνες έχουν τής εξής ιδιότητες:

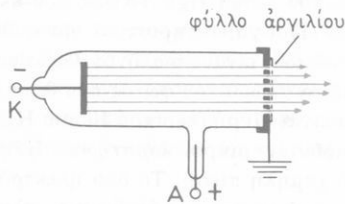
1. Προκαλούν τό φθορισμό πολλών σωμάτων, π.χ. του γυαλιού, του άσβεστίου, του κυανιούχου βαριολευκοχρύσου κ.ά.



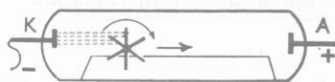
Σχ. 101. Σωλήνας Crookes για την παραγωγή καθοδικών ακτίνων.



Σχ. 102. Εὐθύγραμμη διάδοση τῶν καθοδικῶν ακτίνων.



Σχ. 102α. Οἱ καθοδικές ακτίνες περνοῦν μέσα ἀπὸ λεπτό φύλλο ἀλουμινίου.



Σχ. 103. Μηχανικά ἀποτελέσματα τῶν καθοδικῶν ακτίνων.

2. Προσβάλλουν τὴ φωτογραφικὴ πλάκα καὶ προκαλοῦν χημικὲς ἀλλοιώσεις σὲ ὀρισμένα σώματα, π.χ. γυαλί πού περιέχει μόλυβδο (κρύσταλλο) μαυρίζει, γιατί ἐλευθερώνεται μόλυβδος.

3. Φεύγουν κάθετα ἀπὸ τὴν κάθοδο καὶ διαδίδονται εὐθύγραμμα, ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὴ θέση πού ἔχει ἡ ἄνοδος. Ἐάν στὴν πορεία τῶν καθοδικῶν ακτίνων βάλουμε ἕνα σῶμα, τότε πίσω ἀπὸ τὸ σῶμα σχηματίζεται ἡ σκιά τοῦ σώματος πάνω στό τοίχωμα τοῦ σωλήνα πού φθορίζει (σχ. 102).

4. Ὄταν πέφτουν πάνω σὲ ἕνα σῶμα, προκαλοῦν θέρμανση τοῦ σώματος, π.χ. μποροῦν νά λευκοκυρώσουν ἕνα ἔλασμα ἀπὸ λευκόχρυσο.

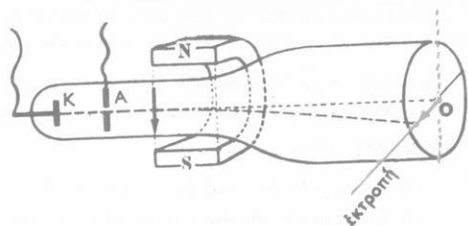
5. Ἔχουν διεισδυτικὴ ἰκανότητα. Τὸ τοίχωμα τοῦ σωλήνα πού εἶναι ἀπέναντι ἀπὸ τὴν κάθοδο ἔχει μικρὸ ἄνοιγμα πού κλείνεται μὲ ἕνα λεπτό φύλλο ἀπὸ ἀλουμίνιο (πάχους 0,001 mm). Οἱ καθοδικές ακτίνες περνοῦν μέσα ἀπὸ τὴ μάζα τοῦ ἀλουμινίου καὶ βγαίνουν στὸν ἀέρα, ὁ ὁποῖος φωτοβολεῖ σὲ ἀπόσταση 5 cm ἀπὸ τὸ τοίχωμα τοῦ σωλήνα (σχ. 102α).

6. Προκαλοῦν μηχανικά φαινόμενα. Ἐάν οἱ καθοδικές ακτίνες πέφτουν πάνω στὰ πτερύγια ἐνός εὐκίνητου μύλου, αὐτὸς ἀρχίζει νά περιστρέφεται (σχ. 103).

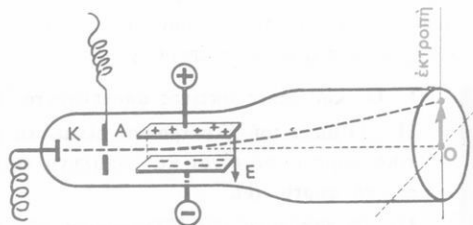
7. Μὲ τὴν ἐπίδραση μαγνητικοῦ πεδίου ἐκτρέπονται ἀπὸ τὴν εὐθύ-

γραμμὴ τροχιά τους. Μὲ ἕνα διάφραγμα πού ἔχει μικρὴ τρύπα δημιουργοῦμε μιά ὀριζόντια λεπτὴ δέσμη καθοδικῶν ακτίνων πού σχηματίζει ἕνα φωτεινὸ σημεῖο πάνω στό τοίχωμα πού φθορίζει (σχ. 104).

Όταν οι καθοδικές ακτίνες της δέσμης είναι κάθετες στις δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, παρατηρούμε ότι οι καθοδικές ακτίνες εκτρέπονται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Αυτή η εκτροπή είναι ίδια με την εκτροπή που θα πάθαινε από αυτό το μαγνητικό πεδίο ένα εθύγραμμο ρεύμα που θα είχε φορά (συμβατική) αντίθετη με τη φορά των καθοδικών ακτίνων.

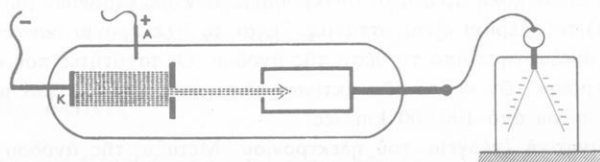


Σχ. 104. Έκτροπή των καθοδικών ακτίνων με την επίδραση μαγνητικού πεδίου.



Σχ. 105. Έκτροπή των καθοδικών ακτίνων με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

8. Με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου εκτρέπονται από την εθύγραμμη τροχιά τους. Αυτή η εκτροπή φαίνεται, αν μέσα στο σωλήνα υπάρχει ένας πυκνωτής (σχ. 105). Οι καθοδικές ακτίνες μιας λεπτής δέσμης περνώντας μέσα από το ομογενές ηλεκτρικό πεδίο εκτρέπονται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. σάν να έλκονται από το θετικό όπλισμό του πυκνωτή.
9. Μεταφέρουν αρνητικά ηλεκτρικά φορτία. Αυτό φαίνεται από την εκτροπή που παθαίνουν οι καθοδικές ακτίνες με την επίδραση μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου, τό διαπιστώνουμε όμως και ως εξής: Μέσα στο σωλήνα και απέναντι από την κάθοδο υπάρχει ένας μονωμένος μεταλλικός κύλινδρος (σχ. 106). Αυτός συνδέεται με ηλεκτρο-



Σχ. 106. Οι καθοδικές ακτίνες μεταφέρουν αρνητικά φορτία.

σκόπιο πού βρίσκεται έξω από τό σωλήνα. Όταν οί καθοδικές άκτίνες πέφτουν μέσα στόν κύλινδρο, αυτός αποκτά άρνητικό φορτίο.

β. Φύση τών καθοδικών άκτίνων. Από τήν έκτροπή πού παθαίνουν οί καθοδικές άκτίνες μέ τήν επίδραση μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου άποδείχτηκε ότι:

Οί καθοδικές άκτίνες άποτελοῦνται από σωματίδια πού έχουν άρνητικό ήλεκτρικό φορτίο καί κινοῦνται εὐθύγραμμα.

Πειραματικά μποροῦμε νά μετρήσουμε *τή μάζα, τό ήλεκτρικό φορτίο* καί *τήν ταχύτητα* τών σωματιδίων πού άποτελοῦν τίς καθοδικές άκτίνες. Έτσι καταλήξαμε στά ἑξῆς συμπεράσματα:

I. Οί καθοδικές άκτίνες άποτελοῦνται από ήλεκτρόνια.

II. Ἡ μάζα τοῦ ήλεκτρονίου εἶναι ἴση μέ $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg καί τό άρνητικό φορτίο του εἶναι κατ' άπόλυτη τιμή ἴσο μέ τό στοιχειῶδες ήλεκτρικό φορτίο (e).

III. Ἡ ταχύτητα τών ήλεκτρονίων τών καθοδικών άκτίνων ἑξαρτᾶται από τήν τάση πού ὑπάρχει μεταξύ τῆς άνόδου καί τῆς καθόδου.

μάζα ήλεκτρονίου	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
φορτίο ήλεκτρονίου	$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb

γ. Παραγωγή τών καθοδικών άκτίνων. Στο σωλήνα Crookes ή πίεση τοῦ αέριου εἶναι πολύ μικρή καί αντίθετα ή τάση πού εφαρμόζεται στά ήλεκτρόδια εἶναι πολύ μεγάλη. Πειραματικά άποδεικνύεται ότι πολύ κοντά στήν κάθοδο ὑπάρχει μία περιοχή ὅπου τό ήλεκτρικό πεδίο ἔχει *μεγάλη ένταση*. Μέσα σ' αὐτή τήν περιοχή μερικά ἄτομα τοῦ αέριου *ιονίζονται*, δηλαδή χάνουν συνήθως ἕνα ήλεκτρόνιο κατά ἄτομο. Τά ήλεκτρόνια πού ἐλευθερώνονται μέσα σ' αὐτή τήν περιοχή πολύ γρήγορα *ἀποκτοῦν μεγάλη ταχύτητα* μέ διεύθυνση *κάθετη στήν ἐπιφάνεια τῆς καθόδου*, γιατί ή ένταση (\vec{E}) τοῦ ήλεκτρικού πεδίου εἶναι κάθετη στήν ἐπιφάνεια τῆς καθόδου. Ἐπειδή τό αέριο εἶναι πολύ ἀραιό, οί συγκρούσεις τών ήλεκτρονίων μέ τά ἄτομα (ή μόρια) τοῦ αέριου εἶναι σπάνιες. Ἐτσι τά ήλεκτρόνια *κινοῦνται εὐθύγραμμα*, ἀνεξάρτητα από τή θέση τῆς άνόδου. Οί ταχύτητες πού ἀποκτοῦν τά ήλεκτρόνια τών καθοδικών άκτίνων εἶναι *πολύ μεγάλες* καί μπορεῖ νά φτάσουν πάνω από 100 000 km/sec.

δ. Κινητική ἐνέργεια τοῦ ήλεκτρονίου. Μεταξύ τῆς άνόδου καί τῆς καθόδου ὑπάρχει ή τάση U , πού δημιουργεῖ τό ήλεκτρικό πεδίο. Ἐνά ήλεκτρόνιο ξεκινάει από τήν ἐπιφάνεια τῆς καθόδου χωρίς άρχική ταχύτητα.

Τό ηλεκτρόνιο, εξαιτίας τοῦ ηλεκτρικοῦ πεδίου, κινεῖται μέ ἐπιτάχυνση καί ἂν στήν πορεία του δέ συγκρουστεῖ μέ μόρια τοῦ αερίου, φτάνει στήν ἄνοδο μέ *κινητική ἐνέργεια* $E_{κιν} = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$. Αὐτή ἡ ἐνέργεια εἶναι ἴση μέ τό ἔργο πού παράγεται ἀπό τό ηλεκτρικό πεδίο. Τό ἔργο αὐτό εἶναι κατ' ἀπόλυτη τιμή ἴσο μέ $e \cdot U$ καί, ἐπομένως, ἰσχύει ἡ ἐξίσωση:

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = e \cdot U \quad (1) \quad \text{καί} \quad \boxed{E_{κιν} = e \cdot U} \quad (2)$$

Ἐπίσης ἀπό τήν ἐξίσωση (1) βρίσκουμε ὅτι ἡ ταχύτητα v πού ἀποκτᾶ τό ἠλεκτρόνιο ἐξαρτᾶται ἀπό τήν τάση U πού ἐφαρμόζεται στόν καθοδικό σωλήνα καί δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση:

$$\boxed{\text{ταχύτητα ἠλεκτρονίου } v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m_e}}}$$

ε. Ἡ μονάδα ἐνέργειας ἠλεκτρονιοβόλτ. Ἐάν στήν ἐξίσωση (2) βάλουμε $U = 1 \text{ V}$, βρίσκουμε $E_{κιν} = |e| \cdot U = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb} \cdot 1 \text{ V}$ καί $E_{κιν} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$. Αὐτή ἡ ἐνέργεια τοῦ ἠλεκτρονίου εἶναι μιᾶ ἄλλη *μονάδα ἐνέργειας*, πού ὀνομάζεται **ἠλεκτρονιοβόλτ** (1 eV, electron - Volt) καί ὀρίζεται ὡς ἐξῆς:

1 ἠλεκτρονιοβόλτ (1 eV) εἶναι ἡ ἐνέργεια πού ἀποκτᾶ ἕνα ἠλεκτρόνιο, ὅταν ἐπιταχύνεται ἀπό τάση πού εἶναι ἴση μέ 1 Volt.

$$\boxed{1 \text{ ἠλεκτρονιοβόλτ (1eV)} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}}$$

Ἡ μονάδα ἠλεκτρονιοβόλτ χρησιμοποιεῖται πολύ στήν Ἀτομική καί Πυρηνική Φυσική. Συνήθως χρησιμοποιοῦνται καί τά ἐξῆς πολλαπλάσια τῆς μονάδας ἠλεκτρονιοβόλτ:

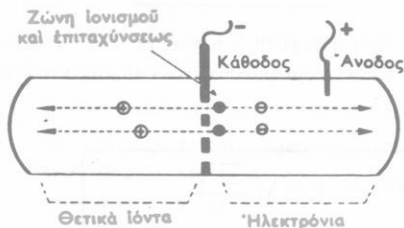
- 1 Μέγα - ἠλεκτρονιοβόλτ : 1 MeV = 10⁶ eV
- 1 Γίγα - ἠλεκτρονιοβόλτ : 1 GeV = 10⁹ eV

74. Θετικές ἀκτίνες

Στό σωλήνα Crookes ἀπό τόν ἰονισμό τῶν ἀτόμων τοῦ αερίου σχηματίζονται *θετικά ἰόντα* καί *ἠλεκτρόνια*. Μέ τήν ἐπίδραση τοῦ ηλεκτρικοῦ πεδίου τά θετικά ἰόντα κινοῦνται *πρός τήν κάθοδο*. Ὅπως ὁμως μάθαμε

πολύ κοντά στην κάθοδο υπάρχει μία περιοχή, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ μεγάλη. Μέσα σ' αυτήν την περιοχή, που είναι μία ζώνη *ιονισμού* και *επιταχύνσεως*, επιταχύνονται όχι μόνο τα ηλεκτρόνια των καθοδικών ακτίνων, αλλά και τα θετικά ιόντα που κινούνται προς την κάθοδο. Έτσι πολύ κοντά στην κάθοδο τα θετικά ιόντα αποκτούν *μεγάλη ταχύτητα* με δεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια της καθόδου.

Αν η κάθοδος έχει μικρές τρύπες, τότε μερικά από τα θετικά ιόντα που κινούνται προς την κάθοδο περνούν μέσα από τις τρύπες και εξακολουθούν να κινούνται *εθύγραμμα πίσω από την κάθοδο* (σχ. 107). Αυτά τα θετικά ιόντα αποτελούν μία δέσμη ακτίνων που ονομάζονται *θετικές ακτίνες* (ή και *διαυλικές ακτίνες*). Η δέσμη των θετικών ακτίνων έχει μία *ασθενή φωτοβολία*.



Σχ. 107. Οί θετικές ακτίνες είναι θετικά ιόντα.

α. *Ιδιότητες των θετικών ακτίνων.* Οί θετικές ακτίνες με την επίδραση *μαγνητικού* ή *ηλεκτρικού πεδίου* εκτρέπονται από την *εθύγραμμη τροχιά* τους, προσβάλλουν *τή φωτογραφική πλάκα* και προκαλούν *τό φθορισμό* σε όρισμένα σώματα. Έπειδή τα σωματίδια των θετικών ακτίνων έχουν *μάζα πολύ μεγαλύτερη* από τή *μάζα* του ηλεκτρονίου, γι' αυτό τα σωματίδια των θετικών ακτίνων έχουν *ταχύτητα πολύ μικρότερη* από την ταχύτητα που έχουν τα ηλεκτρόνια των καθοδικών ακτίνων.

Από τήν *εκτροπή* που παθαίνει με τήν *επίδραση μαγνητικού* και *ηλεκτρικού πεδίου* μία *λεπτή δέσμη* θετικών ακτίνων μπορούμε να μετρήσουμε *τή μάζα, τό ηλεκτρικό φορτίο* και *τήν ταχύτητα* ενός σωματιδίου των θετικών ακτίνων. Έτσι καταλήξαμε στο *έξηξ συμπέρασμα*:

Τά σωματίδια των θετικών ακτίνων είναι θετικά ιόντα του αερίου, που έχουν ένα ή περισσότερα στοιχειώδη θετικά ηλεκτρικά φορτία.

Αν π.χ. μέσα στο σωλήνα Crookes υπάρχει υδρογόνο, τότε οί θετικές ακτίνες που σχηματίζονται, αποτελούνται από τούς πυρήνες των ατόμων υδρογόνου, δηλαδή από *πρωτόνια*. Σ' αυτή τήν περίπτωση βρίσκουμε τά *έξηξ εξαγόμενα*:

μάζα πρωτονίου	$m_p = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
φορτίο πρωτονίου	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Τό υδρογόνο αποτελείται από δύο ισότοπα, τό κοινό υδρογόνο H^1 και τό δευτέριο H^2 , ενώ άλλα στοιχεία αποτελούνται από περισσότερα ισότοπα, π.χ. ό κασσίτερος (Sn) αποτελείται από δέκα ισότοπα. Η διάταξη μέ τήν όποία διαχωρίζουμε τά ισότοπα ενός στοιχείου ονομάζεται **φασματογράφος των μαζών**. Αυτός διαχωρίζει τά θετικά ιόντα των ισωτόπων ενός στοιχείου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

104. Σε ένα σωλήνα Crookes σχηματίζεται ρεύμα έντάσεως 10 mA. Πόσα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο κατά δευτερόλεπτο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

105. Σε έναν καθοδικό σωλήνα εφαρμόζεται τάση $U = 10\ 000$ V. Πόση ταχύτητα και πόση κινητική ενέργεια αποκτούν τά ηλεκτρόνια των καθοδικών ακτίνων; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

106. Μέσα σε έναν καθοδικό σωλήνα υπάρχει πυκνωτής που οι όπλισμοί του είναι όριζόντιοι, έχουν μήκος $l = 6$ cm και ή μεταξύ τους απόσταση είναι $d = 2$ cm. Στους όπλισμούς του πυκνωτή εφαρμόζεται τάση $U = 500$ V. Η λεπτή καθοδική δέσμη είναι όριζόντια και αποτελείται από ηλεκτρόνια που κινούνται μέ σταθερή ταχύτητα $v_0 = 25 \cdot 10^3$ km/sec. Η καθοδική δέσμη μπαίνει μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ των όπλισμών του πυκνωτή και κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. 1) Πόσο χρόνο ένα ηλεκτρόνιο κινείται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο; 2) Βγαίνοντας τό ηλεκτρόνιο από τό ηλεκτρικό πεδίο, πόσο έχει έκτραπει από τήν αρχική διεύθυνση τής κινήσεώς του; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

107. Τά ηλεκτρόνια μιάς λεπτής καθοδικής δέσμης κινούνται μέ σταθερή ταχύτητα $v_0 = 10^8$ m/sec και μπαίνουν μέσα σε όμογενές ηλεκτρικό πεδίο, που έχει ένταση $E = 2,8 \cdot 10^4$ V/m. Η ταχύτητα v_0 είναι κάθετη στις κατακόρυφες δυναμικές γραμμές του πεδίου. 1) Τί τροχιά διαγράφει τό ηλεκτρόνιο μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο; 2) Πόση επιτάχυνση αποκτά τό ηλεκτρόνιο; 3) Αν ή κατακόρυφη έκτροπή του ηλεκτρονίου από τήν αρχική όριζόντια διεύθυνση τής κινήσεώς του είναι $h = 4$ cm, πόσο χρόνο κινήθηκε τό ηλεκτρόνιο μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

108. Τά ηλεκτρόνια μιάς λεπτής καθοδικής δέσμης επιταχύνονται από τάση U και αποκτούν ταχύτητα $v = 10^4$ km/sec. Πόση είναι ή κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου τής δέσμης και πόση είναι ή τάση U ; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

109. Μιά λεπτή δέσμη θετικών ακτίνων αποτελείται από άτομικούς πυρήνες υδρογόνου, δηλαδή από πρωτόνια, που επιταχύνονται από τάση $U = 1000$ V. Πόση ταχύτητα και πόση κινητική ενέργεια αποκτά κάθε πρωτόνιο αυτής τής δέσμης; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Άγωγιμότητα στο κενό

75. Ή άγωγιμότητα στο κενό

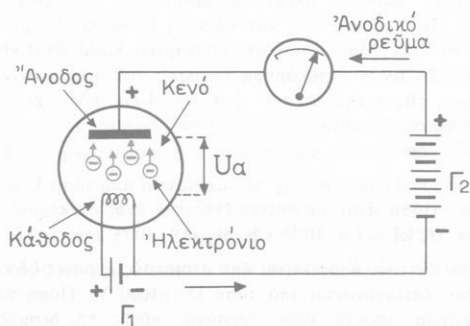
Τό ήλεκτρικό ρεύμα είναι κίνηση φορέων ήλεκτρικού φορτίου. Τέτοιιοι φορείς, όπως ξέρουμε, είναι τά ήλεκτρονία καί τά ίοντα. Τό κενό άποκτά άγωγιμότητα, όταν μέσα σ' αυτό δημιουργηθοϋν ήλεκτρονία. Αυτά παράγονται μέσα στο κενό με δύο φαινόμενα, που ονομάζονται αντίστοιχα *θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο* καί *φωτοηλεκτρονικό φαινόμενο*.

76. Θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο

α. Πειραματική άπόδειξη. Άπό μία παρατήρηση του Edison (1883) άνακάλυψαν τό άκόλουθο φαινόμενο, που ονομάζεται **θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο** ή **θερμική έκπομπή ήλεκτρονίων** :

Τά μέταλλα, όταν έχουν μεγάλη θερμοκρασία, εκπέμπουν ήλεκτρονία.

Γιά νά παρατηρήσουμε τό θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο, χρησιμοποιούμε τήν εξής διάταξη (σχ. 108). Μέσα σέ άερόκενο σωλήνα ύπάρχει σύρμα K (*κάθοδος*), που διαπυρώνεται με τό συνεχές ρεύμα μιάς γεννήτριας Γ_1 , καί μία μεταλλική πλάκα A (*άνοδος*), που συνδέεται με τό θετικό πόλο μιάς ισχυρής γεννήτριας Γ_2 . Ό άρνητικός πόλος τής γεννήτριας Γ_2 συν-



Σχ. 108. Άπό τή διάπυρη κάθοδο βγαίνουν ήλεκτρονία καί εξαιτίας τής άνοδικής τάσεως U_a φτάνουν στην άνοδο καί έτσι κλείνει τό κύκλωμα.

δέεται με τόν άρνητικό πόλο τής γεννήτριας Γ_1 . Όταν ή κάθοδος K έχει τή θερμοκρασία του περιβάλλοντος, στο κύκλωμα τής άνόδου A δέν κυκλοφορεί ρεύμα. Όταν όμως ή κάθοδος K διαπυρωθεί καί μεταξύ τής άνόδου A καί τής καθόδου ύπάρχει θετική τάση U_a (*άνοδική τάση*), τότε στο κύκλωμα τής άνόδου κυκλοφορεί ρεύμα (*άνοδικό ρεύμα*). Αυτό δείχνει ότι τό κενό έχει άπο-

κτῆσει *ἀγωγιμότητα*, πού οφείλεται στά ἠλεκτρόνια πού *ἐκπέμπει ἢ διάπυρη κάθοδος*. Τά ἠλεκτρόνια μέ τήν ἐπίδραση τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου κινούνται μέσα στό κενό, φτάνουν στήν ἄνοδο καί ἔτσι κλείνει τό κύκλωμα τῆς ἄνοδου.

Μέσα στό σωλήνα τό ἀνοδικό ρεύμα ἔχει συμβατική φορά ἀπό τήν πλάκα Α πρὸς τό σύρμα Κ καί γι' αὐτό ἡ πλάκα ὀνομάζεται ἄνοδος καί τό σύρμα κάθοδος. Ἐπειδὴ μέσα στό σωλήνα ὑπάρχουν *δύο ἠλεκτρόδια* (ἡ ἄνοδος Α καί ἡ κάθοδος Κ), γι' αὐτό ὁ σωλήνας ὀνομάζεται **δίοδος ἠλεκτρονική λυχνία** ἢ καί ἀπλά **δίοδος**. Στήν πράξη ἡ ἄνοδος εἶναι ἓνας κύλινδρος πού ἄξονά του ἔχει τό σύρμα τῆς καθόδου. Ἀπό τά παραπάνω βγάζουμε τό ἔξης συμπέρασμα:

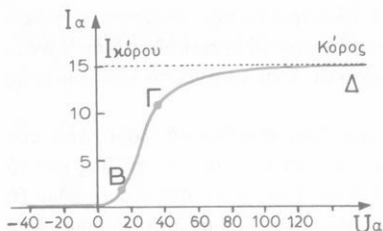
Στή δίοδο ἠλεκτρονική λυχνία τό ρεύμα περνάει, μόνο ὅταν ἡ ἀνοδική τάση εἶναι θετική ($V_a > 0$).

Ἄν διακόψουμε τή σύνδεση τῆς ἄνοδου Α μέ τή γεννήτρια Γ_2 , τό ἀνοδικό ρεύμα 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 ἓνα «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 ἑνός λαμπτήρα πυρακτώσεως.

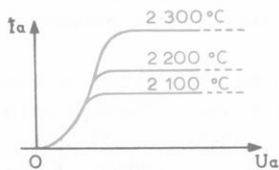
β. Ἡ ἔνταση τοῦ ἀνοδικοῦ ρεύματος. Διατηροῦμε *σταθερή τή θερμοκρασία* τῆς καθόδου. Ὄταν αὐξάνουμε προοδευτικά *τήν ἀνοδική τάση* (U_a), συνεχῶς αὐξάνει καί ἡ ἔνταση (I_a) τοῦ ἀνοδικοῦ ρεύματος, ἄρα συνεχῶς αὐξάνει ὁ ἀριθμός τῶν ἠλεκτρονίων πού φτάνουν στήν ἄνοδο. Καί ὅταν ἡ ἀνοδική τάση ἀποκτήσει μιὰ ὀρισμένη τιμή, *ὅλα τά 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* (σχ. 109).

Ἄν αὐξάνουμε προοδευτικά *τή θερμοκρασία* τοῦ σύρματος (*), βρίσκουμε ὅτι αὐξάνει καί τό ρεύμα κόρου. Ἄρα, ὅταν ὑψώνεται ἡ θερμοκρασία τοῦ σύρματος, αὐξάνει ὁ *ἀριθμός τῶν ἠλεκτρονίων* πού βγαίνουν ἀπό τό σύρμα. Πειραματικά βρῖσκουμε ὅτι μικρὴ αὐξηση τῆς θερμοκρασίας

(*) Ἡ θερμοκρασία τοῦ σύρματος αὐξάνει, ὅταν αὐξάνει ἡ τάση πού ἐφαρμόζεται στό σύρμα.



Σχ. 109. Ή χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου λυχνίας (U_{α} σε Volt, I_{α} σε mA). Μεταξύ των σημείων Β και Γ ή ένταση του ρεύματος είναι σχεδόν ανάλογη με την άνοδική τάση.



Σχ. 110. Όταν αυξάνεται ή θερμοκρασία της καθόδου, αυξάνεται ή ένταση του ρεύματος κόρου.

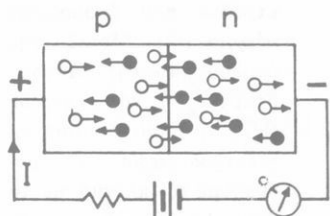
του σύρματος προκαλεί σημαντική αύξηση της έντάσεως του ρεύματος κόρου (σχ. 110). Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά εξής συμπεράσματα:

- I. Ή ένταση του άνοδικού ρεύματος μπορεί νά λάβει μιά όρισμένη μέγιστη τιμή (ρεύμα κόρου), πού εξαρτάται από τή θερμοκρασία της καθόδου και από τήν άνοδική τάση.
- II. Ό αριθμός των ήλεκτρονίων πού κατά μονάδα χρόνου βγαίνουν από τό διάπυρο σύρμα αυξάνει με τή θερμοκρασία του σύρματος.

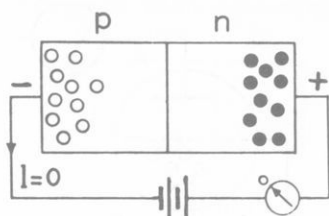
γ. Ή εφαρμογές του θερμοηλεκτρονικού φαινομένου. Τό θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο έχει σημαντικές εφαρμογές. Πολλές συσκευές, πού γενικά ονομάζονται ήλεκτρονικοί σωλήνες, είναι άερόκενοι σωλήνες στους όποιους παράγονται ήλεκτρόνια από μιά διαπυρωμένη κάθοδο. Τέτοιοι ήλεκτρονικοί σωλήνες είναι π.χ. ή τρίοδος ήλεκτρονική λυχνία, ό ήλεκτρονικός παλμογράφος, ό σωλήνας Braun, ό σωλήνας Coolidge, τό ήλεκτρονικό μικροσκόπιο κ.ά.

Ήν στό άνοδικό κύκλωμα (σχ. 108) άντικαταστήσουμε τή γεννήτρια συνεχούς ρεύματος Γ_2 με μιά γεννήτρια έναλλασσόμενου ρεύματος, τότε από τή δίοδο λυχνία περνάει ρεύμα μόνο κατά τή μιά ήμπερίοδο ($T/2$), δηλαδή όσο χρόνο ή πλάκα Α είναι θετικό ήλεκτρόδιο. Ήντε ή δίοδος λυχνία μπορεί νά χρησιμοποιηθεί ως άνορθωτής του έναλλασσόμενου ρεύματος.

δ. Κρυσταλλοδίοδος. Ήνας ήμιαγωγός p και ένας ήμιαγωγός n βρίσκονται σε στενή έπαφή μεταξύ τους και στίς δύο άκρες τους είναι στερεωμένα δύο ήλεκτρόδια (σχ. 111). Αυτό τό σύστημα των δύο ήμιαγωγών ονομάζεται κρυσταλλοδίοδος ή και δίοδος p — n. Ήν συνδέσουμε τήν κρυσταλλοδίοδο με μιά γεννήτρια όπως φαίνεται στό σχήμα, τότε μέσα στήν



Σχ. 111. Από την κρυσταλλοδίοδο περνάει ρεύμα.
(Άγωγή φορά $p \rightarrow n$).



Σχ. 111α. Από την κρυσταλλοδίοδο δέν περνάει ρεύμα.
(Ανασταλτική φορά $n \rightarrow p$).

κρυσταλλοδίοδο με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τά ηλεκτρόνια κινούνται προς τό θετικό πόλο τής γεννήτριας και οι όπές κινούνται προς τόν άρνητικό πόλο τής. Τό ρεύμα περνάει μέσα από τήν κρυσταλλοδίοδο. Τά ηλεκτρόνια και οι όπές τής κρυσταλλοδίοδου συνεχώς άναπληρώνονται. Άν άντιστρέψουμε τή σύνδεση τής κρυσταλλοδίοδου με τή γεννήτρια (σχ. 111α), τότε ή κρυσταλλοδίοδος δέν παρουσιάζει άγωγιμότητα. Ωστε :



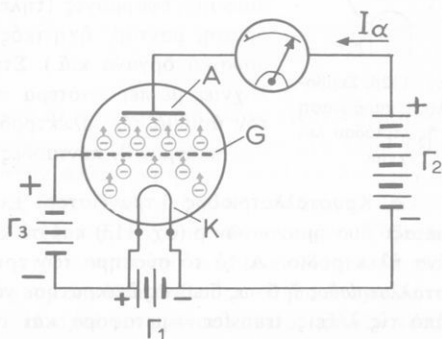
Σχ. 111β. Συμβολική παράσταση τής κρυσταλλοδίοδου.

Ή κρυσταλλοδίοδος παρουσιάζει άγωγιμότητα μόνο κατά τή μιά φορά (άγωγή φορά $p \rightarrow n$).

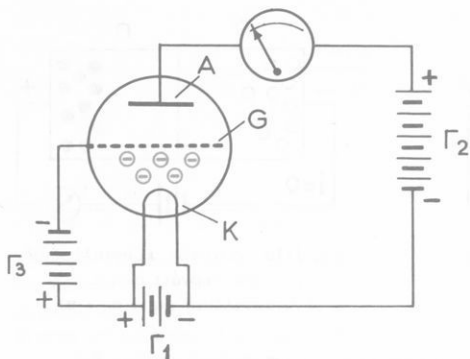
Γι' αυτό ή κρυσταλλοδίοδος χρησιμοποιείται ως *άνορθωτής* αντί για τήν πολυπλοκότερη δίοδο ηλεκτρονική λυχνία. Στο σχήμα 111β φαίνεται ή συμβολική παράσταση τής κρυσταλλοδίοδου.

77. Τρίοδος ηλεκτρονική λυχνία

Ή *τρίοδος ηλεκτρονική λυχνία* ή *άπλά τρίοδος* (σχ. 112) είναι μιά δίοδος λυχνία στήν όποία μεταξύ τής άνόδου (A) και τής καθόδου (K) έχει προστεθεί ένα τρίτο ήλε-



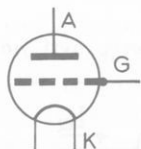
Σχ. 112. Σχηματική παράσταση τής τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας. Τό πλέγμα επιταχύνει τά ήλεκτρόνια.



Σχ. 112α. Τό πλέγμα άπωθεί τά ηλεκτρόνια καί τό ρεύμα διακόπτεται.

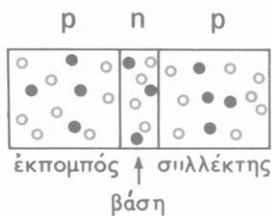
πλέγμα καί έτσι τό άνοδικό ρεύμα *ένισχύεται*. Αντίθετα, άν συνδέσουμε τό πλέγμα μέ τόν άρνητικό πόλο τής γεννήτριας, ώστε τό δυναμικό τοϋ πλέγματος νά είνai άρνητικό σχετικά μέ τό δυναμικό τής καθόδου, τότε τά ηλεκτρόνια πού βγαίνουν από τήν κάθοδο άπωθοϋνται από τό πλέγμα καί τό άνοδικό ρεύμα *έξασθενίζει* ή καί *καταργείται τελείως* (σχ. 112α). Έτσι μεταξύ τοϋ πλέγματος καί τής καθόδου δημιουργοϋμε *τήν τάση πλέγματος*

(U_G), ή όποία δημιουργεί ένα *ήλεκτρικό πεδίο*. Οί μεταβολές τής τάσεως τοϋ πλέγματος προκαλοϋν αντίστοιχες μεταβολές στήν ένταση τοϋ άνοδικοϋ ρεύματος. Αϋτή τήν ιδιότητα τής τριόδου λυχνίας εκμεταλλεϋόμαστε σέ διάφορες εφαρμογές (τηλεπικοινωνίες, ραδιοφωνία, τηλεόραση, ραντάρ, ήχητικός κινηματογράφος, ηλεκτρονικά μουσικά όργανα κ.ά.). Στήν πράξη χρησιμοποιοϋνται καί λυχνίες μέ περισσότερα πλέγματα, οί όποίες άνάλογα μέ τόν άριθμό τών ηλεκτροδίων ονομάζονται τετράοδες (μέ δύο πλέγματα), πεντάοδες (μέ τρία πλέγματα) κ.ο.κ.



Σχ. 112β. Συμβολική παράσταση τής τριόδου λυχνίας.

α. Κρυσταλλοτρίοδος ή τρανζίστορ. Ένας ήμιαγωγός η παρεμβάλλεται μεταξύ δύο ήμιαγωγών p (σχ. 113) καί σέ κάθε ήμιαγωγό είνai στερεωμένο ένα ήλεκτροδίο. Αϋτό τό σύστημα τών τριών ήμιαγωγών ονομάζεται *κρυσταλλοτρίοδος* ή όπως διεθνώς επικράτησε νά λέγεται *τρανζίστορ* (transistor, από τίς λέξεις transfer = μεταφορά καί resistance = αντίσταση). Τό μεσαίο τμήμα ονομάζεται *βάση* καί είνai πολύ λεπτό (έχει πάχος 10 ως 100 μm). Τά δύο άκραία τμήματα ονομάζονται τό ένα *έκπομπός* καί τό άλλο *σλλέκτης*.

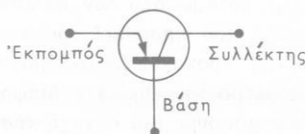


Σχ. 113. Ο p-n-p τρανζίστορ. Αποτελείται από δύο ενωμένες κρυσταλλοδιόδους.



Σχ. 113α. Οι μεταβολές της έντασης του ρεύματος I_E προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην ένταση του ρεύματος I_C .

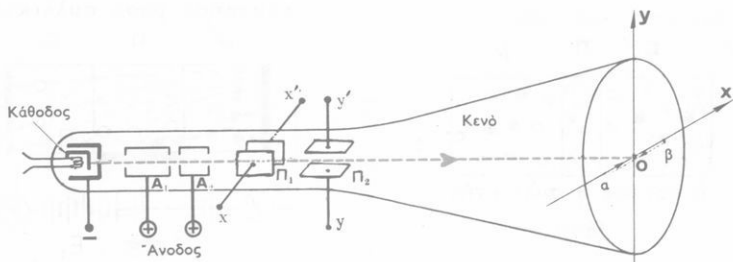
Ο τρανζίστορ αποτελείται από δύο ενωμένες κρυσταλλοδιόδους. Συνδέουμε τον τρανζίστορ με δύο γεννήτριες όπως φαίνεται στο σχήμα. Τότε, όπως ξέρουμε, η άριστερή κρυσταλλοδιόδος παρουσιάζει αγωγιμότητα. Οι μεταβολές της έντασης I_E του ρεύματος που διαρρέει τον έκπομπο προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην ένταση I_C του ρεύματος που διαρρέει το συλλέκτη. Άρα ο τρανζίστορ έχει ιδιότητα ανάλογη με την ιδιότητα της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας. Γι' αυτό σήμερα σε πάρα πολλές ηλεκτρονικές συσκευές ο τρανζίστορ αντικαθιστά την πολυπλοκότερη τριόδο ηλεκτρονική λυχνία. Στο σχήμα 114 δείχνεται η συμβολική παράσταση του τρανζίστορ.



Σχ. 114. Συμβολική παράσταση του τρανζίστορ.

78. Σωλήνας Braun

Μία πολύ ενδιαφέρουσα μορφή ηλεκτρονικού σωλήνα είναι ο **σωλήνας Braun** (σχ. 115). Αυτός είναι αερόκενος σωλήνας, που στη μία άκρη έχει κάθοδο που διαπυρώνεται και στην άλλη άκρη έχει κυκλικό διάφραγμα που φθορίζει. Η άνοδος είναι ένας δίσκος που στη μέση του έχει μία μικρή τρύπα. Έτσι δημιουργείται μία λεπτή δέσμη καθοδικών ακτίνων, η οποία σχηματίζει ένα φωτεινό σημείο στο κέντρο του κυκλικού διαφράγματος. Όλα τα ηλεκτρόνια της δέσμης έχουν την ίδια ταχύτητα. Μέσα στο σωλήνα υπάρχουν δύο πυκνωτές που οι όπλισμοί τους είναι κάθετοι μεταξύ τους. Έτσι η καθοδική δέσμη περνάει διαδοχικά μέσα από δύο ηλεκτρικά πεδία που οι εντάσεις τους είναι κάθετες μεταξύ τους. Όταν οι δύο πυκνωτές είναι αφόρτιστοι, η καθοδική δέσμη είναι ευ-



Σχ. 115. Σωλήνας Braun. Οι δύο πυκνωτές Π_1 και Π_2 προκαλούν αντίστοιχα οριζόντια και κατακόρυφη έκτροπή τής δέσμης των ηλεκτρονίων.

θύγραμμη. *Αν στον πρώτο πυκνωτή Π_1 εφαρμόσουμε μία συνεχή τάση (U_1), τότε μεταξύ των όπλισμών του δημιουργείται οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο, που προκαλεί *οριζόντια έκτροπή* τής καθοδικής δέσμης και επομένως προκαλεί *μετακίνηση* του φωτεινού σημείου πάνω *στην οριζόντια* διάμετρο του κυκλικού διαφράγματος. *Αν μόνο στο δεύτερο πυκνωτή Π_2 εφαρμόσουμε μία συνεχή τάση (U_2), τότε μεταξύ των όπλισμών του σχηματίζεται κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο, που προκαλεί *κατακόρυφη έκτροπή* τής καθοδικής δέσμης και επομένως προκαλεί *μετακίνηση* του φωτεινού σημείου πάνω *στην κατακόρυφη* διάμετρο του κυκλικού διαφράγματος. Οι έκτροπές τής καθοδικής δέσμης είναι ανάλογες με τις εντάσεις των αντίστοιχων ηλεκτρικών πεδίων, άρα είναι ανάλογες με τις τάσεις U_1 και U_2 που εφαρμόζονται στους δύο πυκνωτές. *Αν σ' αυτούς εφαρμόσουμε ταυτόχρονα τις τάσεις U_1 και U_2 , τότε εξαιτίας των δύο έκτροπών τής καθοδικής δέσμης τό φωτεινό σημείο σχηματίζεται σέ μία ορισμένη θέση τής επιφάνειας του κυκλικού διαφράγματος. *Ωστε μεταβάλλοντας τις τάσεις U_1 και U_2 μπορούμε νά μετακινούμε τό φωτεινό σημείο πάνω σέ *όλο τό διάφραγμα*. *Η δέσμη των ηλεκτρονίων *δέν παρουσιάζει καμιά αδράνεια* και επομένως μπορεί νά παρακολουθεί *τις ταχύτατες μεταβολές τής εναλλασσόμενης τάσεως* που συνήθως εφαρμόζουμε στους δύο πυκνωτές. *Ετσι τό φωτεινό σημείο μπορεί νά μετακινείται ταχύτατα σέ *όλη τήν έκταση* του διαφράγματος που φθορίζει. *Ο σωλήνας Braun έχει σήμερα σημαντικές εφαρμογές, π.χ. στον ηλεκτρονικό παλμογράφο, στην τηλεόραση, στό ραντάρ κ.ά.

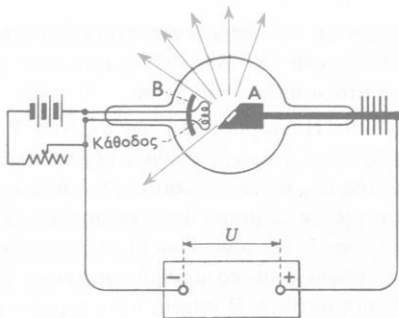
79. Άκτίνες Röntgen

α. Παραγωγή των ακτίνων Röntgen. *Ο Röntgen (1895) μελετώντας τις καθοδικές ακτίνες ανακάλυψε ότι τά τοιχώματα του γυάλινου σωλήνα που βρίσκονται άπέναντι από την κάθοδο εκπέμπουν μία άόρατη και πολύ

διδεισδυτική ακτινοβολία, που ονομάζεται **ακτίνες Röntgen** ή **ακτίνες X**. Έτσι ανακαλύφθηκε ότι:

Οι ακτίνες Röntgen παράγονται, όταν ηλεκτρόνια που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα πέφτουν πάνω σε ένα στόχο.

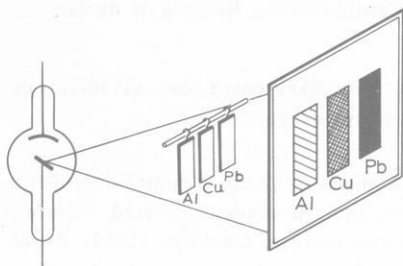
Για την παραγωγή των ακτίνων Röntgen στην αρχή χρησιμοποιούσαν τους *σωλήνες Crookes*, σήμερα όμως χρησιμοποιούμε γενικά ειδικούς ηλεκτρονικούς σωλήνες που ονομάζονται *σωλήνες Coolidge* (1914). Αυτοί είναι γυάλινοι αερόκενοι σωλήνες στους οποίους τά απαραίτητα για τη λειτουργία τους ηλεκτρόνια παράγονται από μία διάπυρη κάθοδο (σχ. 116). Η άνοδος που ειδικότερα ονομάζεται *αντικαθόδος*, αποτελείται από ένα δύστηκτο μέταλλο (συνήθως βολφράμιο). Μεταξύ της αντικαθόδου και της καθόδου εφαρμόζεται ψηλή συνεχής τάση (10 ως 1000 kV), η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η διάπυρη κάθοδος. Οι ακτίνες Röntgen που παράγονται από την αντικαθόδο εκπέμπονται προς όλες τις διευθύνσεις.



Σχ. 116. Σωλήνας Coolidge για την παραγωγή ακτίνων Röntgen.

β. Ιδιότητες των ακτίνων Röntgen. Πειραματικά βρίσκουμε ότι οι ακτίνες Röntgen έχουν τρεις εξής ιδιότητες :

1. Προκαλούν τό φθορισμό μερικών σωμάτων, (π.χ. του κυανιούχου βαριολευκοχρύσου, του θειούχου ψευδαργύρου).
2. Προσβάλλουν τή φωτογραφική πλάκα και προκαλούν χημικά φαινόμενα, π.χ. αλλάζουν τό χρώμα μερικών πολύτιμων λίθων, γιατί προκαλούν αλλαγές στη δομή του μορίου του σώματος.
3. Προκαλούν ισχυρό ιονισμό των αερίων και γι' αυτό ένα φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο, όταν βρίσκεται κοντά σε μία πηγή ακτίνων Röntgen, εκφορτίζεται πολύ γρήγορα.
4. Διαδίδονται εὐθύγραμμα, δέν ἐκτρέπονται ἀπό μαγνητικό ἢ ηλεκτρικό πεδίο καί ἐπομένως δέ μεταφέρουν ἠλεκτρικό φορτίο.
5. Πρόκαλουν εὐκολα τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή τήν ἐξοδὸ ἠλεκτρονίων ἀπὸ διάφορα μέταλλα.



Σχ. 117. Ἡ ἀπορρόφηση τῶν ἀκτίνων Röntgen αὐξάνεται μέ τόν ἀτομικό ἀριθμό τοῦ στοιχείου.

κή, γιατί τά ἄτομα ἑνός στοιχείου ἀπορροφοῦν τίς ἀκτίνες Röntgen πάντοτε κατά τόν ἴδιο τρόπο, εἴτε εἶναι *μονωμένα* ἄτομα, εἴτε εἶναι *ἐνωμένα* μέ ἄτομα ἄλλου στοιχείου.

9. Ἡ ἀπορρόφηση τῶν ἀκτίνων Röntgen αὐξάνει πολύ γρήγορα, ὅταν αὐξάνει ὁ *ἀτομικός ἀριθμός* (Z) τοῦ στοιχείου (σχ. 117). Οἱ σάρκες τοῦ σώματός μας ἀποτελοῦνται κυρίως ἀπό λευκώματα, πού εἶναι χημικές ἐνώσεις στοιχείων μέ μικρό ἀτομικό ἀριθμό (ὕδρογόνο $Z = 1$, ἄνθρακα $Z = 6$, ἄζωτο $Z = 7$, ὀξυγόνο $Z = 8$), ἐνῶ τά κόκκαλα περιέχουν καί στοιχεῖα μέ μεγαλύτερο ἀτομικό ἀριθμό (φωσφόρο $Z = 15$, ἀσβέστιο $Z = 20$). Ἐτσι μιά δέσμη ἀκτίνων Röntgen, ὅταν περνάει μέσα ἀπό τό σῶμα μας, ἀπορροφᾶται λιγότερο ἀπό τίς σάρκες καί πολύ περισσότερο ἀπό τά κόκκαλα. Τότε πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει ἢ στή φωτογραφική πλάκα τά κόκκαλα σχηματίζουν *σκιά*.

10. Σέ μιά πλάκα μέ ὀρισμένο πάχος (π.χ. σέ μιά πλάκα μολύβδου) ἡ ἀπορρόφηση τῶν ἀκτίνων Röntgen αὐξάνει, ὅταν *αὐξάνει τό μήκος κύματος* (λ). Ἐτσι οἱ ἀκτίνες Röntgen πού ἔχουν πολύ μικρά μήκη κύματος εἶναι περισσότερο διεισδυτικές καί ὀνομάζονται *σκληρές*, ἐνῶ ἐκεῖνες πού ἔχουν μεγαλύτερα μήκη κύματος εἶναι λιγότερο διεισδυτικές καί ὀνομάζονται *μαλακές*. Ὅσο μεγαλύτερη γίνεται ἡ *τάση* πού ἐφαρμόζεται μεταξὺ τῆς ἀντικαθόδου καί τῆς καθόδου, τόσο μικρότερο γίνεται τό *μήκος κύματος* τῶν ἀκτίνων Röntgen.

γ. Φύση τῶν ἀκτίνων Röntgen. Πειραματικά ἀποδείχθηκε ὅτι μιά λεπτή δέσμη ἀκτίνων Röntgen, ὅταν πέφτει πάνω σέ ἕναν κρύσταλλο, δίνει πάνω στό διάφραγμα πού φθορίζει φαινόμενα *περιθλάσεως*, ὅμοια μέ ἐκεῖνα πού δίνει μιά λεπτή μονοχρωματική δέσμη φωτός, ὅταν πέφτει πάνω σέ φράγμα *περιθλάσεως*. Γενικά ἀποδείχθηκε ὅτι:

6. Ἐπιδρῶν *στά κύτταρα* τῶν ζωντανῶν ὀργανισμῶν καί προκαλοῦν διάφορες *βιολογικές δράσεις*.

7. Ἐχουν *μεγάλη διεισδυτική ικανότητα* καί περνοῦν μέσα ἀπό σώματα πού εἶναι ἀδιαφανή γιά τό φῶς (ὅπως π.χ. μιά ξύλινη σανίδα, οἱ σάρκες τοῦ σώματός μας κ.ἄ.).

8. Ὅταν οἱ ἀκτίνες Röntgen, περνοῦν μέσα ἀπό τήν ὕλη, πάντοτε συμβαίνει κάποια *ἀπορρόφηση* τους ἀπό τήν ὕλη. Αὕτη ὅμως ἡ ἀπορρόφηση εἶναι *ιδιότητα ἀτομική*.

Οί άκτίνες Röntgen είναι άόρατη ήλεκτρομαγνητική άκτινοβολία πού έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τά μήκη κύματος τής υπεριώδους άκτινοβολίας.

Σημείωση. Τά μήκη κύματος είναι:

των όρατων άκτινοβολιων	από	7500 Å	ώς	4000 Å
των άκτινων Röntgen	από	20 Å	ώς	0,05 Å

Παρατηρούμε ότι τά μήκη κύματος των άκτινων Röntgen είναι πολύ μικρά σχετικά μέ τά μήκη κύματος των όρατων άκτινοβολιων.

δ. Φασματοσκοπία των άκτινων Röntgen. Στην Όπτική μέ τό φράγμα περιθλάσεως (§ 41) παίρνουμε τό *φάσμα* μιās δέσμης φωτεινων άκτινων. Γιά τίς άκτίνες Röntgen τό κρυσταλλικό πλέγμα ενός κρυστάλλου παιζει τό ρόλο φράγματος περιθλάσεως καί έπομένως μπορούμε νά λάβουμε τό *φάσμα* μιās δέσμης άκτινων Röntgen. Η πειραματική έρευνα απέδειξε ότι ή δέσμη άκτινων Röntgen, πού έκπέμπεται από τήν αντικάθοδο, όταν αναλυθεί, δίνει ένα *συνεχές φάσμα* στό όποιο προσθέεται καί ένα *γραμμικό φάσμα*.

1. Τό συνεχές φάσμα των άκτινων Röntgen. Πρός τήν πλευρά των *μεγαλύτερων συχνοτήτων* τό συνεχές φάσμα των άκτινων Röntgen *τελειώνει άπότομα*, δηλαδή παρουσιάζει ένα σαφές *όριο*. Τό συνεχές φάσμα περιλαμβάνει πολλές συχνοτήτες, οί όποιες αντιστοιχούν σέ μία *μεγάλη ποικιλία* φωτονίων Röntgen. Η γένεση του συνεχους φάσματος έρμηνεύεται ως εξής:

Ένα ήλεκτρόνιο πού βγαινει από τή διάπυρη κάθοδο, εξαιτίας τής τάσεως U πού υπάρχει μεταξύ τής καθόδου καί τής αντικαθόδου, έπιταχύνεται καί φτάνει στην αντικάθοδο μέ κινητική ενέργεια $E_{κιν} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ ίση μέ τό έργο $e \cdot U$ πού παράγεται από τό ήλεκτρικό πεδίο κατά τή μεταφορά του ήλεκτρονίου από τήν κάθοδο ως τήν αντικάθοδο, Άρα ισχύει ή εξίσωση:

$$\text{ένέργεια ήλεκτρονίου } E_{κιν} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U \quad (1)$$

Σύμφωνα μέ τήν ήλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell, όταν ένα ήλεκτρόνιο κινείται μέ έπιτάχυνση ($\gamma > 0$ ή $\gamma < 0$), τότε τό ήλεκτρόνιο *αποβάλλει* ενέργεια μέ τή μορφή ήλεκτρομαγνητικής άκτινοβολίας, δηλαδή μέ τή μορφή *φωτονίου*.

Όταν τό ήλεκτρόνιο συγκρούεται μέ τήν αντικάθοδο καί προσπαθει νά εισχωρήσει μέσα στην ύλη της, τότε τό ήλεκτρόνιο *ύφίσταται τροχολέδηση* (φρενάρισμα) καί *αποβάλλει* ένα μέρος ΔE τής κινητικής ενέργειάς

του μέ τη μορφή *ένός φωτονίου Röntgen*, συχνότητας ν . Σ' αυτή την περίπτωση ισχύει ή σχέση:

$$\text{ένέργεια φωτονίου } \Delta E = h \cdot \nu \quad \eta \quad h \cdot \nu < E_{\kappa\iota\nu}$$

Ήν *δλη ή κινητική ενέργεια* ($E_{\kappa\iota\nu}$) του ήλεκτρονίου μετατραπεί σέ *ένέργεια ενός φωτονίου Röntgen*, τότε αυτό τό φωτόνιο έχει *τή μέγιστη συχνότητα* (ν_{\max}) πού άντιστοιχεί στήν ύπάρχουσα τάση U . Ήπομένως ισχύει ή *έξίσωση*:

μέγιστη ενέργεια φωτονίου	$h \cdot \nu_{\max} = E_{\kappa\iota\nu} \quad \eta \quad h \cdot \nu_{\max} = e \cdot U$	(2)
------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Ήπό τήν *έξίσωση* (2) βρίσκουμε *ότι ή μέγιστη συχνότητα* τών φωτονίων Röntgen είναι:

μέγιστη συχνότητα φωτονίων	$\nu_{\max} = \frac{e \cdot U}{h}$	(3)
-------------------------------	------------------------------------	-----

Αυτή ή *μέγιστη συχνότητα* του συνεχούς φάσματος τών ακτίνων Röntgen άντιστοιχεί σέ *ένα ελάχιστο μήκος κύματος* ίσο μέ :

$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}}$	η	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;"> $\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$ </td> <td style="padding: 5px; text-align: right;">(4)</td> </tr> </table>	$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$	(4)
$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$	(4)			

Ήπό τά παραπάνω συνάγεται *ότι τά μήκη κύματος τών ακτινοβολιών του συνεχούς φάσματος τών ακτίνων Röntgen δίνονται από τή σχέση :*

ακτινοβολίες του συνεχούς φάσματος	$\lambda \geq \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$	(5)
---------------------------------------	--------------------------------------------	-----

Ή σχέση (5) φανερώνει *ότι στίς πρακτικές εφαρμογές, μπορούμε νά λάβουμε τόσο περισσότερο διεισδυτικές ακτίνες Röntgen (δηλαδή μέ μικρότερο μήκος κύματος λ), όσο μεγαλύτερη είναι ή τάση U μέ τήν όποία επιταχύνονται τά ήλεκτρόνια.*

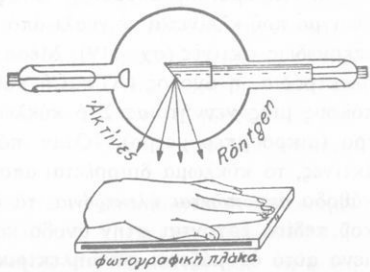
2. Τό γραμμικό φάσμα τών ακτίνων Röntgen. *Τό γραμμικό φάσμα* τών ακτίνων Röntgen άντελείται από *όρισμένες ομάδες γραμμών* πού *ονομάζονται σειρά K, σειρά L και σειρά M.* Ή έκπομπή του γραμμικού φάσματος *έξηγείται* ως *έξής*: Τά ήλεκτρόνια πού πέφτουν πάνω στήν άντικάθοδο έχουν *μεγάλη κινητική ενέργεια.* Τότε μερικά άτομα του μετάλλου άπορ-

ροφούν σημαντική ενέργεια και αποκτούν μία άσταθη ενεργειακή κατάσταση που λέγεται *διέγερση* του ατόμου. Αλλά τό άτομο που διεγέρθηκε άμέσως επανέρχεται στη σταθερή ενεργειακή κατάστασή του αποβάλλοντας μέ τή μορφή *φωτονίων Röntgen* τήν ενέργεια που πήρε από τό ήλεκτρόνιο. Η συχνότητα που μπορεί νά έχει αυτό τό φωτόνιο Röntgen είναι *ορισμένη* και εξαρτάται από τή δομή του ατόμου του μετάλλου. Γι' αυτό παρατηρούμε ότι τό γραμμικό φάσμα των ακτίνων Röntgen είναι *χαρακτηριστικό του μετάλλου* που αποτελεί τήν αντικάθοδο.

3. Συμπεράσματα τής φασματοσκοπίας των ακτίνων Röntgen. Η πειραματική έρευνα απέδειξε ότι:

- I. Μιά δέσμη ακτίνων Röntgen δίνει ένα συνεχές και ένα γραμμικό φάσμα.
- II. Τό συνεχές φάσμα τελειώνει απότομα μέ μία ακτινοβολία συχνότητας ν_{max} που εξαρτάται από τήν εφαρμοζόμενη τάση U.
- III. Τό γραμμικό φάσμα αποτελείται από τρεις σειρές ακτινοβολιών (K, L, M) που οι συχνότητές τους εξαρτώνται από τή φύση του μετάλλου που χρησιμοποιείται ως αντικάθοδος.

ε. Έφαρμογές των ακτίνων Röntgen. Οι ιδιότητες τής απορρόφησης των ακτίνων Röntgen από τήν ύλη έχουν σήμερα μεγάλη εφαρμογή στήν *Ίατρική*, γιατί οι ιστοί του σώματός μας, που αποτελούνται από στοιχεία μέ μικρό ατομικό αριθμό (H,C,N,O), προκαλούν μικρή απορρόφηση, ενώ ό οστεώδης ιστός, που περιέχει στοιχεία μέ μεγαλύτερο ατομικό αριθμό (P,Ca), προκαλεί μεγαλύτερη απορρόφηση. Σ' αυτή τήν άρχή στηρίζεται ή *ακτινοσκόπηση* και ή *ακτινογραφία*. Κατά τήν ακτινοσκόπηση παρατηρούμε τις σκιές που σχηματίζονται πάνω στο διάφραγμα που φθορίζει, ενώ κατά τήν ακτινογραφία οι σκιές αποτυπώνονται πάνω σέ φωτογραφική πλάκα (σχ. 118). Μέ τήν ακτινοσκόπηση και τήν ακτινογραφία γίνεται σήμερα ή *διάγνωση* πολλών παθήσεων (π.χ. αλλοιώσεις στα κόκκαλα, κατάγματα, φυματίωση κ.ά.). Γιá τή διάγνωση παθήσεων του πεπτικού ή του ουροποιητικού συστήματος εισάγουμε μέσα σ' αυτά τά συστήματα ένώσεις στοιχείων μέ μεγάλο ατομικό αριθμό (π.χ. ένώσεις βισμούθιου $Z = 83$, βαρίου $Z = 56$, ιωδίου $Z = 53$ κ.λ.).



Σχ. 118. Ακτινογραφία.

Ἐπειδὴ οἱ ἀκτίνες Röntgen ἀσκοῦν βιολογικὲς δράσεις στὰ κύτταρα, γι' αὐτὸ χρησιμοποιοῦνται καὶ γιὰ θεραπευτικούς σκοποὺς (*ἀκτινοθεραπεία*). Γενικά οἱ ἐφαρμογές τῶν ἀκτίνων Röntgen στὴν Ἱατρικὴ ἀποτελοῦν ἕναν ἰδιαίτερο κλάδο πού ὀνομάζεται *Ἀκτινολογία*.

Οἱ πολὺ σκληρὲς ἀκτίνες Röntgen χρησιμοποιοῦνται στὴ *μεταλλουργία*. Μὲ αὐτὲς ἐλέγχουμε τὴν ὁμοιογένεια καὶ τὴ συνέχεια τοῦ μεταλλικοῦ ὑλικοῦ καὶ βρίσκουμε ἂν ὑπάρχουν κενοὶ χῶροι μέσα στοῦ ὑλικό ἢ ἂν εἶναι τέλειες οἱ μεταλλικὲς συγκολλήσεις.

Οἱ ἀκτίνες Röntgen παίζουν σπουδαῖο ρόλο στὴ μελέτη τῆς δομῆς τῶν κρυστᾶλλων (*Κρυσταλλογραφία*).

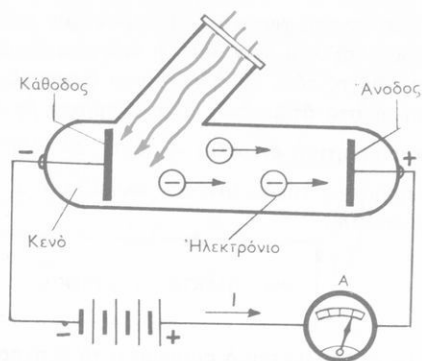
στ. Φυσιολογικὸ ἀποτέλεσμα τῶν ἀκτίνων Röntgen. Ὅταν ἡ προσβολὴ τοῦ ὄργανισμοῦ μὲ τὶς ἀκτίνες Röntgen εἶναι σύντομη, τότε εἶναι ἀκίνδυνη. Ὅταν ὅμως ἡ προσβολὴ διαρκεῖ πολὺ χρόνο, τότε προκαλοῦνται στὸν ὄργανισμό σοβαρὲς βλάβες (π.χ. ἐλάττωση τῶν ἐρυθρῶν αἱμοσφαιρίων, ἐπικίνδυνα τραύματα, πού μπορεῖ νὰ ὀδηγήσουν σὲ ἀκρωτηριασμούς ἢ καὶ στὸ θάνατο). Τὰ ἀποτελέσματα τῆς δράσεως τῶν ἀκτίνων Röntgen πάνω στὸν ὄργανισμό εἶναι *ἀθροιστικά*, δηλαδή τὰ ἀποτελέσματα τὰ ὅποια προκαλοῦν οἱ ἀκτίνες Röntgen πάνω στὰ κύτταρα δὲν ἐξασθενίζουν μὲ τὸ πέρασμα τοῦ χρόνου, ἀλλὰ προσθέτονται στὰ ἀποτελέσματα τῶν ἐπόμενων ἀκτίνων Röntgen. Βρέθηκε ὅτι ὁ ἀνθρώπινος ὄργανισμός σὲ ὅλη τὴ διάρκεια τῆς ζωῆς του δὲν πρέπει νὰ ξεπεράσει μιὰ ὀρισμένη *δόση* ἀκτινοβολίας Röntgen. Ὅσοι ἀσχολοῦνται μὲ ἀκτίνες Röntgen προστατεύονται μὲ διάφορους τρόπους (π.χ. σκεπάζουν τὸ σῶμα τους καὶ τὰ χέρια τους μὲ κάλυμμα ἀπὸ καουτσούκ πού εἶναι ἐμπλουτισμένο μὲ μόλυβδο καὶ φοροῦν γυαλιὰ ἀπὸ γυαλί πού περιέχει πυριτικὸ μόλυβδο).

80. Φωτοηλεκτρικὸ φαινόμενο

α. Πειραματικὴ ἀπόδειξη. Ἐνας ἀερόκενος γυάλινος σωλήνας ἔχει ἄνοιγμα πού κλείνεται μὲ γυαλί ἀπὸ χαλαζία, ὁ ὁποῖος εἶναι διαφανὴς στὶς ὑπεριώδεις ἀκτίνες (σχ. 119). Μέσα στοῦ σωλήνα ὑπάρχουν δύο μεταλλικὰ ἤλεκτροδια, ἡ ἄνοδος (A) καὶ ἡ κάθοδος (K), πού συνδέονται μὲ τοὺς δύο πόλους μιᾶς γεννήτριας. Στὸ κύκλωμα ὑπάρχει καὶ εὐαίσθητο ἀμπερόμετρο (μικροαμπερόμετρο). Ὅταν πάνω στὴν κάθοδο πέσουν ὑπεριώδεις ἀκτίνες, τὸ κύκλωμα διαρρέεται ἀπὸ ρεῦμα. Αὐτὸ συμβαίνει, γιὰτὶ ἀπὸ τὴν κάθοδο *ἀποσπῶνται ἤλεκτρόνια*, τὰ ὅποια μὲ τὴν ἐπίδραση τοῦ ἤλεκτρικοῦ πεδίου ἔρχονται στὴν ἄνοδο καὶ ἔτσι κλείνει τὸ κύκλωμα. Τὸ φαινόμενο αὐτὸ ὀνομάζεται **φωτοηλεκτρικὸ φαινόμενο**. Τὰ ἤλεκτρονια πού ἀποσπῶνται ἀπὸ τὸ μέταλλο τῆς καθόδου ὀνομάζονται *φωτοηλεκτρόνια* καὶ τὸ

ρεύμα που κυκλοφορεί στο κύκλωμα ονομάζεται *φωτοηλεκτρικό ρεύμα*. Όστε:

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται η απόσπαση ηλεκτρονίων από τα μέταλλα, όταν πέφτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ορατή ή υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες Röntgen ή γ).



Σχ. 119. Σχηματική διάταξη για την παρατήρηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

β. Έξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Ξέρουμε ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος λ μιάς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, 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 τὰ ἑξῆς πειράματα:

1. Πάνω στην κάθοδο, που αποτελείται από ὀρισμένο μέταλλο, π.χ. από λευκόχρυσο, αφήνουμε να πέσουν διαδοχικά ακτινοβολίες με διαρκῶς μεγαλύτερη συχνότητα ν . Παρατηροῦμε ότι ἀπό τὸ μέταλλο ἀρχίζουν να ἀποσπῶνται φωτοηλεκτρόνια, ὅταν ἡ συχνότητα ν τῆς ἀκτινοβολίας που πέφτει πάνω στο μέταλλο γίνει ἴση ἢ μεγαλύτερη ἀπὸ μιά ὀριακή συχνότητα $\nu_{ορ}$, που εἶναι χαρακτηριστική γιὰ τὸ θεωρούμενο μέταλλο. Αὐτὸ δείχνει ὅτι ἀπὸ τὸ μέταλλο ἀποσπῶνται φωτοηλεκτρόνια, μόνο ὅταν κάθε φωτόνιο, που πέφτει πάνω στο μέταλλο, ἔχει ἐνέργεια E ἴση ἢ μεγαλύτερη ἀπὸ μιά ὀριακή τιμὴ, που εἶναι ἴση μὲ $E_{ορ} = h\nu_{ορ}$.
2. Πάνω στην κάθοδο ἀφήνουμε να πέσει μονοχρωματική ἀκτινοβολία που ἔχει συχνότητα ν μεγαλύτερη ἀπὸ τὴν ὀριακή συχνότητα ν ($\nu > \nu_{ορ}$). Τότε ἀπὸ τὴν κάθοδο ἀποσπῶνται φωτοηλεκτρόνια. Ὅταν αὐξήσουμε τὴ φωτεινὴ ροή, δηλαδή τὸν ἀριθμὸ τῶν φωτονίων, που πέφτουν πάνω στο μέταλλο, αὐξάνει ἢ ἔνταση I τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ ρεύματος, δηλαδή αὐξάνει ὁ ἀριθμὸς τῶν ἠλεκτρονίων που ἀποσπῶνται ἀπὸ τὸ μέταλλο.

Τὰ παραπάνω πειράματα δείχνουν ὅτι γιὰ να ἀποσπαστεῖ ἓνα ἠλεκτρόνιο ἀπὸ ἓνα ἄτομο τῆς ἐπιφάνειας τοῦ μετάλλου, πρέπει να δαπανηθεῖ ὀρισμένο ἔργο b , που ονομάζεται ἔργο ἐξαγωγῆς καὶ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴ φύση τοῦ μετάλλου. Ὅταν ἓνα φωτόνιο πέφτει πάνω στο μέταλλο, τότε ἡ ἐνέρ-

γεια ην τοῦ φωτονίου ἀπορροφᾶται μόνο ἀπό ἕνα ἠλεκτρόνιο ἑνός ἀτόμου τοῦ μετάλλου. Ἐάν αὐτή ἡ ἐνέργεια ην εἶναι μεγαλύτερη ἀπό τό ἔργο ἐξαγωγῆς b , τότε τό ἠλεκτρόνιο ὑπερνικᾶ τίς δυνάμεις πού τό συγκρατοῦν μέσα στό ἄτομο καί τό ἠλεκτρόνιο βγαίνει ἀπό τό ἄτομο μέ ταχύτητα v καί κινητική ἐνέργεια $\frac{1}{2} m_e v^2$. Σ' αὐτή τήν περίπτωση ἡ ἀρχή τῆς διατηρήσεως τῆς ἐνέργειας ἐκφράζεται μέ τή φωτοηλεκτρική ἐξίσωση τοῦ Einstein :

$$\text{φωτοηλεκτρική ἐξίσωση} \quad \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h \cdot \nu - b$$

Τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο τό ἐξήγησε ὁ Einstein γενικεύοντας τή θεωρία τῶν κβάντα πού ἀρχικά διατύπωσε ὁ Planck.

Νόμοι τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου. Ἀπό τά παραπάνω συναγόνται οἱ ἐξῆς νόμοι τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου :

I. Ἡ ἀπόσπαση φωτοηλεκτρονίων ἀπό ἕνα μέταλλο εἶναι δυνατή, μόνο ὅταν ἡ ἐνέργεια ην τοῦ φωτονίου πού πέφτει πάνω στό μέταλλο εἶναι ἰση ἢ μεγαλύτερη ἀπό τό ἔργο ἐξαγωγῆς b , πού εἶναι χαρακτηριστικό γιά τό μέταλλο τῆς καθόδου.

$$\text{ἀπόσπαση φωτοηλεκτρονίου} \quad h\nu \geq b$$

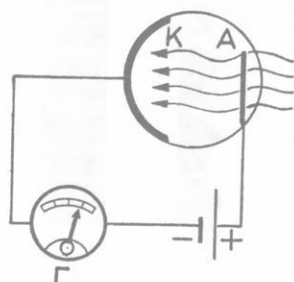
II. Ὁ ἀριθμός τῶν φωτοηλεκτρονίων πού ἀποσπῶνται ἀπό τήν κάθοδο κατά μόνάδα χρόνου εἶναι ἀνάλογος μέ τόν ἀριθμό τῶν φωτονίων πού πέφτουν πάνω στήν κάθοδο κατά μόνάδα χρόνου.

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

είναι σκεπασμένο με ένα στρώμα από καίσιο (κάθοδος) που είναι ευαίσθητο στις όρατες ακτινοβολίες (σχ. 120). Η άνοδος αποτελείται από εθύγραμμο ή κυκλικό ηλεκτρόδιο. Η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος είναι ανάλογη με τη φωτεινή ροή που πέφτει πάνω στην κάθοδο. Τα φωτοκύτταρα τά χρησιμοποιούμε, όταν θέλουμε να μετατρέπονται οι μεταβολές της φωτεινής ροής σε μεταβολές της έντασεως του ρεύματος. Το φωτοκύτταρο δεν παρουσιάζει καμιά αδράνεια και γι' αυτό η ένταση του



Σχ. 120. Φωτοκύτταρο.

φωτοηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλεται την ίδια στιγμή που συμβαίνει ή μεταβολή της φωτεινής ροής. 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 ασφαλείας χρηματοκιβωτίων, στον ήχητικό κινηματογράφο κ.ά.

Ένα φωτοκύτταρο ειδικής μορφής είναι ο φωτοπολλαπλασιαστής, ο οποίος πολλαπλασιάζει τά λίγα φωτοηλεκτρόνια που αρχικά βγαίνουν από την κάθοδο (σε κάθε ένα φωτοηλεκτρόνιο που βγαίνει από την κάθοδο αντιστοιχούν 10^6 ως 10^8 ηλεκτρόνια που φτάνουν στην άνοδο).

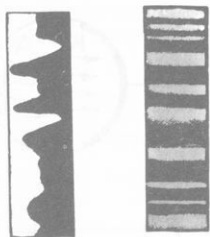
81. Ήχητικός κινηματογράφος

Στόν ήχητικό κινηματογράφο πάνω στην κινηματογραφική ταινία αποτυπώνονται ταυτόχρονα οί εικόνες και οί ήχοι. Η αποτύπωση των εικόνων βασίζεται στις μεθόδους της φωτογραφίας. Η αποτύπωση των ήχων πάνω στην κινηματογραφική ταινία ονομάζεται ήχοληψία και γίνεται με την έξης σειρά μετατροπών:

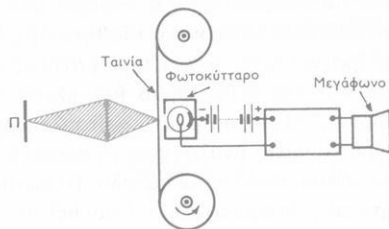
ήχος → μεταβολή έντασεως ρεύματος → φως

Η μετατροπή του ήχου σε ηλεκτρικό ρεύμα γίνεται με τό μικρόφωνο. Τό ρεύμα του μικροφώνου, αφού ενισχυθεί, μετατρέπεται σε φως με διάφορους τρόπους, από τούς οποίους απλούστερος είναι ο έξης:

Τό ρεύμα του μικροφώνου περνάει από μία ειδική λυχνία αγγλης, ή οποία σε κάθε στιγμή παράγει φωτεινή ροή ανάλογη με την ένταση του μικροφωνικού ρεύματος. Οί μεταβολές της φωτεινής ροής αποτυπώνονται πάνω σε φωτογραφική ταινία που ξετυλίγεται όμαλά (σχ. 121). Έτσι πάνω στην ταινία αποτυπώνονται περιοχές που παρουσιάζουν διαφορετικό μαύρισμα



Σχ. 121. Καταγραφή του ήχου πάνω στην κινηματογραφική ταινία (οί ζώνες με τό διαφορετικό μαύρισμα αντίστοιχούν σέ ήχους.



Σχ. 122. Σχηματική παράσταση τής αναπαραγωγής του ήχου από τήν κινηματογραφική ταινία. Τό φωτοηλεκτρικό ρεύμα, αφού ενισχυθεί, πηγαιίνει στό μεγάφωνο.

(*οπτική έγγραφή τών ήχων*). Αυτές οί περιοχές άποτυπώνονται δίπλα από τίσ αντίστοιχες εικόνες.

Όταν γίνεται προβολή τής ταινίας, οί εικόνες φωτίζονται από τόν προβολέα καί προβάλλονται στην οθόνη. Ό ήχος πού εΐναι άποτυπωμένος πάνω στην ταινία *αναπαράγεται* μέ τήν έξηξ σειρά μετατροπών:

φως → μεταβολή έντάσεως ρεύματος → ήχος

Ή μετατροπή του φωτός σέ ρεύμα γίνεται μέ τό *φωτοκυτόταρο*. Ή ταινία ξετυλίγεται καί περνάει μεταξύ μιζς φωτεινής πηγής καί του φωτοκυτόταρου (σχ. 122). Ή μεταβλητή φωτεινή ροή πού πέφτει στό φωτοκυτόταρο δημιουργεί φωτοηλεκτρικά ρεύματα μεταβλητής έντάσεως. Αυτά τά ρεύματα, αφού ενισχυθούν, έρχονται στό μεγάφωνο πού βρίσκεται πίσω από τήν οθόνη καί μετατρέπει τίσ μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος σέ αντίστοιχους ήχους.

Σήμερα εφαρμόζεται καί ή μαγνητική έγγραφή τών ήχων πάνω σέ λεπτή χαλύβδινη ταινία.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

110. Σέ μία δίοδο ήλεκτρονική λυχνία μεταξύ τής άνόδου καί τής καθόδου εφαρμόζεται τάση $U = 250$ V. 1) Μέ πόση κινητική ένέργεια φτάνουν τά ήλεκτρόνια στην άνοδο; 2) Άν τό άνοδικό ρεύμα έχει ένταση $I = 6,4$ mA, πόσα ήλεκτρόνια φτάνουν κάθε δευτερόλεπτο στην άνοδο καί πόση ισχύς δαπανάται μέσα στή δίοδο λυχνία;

$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgf.

111. Σε μία δίοδο ηλεκτρονική λυχνία βγαίνουν από τη διάπυρη κάθοδο 10^{15} ηλεκτρόνια κατά δευτερόλεπτο. Πόση είναι η ένταση του ρεύματος μέσα στη λυχνία και πόση ισχύς μεταφέρεται στην άνοδο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $U_A = 150$ V.

112. Σε έναν ηλεκτρονικό σωλήνα τα ηλεκτρόνια βγαίνουν από τη διάπυρη κάθοδο χωρίς αρχική ταχύτητα και επιταχύνονται με την επίδραση της τάσεως $U = 2000$ V που υπάρχει μεταξύ της άνοδου και της καθόδου. Η απόσταση μεταξύ αυτών των δύο ηλεκτροδίων είναι $l = 20$ cm. 1) Πόση είναι η δύναμη F που επιταχύνει το ηλεκτρόνιο και πόση είναι η επιτάχυνση γ ; 2) Μέ πόση κινητική ενέργεια φτάνει το ηλεκτρόνιο στην άνοδο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

113. Θεωρούμε ότι ένα ηλεκτρόνιο βγαίνει από τη διάπυρη κάθοδο χωρίς αρχική ταχύτητα και εξαιτίας της τάσεως επιταχύνεται και πέφτει πάνω στην αντικάθοδο ενός σωλήνα Coolidge με ταχύτητα $v = 2 \cdot 10^4$ km/sec. 1) Μέ πόση κινητική ενέργεια το ηλεκτρόνιο φτάνει στην αντικάθοδο και πόση είναι η τάση U ; 2) Αν κατά τη σύγκρουση του ηλεκτρονίου με την αντικάθοδο ολόκληρη η ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου Röntgen, πόση είναι η συχνότητα ν του φωτονίου; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

114. Σε ένα σωλήνα Coolidge εφαρμόζεται τάση $U = 2 \cdot 10^5$ V. Αν ολόκληρη η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατραπεί σε ενέργεια ενός φωτονίου, πόση είναι η συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ αυτής της ακτινοβολίας; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

115. Για μία ακτινογραφία χρειαζόμαστε ακτίνες Röntgen με μήκος κύματος $\lambda = 0,12$ Å. Η ένταση της ηλεκτρονικής δέσμης που πέφτει πάνω στην αντικάθοδο είναι 50 mA. 1) Πόση τάση U πρέπει να εφαρμόσουμε στο σωλήνα Coolidge; 2) Πόση ισχύ μεταφέρει η ηλεκτρονική δέσμη; 3) Αν ο συντελεστής αποδόσεως της αντικάθοδου σε ακτινοβολία Röntgen είναι $\eta = 0,003$, πόση ισχύ μεταφέρει η δέσμη των ακτίνων Röntgen; (Τό η φανερώνει ότι από τα 1000 ηλεκτρόνια που πέφτουν πάνω στην αντικάθοδο μόνο 3 από αυτά προκαλούν την έκπομπή 3 φωτονίων). $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

116. Σε ένα φωτοκυτόταρο τό φωτοηλεκτρικό ρεύμα έχει ένταση $I = 10^{-10}$ A. Πόσα ηλεκτρόνια βγαίνουν από την κάθοδο κάθε δευτερόλεπτο; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

117. Πάνω σε μία μεταλλική πλάκα πέφτει ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος $\lambda = 1$ Å. Για τό μέταλλο αυτό τό έργο εξαγωγής b θεωρείται άσημαντο. Πόση είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου που βγαίνει από την κάθοδο; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

118. Πάνω στην κάθοδο ενός φωτοκυττάρου πέφτει ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος $\lambda_{op} = 0,66 \cdot 10^{-6}$ m, δηλαδή τό όριακό μήκος κύματος για τό μέταλλο της καθόδου. Πόσο είναι τό έργο εξαγωγής για τό μέταλλο της καθόδου; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

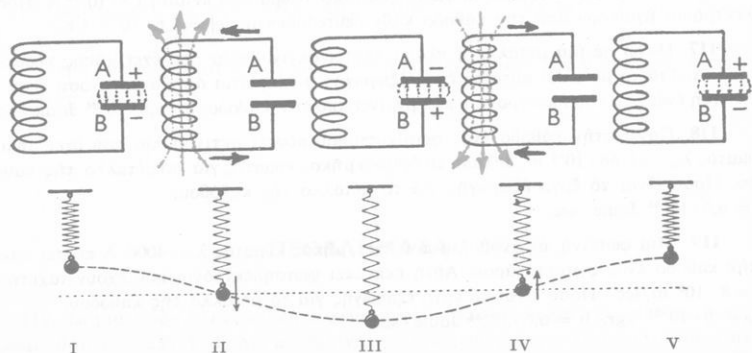
119. Μία φωτεινή ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος $\lambda = 4000$ Å πέφτει πάνω στην κάθοδο ενός φωτοκυττάρου. Αυτή εκπέμπει φωτοηλεκτρόνια που έχουν ταχύτητα $v = 8 \cdot 10^6$ m/sec. Πόσο είναι τό έργο εξαγωγής για τό μέταλλο της καθόδου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr. $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

82. Ήλεκτρικές ταλαντώσεις

Ένα κύκλωμα αποτελείται από έναν πυκνωτή που έχει χωρητικότητα C και από ένα πηνίο, που έχει συντελεστή αυτεπαγωγής L και άσημαντη ωμική αντίσταση (σχ. 123). Η ωμική αντίσταση (R) του κυκλώματος θεωρείται ίση με μηδέν και επομένως σ' αυτό το κύκλωμα δε συμβαίνει απώλεια ενέργειας εξαιτίας του φαινομένου Joule (δηλαδή δε συμβαίνει μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα). Αυτό το κύκλωμα ονομάζεται **κύκλωμα Thomson**.

Φορτίζουμε τον πυκνωτή (σχ. 123). Τότε οι όπλισμοί του έχουν αντίστοιχα φορτία $+Q$ και $-Q$ και μεταξύ των όπλισμών του υπάρχει τάση U . Άρα ο πυκνωτής έχει ενέργεια $\frac{1}{2}QU$, που είναι αποταμιευμένη μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ των όπλισμών του πυκνωτή (ηλεκτροστατική ενέργεια).

Επειδή οι δύο όπλισμοί του πυκνωτή συνδέονται μεταξύ τους με το πηνίο, ο πυκνωτής αρχίζει να εκφορτίζεται. Τότε το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα και στο έσωτερικό του δημιουργείται μαγνητικό πεδίο (σχ. 123 II). Όταν ο πυκνωτής εκφορτίζεται, η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου συνεχώς ελαττώνεται, ενώ αντίθετα η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου συνεχώς αυξάνει. Και όταν ο πυκνωτής εκφορτιστεί, τότε όλη η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου έχει μετατραπεί σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου



Σχ. 123. Στο κύκλωμα ταλαντώσεων το ηλεκτρικό φορτίο εκτελεί ταλάντωση ανάλογη με τη μηχανική ταλάντωση μίας σφαίρας κρεμασμένης από έλατήριο.

$\frac{1}{2} L I^2$ (ήλεκτρομαγνητική ενέργεια). Όταν ο πυκνωτής εκφορτιστεί, τό ρεύμα καταργείται. Τότε από αυτεπαγωγή δημιουργείται μέσα στο πηνίο ρεύμα, πού είναι *όμορροπο* μέ τό ρεύμα πού διακόπηκε. Αυτό τό ρεύμα φορτίζει τόν πυκνωτή, αλλά μέ αντίθετη τώρα πολικότητα (σχ. 123 III). Τό μαγνητικό πεδίο καταργήθηκε καί ή ενέργειά του έχει μετατραπεί σέ ενέργεια του ήλεκτρικού πεδίου πού υπάρχει τώρα μεταξύ των όπλισμών του πυκνωτή. Ακολουθεί έπειτα νέα εκφόρτιση του πυκνωτή, πού δημιουργεί νέο μαγνητικό πεδίο (σχ. 123 IV). Αυτό, όταν καταργηθεί, προκαλεί νέα φόρτιση του πυκνωτή, αλλά μέ *τήν άρχική του πολικότητα* (σχ. 123 V).

Έπειδή δεχτήκαμε ότι σ' αυτό τό κύκλωμα δέν υπάρχουν άπώλειες ενέργειας, τό φαινόμενο θά επαναλαμβάνεται διαρκώς, δηλαδή μέσα στό κύκλωμα δημιουργείται ένα *ήμιτονοειδές ρεύμα* μεγάλης συχνότητας, πού όνομάζεται **ήλεκτρική ταλάντωση**. Τό κύκλωμα Thomson λέγεται καί *κύκλωμα ταλαντώσεων*. Από τά παραπάνω βγάζουμε τό έξής συμπέρασμα :

Η ήλεκτρική ταλάντωση πού παράγεται σέ ένα κύκλωμα Thomson όφείλεται σέ περιοδική μετατροπή τής ενέργειας του ήλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή σέ ενέργεια του μαγνητικού πεδίου του πηνίου καί αντίστροφα.

Αυτές οι μετατροπές τής ενέργειας προκαλούνται από *τήν αυτεπαγωγή* του πηνίου, ή όποία είναι ή κύρια αίτια για τήν παραγωγή των ήλεκτρικών ταλαντώσεων.

Περίοδος καί συχνότητα των ήλεκτρικών ταλαντώσεων. Αν σέ ένα κύκλωμα Thomson ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα C καί τό πηνίο έχει συντελεστή αυτεπαγωγής L, άποδεικνύεται ότι ή *ιδιοπερίοδος* (T_0) τής ήλεκτρικής ταλάντωσης πού παράγεται μέσα σ' αυτό τό κύκλωμα δίνεται από τήν ακόλουθη **έξίσωση του Thomson :**

$$\text{έξίσωση του Thomson } T_0 = 2\pi \sqrt{LC} \quad \left\{ \begin{array}{l} L \text{ σέ H, } C \text{ σέ F} \\ T \text{ σέ sec} \end{array} \right.$$

Επομένως ή *ιδιοσυχνότητα* (ν_0) τής ήλεκτρικής 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 άπώλειες ενέργειας, ή ήλεκτρική ταλάντωση είναι *άμειωτη*, δηλαδή τό πλάτος (I_0) τής έντάσεως του ήμιτονοειδούς ρεύματος διατηρείται *στεθερό*. Αυτή ή ήλεκτρική ταλάντωση είναι *ελεύθερη ταλάντωση*, άνάλογη μέ τή μηχανική ταλάντωση

πού εκτελεί μιά μεταλλική σφαίρα κρεμασμένη από σπειροειδές ελατήριο (σχ. 123).

Παράδειγμα. Σε ένα κύκλωμα Thomson ο πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C = 0,01 \mu\text{F}$ και τό πηνίο έχει συντελεστή αυτεπαγωγής $L = 1 \mu\text{H}$. Ή ηλεκτρική ταλάντωση έχει ιδιοπερίοδο

$$T_0 = 2\pi \sqrt{LC} = 2\pi \cdot \sqrt{10^{-6} \text{ H} \cdot 10^{-8} \text{ F}} \quad \text{καί} \quad T_0 = 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$$

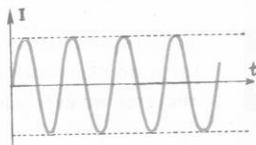
Ή ιδιοσυχνότητα τής ηλεκτρικής ταλαντώσεως είναι

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{10^7}{6,28} \text{ sec}^{-1} \quad \text{ή} \quad \nu_0 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 1,6 \text{ MHz}$$

Παρατηρούμε ότι οι ηλεκτρικές ταλαντώσεις είναι *εναλλασσόμενα ρεύματα ψηλής συχνότητας*.

83. Παραγωγή ηλεκτρικῶν ταλαντώσεων

Σε ένα κύκλωμα Thomson στην πραγματικότητα υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας εξαιτίας του φαινομένου Joule καί επομένως τό πλάτος τής εντάσεως (I_0) του ρεύματος συνεχῶς ελαττώνεται. Γιά νά διατηρηθεῖ σταθερό τό πλάτος τής εντάσεως του ρεύματος (σχ. 124), πρέπει ρυθμικά νά προσφέρεται ἀπέξω στό κύκλωμα τόση ἀκριβῶς ἐνέργεια, ὅση εἶναι ἡ ἐνέργεια πού χάνεται μέ τίς ἀπώλειες. Αὐτό τό πετυχαίνουμε μέ τήν *τριόδο ηλεκτρονική λυχνία*.



Σχ. 124. Τό πλάτος τής εντάσεως του ρεύματος διατηρεῖται σταθερό.

84. Ήπαγωγική σύζευξη δύο κυκλωμάτων ταλαντώσεων

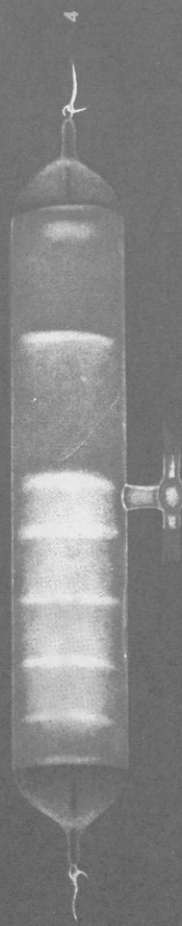
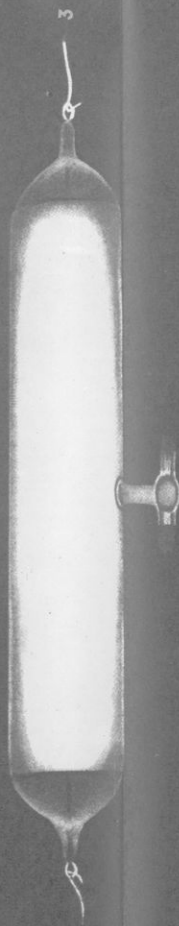
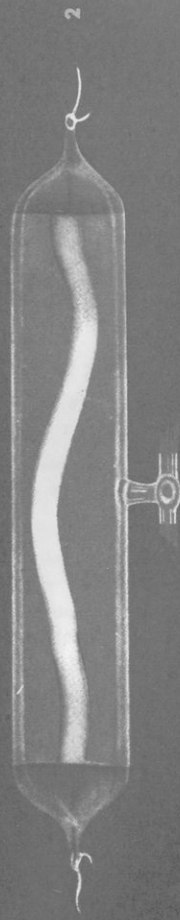
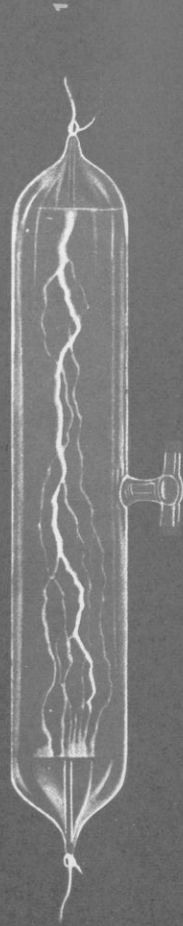
Έχουμε δύο κυκλώματα Thomson, τά A καί B (σχ. 125). Τό πρῶτο κύκλωμα έχει ιδιοπερίοδο $T_1 = 2\pi \sqrt{L_1 C_1}$. Τά πηνία L_1 καί L_2 τῶν δύο κυκλωμάτων βρίσκονται σε μικρή ἀπόσταση τό ένα ἀπό τό ἄλλο. Στο πρῶτο κύκλωμα παράγεται ἀμείωτη ηλεκτρική ταλάντωση μέ ιδιοπερίοδο T_1 . Οἱ δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου πού παράγεται ἀπό τό πηνίο L_1 , περνοῦν ἀπό τίς σπείρες του πηνίου L_2 . Τότε λέμε ότι μεταξύ τῶν δύο κυκλωμάτων A καί B ὑπάρχει *ἐπαγωγική σύζευξη*. Ή μαγνητική ροή πού περνάει ἀπό τίς σπείρες του πηνίου L_2 μεταβάλλεται ἡμιτονοειδῶς μέ τή συχνότητα ν_1 , πού έχει ἡ ηλεκτρική ταλάντωση στό πρῶτο κύκλωμα A. Ἐτσι μέσα στό δεύτερο κύκλωμα B παράγεται *ἐξαναγκασμένη ηλεκτρονική ταλάντωση*, πού έχει περίοδο T_1 ἴση μέ τήν ιδιοπερίοδο του πρῶτου κυκλώματος A.

Διάφορες φάσεις τής ηλεκτρικής έκκενώσεως

1. 'Υπό τήν ατμοσφαιρική πίεση ὁ ἠλεκτρικός σπινθήρας εἶναι διακλαδισμένος.
2. 'Υπό πίεση ἴση μέ τό $1/4$ τής ατμοσφαιρικής ὁ ἠλεκτρικός σπινθήρας ἔχει τήν ὄψει ἔγχρωμης φωτεινῆς στήλης.
3. 'Υπό πίεση ἴση μέ τό $1/20$ τής ατμοσφαιρικής ὄλο τό ἀέριο φωτοβολεῖ.
4. 'Υπό πίεση ἴση μέ τό $1/100$ τής ατμοσφαιρικής ἐμφανίζονται σκοτεινές περιοχές μέσα στό σωλήνα.
5. 'Υπό πίεση ἴση μέ τό $1/1000$ τής ατμοσφαιρικής τό στενό τμήμα τοῦ σωλήνα φωτοβολεῖ ἰσχυρότερα.

ANODOSI (+)

KATHODOSI (-)



Ή ηλεκτρική ταλάντωση στό δεύτερο κύκλωμα Β άποδεικνύεται άπό τή φωτοβολία του λαμπτήρα. Τό κύκλωμα Β έχει μεταβλητό πυκνωτή. Μεταβάλλοντας τή χωρητικότητα του πυκνωτή μεταβάλλουμε τήν ιδιοπερίοδο του κυκλώματος Β. Τότε βρίσκουμε ότι τό πλάτος τής εξαναγκασμένης ταλαντώσεως στό δεύτερο κύκλωμα παίρνει τή μέγιστη τιμή, όταν ή ιδιοπερίοδος του δεύτερου κυκλώματος $T_2 = 2\pi \sqrt{L_2 C_2}$ γίνει ίση μέ τήν ιδιοπερίοδο T_1 του πρώτου κυκλώματος, δηλαδή όταν είναι :

$$T_1 = T_2 \quad \eta \quad 2\pi \sqrt{L_1 C_1} = 2\pi \sqrt{L_2 C_2}$$

Σ' αυτή τήν περίπτωση λέμε ότι μεταξύ των δύο κυκλωμάτων υπάρχει **συντονισμός**. Τότε ή φωτοβολία του λαμπτήρα είναι έντονη. Ωστε :

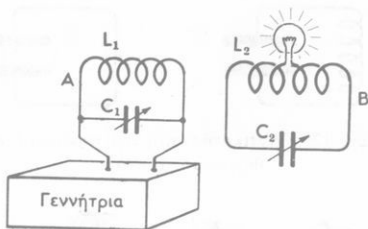
Δύο κυκλώματα ταλαντώσεων πού συνδέονται μέ επαγωγική σύζευξη βρίσκονται σέ συντονισμό, όταν ισχύει ή εξίσωση :

$$\text{συνθήκη συντονισμού} \quad L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2$$

Ή ηλεκτρική ταλάντωση πού παράγεται μέσα στό δεύτερο κύκλωμα όφείλεται σέ *ένέργεια πού μεταφέρεται* άπό τό πρώτο κύκλωμα μέ τό μαγνητικό πεδίο του.

85. Παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο

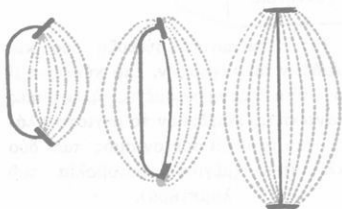
Οί ηλεκτρικές ταλαντώσεις μέσα σέ ένα κύκλωμα ταλαντώσεων μπορούν νά προκαλέσουν εξαναγκασμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις μέσα σέ δεύτερο κύκλωμα ταλαντώσεων πού βρίσκεται κοντά στό πρώτο κύκλωμα (σχ. 125). Ή διέγερση του δεύτερου κυκλώματος όφείλεται μόνο στήν επίδραση του *μαγνητικού πεδίου* πού δημιουργείται γύρω άπό τό πρώτο κύκλωμα, γιατί τό ηλεκτρικό πεδίο μένει έντοπισμένο μεταξύ των δύο όπλισμών του πυκνωτή. Μπορούμε όμως νά προκαλέσουμε τή διέγερση του δεύτερου κυκλώματος καί μέ τό *ηλεκτρικό πεδίο* του πρώτου κυκλώματος, άν διαμορφώσουμε κατάλληλα τά δύο κυκλώματα ταλαντώσεων.



Σχ. 125. Ή επαγωγική σύζευξη δύο κυκλωμάτων ταλαντώσεων. Στό κύκλωμα Β παράγονται εξαναγκασμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις, πού έχουν τό μέγιστο πλάτος, όταν υπάρχει συντονισμός των δύο κυκλωμάτων (μέγιστη φωτοβολία του λαμπτήρα).



Σχ. 126. Ἀντικατάσταση τοῦ πηνίου με εὐθύγραμμο ἀγωγό

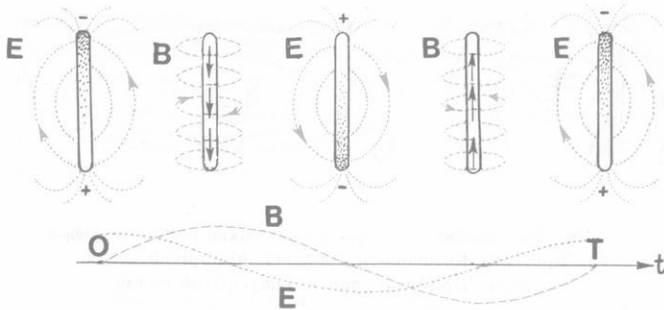


Σχ. 127. Τό ἠλεκτρικό πεδίο ἀπλώνεται στό χῶρο.

του νά καταλήγει ἐλεύθερα ἢ νά ἔχει μικρές πλάκες ἢ σφαιρές. Αυτό τό ἀνοικτό κύκλωμα Thomson, πού ἀποτελεῖται μόνο ἀπό ἕναν εὐθύγραμμο ἀγωγό, ὀνομάζεται **παλλόμενο ἠλεκτρικό δίπολο**, γιατί σέ μιά στιγμή τῆς ἠλεκτρικῆς ταλαντώσεως στίς δύο ἄκρες τοῦ ἀγωγοῦ βρίσκονται ἴσα καί ἀντίθετα ἠλεκτρικά φορτία (ὅπως συμβαίνει καί στούς δύο ὀπλισμούς τοῦ πυκνωτῆ στό κλειστό κύκλωμα Thomson). Ὁ εὐθύγραμμος ἀγωγός μπορεῖ νά ἔχει στή μέση του μιά μικρή διακοπή (σπινθηριστή).

86. Ἐκπομπή ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων

α. Τό ἠλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ὄταν μέσα στό παλλόμενο ἠλεκτρικό δίπολο παράγεται ἀμείωτη ἠλεκτρική ταλάντωση, στίς δύο ἄκρες τοῦ διπόλου ἀναπτύσσεται ἐναλλασσόμενη τάση, γιατί περιοδικά τά ἐλεύθερα ἠλεκτρόνια τοῦ ἀγωγοῦ συγκεντρώνονται πότε στή μιά καί πότε στήν ἄλλη ἄκρη τοῦ διπόλου. Ἔτσι οἱ δύο ἄκρες τοῦ διπόλου ἀποκτοῦν διαδοχικά θετικό καί ἀρνητικό δυναμικό. Ἐπομένως γύρω ἀπό τό δίπολο δημιουργεῖται ἕνα ἐναλλασσόμενο ἠλεκτρικό πεδίο (σχ. 128). Ἐξαιτίας τῆς ἐναλλασσομένης τάσεως δημιουργεῖται μέσα στόν ἀγωγό ἐναλλασσόμενο ρεῦμα, πού παράγει γύρω του ἕνα ἐναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Οἱ δυναμικές γραμμές τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου εἶναι ὁμόκεντροι κύκλοι, κάθετοι στόν ἀγωγό. Ὄταν σιγά - σιγά ἐξασθενίζει τό ἠλεκτρικό πεδίο, ἐνισχύεται τό μαγνητικό πεδίο καί ἀντίστροφα, ὅταν ἐξασθενίζει τό μαγνητικό πεδίο,

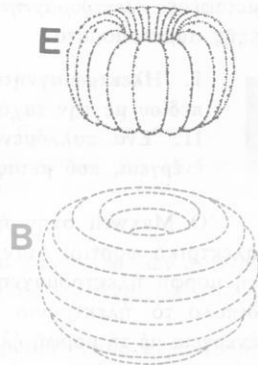


Σχ. 128. Γύρω από το παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο σχηματίζονται ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο (\vec{E}) και ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (\vec{B}).

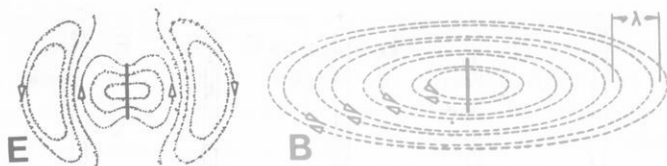
ένισχύεται το ηλεκτρικό πεδίο. Αυτά τα δύο εναλλασσόμενα πεδία, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό, είναι άλληλένδετα και αποτελούν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ωστε :

Ή ηλεκτρική ταλάντωση που παράγεται μέσα στο παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο δημιουργεί γύρω από αυτό εναλλασσόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, που είναι άλληλένδετα και αποτελούν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

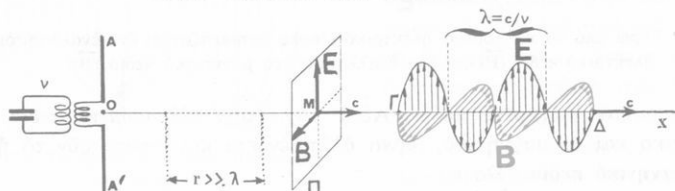
β. Ήλεκτρομαγνητικά κύματα. Κάθε μισή περίοδο αλλάζει ή φορά των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Στο διάστημα αυτό το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο διαδίδονται στο γύρω χώρο με την ταχύτητα του φωτός (c) και έτσι οι δυναμικές γραμμές των δύο πεδίων συνεχώς απλώνονται μέσα στο χώρο γύρω από το δίπολο (σχ. 129). Σε ένα σημείο M του χώρου που βρίσκεται σε αρκετή απόσταση από το δίπολο ή ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου και η μαγνητική επαγωγή \vec{B} του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους και κάθετες στη διεύθυνση της διαδόσεως του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (σχ. 130). Στη διάρκεια μιάς περιόδου τά μεγέθη E και B μεταβάλλονται ήμιτονοειδώς και σε κάθε στιγμή έχουν την ίδια φάση (δηλαδή ταυτόχρονα παίρνουν τη μεγίστη τιμή τους και ταυτόχρονα μηδενίζονται). Αυτή η διάδοση του ή-



Σχ. 129. Διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο. Πάνω: διάδοση του ηλεκτρικού πεδίου. Κάτω: διάδοση του μαγνητικού πεδίου



Σχ. 129α. Διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο
 Ἀριστερά: Κατακόρυφη τομή του ηλεκτρικού πεδίου
 Δεξιά: Ὁριζόντια τομή του μαγνητικού πεδίου



Σχ. 130. Ἡ ἀπόσταση r ἀπὸ τὸ παλλόμενο δίπολο εἶναι μεγάλη σχετικά μὲ τὸ μήκος κύματος λ . Ἡ ἔνταση E τοῦ ηλεκτρικοῦ πεδίου καὶ ἡ μαγνητικὴ ἐπαγωγή B τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου βρίσκονται σὲ συμφωνία φάσεως.

λεκτρομαγνητικοῦ πεδίου ἀποτελεῖ τὸ **ηλεκτρομαγνητικὸ κύμα**, τὸ ὁποῖο μεταφέρει **ηλεκτρομαγνητικὴ ἐνέργεια**. Ἀπὸ τὰ παραπάνω καταλήγουμε στὰ ἑξῆς συμπεράσματα :

- I. Ἡλεκτρομαγνητικὸ κύμα εἶναι ἡ διάδοση τοῦ ηλεκτρομαγνητικοῦ πεδίου μὲ τὴν ταχύτητα τοῦ φωτός.
- II. Ἐνα παλλόμενο ηλεκτρικὸ δίπολο ἐκπέμπει ηλεκτρομαγνητικὴ ἐνέργεια, πού μεταφέρεται ἀπὸ τὰ ηλεκτρομαγνητικὰ κύματα.

Ὁ Maxwell στὴν ηλεκτρομαγνητικὴ θεωρία του ἀπέδειξε ὅτι κάθε ηλεκτρικὸ φορτίο, ὅταν κινεῖται μὲ ἐπιτάχυνση, ἀποβάλλει ἐνέργεια μὲ τὴ μορφή ηλεκτρομαγνητικοῦ κύματος. Μέσα στοῦ παλλόμενου ηλεκτρικοῦ δίπολο τὸ ηλεκτρόνιο κινεῖται μὲ ἐπιτάχυνση καὶ ἐπομένως ἐκπέμπει ἐνέργεια μὲ τὴ μορφή **ηλεκτρομαγνητικοῦ κύματος**. Ἡ ἐνέργεια, τὴν ὁποία χάνει τὸ κινούμενο μὲ ἐπιτάχυνση ηλεκτρόνιο, ἀναπληρώνεται ἀπὸ τὴ γεννήτρια πού ὑπάρχει στοῦ κύκλωμα.

Ἀργότερα ὁ Hertz ἐπιβεβαίωσε πειραματικὰ τὶς θεωρητικὲς προβλέψεις τοῦ Maxwell καὶ ἀπέδειξε τὴν ὑπαρξὴ τῶν ηλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. Σήμερα τὸ ραδιόφωνο, ἡ τηλεόραση, τὸ ραντάρ εἶναι μεγάλες ἐφαρμογές τῶν ηλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων.

γ. Μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τά δύο εναλλασσόμενα πεδία πού αποτελούν τό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, έχουν τήν ίδια συχνότητα πού έχει καί ή ηλεκτρική ταλάντωση ή όποία παράγεται μέσα στό παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο. Άρα τό ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει συχνότητα ν . Τό μήκος κύματος λ του ηλεκτρομαγνητικού κύματος υπολογίζεται από τή γενική εξίσωση των κυμάτων $c = \nu \cdot \lambda$, όπου c είναι ή ταχύτητα του φωτός.

δ. Ίδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν τίσ εξής ιδιότητες:

1. "Όταν πέφτουν πάνω στην επιφάνεια μετάλλων (καί γενικότερα άγωγων), ανακλώνται σύμφωνα μέ τούς νόμους τής ανακλάσεως του φωτός.

2. "Όταν περνούν τήν επιφάνεια πού χωρίζει δύο διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά, διαθλώνται σύμφωνα μέ τούς νόμους τής διαθλάσεως του φωτός.

3. Παράγουν φαινόμενα συμβολής καί περιθλάσεως, όπως καί στην περίπτωση του φωτός.

4. Είναι εγκάρσια κύματα, όπως είναι καί τά φωτεινά κύματα. "Ωστε τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν όλες τίσ ιδιότητες των φωτεινών κυμάτων. Πρώτος ό Maxwell (1865) απέδειξε ότι ή φύση των ηλεκτρομαγνητικών καί των φωτεινών κυμάτων είναι ή ίδια καί διατύπωσε τήν ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός, πού έδωσε ενιαία εξήγηση σε όλα τά ως τότε γνωστά ηλεκτρομαγνητικά καί όπτικά φαινόμενα.

87. Ήλεκτρομαγνητική άκτινοβολία

Σήμερα έχει συμπληρωθεί όλη ή σειρά των συχνοτήτων, από τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα πού παράγονται μέ κυκλώματα ως τά φωτεινά κύματα καί τίσ άκτίνες Röntgen ή γ πού παράγονται από τά άτομα. Γενικά έχουμε τόν εξής όρισμό:

Ήλεκτρομαγνητική άκτινοβολία ονομάζεται τό σύνολο των άκτινοβολιών πού μεταφέρουν ενέργεια μέ τή μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Ή ενέργεια πού μεταφέρεται από τό ηλεκτρομαγνητικό κύμα εξαρτάται από όρισμένα χαρακτηριστικά του κύματος.

Τό φάσμα τής ηλεκτρομαγνητικής άκτινοβολίας. Πειραματικά αποδείχτηκε ότι τά τεχνικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα, οί υπέρυθρες άκτίνες, οί όρατές άκτινοβολίες, οί υπεριώδεις άκτίνες, οί άκτίνες Röntgen καί οί άκτίνες γ είναι διάφορες μορφές ηλεκτρομαγνητικής άκτινοβολίας, πού ή

μόνη διαφορά τους είναι στο *μήκος κύματος* (λ) και, επομένως, και στη συχνότητα (ν). Οι συχνότητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουν τιμές από $\nu = 0$ ως $\nu = 10^{24}$ Hz. Οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που παράγουμε με κυκλώματα έχουν συχνότητες από 0 ως 10^{13} Hz και διαδίδονται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που συνήθως τα ονομάζουμε *έρτζιανά κύματα*. Οι ακτινοβολίες που έχουν συχνότητες από 10^{13} ως 10^{24} Hz παράγονται από τα άτομα και τα μόρια της ύλης, όταν βρίσκονται σε κατάσταση διεγέρσεως. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει **τό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**. Παρατηρούμε ότι μόνο μία μικρή περιοχή αυτού του φάσματος αποτελεί **τό ορατό φάσμα**, δηλαδή τις ορατές ακτινοβολίες.

Τό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Συχνότητα ν (σε Hz)		Μήκος κύματος λ
10^{24}	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	$3 \cdot 10^{-6}$ Å
10^{21}		$3 \cdot 10^{-3}$ Å
10^{18}	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	3 Å
10^{15}	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	$3 \cdot 10^3$ Å
10^{12}	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	300 μm
10^9	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	30 cm
10^6	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	300 m
10^3	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	300 km
10^0	Ήλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες	300 000 km

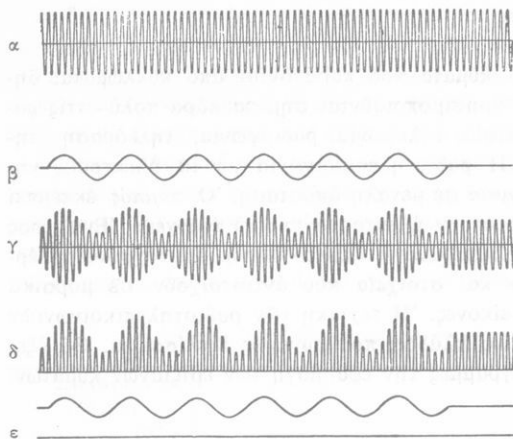
88. Ραδιοηλεκτροκωινωνίες

Τά ήλεκτρομαγνητικά κύματα πού παράγονται από κυκλώματα, δηλαδή τά *έρτζιανά κύματα*, χρησιμοποιούνται σήμερα πάρα πολύ στίς *ραδιοηλεκτροκωινωνίες* (τηλεγραφία, τηλεφωνία, ραδιοφωνία, τηλεόραση, τηλεφωτογραφία, ραντάρ). Ή ραδιοηλεκτροκωινωνία μέ τά ήλεκτρομαγνητικά κύματα *μεταδίδει ενέργεια* σέ μεγάλη απόσταση. Ή *πομπός* εκπέμπει έρτζιανά κύματα πού μεταφέρουν ήλεκτρομαγνητική ενέργεια. Ένα μέρος από ατή τήν ενέργεια συλλαμβάνεται από τό *δέκτη*. Ταυτόχρονα τά έρτζιανά κύματα *μεταφέρουν* καί στοιχειά πού αντίστοιχούν σέ μορσικά σήματα, σέ ήχους ή σέ εικόνες. Ή τεχνική τών ραδιοηλεκτροκωινωνιών είναι σήμερα ένας τεράστιος κλάδος, πού συνεχώς εξελίσσεται. Θά εξετάσουμε σέ πολύ γενικές γραμμές τήν εφαρμογή τών έρτζιανών κυμάτων.

89. Πομπός έρτζιανών κυμάτων

α. Φέρον κύμα. Ή *πομπός* έρτζιανών κυμάτων αποτελείται από ένα *κύκλωμα ταλαντώσεων*, στό όποιο παράγονται αμείωτες ήλεκτρικές ταλαντώσεις πού έχουν πολύ μεγάλη συχνότητα (ν). Ή συχνότητα ατή όνομάζεται *φέρουσα συχνότητα* (καί είναι τής τάξεως του MHz). Για τήν παραγωγή αττών τών ταλαντώσεων χρησιμοποιούνται κυρίως τρίοδοι ήλεκτρονικές λυχνίες. Τό παραπάνω κύκλωμα συνδέεται μέ τήν *κεραία*, πού είναι ένα παλλόμενο ήλεκτρικό δίπολο, στό όποιο παράγονται ήλεκτρικές ταλαντώσεις μέ τήν ίδια συχνότητα (ν). Ή *κεραία* εκπέμπει ήλεκτρομαγνητικό κύμα, πού έχει *σταθερή μεγάλη συχνότητα* (ν) καί όνομάζεται *φέρων κύμα*.

β. Διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Κατά τήν όμιλία καί στή μουσική παράγονται ήχοι πού έχουν *χαμηλές συχνότητες* (ώς 12 kHz). Αύτοί οί ήχοι, όταν φτάνουν στό μικρόφωνο προκαλούν μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος του μικροφώνου μέ τή συχνότητα ($\nu_{\eta\chi}$), πού έχει ό αντίστοιχος ήχος. Για τή μετάδοση ήχων (*ραδιοηλεφωνία, ραδιοφωνία*) τό κύκλωμα του μικροφώνου συνδέεται μέ τό κύκλωμα ταλαντώσεων. Οί μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος του μικροφώνου (πού αντίστοιχούν σέ ήχο όρισμένης συχνότητας $\nu_{\eta\chi}$) προκαλούν αντίστοιχες *μεταβολές στό πλάτος του φέροντος κύματος* μέ τό ρυθμό τής ήχητικής συχνότητας. Τότε ή *κεραία* εκπέμπει ένα *διαμορφωμένο κύμα*, πού μεταφέρει τίς χαρακτηριστικές μεταβολές πού προκάλεσε ό ήχος στό ρεύμα του μικροφώνου. Στο σχήμα 131 τό α δείχνει τό φέρον κύμα, πρίν πάθει διαμόρφωση. Τό β δείχνει τήν ήμιτονοειδή μεταβολή πού προκαλεί στήν ένταση του ρεύμα-

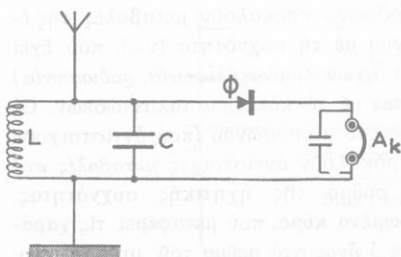


Σχ. 131. Διαμόρφωση των κυμάτων στο σταθμό εκπομπής και αποδιαμόρφωση στο δέκτη
 (α φέρον κύμα,
 β μικροφωνικό ήμιτονοειδές ρεύμα,
 γ διαμορφωμένο κύμα,
 δ ανόρθωση,
 ε ανορθωμένο ρεύμα όμοιο με τό μικροφωνικό ρεύμα)

τος του μικροφώνου ένας άπλός ήχος. Τό γ δείχνει τή διαμόρφωση πού παθαίνει τό φέρον κύμα.

90. Δέκτης έρτζιανών κυμάτων

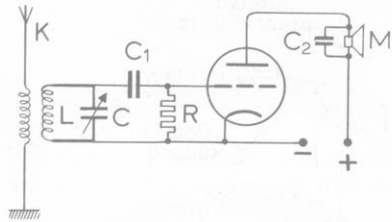
Ο δέκτης έρτζιανών κυμάτων αποτελείται από τήν κεραία, πού συνδέεται μέ ένα κύκλωμα ταλαντώσεων. Αυτό βρίσκεται σέ συντονισμό μέ τό κύκλωμα ταλαντώσεων του πομπού. Έτσι μέσα στό κύκλωμα του δέκτη παράγονται διαμορφωμένες ηλεκτρικές ταλαντώσεις, ίδιες μέ εκείνες πού σχηματίστηκαν στό κύκλωμα του πομπού. Αν αυτές οι ταλαντώσεις έρθουν στό άκουστικό ή στό μεγάφωνο, δέν παράγεται ήχος, γιατί ή πλάκα του άκουστικού ή ή μεμβράνη του μεγαφώνου δέν μπορούν νά παρακολουθήσουν τίς τόσο γρήγορες μεταβολές τής έντάσεως του ρεύματος. Μεταξύ



Σχ. 132. Άπλή διάταξη δέκτη μέ κρυσταλλικό άνορθωτή (φωρατή Φ) και άκουστικά

του κυκλώματος ταλαντώσεων και του άκουστικού ή του 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 παρακολου-

θήσουν τίς μεταβολές τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος καί ἔτσι ἀναπαράγεται ὁ ἀρχικός ἤχος. Στό σχῆμα 131 τό δ δείχνει τό ἀνορθωμένο ρεύμα καί τό ε δείχνει τό ρεύμα πού περνάει ἀπό τό ἀκουστικό ἢ τό μεγάφωνο καί ὅπως βλέπουμε διατηρεῖται ἡ ἡμιτονοειδῆς μεταβολή τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος τοῦ μικροφώνου. Στό σχῆμα 132 φαίνεται μιά ἀπλή διάταξη δέκτη μέ ἀκουστικά.



Σχ. 133. Σχηματική διάταξη δέκτη μέ τρίοδο λυχνία

Ἐνίσχυση, ἐπιλογή. Οἱ διαμορφωμένες ἠλεκτρικές ταλαντώσεις πού παράγονται στό κύκλωμα τοῦ δέκτη εἶναι πολύ ἀσθενεῖς καί γι' αὐτό ἐνισχύονται μέ κατάλληλους ἐνισχυτές. Στήν κεραία πέφτουν ἠλεκτρομαγνητικά κύματα μέ πολύ διαφορετικές συχνότητες. Γιά νά μπορούμε νά κάνουμε ἐπιλογή καί νά συντονίζουμε τό δέκτη μέ τόν πομπό, ὁ δέκτης ἔχει ἕναν πυκνωτή μεταβλητῆς χωρητικότητας, μέ τόν ὁποῖο μεταβάλλουμε τήν ἰδιοσυχνότητα τοῦ κυκλώματος τοῦ δέκτη. "Όταν ὑπάρχει συντονισμός τοῦ δέκτη μέ τόν πομπό, οἱ ταλαντώσεις στό κύκλωμα τοῦ δέκτη ἔχουν μεγάλο πλάτος.

Ραδιόφωνο. Τό ραδιόφωνο εἶναι ἕνας δέκτης ἐρτζιανῶν κυμάτων, στόν ὁποῖο ἡ ἀνόρθωση καί ἡ ἐνίσχυση γίνεται μέ κατάλληλες ἠλεκτρονικές λυχνίες ἢ μέ ἡμιαγωγούς (ραδιόφωνα μέ τρανζίστορ). Τό σχῆμα 133 δείχνει τή συνδεσμολογία ἑνός ἀπλοῦ ραδιοφώνου μέ μιά τρίοδο ἠλεκτρονική λυχνία.

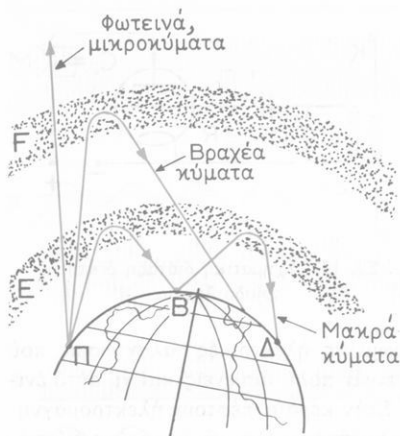
91. Διάδοση τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων

Ἡ διάδοση τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων πού ἐκπέμπονται ἀπό τήν κεραία ἐπηρεάζεται κυρίως ἀπό τοὺς ἐξῆς δύο παράγοντες :

α) Ἀπό τήν παρουσία τοῦ ἐδάφους, πού ἡ ἀγωγιμότητά του ἐξαρτᾶται ἀπό τή φύση τοῦ ἐδάφους.

β) Ἀπό τήν παρουσία μέσα στήν ἀτμόσφαιρα καί σέ ὕψος ἀπό 100 ὠς 350 km περίπου ἑνός στρώματος ἀέρα πού ἔχει σημαντική ἀγωγιμότητα καί ὀνομάζεται **ιονόσφαιρα**. Ἡ ἀγωγιμότητα τῆς ἰονόσφαιρας ὀφείλεται σέ θετικά ἰόντα καί ἠλεκτρόνια πού προέρχονται ἀπό τόν ἰονισμό τοῦ ἀέρα.

Τά ἠλεκτρομαγνητικά κύματα πού ἐκπέμπονται ἀπό τήν κεραία διακρίνονται στίς ἐξῆς δύο κατηγορίες : α) *στά κύματα ἐπιφάνειας*, πού δια-



Σχ. 134. Ἀνάκλαση τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων πάνω στά στρώματα E καί F τῆς ἰονόσφαιρας

δίδονται κοντά στήν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς, καί β) *στά κύματα* *χώρου*, πού ἐκπέμπονται ἀπό τήν κεραία πρὸς τά πάνω.

Τά κύματα ἐπιφανείας *ἀπορροφῶνται* ἀπό τήν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς καί ἡ ἀπορρόφηση εἶναι τόσο μεγαλύτερη, ὅσο *μικρότερο* εἶναι τό μήκος κύματος (λ) τοῦ ἠλεκτρομαγνητικοῦ κύματος. Τά κύματα *χώρου*, ὅταν ἔχουν μήκος κύματος (λ) μεγαλύτερο ἀπό ἓνα ὄριο, *ἀνακλῶνται* πάνω στήν ἰονόσφαιρα καί *ξαναγυρίζουν* στήν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς (σχ. 134). Ἔτσι τά ἀνακλῶμενα κύματα φτάνουν σέ μεγάλες ἀποστάσεις χωρίς σημαντική *ἐξασθένηση*.

α. Τά *ἐρτζιανὰ* κύματα στίς τηλεπικοινωνίες. Τά ἐρτζιανὰ κύματα πού χρησιμοποιοῦνται στίς τηλεπικοινωνίες διακρίνονται στίς ἐξῆς κατηγορίες :

α) Τά *μακρὰ κύματα* ($\lambda > 600 \text{ m}$) παρουσιάζουν μικρή ἀπορρόφηση τῶν κυμάτων ἐπιφανείας καί εἶναι κατάλληλα γιά μετάδοση σέ μεγάλες ἀποστάσεις.

β) Τά *μεσαῖα κύματα* ($100 \text{ m} < \lambda < 600 \text{ m}$) παρουσιάζουν μεγαλύτερη ἀπορρόφηση τῶν κυμάτων ἐπιφανείας, ἀλλά τά κύματα *χώρου* ἀνακλῶνται πάνω στήν ἰονόσφαιρα καί φτάνουν σέ μεγάλες ἀποστάσεις ἀπό τόν πομπό.

γ) Τά *βραχέα κύματα* ($10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$) παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ἀπορρόφηση τῶν κυμάτων ἐπιφανείας, ἀλλά ἀντίθετα τά κύματα *χώρου* μποροῦν νά πάθουν διαδοχικές ἀνακλάσεις πάνω στήν ἰονόσφαιρα καί στό ἔδαφος καί νά φτάσουν σέ μεγάλες ἀποστάσεις χωρίς αἰσθητή *ἐξασθένηση*.

δ) Τά *ὑπερβραχέα κύματα* ($1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$) δέν ἀνακλῶνται πάνω στήν ἰονόσφαιρα, ἀλλά περνοῦν μέσα ἀπό αὐτήν καί βγαίνουν στό ἀστρικό διάστημα. Ἐπομένως γιά τή μετάδοση χρησιμοποιοῦμε μόνο τά κύματα ἐπιφανείας, πού ἔχουν πολύ μικρή ἐμβέλεια. Τά ὑπερβραχέα κύματα διαδίδονται *ἐνθύγραμμα*, ὅπως καί τό φῶς, καί γι' αὐτό ὁ δέκτης πρέπει νά βρίσκεται στόν ὀπτικό ὀρίζοντα τοῦ πομποῦ. Χρησιμοποιοῦνται στήν τηλεόραση.

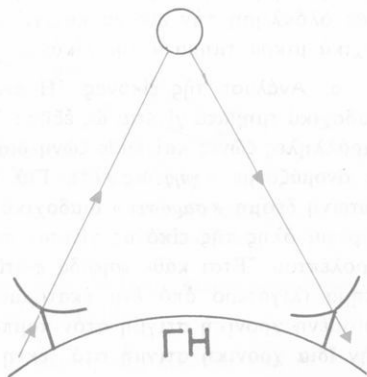
ε) Τά *μικροκύματα* ($0,1 \text{ mm} < \lambda < 1 \text{ m}$) περνοῦν ἀπό τήν ἰονόσφαιρα

καί βγαίνουν στο άστρικό διάστημα. Μπορούν να αποτελέσουν μία *κατευθυνόμενη δέσμη* ανάλογη με μία δέσμη φωτεινών ακτίνων. Χρησιμοποιούνται στο ραντάρ και στη ραδιοτηλεφωνία.



Σχ. 135. Σχηματική παράσταση σταθμών αναμεταδόσεως των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

β. *Αναμετάδοση των κυμάτων.* Τά υπερβραχέα κύματα και τά μικροκύματα διαδίδονται εὐθύγραμμα καί ἐπομένως τά βουνά καί ἡ καμπυλότητα τῆς Γῆς ἐμποδίζουν τή διάδοση αὐτῶν τῶν κυμάτων σέ μεγάλες ἀποστάσεις. Σ' αὐτή τήν περίπτωση χρησιμοποιοῦμε *σταθμούς ἀναμεταδόσεως τῶν κυμάτων* πού βρίσκονται στίς κορυφές βουνῶν, ὥστε νά ἀντικρύζουν ὁ ἕνας τόν ἄλλο σταθμό (σχ. 135). Σέ κάθε σταθμό ἀναμεταδόσεως ὑπάρχει *δέκτης* τῶν κυμάτων, *ἐνισχυτής* καί *πομπός* πού ξαναεκπέμπει τά κύματα πρὸς ὀρισμένη κατεύθυνση. Ὁ δέκτης καί ὁ πομπός εἶναι μεγάλοι παραβολικοί μεταλλικοί καθρέφτες, πού ἔχουν κεραία στήν ἐστία τους.



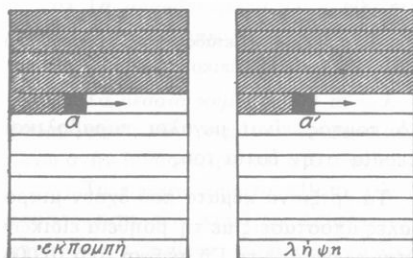
Σχ. 136. Ἀναμετάδοση τῶν κυμάτων ἀπό τεχνητό τηλεπικοινωνιακό δορυφόρο

γ. *Διαστημικές τηλεπικοινωνίες.* Τά ἐρτζιανά κύματα πού ἔχουν μικρό μῆκος κύματος μεταδίδονται σέ μεγάλες ἀποστάσεις με τή βοήθεια εἰδικῶν τεχνητῶν δορυφόρων πού περιφέρονται γύρω ἀπό τή Γῆ σέ ὕψη ἀπό 10 000 km ὡς 36 000 km καί ὀνομάζονται *τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι* (σχ. 136). Κάθε τέτοιος δορυφόρος ἔχει δέκτη, ἐνισχυτή καί πομπό. Οἱ συσκευές τοῦ δορυφόρου λειτουργοῦν μέ συσσωρευτές πού φορτίζονται μέ τό ἠλεκτρικό ρεῦμα τό ὁποῖο παράγεται ἀπό πολλές φωτοστῆλες. Αὐτές μετατρέπουν τήν ἐνέργεια τοῦ ἡλιακοῦ φωτός σέ ἠλεκτρική ἐνέργεια. Τά ἐρτζιανά κύματα πού ἐκπέμπονται ἀπό τήν ἐπιφάνεια τῆς Γῆς ξαναγυρίζουν σ' αὐτή, ἀφοῦ διατρέξουν μεγάλες ἀποστάσεις ἔξω ἀπό τήν ἀτμόσφαιρα, δηλαδή μέσα στοῦ ἀστρικό διάστημα (*διαστημικές τηλεπικοινωνίες*).

92. Τηλεόραση

Στήν τηλεόραση μέ τά ήλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται εικόνας προσώπων ή άντικειμένων πού μπορεί νά βρίσκονται καί σέ κίνηση. Όπως ξερούμε, τό μάτι μας δέν μπορεί νά διακρίνει όστι στήν όθόνη του κινηματογράφου προβάλλονται πολύ γρήγορα διαδοχικές εικόνας του άντικειμένου πού κινείται. Σ' αυτή τήν ιδιότητα του ματιου στηρίζεται καί ή τηλεόραση, μέ τή διαφορά όστι άκόμα δέν μπορούμε νά μεταδώσουμε μονομιάς όλόκληρη τήν εικόνα καί γι' αυτό μεταδίδουμε πολύ γρήγορα διαδοχικά μικρά τμήματα τής εικόνας.

α. Άνάλυση τής εικόνας. Ή *άνάλυση* τής εικόνας σέ πολλά μικρά διαδοχικά τμήματα γίνεται ως εξής : Ή εικόνα διαιρείται σέ πολλές στενές παράλληλες ζώνες καί κάθε ζώνη διαιρείται σέ πολλά μικρά τμήματα πού τά όνομάζουμε « ψηφίδες » (*). Για τή μετάδοση τής εικόνας μιά λεπτή φωτεινή δέσμη « *σάρωνει* » διαδοχικά τίς ζώνες τή μιά μετά τήν άλλη. Τό σάρωμα όλης τής εικόνας γίνεται πολύ γρήγορα, μέσα σέ 1/25 του δευτερολέπτου. Έτσι κάθε ψηφίδα φωτίζεται επί ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα (λιγότερο άπό ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου). Σέ μιά όρισμένη χρονική στιγμή στον πομπό φωτίζεται ή ψηφίδα *a* τής εικόνας. Τήν ίδια χρονική στιγμή στό δέκτη *άναπαράγεται* ή ψηφίδα *a'* πού αντι-



Σχ. 137. Άνάλυση τής εικόνας σέ μικρά τμήματα (*a*) πού μεταδίδονται διαδοχικά

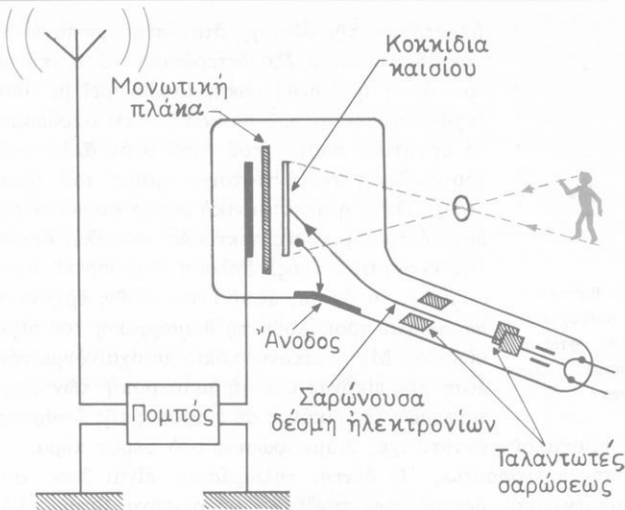
στοιχεί στό μικρό τμήμα *a* τής εικόνας πού μεταδίδεται (σχ. 137).

Ή διαμόρφωση του φέροντος κύματος ή όποία άντιστοιχεί σέ μιά ψηφίδα, διαρκεί επί ελάχιστο χρόνο. Έπομένως, ή περίοδος του φέροντος κύματος πρέπει νά είναι πολύ μικρότερη άπό αυτό τό χρόνο. Γι' αυτό στήν τηλεόραση πρέπει νά χρησιμοποιούμε φέροντα κύματα μέ

πολύ μεγάλη συχνότητα, δηλαδή *υπερβραχεία κύματα* ή *μικροκύματα* ($\lambda < 1 \text{ m}$). Άλλά αυτά τά κύματα έχουν πολύ μικρή έμβέλεια.

(*) Άν π.χ. ή εικόνα διαιρεθεί σέ 625 ζώνες καί κάθε ζώνη διαιρεθεί σέ 640 ψηφίδες τότε όλη ή εικόνα άναλύεται σέ 400 000 ψηφίδες. Ή μετάδοση μιάς ψηφίδας διαρκεί επί χρόνο

$$\frac{1/25 \text{ sec}}{4 \cdot 10^5 \text{ ψηφίδες}} = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ sec/ψηφίδα}$$

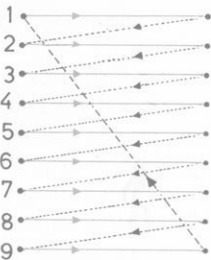


Σχ. 138. Σχηματική παράσταση πομπού τηλεοράσεως. Ή δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει τό « ηλεκτρικό είδωλο » του αντικειμένου.

β. Πομπός τηλεοράσεως. Γιά τήν ανάλυση τής εικόνας καί τή διαδοχική μετάδοση τών μικρών τμημάτων της εφαρμόζουμε διάφορα συστήματα. Ένα από αυτά είναι τό **εικονοσκόπιο Zworykin**. Αυτό είναι ένας σωλήνας Braun, πού στό έσωτερικό του υπάρχει μιά λεπτή μονωτική πλάκα (σχ. 138). Ή μιά επιφάνεια τής πλάκας σκεπάζεται μέ μιά λεπτή μεταλλική πλάκα (ηλεκτρόδιο) πού συνδέεται μέ τό κύκλωμα ταλαντώσεων του πομπού. Ή άλλη επιφάνεια τής μονωτικής πλάκας έχει σκεπαστεί μέ πολύ μικρά κοκκίδια καισίου, πού είναι μονωμένα τό ένα από τό άλλο. Έτσι κάθε κοκκίδιο καισίου καί τό αντίστοιχο τμήμα του ηλεκτροδίου αποτελούν ένα *μικρότατο πυκνωτή*.

Μέ ένα φακό σχηματίζεται πάνω στό στρώμα του καισίου τό πραγματικό είδωλο τής εικόνας πού θέλουμε νά μεταδώσουμε. Τότε από κάθε κοκκίδιο καισίου αποσπώνται φωτοηλεκτρόνια καί τό κοκκίδιο αποκτά *θετικό φορτίο* ανάλογο μέ τή *φωτεινή ροή* πού έπεσε πάνω του Έτσι οί μικρότατοι πυκνωτές *φορτίζονται* καί μπορούμε νά πούμε ότι πάνω στό στρώμα του καισίου έχει σχηματιστεί τό « ηλεκτρικό είδωλο » του αντικειμένου.

Ή ηλεκτρονική δέσμη πού παράγει ή κάθοδος, αρχίζει νά σαρώνει διαδοχικά κάθε ζώνη καί όταν σαρώσει όλες τές ζώνες, ξαναγυρίζει απότομα στην αρχή τής πρώτης ζώνης καί αρχίζει νέο σάρωμα (σχ. 139). Τά

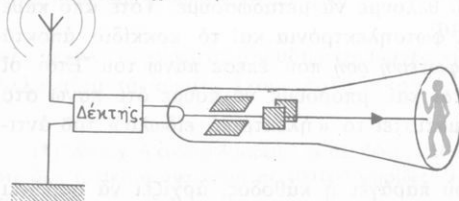


Σχ. 139. Τό ρυθμικό σάρωμα των διαδοχικών ζωνών 1,2,3,4... στις οποίες αναλύεται ή εικόνα

ήλεκτρονία τής δέσμης, όταν πέφτουν πάνω σέ ένα κοκκίδιο καισίου, εξουδετερώνουν τό θετικό φορτίο του. Αυτή ή εξουδετέρωση ίσοδυναμεί μέ άποδομη εκφόρτιση τοῦ μικροῦ πυκνωτῆ, γιατί άποδεσμεύεται τό άρνητικό φορτίο πού ήταν στόν άλλο όπλισμό του (δηλαδή στό αντίστοιχο τμήμα τοῦ ήλεκτροδίου). Ὡστε ή ήλεκτρονική δέσμη σαρώνοντας διαδοχικά τούς μικρούς πυκνωτές προκαλεί διαδοχικά τήν εκφόρτισή τους, δηλαδή δημιουργεί διαδοχικά ρεύματα, τά όποια, άφου ενισχυθοῦν, έρχονται στόν πομπό καί προκαλοῦν τή διαμόρφωση τοῦ φέροντος κύματος. Μέ τό εικονοσκόπιο πετυχαίνουμε τήν άνάλυση τῆς εικόνας καί τή μετατροπή τῶν φωτεινῶν διαφορῶν τῆς εικόνας σέ διαφορές τῆς έντάσεως ρεύ-

ματος πού προκαλοῦν αντίστοιχες διαμορφώσεις στό φέρον κύμα.

γ. Δέκτης τηλεράσεως. Ὁ δέκτης τηλεράσεως είναι ένας συνηθισμένος ραδιοφωνικός δέκτης πού συνδέεται μέ σωλήνα Braun. Τό διάφραγμα πού φθορίζει (όθόνη) είναι ένα παραλληλόγραμμο. Τά ήλεκτρομαγνητικά κύματα πού πέφτουν στήν κεραία δημιουργοῦν στό κύκλωμα ταλαντώσεων τοῦ δέκτη διαμορφωμένες ήλεκτρικές ταλαντώσεις. Αδτές, άφου ενισχυθοῦν, ύποβάλλονται σέ άνόρθωση. Οί μεταβολές τῆς έντάσεως τοῦ άνορθωμένου ρεύματος ρυθμίζουν τήν ένταση τῆς ήλεκτρονικῆς δέσμης πού εκπέμπει ή διάπυρη κάθοδος στό σωλήνα Braun. Ἔτσι ή φωτεινότητα σέ ένα σημείο τῆς όθόνης είναι άνάλογη μέ τήν ένταση τῆς ήλεκτρονικῆς δέσμης. Στό δέκτη τό σάρωμα πού κάνει ή ήλεκτρονική δέσμη πάνω στήν όθόνη τοῦ σωλήνα Braun είναι άπόλυτα συγχρονισμένο μέ τό σάρωμα πού κάνει ή ήλεκτρονική δέσμη πάνω στό «ήλεκτρικό εἶδωλο» πού σχηματίζεται στόν πομπό. Τό σάρωμα τῆς όθόνης τοῦ δέκτη γίνεται μέσα σέ 1/25 τοῦ δευτερολέπτου. Ἔτσι κάθε στιγμή στήν όθόνη τοῦ δέκτη σχηματίζεται ή εικόνα τοῦ φωτεινοῦ αντικειμένου πού βρίσκεται στόν τόπο τοῦ πομποῦ (σχ. 140).



Σχ. 140. Σχηματική παράσταση τοῦ δέκτη τηλεράσεως

Σέ πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιεῖται ή *έγχρωμη τηλεόραση* πού βασίζεται στήν εξῆς αρχή: μέ τρία μόνο χρώματα, τό έρυθρό, τό πράσινο καί τό κυανό μπορούμε νά λάβουμε όλα τά άλλα χρώματα.

δ. Τηλεφωτογραφία. Στην τηλεφωτογραφία με τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται έντυπες εικόνες (φωτογραφίες, χάρτες, κείμενα). Η τηλεφωτογραφία στηρίζεται στην ίδια αρχή που στηρίζεται και η τηλεόραση, με 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 έπίκαιρα γεγονότα. Έπίσης χρησιμοποιείται γιά τή γρήγορη μετάδοση χαρτών ή κειμένων.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

120. Σε ένα κύκλωμα ταλαντώσεων ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C = 1 \mu\text{F}$ και τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L = 1 \mu\text{H}$. Πόση είναι ή περίοδος και ή συχνότητα των ήλεκτρικών ταλαντώσεων;

121. Σε ένα κύκλωμα ταλαντώσεων τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L = 0,1 \mu\text{H}$. Πόση πρέπει νά είναι ή χωρητικότητα του πυκνωτή, ώστε ή συχνότητα των ήλεκτρικών ταλαντώσεων νά είναι ίση με $\nu = 1 \text{ MHz}$; $\pi^2 = 10$.

122. Ό πυκνωτής ενός κυκλώματος ταλαντώσεων έχει χωρητικότητα $C = 0,2 \mu\text{F}$. Πόσος πρέπει νά είναι ό συντελεστής άυτεπαγωγής του πηνίου, ώστε ή συχνότητα των ήλεκτρικών ταλαντώσεων νά είναι $\nu = 2 \text{ MHz}$; $\pi^2 = 10$.

123. Σε ένα κύκλωμα ταλαντώσεων Α ό πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C_1 = 2 \mu\text{F}$ και τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L_1 = 4 \mu\text{H}$. Οί παραγόμενες ήλεκτρικές ταλαντώσεις έχουν συχνότητα ν_0 ίση με τήν ίδιοςυχνότητα του κυκλώματος. Σε ένα γειτονικό κύκλωμα ταλαντώσεων Β τό πηνίο έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L_2 = 10 \mu\text{H}$. Πόση πρέπει νά γίνει ή χωρητικότητα C_2 του πυκνωτή, ώστε τά δύο κυκλώματα νά βρίσκονται σε συντονισμό;

124. Τό κύκλωμα ταλαντώσεων ενός πομπού άποτελείται από ένα πηνίο που έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L = \frac{1}{\pi \cdot 10^8} \text{ H}$ και από έναν πυκνωτή που έχει χωρητικότητα $C = \frac{1}{\pi \cdot 10^8} \text{ F}$. Πόσο είναι τό μήκος κύματος λ και ή συχνότητα ν των ήλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκπέμπει αυτός ό σταθμός;

125. Σε ένα ραδιοφωνικό δέκτη τό κύκλωμα ταλαντώσεων άποτελείται από ένα πηνίο που έχει συντελεστή άυτεπαγωγής $L = 0,8 \text{ mH}$ και από έναν πυκνωτή που ή χωρη-

τικότητα του μπορεί να μεταβάλλεται από $C_1 = 2 \cdot 10^{-12}$ F ως $C_2 = 50 \cdot 10^{-12}$ F. Για ποιά μήκη κύματος λειτουργεί αυτός ο δέκτης;

126. Το κύκλωμα ταλαντώσεων ενός ραδιοφωνικού δέκτη έχει ένα πηνίο με $L = 0,2$ mH και ένα μεταβλητό πυκνωτή που η χωρητικότητα του μπορεί να μεταβάλλεται από $C_1 = 50$ pF ως $C_2 = 200$ pF. Μπορούμε με αυτό το δέκτη να πιάσουμε κύματα που έχουν μήκη κύματος $\lambda_1 = 100$ m, $\lambda_2 = 300$ m και $\lambda_3 = 500$ m;

127. Ένας ραδιοφωνικός δέκτης προορίζεται για τα μεσαία κύματα που έχουν μήκος κύματος από $\lambda_1 = 180$ m ως $\lambda_2 = 600$ m. Το κύκλωμα ταλαντώσεων του δέκτη έχει πηνίο με $L = 0,8$ mH. Ανάμεσα σε ποιά όρια πρέπει να μεταβάλλεται η χωρητικότητα C του πυκνωτή που θα βάλουμε σ' αυτό το κύκλωμα;

ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Εισαγωγή

93. Η θεωρία τῶν κβάντα

Μάθαμε (§ 87) ὅτι τὰ ἄτομα τῆς ὕλης ἐκπέμπουν ἠλεκτρομαγνητικές ἀκτινοβολίες πού ἔχουν πολύ μεγάλες συχνότητες (ἀπό 10^{13} Hz ὡς 10^{24} Hz). Γιά νά ἐξηγηθοῦν ὀρισμένα φαινόμενα, διατυπώθηκε ἡ θεωρία τῶν κβάντα (§ 39 β), πού ἀπέδειξε ὅτι τὰ ἄτομα τῆς ὕλης ἐκπέμπουν καί ἀπορροφοῦν φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιᾶς ἀκτινοβολίας μεταφέρει ὀρισμένη ἐνέργεια, ἴση μέ $E = h \cdot \nu$, ὅπου ν εἶναι ἡ συχνότητα τῆς ἀκτινοβολίας. Ὅπως θά δοῦμε παρακάτω, ἡ θεωρία τῶν κβάντα μᾶς ἐπιτρέπει νά ἐξηγήσουμε πῶς τό ἄτομο ἐκπέμπει καί ἀπορροφᾷ τό φωτόνιο μιᾶς ἀκτινοβολίας.

94. Η θεωρία τῆς σχετικότητας

Ὁ Einstein, γιά νά ἐξηγήσει ὀρισμένα πειραματικά ἀποτελέσματα, διατύπωσε μιά πολύ γενική θεωρία, πού εἶναι γνωστή μέ τό ὄνομα **θεωρία τῆς σχετικότητας**. Θά ἐξετάσουμε μόνο δύο πολύ ἐνδιαφέρουσες συνέπειες τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας.

α. Μεταβολή τῆς μάζας μέ τήν ταχύτητα. Στήν Κλασσική Μηχανική ἀποδεικνύεται θεωρητικά καί πειραματικά ὅτι ἡ μάζα m ἑνός σώματος εἶναι μέγεθος *σταθερό* καί *ἀνεξάρτητο* ἀπό τήν κατάσταση τῆς ἠρεμίας ἢ τῆς κινήσεως τοῦ σώματος. Ἀντίθετα, ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας ἀποδεικνύει θεωρητικά ὅτι ἡ μάζα ἑνός σώματος *ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ταχύτητα* μέ τήν ὁποία κινεῖται τό σῶμα καί διατυπώνει τόν ἐξῆς νόμο μεταβολῆς τῆς μάζας μέ τήν ταχύτητα :

Ἄν ἡ μάζα ἑνός σώματος στήν κατάσταση ἠρεμίας εἶναι m_0 (μάζα ἠρεμίας), τότε γιά ἕναν παρατηρητή, πού σχετικά μέ αὐτόν τό σῶμα κινεῖται μέ ταχύτητα v , ἡ μάζα m τοῦ σώματος εἶναι ἴση μέ :

$$\text{μάζα κινούμενου σώματος} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (1)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = 3 \cdot 10^8$ m/sec). Οί ταχύτητες που έχουμε στο μακρόκοσμο είναι πολύ μικρές σχετικά με την ταχύτητα του φωτός. Έτσι, ο λόγος $(v/c)^2$ είναι πολύ μικρός και δέν μπορούμε να διαπιστώσουμε τή μεταβολή τής μάζας ενός σώματος που κινείται (γιατί βρίσκουμε $m = m_0$). Στόν καθοδικό σωλήνα αυξάνοντας τή τάση U αυξάνουμε τήν ταχύτητα v τών ηλεκτρονίων. Από τίς μετρήσεις βρέθηκε ότι *ή μάζα τών ηλεκτρονίων μεταβάλλεται με τήν ταχύτητα* όπως ακριβώς ορίζει ή θεωρία τής σχετικότητας.

Όταν ή ταχύτητα (v) του σώματος συνεχώς αυξάνει, τότε ο λόγος v/c τείνει πρός τή μονάδα, και έπομένως ή μάζα m του σώματος συνεχώς αυξάνει. Όταν ή ταχύτητα v του σώματος τείνει νά γίνει ίση με τήν ταχύτητα c του φωτός, τότε ή μάζα m του σώματος τείνει νά γίνει άπειρη. Στήν όριακή περίπτωση $v = c$ έχουμε :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \frac{m_0}{0} \quad \text{άρα } m = \infty$$

Έτσι καταλήγουμε στό εξής συμπέρασμα :

Είναι αδύνατο νά κινηθεί ένα σώμα με τήν ταχύτητα του φωτός στό κενό.

Σύμφωνα με τή θεωρία τής σχετικότητας ή ταχύτητα του φωτός στό κενό είναι τό όριο τών ταχυτήτων στό Σύμπαν.

Όταν λέμε ότι ή μάζα (m) ενός σώματος αυξάνει με τήν ταχύτητα (v) του σώματος, δέν έννοούμε ότι αυξάνει ή ποσότητα τής ύλης του σώματος. Εκείνο που αυξάνει είναι *ή αδράνεια* του σώματος, γιατί όπως ξέρουμε ή μάζα ενός σώματος εκφράζει και τό βαθμό τής αδράνειας του σώματος. Όστε, όταν είναι $v = c$, ή 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 $m = m_0 \left(1 + \frac{5}{10^{12}}\right)$

Άρα η μεταβολή (Δm) της μάζας του βλήματος είναι :

$$\Delta m = m - m_0 = 5 \cdot 10^{-12} \text{ kgr} \quad \text{ή} \quad \Delta m = 5 \cdot 10^{-9} \text{ gr}$$

Είναι φανερό ότι η αύξηση της μάζας του βλήματος κατά πέντε δισεκατομμυριοστά του γραμμαρίου είναι τελείως ασήμαντη.

2) Ένα ηλεκτρόνιο που έχει μάζα ηρεμίας m_0 κινείται με ταχύτητα $v = 0,9c$ (δηλαδή είναι $v = 2,7 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$). Το κινούμενο ηλεκτρόνιο έχει μάζα :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (0,9)^2}} \approx 2,3 m_0$$

Παρατηρούμε ότι η μάζα του κινούμενου ηλεκτρονίου είναι 2,3 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου.

β. Ίσοδυναμία μάζας και ενέργειας. Ένα σώμα που έχει μάζα ηρεμίας m_0 , όταν κινείται με ταχύτητα v , έχει μάζα :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Η θεωρία της σχετικότητας αποδεικνύει ότι το σώμα έχει τότε ολική ενέργεια $E_{ολ} = m \cdot c^2$ και ισχύει η εξίσωση :

$$m \cdot c^2 = m_0 \cdot c^2 + \frac{1}{2} m_0 \cdot v^2 \quad (2)$$

Τό γινόμενο $m_0 \cdot c^2$ εκφράζει ενέργεια. Η εξίσωση (2) δείχνει ότι, αν τό σώμα ήρεμει ($v = 0$) ή κινητική ενέργειά του $\left(\frac{1}{2} m_0 \cdot v^2\right)$ είναι ίση μέ μηδέν, αλλά η μάζα ηρεμίας m_0 του σώματος εξακολουθεί νά έχει ενέργεια ίση μέ $m_0 \cdot c^2$. Έτσι η θεωρία της σχετικότητας αποδεικνύει ότι η μάζα και η ενέργεια είναι δύο φυσικά μεγέθη ισοδύναμα και διατυπώνει τήν ακόλουθη αρχή της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας :

Μιά μάζα m ισοδυναμεί μέ ενέργεια E , ίση μέ τό γινόμενο της μάζας (m) επί τό τετράγωνο της ταχύτητας (c) του φωτός στό κενό.

ισοδυναμία μάζας και ενέργειας	$E = m \cdot c^2$
--------------------------------	-------------------

Η αρχή της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας ισχύει και αντίστροφα, δηλαδή :

Μιά ενέργεια E ισοδυναμεί με μάζα m , ίση με τό ηλίκο τής ενέργειας (E) διά του τετραγώνου τής ταχύτητας του φωτός στό κενό.

$$\text{ισοδυναμία ενέργειας και μάζας} \quad m = \frac{E}{c^2}$$

Ἡ ἀρχή τής ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας ἐπιβεβαιώθηκε με τό πείραμα και σήμερα βρίσκει ἐφαρμογή στην ἐκμετάλλευση τής πυρηνικής ενέργειας.

Παράδειγμα. Μιά μάζα $m = 1$ gr ισοδυναμεί με ενέργεια :

$$E = m \cdot c^2 = 0,001 \text{ kgr} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec})^2 \quad \text{ἄρα} \quad E = 9 \cdot 10^{13} \text{ Joule}$$

Σύμφωνα με τή γνωστή ἐξίσωση $E = m \cdot g \cdot h$, πού δίνει τή δυναμική ενέργεια, μπορούμε με τήν παραπάνω ενέργεια νά ἐκσφενδονίσουμε σέ ὕψος $h = 100$ m μιά μάζα m ίση με :

$$m = \frac{E}{g \cdot h} = \frac{9 \cdot 10^{13} \text{ Joule}}{10 \text{ m/sec}^2 \cdot 100 \text{ m}} \quad \text{και} \quad m = 9 \cdot 10^{10} \text{ kgr}$$

δηλαδή

$$m = 90\,000\,000 \text{ τόνους}$$

γ. Διατήρηση τής ὕλοενέργειας. Ὅταν θεωρούσαμε ὅτι ἡ ὕλη και ἡ ἐνέργεια, εἶναι δύο διαφορετικά φυσικά μεγέθη, διατυπώσαμε τήν ἀρχή τής διατηρήσεως τής ὕλης (τής μάζας) και τήν ἀρχή τής διατηρήσεως τής ἐνέργειας. Ἀλλά θεωρητικά και πειραματικά ἀποδείχτηκε ὅτι ἡ ὕλη και ἡ ἐνέργεια εἶναι ισοδύναμες και ἡ μιά μετατρέπεται στην ἄλλη. Ἀρα στή Φύση ὑπάρχει μόνο μιά φυσική ὄντοτητα, ἡ ὕλοενέργεια, ἡ ὁποία, ἀνάλογα με τίς συνθήκες πού ἐπικρατοῦν, μᾶς ἐμφανίζεται ὡς ὕλη ἢ ὡς ἐνέργεια. Ἔτσι οἱ δύο γνωστές ἀρχές τής διατηρήσεως τής ὕλης και τής ἐνέργειας συγχωνεύονται σήμερα στην ἐξῆς γενικότερη ἀρχή τής διατηρήσεως τής ὕλοενέργειας :

Ἡ ὕλοενέργεια πού ὑπάρχει στή Φύση εἶναι σταθερή και κάθε ποσότητα ὕλης ισοδυναμεί με ὀρισμένη ποσότητα ἐνέργειας και ἀντίστροφα. Ἡ ισοδυναμία μεταξύ τής ὕλης και τής ἐνέργειας δίνεται ἀπό τήν ἐξίσωση $E = m \cdot c^2$.

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Τά ηλεκτρόνια του ατόμου

95. 'Ατομική θεωρία του Δημόκριτου

Από τον έκτο π.Χ. αιώνα οι Έλληνες φιλόσοφοι υποστήριζαν ότι στά φυσικά φαινόμενα δεν επεμβαίνουν υπερφυσικές δυνάμεις, αλλά ότι στη Φύση ισχύουν *ακατάλυτοι φυσικοί νόμοι*. Σχετικά με την ύλη ιδιαίτερα σημαντική ήταν η θεωρία που υποστήριξε ότι η ύλη δεν είναι απεριόριστα διαιρετή, και επομένως τά σώματα αποτελούνται από πάρα πολλά *μικρότατα σωματίδια*, τά όποια δεν μπορούν να διαιρεθούν και γι' αυτό ονομάστηκαν *άτομα* (δηλαδή *άτμητα*). Τή θεωρία αυτή υποστήριξε κυρίως ο *Λεύκιππος*, αλλά ο μαθητής του *Δημόκριτος* (470 - 360 π.Χ.) τήν *έκαμε γενική θεωρία τής ύλης* και με αυτή θέλησε να εξηγήσει όλες τīs ιδιότητες τής ύλης που ήταν τότε γνωστές.

Τήν ατομική θεωρία του Δημόκριτου τή δίδασκε αργότερα ο *Επίκουρος* (341 - 270 π.Χ.) και τμήματα από αυτή τή θεωρία βρίσκονται σέ *ένα ποίημα για τή Φύση του Ρωμαίου ποιητή Λουκρήτιου* (98 - 55 π.Χ.).

Δυστυχώς από τήν ατομική θεωρία του Δημόκριτου ελάχιστα αποσπάσματα διασώθηκαν. Ο Δημόκριτος υποστήριξε ότι τά *άτομα* διαφέρουν μεταξύ τους κατά τό *σχήμα* και τό *μέγεθος*, δέ δημιουργούνται ούτε καταστρέφονται, *άρα είναι αδιαίρετα και αιώνια*. Τά *άτομα* είναι πάρα πολλά και βρίσκονται *σέ διαρκή κίνηση*. Τά διάφορα φυσικά φαινόμενα οφείλονται στήν αιώνια κίνηση τών ατόμων, καθώς και στίς ενώσεις τους με άλλα άτομα ή στούς αποχωρισμούς τους από τά άτομα με τά όποια ήταν ενωμένα. Σ' αυτές τīs αντιλήψεις του Δημόκριτου φαίνονται καθαρά ή *ιδέα για τήν ατομική δομή τής ύλης* καθώς και ή *ιδέα μιάς κινητικής θεωρίας τής ύλης*. Είναι χαρακτηριστικό ότι μεταξύ τών πολλών φαινομένων που ο Λουκρήτιος περιγράφει με βάση τīs ατομικές αντιλήψεις του Δημόκριτου ιδιαίτερη θέση έχουν ή πίεση που εξασκοούν τά *άερια*, ή διάχυση τών *οσμών* και τό *σχήμα τών κρυστάλλων*. Όπως όμως ξέρουμε, αυτά τά τρία φαινόμενα σχετίζονται άμεσα με τήν *κινητική και ατομική θεωρία τής ύλης*.

Η ατομική θεωρία του Δημόκριτου καταπολεμήθηκε από τή Σωκρα-

τική σχολή και έπεσε σέ άφάνεια ώς τήν Ἀναγέννηση. Τότε άρχισαν νά αναβιώνουν οί ιδέες τοῦ Δημόκριτου και νά κατευθύνουν τήν επιστημονική σκέψη. Στίς άρχές τοῦ δέκατου ένατου αἰώνα ὁ Dalton (1808), γιά νά ἐξηγήσει τούς δύο νόμους πού ανακάλυψε πειραματικά (τό νόμο τῶν σταθερῶν ἀναλογιῶν και τό νόμο τῶν ἀπλῶν πολλαπλασιῶν), δέχτηκε τήν παλιά ιδέα τοῦ Δημόκριτου ὅτι ἡ ὕλη ἀποτελεῖται ἀπό ἄτομα. Ἔτσι ἐπιβεβαιώθηκε και πειραματικά ἡ ὑπαρξη τῶν ἀτόμων, τά ὁποῖα πρίν ἀπό πολλούς αἰῶνες εἶχε συλλάβει ἡ ἐλεύθερη σκέψη τῶν Ἑλλήνων ἀτομικῶν φιλοσόφων.

Οἱ θεωρητικές και πειραματικές ἐρευνες πού ἔγιναν ἀπό τίς άρχές τοῦ εικοστοῦ αἰώνα ἔδειξαν ὅτι τό ἄτομο τῆς ὕλης εἶναι ἕνα πολύπλοκο σύστημα ὑποατομικῶν σωματιδίων, στό ὁποῖο ἰσχύουν και ὀρισμένοι εἰδικοί νόμοι. Ἔτσι δημιουργήθηκε ἕνας ἰδιαίτερος κλάδος τῆς Φυσικῆς, ἡ Ἀτομική Φυσική.

96. Μονάδα ἀτομικῆς μάζας

Ἡ μάζα τῶν ἀτόμων, τῶν πυρήνων και τῶν σωματιδίων μετρεῖται μέ τή μονάδα ἀτομικῆς μάζας, πού συμβολικά γράφεται 1 amu (1 atomic mass unit) και ὀρίζεται ὡς ἑξῆς :

Μονάδα ἀτομικῆς μάζας (1 amu) εἶναι τό 1/12 τῆς μάζας τοῦ ἀτόμου τοῦ ἰσότοπου τοῦ ἄνθρακα 12 (C^{12}).

$$\text{μονάδα ἀτομικῆς μάζας} \quad 1 \text{ amu} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Σημείωση Τό στοιχεῖο ἄνθρακα ἀποτελεῖται ἀπό δύο ἰσότοπα πού ἔχουν ἀντίστοιχα ἀτομική μάζα 12 και 13. Πιό ἄφθονο στή Φύση εἶναι τό ἰσότοπο μέ τήν ἀτομική μάζα 12.

Ἴσοδυναμία τῆς μονάδας ἀτομικῆς μάζας μέ ἐνέργεια. Στήν Ἀτομική και στήν Πυρηνική Φυσική τήν ἐνέργεια συνήθως τή μετράμε μέ τή μονάδα ἐνέργειας ἠλεκτρονιοβόλτ (1 eV) και μέ τά πολλαπλασιάσιά της 1 MeV = 10^6 eV και 1 GeV = 10^9 eV. Σύμφωνα μέ τήν ἀρχή τῆς ἰσοδυναμίας μάζας και ἐνέργειας $E = mc^2$ βρίσκουμε ὅτι :

Ἡ μονάδα ἀτομικῆς μάζας (1 amu) ἰσοδυναμεῖ μέ ἐνέργεια 931 MeV (κατά προσέγγιση).

$$1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV} \quad \eta \quad 1 \text{ amu} = 1492 \cdot 10^{-13} \text{ Joule}$$

97. Τό άτομο και ό πυρήνας του

α. Τά ηλεκτρόνια και ό πυρήνας. Ἡ παραγωγή τῶν καθοδικῶν ἀκτίων ἀπό τόν ἰονισμό τῶν ἀτόμων τοῦ ἀερίου, τό θερμοηλεκτρονικό φαινόμενο καί τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δείχνουν ὅτι σέ ὠρισμένες περιπτώσεις ἀπό τά άτομα τῆς ὕλης βγαίνουν *ηλεκτρόνια*, πού ὅλα ἔχουν τήν ἴδια *μάζα* (m_e), καί *ένα ἀρνητικό στοιχειῶδες ηλεκτρικό φορτίο* ($-e$). Ἔτσι ἀπό διάφορα φαινόμενα διαπιστώθηκε ὅτι *τό ηλεκτρόνιο εἶναι κοινό συστατικό τῶν ἀτόμων τῆς ὕλης*.

Ὁ Rutherford (1911) ἀνακάλυψε πειραματικά ὅτι μέσα στό *ἄτομο* ὑπάρχει *ένα πολύ μικρό σωματίδιο πού ὀνομάστηκε πυρήνας* καί *ἔχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο*. Σχεδόν ὅλη ἡ *μάζα τοῦ ατόμου* εἶναι συγκεντρωμένη στόν πυρήνα του. Ὡστε ἀπό τήν πειραματική ἔρευνα διαπιστώθηκε ὅτι :

Μέσα στό *ἄτομο* ὑπάρχουν : α) ὁ *πυρήνας*, στόν ὁποῖο εἶναι συγκεντρωμένη σχεδόν ὅλη ἡ *μάζα τοῦ ατόμου* καί ὅλο τό *θετικό ηλεκτρικό φορτίο*, καί β) *ηλεκτρόνια* πού ὅλα ἔχουν τήν ἴδια *μάζα* καί τό ἴδιο *ἀρνητικό ηλεκτρικό φορτίο* ($-e$).

β. Ἡ *διάμετρος τοῦ ατόμου* καί τοῦ *πυρήνα*. Μποροῦμε νά θεωρήσουμε ὅτι τό *ἄτομο* καί ὁ *πυρήνας* ἔχουν σφαιρικό σχῆμα. Ἀπό τή μελέτη ὀρισμένων φαινομένων βρήκαμε ὅτι ἡ *διάμετρος τοῦ ατόμου* εἶναι τῆς τάξεως τοῦ 10^{-8} cm, ἐνῶ ἡ *διάμετρος τοῦ πυρήνα* εἶναι τῆς τάξεως τοῦ 10^{-12} cm. Ὡστε :

Ἡ *διάμετρος τοῦ πυρήνα* εἶναι 10 000 φορές μικρότερη ἀπό τή *διάμετρο τοῦ ατόμου*.

γ. Συστατικά τοῦ ατομικοῦ πυρήνα. Μέ διάφορα πειράματα ἀποδείχτηκε ὅτι μέσα σέ ὅλους τοὺς πυρήνες ὑπάρχουν δύο εἶδη σωματιδίων, πού ἀντίστοιχα ὀνομάζονται *πρωτόνια* καί *νετρόνια*. Αὐτά τά δύο εἶδη σωματιδίων ὀνομάζονται γενικά *νουκλεόνια* (ἀπό τό nucleus = πυρήνας).

Τό *πρωτόνιο* εἶναι ὁ ατομικός πυρήνας τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου, δηλαδή εἶναι *ένα ἰόν ὕδρογόνου*. Ἐχει *ένα θετικό στοιχειῶδες ηλεκτρικό φορτίο* ($+e$) καί ἡ *μάζα* του ἡρεμίας εἶναι περίπου ἴση μέ *μία μονάδα ατομικῆς μάζας* (1 amu). Μόνο ὁ *πυρήνας τοῦ ατόμου τοῦ κοινοῦ ὕδρογόνου* ἀποτελεῖται ἀπό *ένα πρωτόνιο*, ἐνῶ ὅλοι οἱ ἄλλοι *πυρήνες* ἔχουν *πρωτόνια* καί *νετρόνια*.

Τό *νετρόνιο* εἶναι σωματίδιο *συδότερο* καί ἡ *μάζα* του ἡρεμίας εἶναι λίγο μεγαλύτερη ἀπό τή *μάζα ἡρεμίας τοῦ πρωτονίου*. Ἐπειδή τό *νετρόνιο*

δέν έχει ηλεκτρικό φορτίο, μπορεί να μπαίνει ελεύθερα μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει γύρω από κάθε άτομικό πυρήνα. Έτσι το νετρόνιο έχει την ικανότητα να πλησιάζει κάθε πυρήνα. Ωστε :

I. Όλοι οι άτομικοί πυρήνες (έκτός από τον πυρήνα του ατόμου του κοινού υδρογόνου) αποτελούνται από πρωτόνια και νετρόνια που γενικά ονομάζονται νουκλεόνια.

II. Το πρωτόνιο έχει ένα θετικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, ενώ το νετρόνιο είναι ουδέτερο.

III. Η μάζα του πρωτονίου και του νετρονίου είναι περίπου ίση με μία μονάδα ατομικής μάζας (1 amu).

δ. Άτομικός και μαζικός αριθμός. Ονομάζεται **ατομικός αριθμός Z** ο αριθμός που φανερώνει πόσα θετικά στοιχειώδη ηλεκτρικά φορτία 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.

Ονομάζεται **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 $N = A - Z$. Ωστε :

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. για το ήλιο και το βόριο είναι :

στοιχείο	He	B
ατομική μάζα	4,002 604 amu	11,009 305 amu
μαζικός αριθμός	A = 4	A = 11

ε. Τά τρία στοιχειώδη σωματίδια. Είδαμε ότι μέσα στο άτομο υπάρχουν τρία *στοιχειώδη σωματίδια*, τό ηλεκτρόνιο, τό πρωτόνιο καί τό νετρόνιο. Ἡ μάζα του ηλεκτρονίου είναι πολύ μικρή σχετικά μέ τή μονάδα ατομικής μάζας (1 amu) καί γι' αὐτό θεωροῦμε ὅτι τό ηλεκτρόνιο ἔχει μαζικό ἀριθμό A ἴσο μέ μηδέν (A = 0). Ἐπειδή ὁμως τό ηλεκτρόνιο ἔχει ἕνα ἀρνητικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (−e), γι' αὐτό θεωροῦμε ὅτι τό ηλεκτρόνιο ἔχει ατομικό ἀριθμό Z ἴσο μέ −1 (Z = −1).

Ὁ ατομικός πυρήνας ἑνός στοιχείου, π.χ. τοῦ ἄνθρακα C, πού ἔχει ατομικό ἀριθμό Z καί μαζικό ἀριθμό A, γράφεται συμβολικά ὡς ἐξῆς

${}_Z C^A$ (ἢ καί C_Z^A). Ἡ ἴδια συμβολική παράσταση ἰσχύει καί γιά τά

τρία στοιχειώδη σωματίδια, ὅπως φαίνεται στόν παρακάτω πίνακα.

Σωματίδιο	Z	Μάζα (σέ amu)	A	Φορτίο	Σύμβολο
Ἡλεκτρόνιο	−1	$m_e = 0,000\ 548$	0	−e	${}_{-1}e^0$
Πρωτόνιο	1	$m_p = 1,007\ 825$	1	+e	${}_1p^1$ ἢ ${}_1H^1$
Νετρόνιο	0	$m_n = 1,008\ 665$	1	0	${}_0n^1$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kgr} \quad m_p = 1836 \text{ } m_e \quad m_n = 1838,6 \text{ } m_e$$

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

98. Δομή του ατόμου

α. Τό οὐδέτερο άτομο. Ὁ Bohr (1913), γιά νά ἐξηγήσει τά φαινόμενα πού ὡς τότε ἦταν γνωστά, διατύπωσε μιά θεωρία γιά *τή δομή τοῦ ατόμου*, ἡ ὁποία ἀργότερα συμπληρώθηκε ἀπό ἄλλους θεωρητικούς φυσικούς, γιά νά συμφωνεῖ μέ τά ἀποτελέσματα τοῦ πειράματος.

Ἄν ἕνας ατομικός πυρήνας ἔχει ατομικό ἀριθμό Z, τότε ὁ πυρήνας αὐτός περιέχει Z πρωτόνια καί, ἐπομένως, τό *θετικό φορτίο* τοῦ πυρήνα εἶναι ἴσο μέ τό γινόμενο τοῦ ατομικοῦ ἀριθμοῦ Z ἐπί τό στοιχειώδες ἠλεκτρικό φορτίο e. Ὡστε :

$$\text{θετικό φορτίο ατομικοῦ πυρήνα} : + Z \cdot e$$

Ὁ ατομικός πυρήνας π.χ. τοῦ νατρίου ἔχει ατομικό ἀριθμό Z = 11.

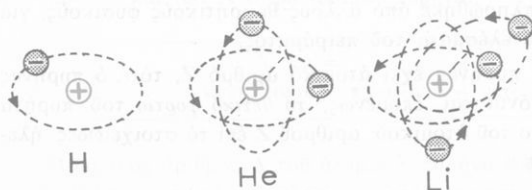
Ἄρα ὁ ἀτομικός πυρήνας νατρίου ἔχει θετικό φορτίο $+11e$. Ἐνα ἄτομο νατρίου, γιά νά εἶναι οὐδέτερο, πρέπει νά περιέχει τόσα ἠλεκτρόνια, ὥστε τό *συνολικό ἀρνητικό φορτίο τους* νά εἶναι ἴσο μέ $-11e$. Ἄρα τό οὐδέτερο ἄτομο νατρίου ἔχει 11 ἠλεκτρόνια, δηλαδή ὅσος εἶναι ὁ ἀτομικός ἀριθμός Z . Ἀπό τά παραπάνω βγαίνει τό ἐξῆς συμπέρασμα :

Ἐνός ἀτομικός ἀριθμός Z φανερώνει πόσα πρωτόνια ὑπάρχουν μέσα στόν πυρήνα τοῦ ἀτόμου καί πόσα ἠλεκτρόνια ὑπάρχουν μέσα στό ἄτομο, ὅταν αὐτό εἶναι οὐδέτερο.

θετικό φορτίο τοῦ πυρήνα	$+ Z \cdot e$
ἠλεκτρόνια στό οὐδέτερο ἄτομο	Z





















β. Κατανομή τῶν ἠλεκτρονίων γύρω ἀπό τόν πυρήνα. Σύμφωνα μέ τή θεωρία τοῦ Bohr, πού τήν ἐπιβεβαίωσαν τά πειράματα, τό ἄτομο εἶναι μία μικρογραφία πλανητικοῦ συστήματος. Στό κέντρο τοῦ ἀτόμου βρίσκεται ὁ πυρήνας πού μέ τό θετικό φορτίο του $+Ze$ δημιουργεῖ γύρω του ἠλεκτρικό πεδίο. Μέσα σ' αὐτό *περιφέρονται* γύρω ἀπό τόν πυρήνα τά ἠλεκτρόνια, ὅπως οἱ πλανῆτες περιφέρονται γύρω ἀπό τόν ἥλιο. Σέ κάθε ἠλεκτρόνιο ἐνεργεῖ ὡς κεντρομόλος δύναμη ἡ *δύναμη Coulomb*, τήν ὁποία ἐξασκεῖ τό θετικό φορτίο τοῦ πυρήνα στό ἀρνητικό φορτίο τοῦ ἠλεκτρονίου. Μόνο τό ἄτομο ὑδρογόνου ἔχει ἓνα ἠλεκτρόνιο πού περιφέρεται γύρω ἀπό τόν πυρήνα, γιατί γιά τό ὑδρογόνο εἶναι $Z = 1$ (σχ. 141). Στό ἄτομο ἡλίου ($Z = 2$) γύρω ἀπό τόν πυρήνα του περιφέρονται δύο ἠλεκτρόνια πάνω σέ τροχιές πού ἔχουν τήν ἴδια ἀκτίνα, ἀλλά δέ βρίσκονται στό ἴδιο ἐπίπεδο. Λέμε ὅτι τά δύο ἠλεκτρόνια βρίσκονται στόν ἴδιο *φλοιό*, (ἢ *στιβάδα*). Τό ἄτομο λιθίου ($Z = 3$) ἔχει τρία ἠλεκτρόνια. Τά δύο ἀπό αὐτά βρίσκονται στόν ἴδιο φλοιό, ἐνῶ τό τρίτο ἠλεκτρόνιο βρίσκεται σέ ἓναν ἄλλο πιό ἐξωτερικό φλοιό.

Ἐνός Γενικά, ὅταν τό ἄτομο ἔχει περισσότερα ἀπό δύο ἠλεκτρόνια (δηλαδή ὅταν εἶναι $Z > 2$), τότε σύμφωνα μέ μία



Σχ. 141. Σχηματική παράσταση τῆς κατανομῆς τῶν ἠλεκτρονίων, στά ἄτομα ὑδρογόνου ἡλίου καί λιθίου.

βάσικη ἀρχή τῆς Ἀτομικῆς Φυσικῆς, πού ὀνομάζεται *ἀρχή τοῦ Pauli*, τά ἠλεκτρόνια κατανέμονται πάνω σέ διαδοχικούς ὁμόκεντρος φλοιούς πού χαρα-

1 Υδρογόνο $H = 1$ 										2 Ήλιο $He = 4$ 
3 Λίθιο $Li = 7$ 	4 Βηρύλλιο $Be = 9$ 	5 Βόριο $B = 11$ 	6 Άνθρακς $C = 12$ 	7 Άζωτο $N = 14$ 	8 Οξυγόνο $O = 16$ 	9 Φθόριο $F = 19$ 	10 Νέο $Ne = 20$ 			
11 Νάτριο $Na = 23$ 	12 Μανγάνησιο $Mg = 24$ 	13 Αργίλιο $Al = 27$ 	14 Πυρίτιο $Si = 28$ 	15 Φωσφόρος $P = 31$ 	16 Θείο $S = 32$ 	17 Χλώριο $Cl = 35,5$ 	18 Άργό $Ar = 40$ 			
19 Κάλιο $K = 39$ 	20 Ασβέστιο $Ca = 40$ 									

Σχ. 142. Σχηματική παράσταση της ηλεκτρονικής δομής των απλούστερων ατόμων με τη σειρά που έχουν στο περι-οδικό σύστημα.

κτηρίζονται με τά γράμματα K, L, M, N, O, P, Q. Σχηματικά ή κατανομή των ηλεκτρονίων σε φλοιούς παριστάνεται πάνω στο ίδιο επίπεδο (σχ. 142), αν και στην πραγματικότητα τά ηλεκτρόνια που ανήκουν στον ίδιο φλοιό δέ βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Τά ηλεκτρόνια που ανήκουν στον έξωτερικό φλοιό ονομάζονται *ηλεκτρόνια σθένους*.

γ. Συμπληρωμένος φλοιός. Στους διαδοχικούς φλοιούς αντιστοιχούν οι άκεραιοι αριθμοί $n = 1, 2, 3, 4, \dots$. Ο άκεραιος αριθμός n που αντιστοιχεί σε ένα φλοιό ονομάζεται *κύριος κβαντικός αριθμός*. Σύμφωνα με την αρχή του Pauli βρίσκουμε πόσα ηλεκτρόνια μπορούν να υπάρχουν πάνω στον ίδιο φλοιό. Όταν ο φλοιός έχει τό μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων που μπορεί να περιλάβει, τότε λέμε ότι ο φλοιός είναι *συμπληρωμένος*. Γενικά

οί συμπληρωμένοι φλοιοί αποτελούν πολύ σταθερή κατανομή των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα. Αποδεικνύεται ότι :

Κάθε φλοιός, που έχει κύριο κβαντικό αριθμό n , είναι συμπληρωμένος, όταν έχει $2n^2$ ηλεκτρόνια.

Έτσι οί τέσσερις πρώτοι φλοιοί, όταν είναι συμπληρωμένοι, έχουν ηλεκτρόνια :

φλοιός	K	L	M	N
κύριος κβαντικός αριθμός	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
ηλεκτρόνια	2	8	18	32

Στά άτομα στά όποια αντιστοιχεί μεγάλος ατομικός αριθμός Z οί πίο εξωτερικοί φλοιοί O, P, Q ποτέ δέν είναι συμπληρωμένοι. Αυτό όφείλεται στίς άμοιβαίες επίδράσεις τών πολλών ηλεκτρονίων που υπάρχουν στό άτομο. Έτσι π.χ. στό άτομο ούρανίου ($Z = 92$) τά 92 ηλεκτρόνια του κατανέμονται ως εξής :

φλοιός	K	L	M	N	O	P	Q
n	1	2	3	4	5	6	7
ηλεκτρόνια	2	8	18	32	18	12	2

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

128. Άν παρατάξουμε σέ μιά σειρά, έφαπτόμενα τό ένα μέ τό άλλο, όλα τά άτομα που περιέχονται σέ 1 cm^3 ύδρογόνου σέ κανονικές συνθήκες, πόσο θά είναι τό μήκος l τής γραμμής που σχηματίζεται; Νά συγκριθεί τό μήκος l αύτής τής γραμμής μέ τό μήκος ενός μεσημβρινού τής Γής $l_{\text{μεσ}} = 40\,000 \text{ km}$. Διάμετρος ατόμου ύδρογόνου $\delta = 10^{-10} \text{ m}$. $N_L = 2,688 \cdot 10^{18}$ μόρια/ cm^3 (αριθμός του Loschmidt).

129. Άποθέτουμε ότι μιά μηχανή άπαριθμήσεως μπορεί νά εργάζεται συνεχώς και νά καταμετράει 1 μόριο νερού τό δευτερόλεπτο. Πόσος χρόνος χρειάζεται γιά νά καταμετρηθούν τά $N = 33 \cdot 10^{15}$ μόρια που υπάρχουν σέ 1 έκατομμυριοστό του γραμμαρίου νερού; 1 έτος $\simeq 3,15 \cdot 10^7 \text{ sec}$.

130. Ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο επιταχύνονται μέ τήν ίδια τάση $U = 10^6 \text{ V}$. 1) Πόση κινητική ενέργεια σέ ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και Joule άποκτά τό καθένα από αυτά τά σωματίδια; 2) Πόσος είναι ό λόγος τής ταχύτητας v_1 , του ηλεκτρονίου προς τήν ταχύτητα v_2 του πρωτονίου : $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$, $m_p = 1836 m_e$.

131. Πόση είναι ή μάζα ενός ηλεκτρονίου που κινείται μέ ταχύτητα $v = 200\,000 \text{ km/sec}$; Πόση είναι ή σχετική αύξηση τής μάζας του; Μάζα ήρεμίας ηλεκτρονίου $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

132. Ένα σωματίδιο (ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο κ.λ.) έχει μάζα ήρεμίας m_0 . Πόση

ταχύτητα u πρέπει να αποκτήσει τό σωματίδιο, ώστε η μάζα του m να είναι διπλάσια από τη μάζα ηρεμίας (δηλαδή για να γίνει $m = 2m_0$);

133. Πόση είναι σε Joule και MeV η ολική ενέργεια ($E_{ολ}$) ενός ηλεκτρονίου που κινείται με ταχύτητα (u) ίση με τά 0,8 τής ταχύτητας του φωτός; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

134. Πόση τάση πρέπει να εφαρμόσουμε σε έναν καθοδικό σωλήνα ώστε τά ηλεκτρόνια των καθοδικών ακτίνων να έχουν ταχύτητα u ίση με τά 2/3 τής ταχύτητας του φωτός στο κενό; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

135. Με πόση ενέργεια (E) ισοδυναμεί μάζα $m = 0,1$ mgr. "Αν με αυτή τήν ενέργεια τροφοδοτούσαμε ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως που έχει ισχύ $P = 100$ W, πόσο χρόνο θά μπορούσε να λειτουργεί συνεχώς ό λαμπτήρας; $I \text{ έτος} = 3,15 \cdot 10^7$ sec.

136. Με πόση ενέργεια σε Joule και MeV ισοδυναμούν: 1) η μάζα ηρεμίας m_e του ηλεκτρονίου, και 2) η μάζα ηρεμίας m_p του πρωτονίου; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr. $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kgr.

137. Με πόση μάζα m ισοδυναμεί ή θερμότητα που ελευθερώνεται, όταν συμβαίνει τέλεια καύση 10^6 λίτρων βενζίνης; Θερμότητα καύσεως τής βενζίνης $8 \cdot 10^3$ kcal κατά λίτρο. $J = 4,2 \cdot 10^3$ Joule/kcal.

138. Μιά ακτινοβολία Röntgen έχει μήκος κύματος $\lambda = 0,1$ Å. Με πόση μάζα ισοδυναμεί ή ενέργεια που μεταφέρει ένα φωτόνιο αυτής τής ακτινοβολίας;

139. Ένα ηλεκτρόνιο που αρχικά βρίσκεται σε ήρεμία, απορροφά τήν ενέργεια $h\nu$ ενός φωτονίου μιάς ακτινοβολίας, που έχει συχνότητα $\nu = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz. Πόση κινητική ενέργεια και πόση ταχύτητα αποκτά τό ηλεκτρόνιο; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kgr. $h = 6,67 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec.

140. Ένα ηλεκτρόνιο επιταχύνεται με τήν επίδραση τάσεως $U = 506\,000$ V. 1) Πόση ταχύτητα αποκτά τό ηλεκτρόνιο; 2) Είναι παραδεκτή αυτή ή τιμή τής ταχύτητας του ηλεκτρονίου; Ποιά διόρθωση πρέπει να κάνουμε στους ύπολογισμούς μας; 3) Πόση είναι ή μάζα του ηλεκτρονίου, όταν κινείται με τήν ταχύτητα που βρήκαμε μετά ή διόρθωση;

141. Πόσο είναι τό δυναμικό σε ένα σημείο B, που απέχει $r = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm από ένα πρωτόνιο; Πόση δυναμική ενέργεια έχει ένα ηλεκτρόνιο, όταν βρίσκεται στο σημείο B; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

142. Πόσο είναι τό δυναμικό σε ένα σημείο B, που απέχει $r = 5 \cdot 10^{-12}$ cm από έναν πυρήνα που έχει ατομικό αριθμό $Z = 80$; Πόση δυναμική ενέργεια έχει ό πυρήνας ήλιου ($Z = 2$), όταν αυτός βρίσκεται στο σημείο B;

143. Στο άτομο υδρογόνου με πόση ταχύτητα κινείται τό ηλεκτρόνιο πάνω σε μία κυκλική τροχιά που έχει ακτίνα $r = 0,5$ Å; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kgr.

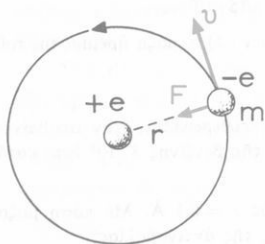
144. Όταν τό άτομο υδρογόνου βρίσκεται στήν κανονική κατάσταση, τό ηλεκτρόνιο κινείται με συχνότητα $\nu = 6,6 \cdot 10^{15}$ Hz πάνω σε κυκλική τροχιά, που έχει ακτίνα $r = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm. 1) Πόση είναι ή ένταση του ρεύματος που αντιστοιχεί στήν κίνηση του ηλεκτρονίου; 2) Πόση είναι ή μαγνητική επαγωγή που δημιουργεί αυτό τό κυκλικό ρεύμα στο κέντρο τής κυκλικής τροχιάς;

145. Πόσα ηλεκτρόνια υπάρχουν στο άτομο αργιλίου, που έχει ατομικό αριθμό $Z = 13$, και πώς κατανέμονται αυτά στους φλοιούς;

Συνθήκες του Bohr

99. Στοιχειώδης μελέτη του ατόμου υδρογόνου

α. Οί δύο κινήσεις του ηλεκτρονίου. Στο άτομο υδρογόνου ($Z = 1$) υπάρχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο (σχ. 143). "Όταν τό άτομο υδρογόνου βρίσκεται στην κανονική κατάσταση, τό μοναδικό ηλεκτρόνιό του περιφέρεται γύρω από τόν πυρήνα διαγράφοντας μέ σταθερή γωνιακή ταχύτητα κυκλική τροχιά πού έχει ακτίνα r . Έπομένως τό ηλεκτρόνιο κινείται μέ ταχύτητα $v = \omega r$. Αυτή ή κυκλική κίνηση του ηλεκτρονίου ισοδυναμεί μέ ένα κυκλικό ρεύμα, πού αποτελεί ένα μαγνητικό δίπολο.



Σχ. 143. Κίνηση του ηλεκτρονίου στο άτομο υδρογόνου.

"Όπως ή Γη περιφέρεται γύρω από τόν "Ήλιο καί ταυτόχρονα περιστρέφεται γύρω από τόν άξονά της, έτσι καί τό ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου περιφέρεται γύρω από τόν πυρήνα, αλλά ταυτόχρονα περιστρέφεται γύρω από τόν άξονά του. Αυτές οί δύο κινήσεις του ηλεκτρονίου δημιουργούν στο άτομο υδρογόνου όρισμένες ιδιότητες. "Ωστε :

Στό άτομο υδρογόνου τό ηλεκτρόνιο εκτελεί ταυτόχρονα δύο κινήσεις, δηλαδή περιφέρεται γύρω από τόν πυρήνα καί περιστρέφεται γύρω από τόν άξονά του.

β. Ένέργεια του ηλεκτρονίου. Τό ηλεκτρόνιο, επειδή βρίσκεται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα έχει δυναμική ενέργεια $E_{δυν}$ καί επειδή κινείται μέ ταχύτητα v , έχει κινητική ενέργεια $E_{κιν}$. Έπομένως τό ηλεκτρόνιο έχει ολική ενέργεια $E_{ολ}$ ίση μέ τό άθροισμα της δυναμικής καί της κινητικής ενέργειάς του, δηλαδή είναι

$$E_{ολ} = E_{δυν} + E_{κιν}$$

γ. Τό φάσμα έκπομπής του υδρογόνου. Ξέρουμε ότι τό φάσμα έκπομπής του υδρογόνου αποτελείται από όρισμένες φασματικές γραμμές, πού καθομιά από αυτές αντιστοιχεί σε μιá ακτινοβολία μέ όρισμένη συχνότητα. "Ωστε τό άτομο υδρογόνου μπορεί νά εκπέμπει μόνο όρισμένες ακτινοβολίες πού έχουν συχνότητες $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$. Σύμφωνα μέ τή θεωρία των κβάντα πρέπει νά δεχτούμε ότι τό άτομο υδρογόνου μπορεί νά εκπέμπει μόνο όρισμένα φωτόνια πού μεταφέρουν ενέργεια $h\nu_1, h\nu_2, h\nu_3, \dots$

Ό Bohr, για νά εξηγήσει τό φάσμα έκπομπής του υδρογόνου, δια-

τύπωσε 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 **έξής 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 **ακέραιος 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 στή *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 στίς άλλες κβαντικές τροχιές, ή ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση :

$$\text{ολική ενέργεια ηλεκτρονίου} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{ή} \quad E_n = \frac{-13,53}{n^2} \text{ eV}$$

Η τελευταία εξίσωση φανερώνει ότι :

Όταν **αυξάνει** ή **ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου**, τότε **αυξάνει** **απότομα** ή **ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου**.

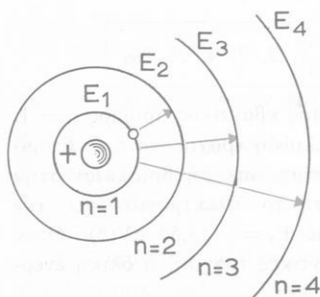
(*) Τό αρνητικό σημείο οφείλεται στο ότι κατ' απόλυτη τιμή ή δυναμική ενέργεια ($E_{δυν}$) του ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερη από την κινητική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια είναι αρνητική, γιατί είναι ίση με τό γινόμενο του δυναμικού U_r σε απόσταση r από τον πυρήνα επί τό φορτίο $-e$ του ηλεκτρονίου, δηλαδή είναι $E_{δυν} = U_r \cdot (-e)$.

ε. Δεύτερη συνθήκη του Bohr. Για *τήν έκπομπή* και *τήν απορρόφηση* της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το άτομο υδρογόνου ισχύει η *έξής δεύτερη συνθήκη του Bohr*:

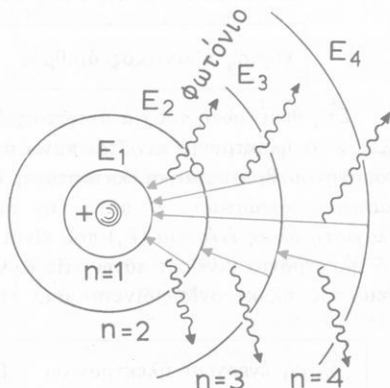
Τό ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου *εκπέμπει* ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μόνο όταν τό ηλεκτρόνιο *πηδάει* από μία κβαντική τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας ($E_{αρχ}$) σε μία άλλη κβαντική τροχιά μικρότερης ενέργειας ($E_{τελ}$). Η ενέργεια ($hν$) του φωτονίου που εκπέμπεται είναι ίση με τή διαφορά των ενεργειών του ηλεκτρονίου πάνω στις δύο κβαντικές τροχιές.

$$\text{ένέργεια φωτονίου που εκπέμπεται} \quad h\nu = E_{αρχ} - E_{τελ}$$

Σύμφωνα με τή δεύτερη συνθήκη του Bohr η γένεση της ακτινοβολίας *οφείλεται* σε *απότομα πηδήματα* του ηλεκτρονίου από μία *έξωτερική* κβαντική τροχιά σε μία άλλη κβαντική τροχιά που είναι *πίο κοντά* στον



Σχ. 144. Διέγερση του ατόμου υδρογόνου. Τό ηλεκτρόνιο πηδάει από τή θεμελιώδη ($n = 1$) σε μία *πίο* έξωτερική τροχιά ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$).



Σχ. 145. Έκπομπή ακτινοβολίας από τό άτομο υδρογόνου (αποδιέγερση του ατόμου).

πυρήνα. Όταν τό άτομο υδρογόνου βρίσκεται στην κανονική κατάσταση, τότε τό ηλεκτρόνιο κινείται πάνω στή *θεμελιώδη τροχιά* ($n = 1$) και έχει ενέργεια E_1 . Σ' αυτή τήν περίπτωση τό ηλεκτρόνιο *δέν εκπέμπει* ακτινοβολία.

Όταν τό ηλεκτρόνιο πάρει μία ενέργεια ΔE , τότε τό ηλεκτρόνιο *πηδάει* *απότομα* σε μία άλλη έξωτερική τροχιά, στην όποια αντιστοιχεί ενέργεια του ηλεκτρονίου $E_n = E_1 + \Delta E$ (σχ. 144). Αυτό τό *απότομο πήδημα*

του ηλεκτρονίου από τη θεμελιώδη σε μία πιό εξωτερική τροχιά λέγεται **διέγερση** του ατόμου. Η διέγερση είναι μία άσταθής κατάσταση του ατόμου, που διαρκεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 10^{-8} sec). Έτσι το άτομο υδρογόνου πολύ γρήγορα επανέρχεται στην κανονική του κατάσταση, γιατί το ηλεκτρόνιο επανέρχεται στη θεμελιώδη τροχιά, είτε με ένα μόνο πήδημά του είτε με διαδοχικά πηδήματά του από μία εξωτερική σε μία πιό εσωτερική τροχιά (σχ. 145). Με αυτό όμως το πήδημά του από τη μία τροχιά στην άλλη το ηλεκτρόνιο **αποβάλλει απότομα** το πλεόνασμα της ενέργειάς του με τη μορφή ενός φωτονίου που έχει ενέργεια ($h\nu$) ίση με τη διαφορά των ενεργειών του ηλεκτρονίου πάνω στις δύο τροχιές. Έτσι η δεύτερη συνθήκη του Bohr εξηγεί εύκολα γιατί το φάσμα εκπομπής του υδρογόνου αποτελείται μόνο από όρισμένες ακτινοβολίες, που τά φωτόνιά τους έχουν όρισμένες συχνότητες. Από τά παραπάνω συνάγεται ότι *η δεύτερη συνθήκη του Bohr* μπορεί να διατυπωθεί γενικότερα ως εξής :

Το ηλεκτρόνιο του ατόμου υδρογόνου, όταν πηδάει από μία κβαντική τροχιά σε άλλη, εκπέμπει ή απορροφά την ενέργεια ενός φωτονίου ($h\nu$) και επομένως ή μεταβολή της ολικής ενέργειας του ηλεκτρονίου 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 μία ενέργεια ($h\nu$), τότε πηδάει σε μία εξωτερική τροχιά και προκαλείται **διέγερση** του ατόμου. Αν ή ενέργεια που παίρνει το ηλεκτρόνιο είναι μεγαλύτερη από ένα όριο, τότε το ηλεκτρόνιο πετάγεται έξω από το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα και το άτομο υδρογόνου μεταβάλλεται τότε σε **θετικό ιόν**. Η ενέργεια που πρέπει να πάρει το ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει από τη θεμελιώδη τροχιά έξω από τά όρια του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται **ενέργεια ιονισμού**. Είναι φανερό ότι :

Γιά το άτομο υδρογόνου ή ενέργεια ιονισμού είναι ίση με την ολική ενέργεια E_1 που έχει το ηλεκτρόνιο όταν κινείται πάνω στη θεμελιώδη τροχιά (δηλαδή κατ' απόλυτη τιμή είναι ίση με $E_1 = 13,53$ eV).

Η διέγερση και ο ιονισμός του ατόμου υδρογόνου συμβαίνουν, όταν το άτομο απορροφήσει ενέργεια είτε από **μία ακτινοβολία** που πέφτει πάνω του είτε κατά **τή σύγκρουσή του** με άτομο ή σωματίδιο που έχει μεγάλη κινητική ενέργεια. Αν ή ενέργεια E που απορροφά το άτομο υδρογόνου

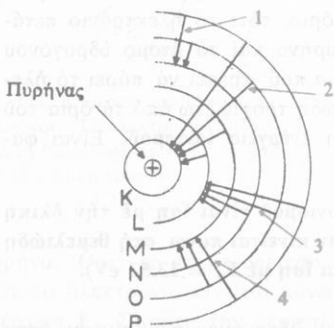
είναι *μεγαλύτερη* από την ενέργεια ιονισμού E_1 , τότε το πλεόνασμα της ενέργειας μένει πάνω στο ηλεκτρόνιο ως *κινητική ενέργεια* και ισχύει η εξίσωση :

$$\text{κινητική ενέργεια εξερχόμενου ηλεκτρονίου} \quad E_{\text{κιν}} = E - E_1$$

100. Άτομα με πολλά ηλεκτρόνια

Τά άτομα που έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό (Z) έχουν πολλά ηλεκτρόνια, π.χ. το άτομο λευκοχρύσου ($Z = 78$) έχει 78 ηλεκτρόνια που κατανέμονται πάνω σε έξι φλοιούς (από τον K ως τον P). Όταν ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια βρίσκεται στην *κανονική κατάσταση*, τότε όλα τα ηλεκτρόνια του κατανέμονται πάνω σε κβαντικές τροχιές έτσι, ώστε κάθε ηλεκτρόνιο να έχει την επιτρεπομένη ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Αν αυτό το άτομο προσλάβει ενέργεια, τότε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια μεταπηδούν σε κβαντικές τροχιές που έχουν μεγαλύτερες ακτίνες και το άτομο βρίσκεται για έναν ελάχιστο χρόνο σε κατάσταση *διεγέρσεως*, Όταν τα ηλεκτρόνια ξαναγυρίζουν με πηδήματα στις αρχικές θέσεις τους, το άτομο *εκπέμπει ακτινοβολίες*, δηλαδή *φωτόνια*, σύμφωνα με τη δεύτερη κβαντική συνθήκη του Bohr.

Σε ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια, π.χ. στο άτομο λευκοχρύσου, κατά τη διεγέρση του ένα ηλεκτρόνιο πηδάει από τους δύο προτελευταίους φλοιούς N ή O στον τελευταίο φλοιό P (σχ. 146). Όταν το ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζει στην αρχική του θέση, τότε το ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο, που έχει σχετικά μικρή ενέργεια και ανήκει στις *ορατές*, τις *υπέρυθρες* ή τις *υπεριώδεις ακτινοβολίες*. Αν όμως κατά τη διεγέρση του ατόμου ένα ηλεκτρόνιο των εσωτερικών φλοιών K, L, M πηδήσει στους πιο εξωτερικούς φλοιούς, τότε το ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζοντας στην αρχική θέση του εκπέμπει ένα φωτόνιο, που έχει μεγάλη ενέργεια και ανήκει στις *ακτίνες Röntgen*. Από τα παραπάνω βγαίνει το εξής συμπέρασμα :



Σχ. 146. Παραγωγή των ορατών ακτινοβολιών και των ακτίνων Röntgen (1 ορατές ακτινοβολίες, 2, 3, 4, σειρές ακτίνων Röntgen)

Σε ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια κατά την πτώση των ηλεκτρονίων πάνω στους πιο εξωτερικούς φλοιούς παράγονται ορατές, υπέρυθρες ή υπεριώδεις ακτινοβολίες, ενώ

Περιοδικό σύστημα των στοιχείων

Περίοδος	Ομάδες																		0		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	He 2													
1	H 1																				
2	Li 3	Be 4		B 5	C 6	N 7	O 8	F 9													Ne 10
3	Na 11	Mg 12		Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17													Ar 18
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35				Kr 36
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53				Xe 54
6	Cs 55	Ba 56	57-71 *	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85				Rn 86
7	Fr 87	Ra 88	89- 103 ***	Ku 104	Ha 105																
* Στοιχά Λανθανίου	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						
** Στοιχά ακτινίου	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lw 103						

κατά την πτώση των ηλεκτρονίων πάνω στους τρεις πιο εσωτερικούς φλοιούς (K, L, M) παράγονται ακτίνες Röntgen.

Αν ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια πάρει την απαιτούμενη ενέργεια ιονισμού, τότε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια του πηδούν έξω από τα όρια του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα και το άτομο μεταβάλλεται σε θετικό ιόν. Η ενέργεια ιονισμού είναι μικρότερη για τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού φλοιού (ηλεκτρόνια σθένους).

101. Περιοδικό σύστημα των στοιχείων

Με βάση την ηλεκτρονική δομή των ατόμων κατατάσσουμε τα στοιχεία στο περιοδικό σύστημα (βλ. σελίδα 195). Όταν στο περιοδικό σύστημα προχωρούμε από το ένα στοιχείο στο άμέσως επόμενο, ο ατομικός αριθμός Z αυξάνει κατά μία μονάδα, άρα ο αριθμός των ηλεκτρονίων του ατόμου αυξάνει κατά ένα ηλεκτρόνιο. Η διαδοχική πρόσθεση ενός ηλεκτρονίου προχωρεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να συμπληρώνονται διαδοχικά οι διάφοροι φλοιοί (σχ. 142).

Τα χημικά φαινόμενα οφείλονται σε μεταβολές του αριθμού των ηλεκτρονίων που ανήκουν στον εξωτερικό φλοιό. Επομένως η περιοδικότητα που παρουσιάζουν οι χημικές ιδιότητες των στοιχείων οφείλονται στο ότι περιοδικά στον εξωτερικό φλοιό υπάρχει ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων.

Στα άτομα των εγγενών αερίων ο εξωτερικός φλοιός είναι συμπληρωμένος και γι' αυτό είναι πολύ σταθερός. Για τα άτομα όλων των άλλων στοιχείων ισχύει ο εξής γενικός κανόνας: το άτομο αποβάλλοντας ή προσλαμβάνοντας ηλεκτρόνια τείνει να αποκτήσει εξωτερικό φλοιό συμπληρωμένο.

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; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

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; $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.

148. Στο άτομο υδρογόνου η 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 $E_1 = -13,53 \text{ eV}$. 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; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$.

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 η ενέργειά του αυξήθηκε κατά $\Delta E = 12 \text{ eV}$. Πηδώντας πάλι το ηλεκτρόνιο από τη νέα τροχιά στη θεμελιώδη εκπέμπει ένα φωτόνιο. Πόσο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το άτομο υδρογόνου; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$.

153. Στο άτομο υδρογόνου το ηλεκτρόνιο πάνω στη θεμελιώδη τροχιά έχει ολική ενέργεια κατ' απόλυτη τιμή με $13,5 \text{ eV}$. Πόσο πρέπει να είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που ένα φωτόνιο της ($h\nu$) προκαλεί τον ιονισμό του ατόμου υδρογόνου;

154. Κατά τη διέγερση ενός ατόμου με πολλά ηλεκτρόνια ένα ηλεκτρόνιο πηδάει από τη θεμελιώδη σε μία εξωτερική κβαντική τροχιά. *Αν η αύξηση της ενέργειας του ηλεκτρονίου είναι ίση με $\Delta E = 4,95 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$, πόσο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το άτομο, όταν το ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζει με ένα πήδημα στη θεμελιώδη τροχιά;

155. Κατά τη διέγερση ενός ατόμου με πολλά ηλεκτρόνια δύο ηλεκτρόνια πηδούν από την τροχιά που βρίσκονται σε δύο πιο εξωτερικές τροχιές. *Η αύξηση της ενέργειας είναι για το ένα ηλεκτρόνιο $\Delta E_1 = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ και για το άλλο είναι $\Delta E_2 = 19,8 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$. Τα ηλεκτρόνια ξαναγυρίζουν με ένα μόνο πήδημα στις αρχικές θέσεις τους. Πόσο είναι το μήκος κύματος λ_1 και λ_2 των δύο ακτινοβολιών που εκπέμπει το άτομο; Είναι ορατές αυτές οι ακτινοβολίες;

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

‘Ο άτομικός πυρήνας

102. Πυρηνική Φυσική

‘Ο Rutherford απέδειξε πειραματικά ότι μέσα στο άτομο υπάρχει ο μικρότατος *ατομικός πυρήνας*, πού έχει θετικό φορτίο. Από τήν περιθλαση τών ακτίνων Röntgen υπολογίζεται ο *ατομικός αριθμός Z* ενός στοιχείου (νόμος του Moseley), δηλαδή βρίσκεται ο αριθμός Z τών θετικών στοιχειωδών φορτίων πού έχει ο πυρήνας. Έτσι ξέρουμε πόσα *πρωτόνια* υπάρχουν στον πυρήνα. Μέ τό φασματογράφο τών μαζών βρίσκουμε τήν *ατομική μάζα*, πού σχεδόν όλόκληρη είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα. Οί γνώσεις μας για τόν ατομικό πυρήνα συμπληρώνονται από τή φυσική καί τήν τεχνητή *ραδιενέργεια*, ή όποία είναι μιá έκρηξη του πυρήνα. Μέ τή μελέτη ειδικά του ατομικού πυρήνα ασχολείται ένας ιδιαίτερος κλάδος τής Φυσικής, ή *Πυρηνική Φυσική*.

103. Ίσότοποι καί ισοβαρείς πυρήνες

α. Ίσότοποι πυρήνες. Όλα σχεδόν τά φυσικά στοιχεία είναι σταθερά μίγματα από όρισμένα *ισότοπα*, δηλαδή από στοιχεία πού έχουν τίσ ίδιες χημικές ιδιότητες, διαφορετική όμως ατομική μάζα. Τό όξυγόνο π.χ. αποτελείται από τρία ισότοπα στοιχεία, στά όποια αντίστοιχούν *τρία είδη* ατομικών πυρήνων. Αυτοί οί πυρήνες έχουν τόν ίδιο ατομικό αριθμό $Z = 8$, αλλά οί μαζικοί αριθμοί τους A αντίστοιχα είναι 16, 17 καί 18. Οί τρεις αυτοί πυρήνες ονομάζονται *ισότοποι πυρήνες* καί γράφονται έτσι:



Καί οί τρεις πυρήνες έχουν γύρω τους $Z = 8$ ηλεκτρόνια καί γι' αυτό τά άτομα τών τριών ισότοπων του όξυγόνου έχουν τίσ ίδιες χημικές ιδιότητες. Άλλά οί τρεις ισότοποι πυρήνες όξυγόνου δέν έχουν τήν ίδια σύσταση, γιατί περιέχουν τόν ίδιο αριθμό πρωτονίων, διαφορετικό όμως αριθμό νετρονίων, όπως δείχνει ο έπόμενος πίνακας:

Πυρήνας	Πρωτόνια	Μαζικός αριθμός	Νετρόνια
${}_8\text{O}^{16}$	$Z = 8$	$A = 16$	$N = 8$
${}_8\text{O}^{17}$	$Z = 8$	$A = 17$	$N = 9$
${}_8\text{O}^{18}$	$Z = 8$	$A = 18$	$N = 10$

Από τα παραπάνω βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

I. Ίσότοποι ονομάζονται οι πυρήνες που έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό Z , διαφορετικό όμως μαζικό αριθμό A , γιατί αυτοί οι πυρήνες περιέχουν τον ίδιο αριθμό (Z) πρωτονίων, διαφορετικό όμως αριθμό (N) νετρονίων.

II. Οι ισότοποι πυρήνες ανήκουν σε άτομα ισοτόπων του ίδιου στοιχείου.

β. Ίσοβαρείς πυρήνες. Ονομάζονται *ισοβαρείς πυρήνες* εκείνοι που περιέχουν τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων και, επομένως, έχουν τον ίδιο μαζικό αριθμό A , διαφορετικό όμως ατομικό αριθμό Z . Τέτοιοι π.χ. είναι οι πυρήνες ${}_3\text{Li}^7$ και ${}_4\text{Be}^7$. Η σύσταση αυτών των πυρήνων φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

Πυρήνας	Μαζικός αριθμός	Πρωτόνια	Νετρόνια
${}_3\text{Li}^7$	$A = 7$	$Z = 3$	$N = 4$
${}_4\text{Be}^7$	$A = 7$	$Z = 4$	$N = 3$

Παρατηρούμε ότι οι δύο ισοβαρείς πυρήνες περιέχουν τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων ($A = 7$), διαφέρουν όμως στον αριθμό των πρωτονίων (Z) και των νετρονίων (N). Έτσι καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

I. Ίσοβαρείς ονομάζονται οι πυρήνες που έχουν τον ίδιο μαζικό αριθμό A , διαφορετικό όμως ατομικό αριθμό Z .

II. Οι ισοβαρείς πυρήνες ανήκουν σε άτομα διαφορετικών στοιχείων.

γ. Βαρύ νερό. Το υδρογόνο αποτελείται από δύο ισότοπα, το κοινό υδρογόνο και το βαρύ υδρογόνο ή δευτέριο. Οι δύο αυτοί ισότοποι πυρήνες συμβολίζονται με ${}_1\text{H}^1$ και ${}_1\text{H}^2$ ή ${}_1\text{D}^2$. Το βαρύ υδρογόνο έχει ατομικό βάρος 2 και βρίσκεται σε μικρή αναλογία μέσα στο φυσικό υδρογόνο. Το βαρύ υδρογόνο ενώνεται με το οξυγόνο και σχηματίζει το βαρύ νερό D_2O , που έχει μοριακό βάρος 20 και φυσικές ιδιότητες διαφορετικές από το κοινό νερό. Π.χ. το βαρύ νερό σε θερμοκρασία 4°C έχει πυκνότητα $1,104 \text{ gr/cm}^3$, έχει θερμοκρασία πήξεως $3,8^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία βρασμού $101,4^\circ\text{C}$ (σε κανονική πίεση). Αυτές οι διαφορές μās βοηθούν να διαχωρίζουμε εύ-

κολα τό βαρύ νερό από τό κοινό νερό. Συνήθως τό βαρύ νερό τό παίρνουμε από τά ύπολειμματα τής ήλεκτρολύσεως καί τό χρησιμοποιούμε σέ όρισμένους τύπους *πυρηνικῶν ἀντιδραστήρων*.

104. Ἐλλειμμα μάζας καί ἐνέργεια συνδέσεως

α. Ἐλλειμμα μάζας τῶν πυρήνων. Κάθε πυρήνας ἀποτελεῖται ἀπό Z πρωτόνια καί N νετρόνια. Ἐπομένως ἡ μάζα (ἡρεμίας) τοῦ πυρήνα πρέπει νά εἶναι ἴση μέ τό ἄθροισμα τῶν μαζῶν (ἡρεμίας) τῶν νουκλεονίων πού υπάρχουν μέσα στόν πυρήνα, δηλαδή πρέπει νά ἰσχύει ἡ σχέση:

$$\text{μάζα πυρήνα} \quad m_{\text{πυρήνα}} = Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

Ἀλλά μέ τίς μετρήσεις βρήκαμε ὅτι πάντοτε ἡ μάζα τοῦ πυρήνα εἶναι *μικρότερη* ἀπό τό ἄθροισμα τῶν μαζῶν τῶν πρωτονίων καί τῶν νετρονίων τοῦ πυρήνα. Ἐτσι κάθε πυρήνας παρουσιάζει ἕνα ἔλλειμμα μάζας (Δm) πού εἶναι χαρακτηριστικό γιά κάθε εἶδος πυρήνα. Ὡστε:

Ὄταν τά πρωτόνια καί τά νετρόνια συνδέονται μεταξύ τους γιά νά σχηματίσουν τόν πυρήνα, πάντοτε ἐμφανίζεται ἕνα ἔλλειμμα μάζας (Δm).

$$\text{ἔλλειμμα μάζας } \Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_{\text{πυρήνα}}$$

β. Ἐνέργεια συνδέσεως. Τό ἔλλειμμα μάζας (Δm) ἑνός πυρήνα *ἰσοδυναμεῖ μέ ἐνέργεια* $\Delta m \cdot c^2$. Μέσα στόν πυρήνα τά πρωτόνια καί τά νετρόνια συνδέονται μεταξύ τους πολύ ἰσχυρά. Γιά νά διαλυθεῖ ὁ πυρήνας καί νά διαχωριστοῦν τά συστατικά του μακριά τό ἕνα ἀπό τό ἄλλο, πρέπει νά δαπανήσουμε ἐνέργεια ἴση μέ $\Delta m \cdot c^2$, δηλαδή ἐνέργεια *ἰσοδύναμη* μέ τό ἔλλειμμα μάζας (Δm) τοῦ πυρήνα. Αὕτη ἡ ἐνέργεια ὀνομάζεται *ἐνέργεια συνδέσεως* τοῦ πυρήνα. Ὅσο μεγαλύτερη εἶναι ἡ ἐνέργεια συνδέσεως, τόσο σταθερότερος εἶναι ὁ πυρήνας. Ὡστε:

I. Ἐνέργεια συνδέσεως ἑνός πυρήνα ὀνομάζεται ἡ ἐνέργεια πού πρέπει νά δαπανηθεῖ, γιά νά ἐλευθερωθοῦν τελείως τά νουκλεόνια τοῦ πυρήνα.

II. Ἡ ἐνέργεια συνδέσεως ἑνός πυρήνα εἶναι ἰσοδύναμη μέ τό ἔλλειμμα μάζας αὐτοῦ τοῦ πυρήνα.

$$\text{ἐνέργεια συνδέσεως} \quad E_{\text{συνδέσεως}} = \Delta m \cdot c^2$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

156. Ένας ατομικός πυρήνας βρέθηκε ότι έχει φορτίο $q = 1,76 \cdot 10^{-18}$ Cb. Πόσα πρωτόνια έχει αυτός ο πυρήνας και ποιός είναι ο ατομικός αριθμός του; Σέ ποίο στοιχείο ανήκει τό άτομο πού έχει αυτό τόν πυρήνα; Πόσα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από αυτό τόν πυρήνα και πώς κατανέμονται; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

157. ‘Ο πυρήνας μολύβδου θεωρείται ως σημείο. 1) Πόσο είναι τό δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου πού δημιουργεί ό πυρήνας μολύβδου ($Z = 82$) σέ απόσταση $r = 4 \cdot 10^{-14}$ m; 2) Πόση δυναμική ενέργεια αποκτά ό πυρήνας ήλίου ($Z = 2$), αν βρεθεί σ’ αυτή τήν απόσταση r από τόν πυρήνα μολύβδου; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

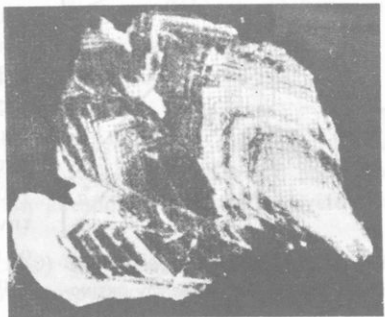
158. Ένας πυρήνας ήλίου (${}_2\text{He}^4$) εκτοξεύεται μέ ταχύτητα $v = 1,78 \cdot 10^7$ m/sec πρός έναν πυρήνα χρυσού ($Z = 79$). Σέ πόση απόσταση r από τόν πυρήνα χρυσού θά κατορθώσει νά φτάσει αυτός ό πυρήνας ήλίου; Μάζα του πυρήνα ήλίου: $m = 6,64 \cdot 10^{-27}$ kgf.

159. Τό δευτερόνιο (${}_1\text{H}^2$ ή ${}_1\text{D}^2$), δηλαδή ό πυρήνας του ατόμου του βαριού ύδρογόνου, έχει μάζα $m_D = 2,014\ 102$ amu. 1) Πόσο είναι τό έλλειμμα μάζας (Δm); 2) Πόση είναι σέ MeV ή ενέργεια συνδέσεως γι’ αυτό τόν πυρήνα; 3) Πόση είναι κατά νουκλεόνιο ή ενέργεια συνδέσεως;
 $1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$. $m_p = 1,007\ 825 \text{ amu}$. $m_n = 1,008\ 665 \text{ amu}$.

160. ‘Η μάζα του πυρήνα ήλίου (${}_2\text{He}^4$) είναι $m_{\text{πυρ}} = 4,00260$ amu. 1) Πόσο είναι τό έλλειμμα μάζας (Δm); 2) Πόση είναι ή ενέργεια συνδέσεως; 3) Πόση είναι ή ενέργεια συνδέσεως κατά νουκλεόνιο; Νά συγκριθεί αυτή ή ενέργεια μέ εκείνη πού βρέθηκε γιά τό δευτερόνιο στό προηγούμενο πρόβλημα.
 $1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$. $m_p = 1,00782 \text{ amu}$. $m_n = 1,00867 \text{ amu}$.

161. Σέ 1 gr νέου (${}_{10}\text{Ne}^{10}$) υπάρχουν $n = 3 \cdot 10^{22}$ άτομα. Γιά τόν πυρήνα νέου ή ενέργεια συνδέσεως είναι $E_{\text{συνδ}} = 160,6$ MeV. Πόση ενέργεια σέ Joule πρέπει νά δαπανήσουμε, γιά νά διαχωρίσουμε τελείως τούς n πυρήνες στά συστατικά τους;
 $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Joule.

Αυτοραδιογράφημα όρυκτου του οϋρανίου (σαμαρκίτη). Διακρίνεται ή κατανομή του οϋρανίου μέσα στον κρύσταλλο.



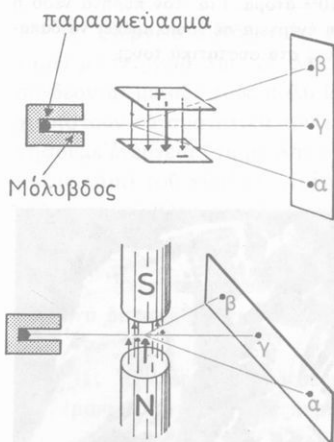
Φυσική ραδιενέργεια

105. Ραδιενέργεια

Ο Becquerel (1896) ανακάλυψε ότι ορυκτά που περιέχουν ούρανιο ή ενώσεις του εκπέμπουν συνεχώς μία άορατη ακτινοβολία, ή οποία προσβάλλει τη φωτογραφική πλάκα, προκαλεί το φθορισμό σε όρισμένα σώματα και τον ιονισμό των αερίων. Η ιδιότητα που έχουν μερικά στοιχεία να εκπέμπουν αυτόματα τέτοια ακτινοβολία ονομάζεται **ραδιενέργεια** και τα στοιχεία ονομάζονται **ραδιενεργά στοιχεία**. Εκτός από το ούρανιο, φυσικά ραδιενεργά στοιχεία είναι το άκτινιο, το θόριο, το πολώνιο, το ράδιο κ.ά. Το πολώνιο και το ράδιο τα ανακάλυψε το ζεύγος Curie. Τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό ($Z > 80$).

106. Φύση της ακτινοβολίας των ραδιενεργών στοιχείων

Ένα κομμάτι μολύβδου έχει μία στενόμακρη κοιλότητα και στο βάθος αυτής της κοιλότητας υπάρχει ένα ραδιενεργό παρασκεύασμα (σχ. 147). Η συσκευή βρίσκεται μέσα σε αερόκενο δοχείο. Η λεπτή δέσμη της



Σχ. 147. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο αναλύουν την ακτινοβολία του ραδίου σε ακτίνες α, β και γ.

ακτινοβολίας που βγαίνει από την κοιλότητα περνάει μέσα από όμογενές ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου και έπειτα πέφτει πάνω σε φωτογραφική πλάκα, που είναι κάθετη στη δέσμη. Τότε το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο διαχωρίζουν την ακτινοβολία του ραδιενεργού στοιχείου σε τρία είδη ακτίνων, που χαρακτηρίζονται διεθνώς με τα γράμματα α, β, γ του ελληνικού αλφάβητου. Οι ακτίνες α και β αποτελούνται από σωματίδια που έχουν ηλεκτρικό φορτίο και γι' αυτό με την επίδραση του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου εκτρέπονται από την εϋθύγραμμη τροχιά τους. Αντίθετα οι ακτίνες γ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ή οποία δέν εκτρέπεται από το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο.

Οι **ακτίνες α** είναι σωματίδια και τό καθένα έχει δύο θετικά στοιχειώδη ηλεκτρικά φορτία (+2e). Κάθε σωματίδιο α είναι ένας ατομικός πυρήνας ήλιου, έχει μάζα περίπου ίση με 4 amu και ταχύτητα που μπορεί να φτάσει ως 20 000 km/sec. Έτσι τὰ σωματίδια α έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια και, επομένως, προκαλούν ισχυρό ιονισμό.

Οι **ακτίνες β** αποτελούνται από ηλεκτρόνια (e^-), τὰ όποια εκτοξεύονται μέσα από τον πυρήνα με πολύ μεγάλη ταχύτητα που μπορεί να φτάσει ως 290 000 km/sec. Έχουν μεγάλη διεισδυτική ικανότητα.

Οι **ακτίνες γ** είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκος κύματος πολύ μικρότερο από τό μήκος κύματος των ακτίνων Röntgen. Είναι πολύ περισσότερο διεισδυτικές από τίς ακτίνες α και β και εξασκούν έντονες βιολογικές δράσεις.

Άπό τὰ παραπάνω βγάζουμε τό έξής συμπέρασμα:

Η ακτινοβολία των ραδιενεργών στοιχείων αποτελείται από τίς ακτίνες α, που είναι ατομικοί πυρήνες ήλιου, από τίς ακτίνες β, που είναι ηλεκτρόνια, και από τίς ακτίνες γ, που είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος.

Η ραδιενέργεια πυρηνικό φαινόμενο. Η ακτινοβολία που εκπέμπει μία όρισμένη ποσότητα ραδιενεργού στοιχείου (π.χ. ουρανίου) δέν επηρεάζεται από καμιά έξωτερική αίτια (θερμοκρασία, πίεση), ούτε από τή χημική ένωση αὐτοῦ τοῦ στοιχείου με άλλα στοιχεία. Άρα ή ραδιενέργεια είναι ένα πυρηνικό φαινόμενο και όφείλεται σε αυτόματη έκρηξη τοῦ ατομικού πυρήνα.

107. Φυσική μεταστοιχείωση

Ο πυρήνας ραδίου ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ εκπέμπει ένα σωματίδιο α που είναι πυρήνας ήλιου ${}_{2}\text{He}^4$. Έτσι όμως ό πυρήνας ραδίου μεταβάλλεται σε έναν καινούριο πυρήνα που έχει:

$$\text{ατομικό αριθμό} \quad Z = 88 - 2 = 86$$

$$\text{μαζικό αριθμό} \quad A = 226 - 4 = 222$$

Αὐτός ό καινούριος πυρήνας ανήκει σε άτομο ενός άλλου στοιχείου, που είναι ευγενές αέριο και όνομάζεται ραδόνιο (Rn). Ωστε ή ραδιενέργεια προκαλεί μεταστοιχείωση, δηλαδή μεταβολή τοῦ ενός στοιχείου σε άλλο.

Στούς πολύ βαριούς πυρήνες ($Z > 80$) ό αριθμός των νετρονίων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των πρωτονίων. Έτσι π.χ. στον ατομικό

πυρήνα ουρανίου ${}_{92}\text{U}^{238}$ υπάρχουν $Z = 92$ πρωτόνια και $N = 146$ νετρόνια. Ήξαιτίας αυτής της μεγάλης διαφοράς μεταξύ των νετρονίων και των πρωτονίων ο πυρήνας ουρανίου είναι **άσταθής** και με τη διαδοχική αποβολή σωματιδίων τείνει να μεταβληθεί σε ένα **σταθερό** πυρήνα. Ωστε:

Οί **άτομικοί πυρήνες των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων είναι άσταθεις** και **αυτόματα μεταστοιχειώνονται** εκπέμποντας **σωματίδια (φυσική μεταστοιχείωση)**.

108. Τό ποζιτρόνιο

Ξέρουμε ότι μέσα στον **άτομικό πυρήνα** υπάρχουν μόνο **πρωτόνια** και **νετρόνια**. Σε **ορισμένες** όμως **περιπτώσεις** **μεταστοιχειώσεων** βγαίνει μέσα από τον πυρήνα ένα νέο σωματίδιο, που ονομάζεται **ποζιτρόνιο**. Αυτό τό σωματίδιο έχει **μάζα ίση** με **τή** **μάζα** (m_e) του **ήλεκτρονίου**, αλλά έχει **ένα θετικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο** ($+e$). Άρα τό **ποζιτρόνιο** είναι ένα **αντιηλεκτρόνιο**. Τό **ποζιτρόνιο** δέν υπάρχει μέσα στον πυρήνα, αλλά σε **ορισμένες** **περιπτώσεις** **γεννιέται** μέσα στον πυρήνα και **άμέσως** **εκπέμπεται** **έξω** από τον πυρήνα. Τό **ποζιτρόνιο** **συμβολίζεται** με $+1e^0$ (ή e^+).

Γένεση του ποζιτρονίου. Σε **μερικές** **περιπτώσεις** μέσα στον πυρήνα ένα **πρωτόνιο** **μετατρέπεται** σε **νετρόνιο**, που **έξακολουθεί** να **παραμένει** μέσα στον πυρήνα. Τό **θετικό** **στοιχειώδες φορτίο** $+e$ που **είχε** τό **πρωτόνιο** τό **παίρνει** τό **ποζιτρόνιο** και τό **μεταφέρει** **έξω** από τον πυρήνα. Η **γένεση** του **ποζιτρονίου** **εκφράζεται** με **τήν** **άκόλουθη** **πυρηνική αντίδραση**:

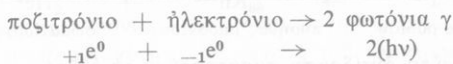


Από τά παραπάνω **συμπεραίνουμε** τά **έξής**:

- I. Τό **ποζιτρόνιο** **έχει** **μάζα** **ίση** με **τή** **μάζα** του **ήλεκτρονίου**, αλλά **έχει** πάνω του **ένα θετικό** **στοιχειώδες** **ηλεκτρικό φορτίο**.
- II. Τό **ποζιτρόνιο** **γεννιέται** μέσα στον **πυρήνα**, **όταν** **ένα** **πρωτόνιο** **μετατρέπεται** σε **νετρόνιο**, και **άμέσως** **αποβάλλεται** από τον **πυρήνα**.

α. Η **έξαφάνιση** του **ποζιτρονίου** Τό **ποζιτρόνιο**, μόλις **βγει** από τον **πυρήνα**, **έξαφανίζεται** πολύ **γρήγορα** (μέσα σε **χρονικό διάστημα** **μικρότερο** από 10^{-6} sec). Αυτή **ή** **ταχύτατη** **έξαφάνιση** του **ποζιτρονίου** **οφείλεται** στην **έξής** **αίτια**: Η **ύλη** **άποτελείται** από **άτομα** και μέσα σε αυτά **κινείται** **ένα** **τεράστιο** **πλήθος** **ήλεκτρονίων**. Όταν τό **ποζιτρόνιο** **αποβληθεί** από

τόν πυρήνα, άμέσως βρίσκεται μέσα στο πλήθος των ηλεκτρονίων. Το ποζιτρόνιο και το πρώτο ηλεκτρόνιο που θά βρεθεί μπροστά του, επειδή έχουν αντίθετα φορτία, έλκονται μεταξύ τους και συνενώνονται. Τότε *ολόκληρη ή μάζα* των δύο ετερόνυμων ηλεκτρονίων μετατρέπεται *σε ισοδύναμη ενέργεια* δύο φωτονίων γ που έχουν την ίδια συχνότητα ν . Το καθένα φωτόνιο έχει ενέργεια ($h\nu$) ισοδύναμη με τη μάζα ήρεμίας (m_e) του ηλεκτρονίου.

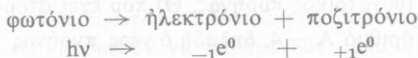


Όταν το ποζιτρόνιο εξαφανίζεται, τότε *εξαφανίζεται μάζα* ίση με $2m_e$ και στή θέση της *εμφανίζεται ενέργεια* ίση με $2(h\nu)$. Τά δύο φωτόνια προέρχονται από την *εξαόλωση* της μάζας $2m_e$. Αυτή ή μετατροπή της μάζας *σε ενέργεια* γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση του Einstein $E = mc^2$.
 Ώστε:

I. Η ταχύτατη εξαφάνιση του ποζιτρονίου οφείλεται στην ένωσή του με ένα ηλεκτρόνιο και τότε συμβαίνει μετατροπή της μάζας των δύο ετερόνυμων ηλεκτρονίων *σε ισοδύναμη ενέργεια* δύο φωτονίων γ .

II. Καθένα από τά δύο φωτόνια έχει ενέργεια ($h\nu$) *ισοδύναμη με τη μάζα* ήρεμίας (m_e) του ηλεκτρονίου.

β. Δίδυμη γένεση. Το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο έχουν την ίδια μάζα ήρεμίας (m_e), που ισοδυναμεί με ενέργεια 0,51 MeV. Ένα φωτόνιο έχει ενέργεια $h\nu$ διπλάσια από την παραπάνω ενέργεια, δηλαδή είναι $h\nu = 1,02$ MeV. Αν αυτό το φωτόνιο περάσει πολύ κοντά από ένα βαρύ πυρήνα, τότε *ολόκληρη ή ενέργεια* του φωτονίου μετατρέπεται *σε ισοδύναμη μάζα* ενός ποζιτρονίου και ενός ηλεκτρονίου. Αυτά τά δύο σωματίδια γεννιούνται από την *ύλοποίηση* της ενέργειας που μεταφέρει τό φωτόνιο, σύμφωνα με την εξίσωση $m = E/c^2$. Τό φαινόμενο αυτό ονομάζεται *δίδυμη γένεση* ή *γένεση ζεύγους ηλεκτρονίων*.

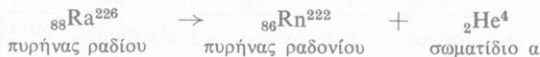


Αν τό φωτόνιο έχει ενέργεια $h\nu > 1,02$ MeV, τότε τό πλεόνασμα της ενέργειας κατανέμεται εξίσου στά δύο σωματίδια με τη μορφή κινητικής ενέργειας. Ώστε:

Από την *ύλοποίηση* της ενέργειας ενός φωτονίου, που έχει ενέργεια τουλάχιστο ίση με 1,02 MeV, σχηματίζεται ένα ζεύγος ετερόνυμων ηλεκτρονίων (ποζιτρόνιο, ηλεκτρόνιο).

109. Έξήγηση της έκπομπής των ακτινοβολιών

α. Οι δύο άρχες των πυρηνικών αντιδράσεων. Ο πυρήνας ραδίου ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ εκπέμπει ένα σωματίδιο α, δηλαδή έναν πυρήνα ήλιου ${}_2\text{He}^4$ και μετασχηματίζεται σε πυρήνα ραδονίου ${}_{86}\text{Rn}^{222}$. Αυτή η μεταστοιχείωση εκφράζεται με την ακόλουθη πυρηνική αντίδραση:



Στήν πυρηνική αυτή αντίδραση παρατηρούμε τὰ ἑξῆς:

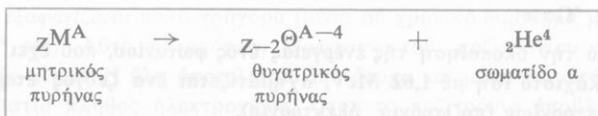
1) Ὁ μαζικός ἀριθμός $A = 226$ τοῦ ἀρχικοῦ πυρήνα εἶναι ἴσος μέ τό ἄθροισμα τῶν μαζικῶν ἀριθμῶν τῶν προϊόντων τῆς ἀντιδράσεως. Αὐτό σημαίνει ὅτι κατά τήν πυρηνική ἀντίδραση δέν μεταβάλλεται ὁ ἀριθμός τῶν νουκλεονίων.

2) Ὁ ἀτομικός ἀριθμός $Z = 88$ τοῦ ἀρχικοῦ πυρήνα εἶναι ἴσος μέ τό ἄθροισμα τῶν ἀτομικῶν ἀριθμῶν τῶν προϊόντων τῆς ἀντιδράσεως. Αὐτό σημαίνει ὅτι κατά τήν πυρηνική ἀντίδραση δέν μεταβάλλεται τό ἀρχικό ἠλεκτρικό φορτίο. Γενικά ἀποδεικνύεται ὅτι:

Σέ κάθε πυρηνική ἀντίδραση ἰσχύουν δύο ἀρχές, ἡ ἀρχή τῆς διατηρήσεως τῶν νουκλεονίων καί ἡ ἀρχή τῆς διατηρήσεως τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου.

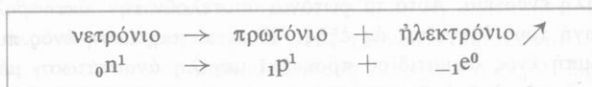
Ἡ μεταστοιχείωση ἑνός ραδιενεργοῦ πυρήνα εἶναι μιά πυρηνική ἀντίδραση, πού γίνεται αὐτόματα. Θά ἐξετάσουμε σέ γενικές γραμμές πῶς παράγονται οἱ ἀκτινοβολίες, ὅταν ἕνας ραδιενεργός πυρήνας μετασχηματίζεται.

β. Ἐκπομπή σωματιδίου α. Ὁ ἀρχικός πυρήνας (μητρικός πυρήνας, M) ἔχει ἀτομικό ἀριθμό Z καί μαζικό ἀριθμό A , δηλαδή ὁ μητρικός πυρήνας εἶναι ${}_Z\text{M}^A$. Αὐτός ὁ πυρήνας εκπέμπει ἕνα σωματίδιο α, δηλαδή ἕναν πυρήνα ἡλίου (${}_2\text{He}^4$). Ἐτσι ἀπό τόν ἀρχικό πυρήνα δημιουργεῖται ἕνας νέος πυρήνας (θυγατρικός πυρήνας, Θ) πού ἔχει ἀτομικό ἀριθμό $Z - 2$ καί μαζικό ἀριθμό $A - 4$, δηλαδή ὁ νέος πυρήνας εἶναι ${}_{Z-2}\Theta^{A-4}$. Αὐτός ὁ πυρήνας ἀνήκει σέ ἄτομο ἄλλου στοιχείου. Ἐπομένως ἡ ἐκπομπή ἑνός σωματιδίου α προκαλεῖ μεταστοιχείωση καί ἐκφράζεται μέ τήν πυρηνική ἀντίδραση:



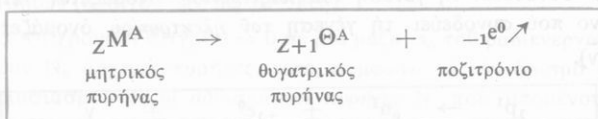
Άν ο θυγατρικός πυρήνας είναι και αυτός άσταθής, τότε θά συμβεί νέα έκπομπή σωματιδίου α και έπομένως νέα μεταστοιχείωση.

γ. Έκπομπή ηλεκτρονίου. Όπως ξέρουμε ο πυρήνας δέν περιέχει ήλεκτρονία. Άρα τό ήλεκτρόνιο (άκτίνες β) πού έκπέμπεται από τόν πυρήνα δημιουργείται μέσα στό μητρικό πυρήνα Μ. Αυτό συμβαίνει, όταν ένα νετρόνιο μεταβάλλεται σέ πρωτόνιο πού έξακολουθεί νά παραμένει μέσα στόν πυρήνα. Τό ήλεκτρόνιο, μόλις δημιουργηθεί, έκτοξεύεται έξω από τόν πυρήνα μέ μεγάλη ταχύτητα. Η γένεση του ήλεκτρονίου εκφράζεται μέ τήν ακόλουθη πυρηνική αντίδραση:



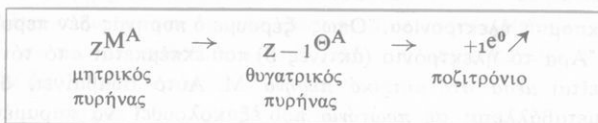
Έτσι από τό μητρικό πυρήνα ${}_Z\text{M}^A$ σχηματίζεται ένας θυγατρικός πυρήνας, πού έχει τόν ίδιο μαζικό αριθμό Α, γιατί δέν άλλαξε ο αριθμός των νουκλεονίων του πυρήνα, έχει όμως άτομικό αριθμό $Z + 1$, γιατί αύξηθηκε κατά μία μονάδα ο αριθμός των πρωτονίων. Ο θυγατρικός πυρήνας ${}_{Z+1}\Theta^A$ είναι *ισοβαρής* μέ τό μητρικό πυρήνα και άνήκει σέ άτομο άλλου στοιχείου.

Έπομένως ή έκπομπή ενός ήλεκτρονίου προκαλεί **μεταστοιχείωση** και εκφράζεται μέ τήν πυρηνική αντίδραση:



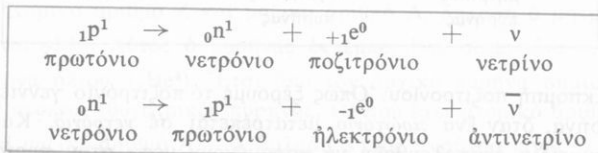
δ. Έκπομπή ποζιτρονίου. Όπως ξέρουμε τό ποζιτρόνιο γεννιέται μέσα στόν πυρήνα, όταν ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σέ νετρόνιο. Καί τά δύο αυτά σωματίδια έξακολουθούν νά παραμένουν μέσα στόν πυρήνα, αλλά τό ποζιτρόνιο, μόλις γεννηθεί, αποβάλλεται έξω από τόν πυρήνα. Έτσι από τό μητρικό πυρήνα ${}_Z\text{M}^A$ σχηματίζεται ένας θυγατρικός πυρήνας πού έχει τόν ίδιο μαζικό αριθμό Α, γιατί δέν άλλαξε ο αριθμός των νουκλεονίων του πυρήνα, έχει όμως άτομικό αριθμό $Z - 1$, γιατί έλαττώθηκε κατά μία μονάδα ο αριθμός των πρωτονίων. Ο θυγατρικός πυρήνας ${}_{Z-1}\Theta^A$ είναι *ισοβαρής* μέ τό μητρικό πυρήνα και άνήκει σέ άτομο άλλου στοιχείου.

Έπομένως η έκπομπή ενός ποζιτρονίου προκαλεί **μεταστοιχείωση** και εκφράζεται με την πυρηνική αντίδραση:



ε. Έκπομπή φωτονίου γ . Όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας μεταστοιχείωνεται με την έκπομπή σωματιδίου α , ηλεκτρονίου ή ποζιτρονίου, πάντοτε αυτή η μεταστοιχείωση συνοδεύεται από την έκπομπή ενός *φωτονίου γ* με μεγάλη ενέργεια. Αυτά τα φωτόνια αποτελούν την *ακτινοβολία γ* και η 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 τό πλεόνασμα της ενέργειας που έχει πάνω του με τη μορφή ενός *φωτονίου γ* μεγάλης ενέργειας.

στ. Νετρίνο και αντινετρίνο. Τό ηλεκτρόνιο και τό ποζιτρόνιο ονομάζονται και *σωματίδια β* (ηλεκτρόνιο β^- , ποζιτρόνιο β^+). Θεωρητικά αποδείχτηκε και έπειτα επιβεβαιώθηκε και πειραματικά ότι κατά τή γένεση ενός σωματιδίου β μέσα στον πυρήνα, ταυτόχρονα γεννιέται και ένα άλλο *ουδέτερο σωματίδιο*, πού ή *μάζα του* θεωρείται *ίση με μηδέν*, γιατί είναι άσημαντη σχετικά με τή *μάζα του* ηλεκτρονίου. Τό ουδέτερο σωματίδιο πού συνοδεύει τή γένεση του *ποζιτρονίου* ονομάζεται *νετρίνο (ν)*, ενώ εκείνο πού συνοδεύει τή γένεση του *ηλεκτρονίου* ονομάζεται *αντινετρίνο ($\bar{\nu}$)*.



ζ. Γενικά συμπεράσματα για τήν έκπομπή των ακτινοβολιών. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά ακόλουθα συμπεράσματα για τήν έκπομπή των ακτινοβολιών από τούς ραδιενεργούς πυρήνες:

I. Όταν ο ραδιενεργός πυρήνας εκπέμπει σωματίδιο α , ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο, συμβαίνει μεταστοιχείωση, ή οποία πάντοτε συνοδεύεται από τήν έκπομπή φωτονίου γ , για να μεταπέσει ο νέος πυρήνας από τήν κατάσταση διεγέρσεως στην κανονική κατάσταση.

II. Τό ποζιτρόνιο ή τό ηλεκτρόνιο γεννιούνται μέσα στό ραδιενεργό πυρήνα και ταυτόχρονα γεννιέται αντίστοιχα ένα νεutrίνο (ν) ή ένα αντινεutrίνο ($\bar{\nu}$).

110. Νόμος τής ραδιενέργειας

a. Χρόνος υποδιπλασιασμού. Σέ μιά όρισμένη χρονική στιγμή $t = 0$, έχουμε μιά μάζα m_0 ενός ραδιενεργού στοιχείου, π.χ. ραδίου ^{226}Ra . Στή μάζα αυτή άρχικά υπάρχουν N_0 πυρήνες ραδίου. Έπειδή συνεχώς πυρήνες ραδίου διασπώνται, ό άρχικός αριθμός N_0 τών πυρήνων ραδίου συνεχώς ελαττώνεται. Στή διάρκεια ενός χρόνου T διασπώνται *οί μισοί* από τούς άρχικούς πυρήνες ραδίου, δηλαδή διασπώνται $N_0/2$ πυρήνες. Έτσι κατά τή χρονική στιγμή $t = T$ έχουν άπομείνει *αδιάσπαστοι* οί μισοί από τούς άρχικούς πυρήνες, δηλαδή έχουν άπομείνει $N_0/2$ πυρήνες ραδίου. Ό χρόνος T είναι *σταθερός* και ονομάζεται *χρόνος υποδιπλασιασμού* ή *ήμιζωή* τού ραδίου. Για τό ράδιο 226 είναι $T \approx 1620$ έτη. Ωστε:

Χρόνος υποδιπλασιασμού (T) ή ήμιζωή ενός ραδιενεργού στοιχείου ονομάζεται ό χρόνος, μέσα στον όποιο διασπώνται οί μισοί από τούς πυρήνες (N_0) που άρχικά υπάρχουν σε μιά μάζα (m_0) τού στοιχείου.

Ό χρόνος υποδιπλασιασμού είναι μιά σταθερή, χαρακτηριστική για κάθε ραδιενεργό στοιχείο (βλ. πίνακα σελ. 213) και κυμαίνεται μεταξύ μεγάλων όριών (άπό 10^{-9} sec ως 10^{10} έτη).

Άν τή χρονική στιγμή $t = 0$ σε μιά μάζα m_0 τού ραδιενεργού στοιχείου υπάρχουν N_0 άρχικοί πυρήνες, τότε, σύμφωνα με τόν όρισμό τού χρόνου υποδιπλασιασμού T , *οί αδιάσπαστοι πυρήνες* N που άπομένουν κατά τή χρονική στιγμή $t = T, 2T, 3T \dots nT$ είναι:

$t:$	0	T	$2T$	$3T$	\dots	nT
$N:$	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$	$\frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{2^3}$	\dots	$\frac{N_0}{2^n}$

Ωστε τή χρονική στιγμή $t = nT$ οί αδιάσπαστοι πυρήνες N είναι :

$$\text{αδιάσπαστοι πυρήνες (για } t = nT) \quad N = \frac{N_0}{2^n} \quad (1)$$

Με τόν ίδιο ρυθμό ελαττώνεται και ή άρχική μάζα m_0 και έπομένως

τή χρονική στιγμή $t = nT$ απομένει μάζα m του ραδιενεργού στοιχείου ίση με:

$$m = \frac{m_0}{2^n}$$

β. Νόμος της ραδιενέργειας "Αν κατά τή χρονική στιγμή $t = 0$ υπάρχουν N_0 πυρήνες ενός ραδιενεργού στοιχείου, τότε κατά τή χρονική στιγμή t θά έχουν απομείνει N αδιάσπαστοι πυρήνες και οί υπόλοιποι θά έχουν μεταστοιχειωθεί. Αποδεικνύεται ότι ισχύει ο έξης νόμος τής ραδιενέργειας (ή νόμος τών ραδιενεργών μετατροπών) :

$$\text{νόμος τής ραδιενέργειας } N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

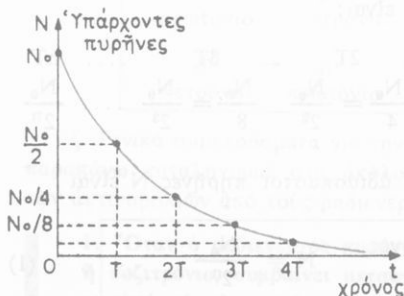
όπου $e = 2,7$ είναι ή βάση τών φυσικών λογαρίθμων και λ μιά σταθερή χαρακτηριστική για κάθε ραδιενεργό στοιχείο, ή όποία ονομάζεται **σταθερή διασπάσεως** και είναι ίση με:

$$\text{σταθερή διασπάσεως } \lambda = \frac{0,693}{T}$$

Τό T είναι ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ραδιενεργού στοιχείου. "Αν τή χρονική στιγμή $t = 0$ υπάρχουν N_0 πυρήνες, τότε *στή διάρκεια τής πρώτης χρονικής μονάδας* διασπᾶται ένα ποσοστό λ από τούς πυρήνες N_0 , δηλαδή οί πυρήνες πού διασπᾶνται είναι:

$$\text{διασπόμενοι πυρήνες } N_{\text{διασπ}} = -\lambda \cdot N_0 / \text{κατά χρονική μονάδα}$$

Τό ἀρνητικό σημείο φανερώνει ότι *στή διάρκεια τής χρονικής μονάδας* (έτος, ήμέρα, δευτερόλεπτο) ἐλαττώνεται ο ἀρχικός ἀριθμός N_0 τών πυρήνων. "Η καμπύλη του σχήματος 148 εκφράζει τό νόμο τής ραδιενέργειας.



Σχ. 148. Ο ρυθμός τής ἐλαττώσεως τών ραδιενεργών πυρήνων.

"Άλλη μορφή του νόμου τής ραδιενέργειας. "Αν στήν εξίσωση (1) βάλουμε $n = t/T$, βρίσκουμε μιά άλλη μορφή του νόμου τής ραδιενέργειας:

$$N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$$

γ. Ένταση ραδιενεργού πηγής. Η ραδιενέργεια μιᾶς ραδιενεργού πηγής είναι ανάλογη με τόν αριθμό τῶν πυρήνων πού διασπῶνται κατά δευτερόλεπτο, τή μετράμε με τή μονάδα πού ὀνομάζεται **κιουρί** (1 Curie, 1 Ci), καί ὀρίζεται ὡς ἐξῆς:

Μία ποσότητα ἀπό ὀποιαδήποτε ραδιενεργό οὐσία ἔχει ἔνταση ραδιενέργειας ἴση με 1 κιουρί, ὅταν 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:

$$1 \text{ μικροκιουρί (1 } \mu\text{Ci)} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ πικοκιουρί (1 pCi)} = 10^{-12} \text{ Ci}$$

III. Βιολογικά ἀποτελέσματα τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν

Ὁ ἄνθρωπος δέχεται τίς *πυρηνικές ἀκτινοβολίες* πού προέρχονται ἀπό τό κοσμικό διάστημα (κοσμικές ἀκτίνες), ἀπό τά φυσικά ραδιενεργά στοιχεῖα πού περιέχονται στά πετρώματα καί ἀπό ραδιοϊσότοπα πού ὑπάρχουν μέσα στούς ἴστους (κάλιο 40, ἄνθρακας 14). Οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες προκαλοῦν βιολογικά ἀποτελέσματα πού ὀφείλονται κυρίως στόν ἰονισμό πού συμβαίνει μέσα στούς ἴστους. Ἀποτέλεσμα τοῦ ἰονιμοῦ εἶναι ὀρισμένες *βιοχημικές μεταβολές* πού δημιουργοῦν πολύπλοκες διαταραχές. Αὐτές ἔχουν ὡς συνέπεια νά ἐμφανιστοῦν ὀρισμένες παθήσεις (π.χ. λευχαιμία τραύματα τοῦ δέρματος κ.ἄ.).

Κατά γενικό κανόνα περισσότερο εὐαίσθητα στίς πυρηνικές ἀκτινοβολίες εἶναι τά κύτταρα πού ἀναπαράγονται γρήγορα. Οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες προκαλοῦν ἀποτελέσματα *σωματικά*, δηλαδή βλάβες στόν ὀργανισμό τοῦ ἴδιου τοῦ ἀτόμου, καί ἀποτελέσματα *γενετικά*, δηλαδή βλάβες στά ὄργανα ἀναπαραγωγῆς με συνέπεια ὀρισμένες μεταβολές στούς ἀπογόνους. Ἀποδείχτηκε ὅτι ὁ ἄνθρωπος σέ ὄλη τή διάρκεια τῆς ζωῆς του μπορεῖ νά προσλάβει ἀκίνδυνα μόνο μιᾶ ὀρισμένη ποσότητα τῆς ἐνέργειας πού μεταφέρουν οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες.

Οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες προσβάλλουν τόν ἀνθρώπινο ὀργανισμό με δύο τρόπους, πού ὀνομάζονται *ἀκτινοβολία* καί *μόλυνση*. Ὄταν πάνω σ' ἓνα ἄτομο ἢ (ἀντικείμενο) πέφτουν οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες, λέμε ὅτι τό ἄτομο παθαίνει *ἀκτινοβολία*. Αὐτή διαρκεῖ ὅσο χρόνο πέφτουν πάνω στό ἄτομο οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες. Ὄταν πάνω σέ διάφορα ἀντικεί-

μενα (π.χ. ενδύματα, τρόφιμα κ.ά.) έχουν κολλήσει ουσίες που έχουν ραδιενέργεια, λέμε ότι αυτά τα αντικείμενα έπαθαν *μόλυνση*. Ο άνθρωπος οργανισμός μπορεί να πάθει είτε *έξωτερική μόλυνση* από ραδιενεργά σώματα που κόλλησαν πάνω στο σώμα του είτε *έσωτερική μόλυνση* από ραδιενεργά σώματα που μπήκαν μέσα στον οργανισμό με τις τροφές ή με τον εισπνεόμενο αέρα. Η μόλυνση διαρκεί όσο συνεχίζεται ή παρούσα του ραδιενεργού σώματος.

112. Οί σειρές τών φυσικῶν ραδιενεργῶν στοιχείων

Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα κατατάσσονται σέ τέσσαρις σειρές, τοῦ οὐρανίου, τοῦ ἀκτινίου, τοῦ θορίου καί τοῦ νεπτουνίου (βλ. πίνακα). Τό νεπτούνιο εἶναι τό πρῶτο ὑπερουράνιο στοιχεῖο πού παρασκευάσαμε καί φαίνεται ὅτι ἄλλοτε ὑπῆρχε στή Φύση, ἐπειδή ὅμως εἶναι σχετικά βραχύβιο ἐξαφανίσθηκε.

Τά ἐλαφρά ραδιοϊσότοπα. Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα πού ἔχουν ἀτομικό ἀριθμό Z *μεγαλύτερο* ἀπό 80 κατατάσσονται στίς παραπάνω τέσσερις

Τά φυσικά ραδιοϊσότοπα

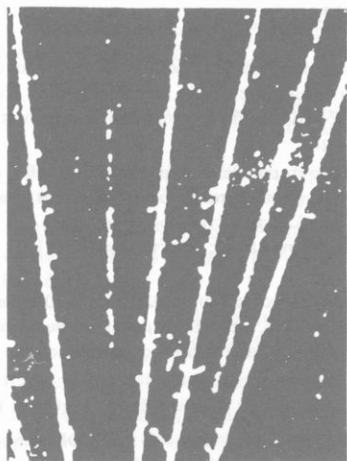
Σειρά	Πρῶτο μέλος	Τελικό προϊόν
Οὐρανίου	${}_{92}\text{U}^{238}$	${}_{82}\text{Pb}^{206}$
Ἄκτινίου	${}_{89}\text{Ac}^{227}$	${}_{82}\text{Pb}^{207}$
Θορίου	${}_{90}\text{Th}^{232}$	${}_{82}\text{Pb}^{208}$
Νεπτουνίου	${}_{93}\text{Np}^{237}$	${}_{83}\text{Bi}^{289}$

σειρές. 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 *ἄνθρακας 14* (C^{14})

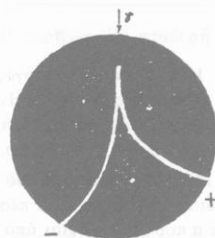
καί τό *κάλιο 40* (K^{40}) πού ὑπάρχουν μέσα στούς ἰστούς τῶν οργανισμῶν (μέ ἀντίστοιχο χρόνο ὑποδιπλασιασμοῦ 5760 ἔτη καί $1,2 \cdot 10^9$ ἔτη).

113. Ἡ μελέτη τῶν πυρηνικῶν ἀκτινοβολιῶν

Γιά νά μελετήσουμε τίς πυρηνικές ἀκτινοβολίες, ἐφαρμόζουμε διάφορες μεθόδους οἱ ὁποῖες βασίζονται στόν ἰονισμό καί στή διέγερση τῶν ἀτόμων πού προκαλοῦν οἱ πυρηνικές ἀκτινοβολίες, ὅταν διαδίδονται μέσα σέ ἕνα ὕλικο. Τά σχήματα 149 καί 150 δείχνουν τίς τροχιές φορτισμένων σωματιδίων πού μποροῦμε νά τίς φωτογραφίζουμε.



Σχ. 149. Φωτογραφία των τροχιών σωματιδίων
α. Διακρίνονται τά ηλεκτρόνια που εκτοξεύονται κατά τον ιονισμό των μορίων του αερίου.



Σχ. 150. Φωτογραφία που δείχνει την ύλοποίηση της ενέργειας ενός φωτονίου γ. Σχηματίστηκε ένα ηλεκτρόνιο (e^-) και ένα ποζιτρόνιο (e^+), τά όποια, εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που υπάρχει, διαγράφουν καμπύλες τροχιές με αντίθετη φορά.

Ἡ σειρά τοῦ οὐρανίου

Ἴσότοπο	Χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ	Ἐνέργεια ἀκτινοβολίας σέ MeV		
		α	β	γ
Οὐράνιο ${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,5 \cdot 10^9$ y	4,18	—	0,045
Θόριο ${}_{90}\text{Th}^{234}$	24,1 d	—	0,19	0,09
Πρωτακτίνιο ${}_{91}\text{Pa}^{234}$	1,14 min	—	2,32	1,50
Οὐράνιο ${}_{92}\text{U}^{234}$	$2,48 \cdot 10^5$ y	4,76	—	0,055
Θόριο ${}_{90}\text{Th}^{230}$	$8,22 \cdot 10^4$ y	4,68	—	0,068
Ράδιο ${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1620 y	4,79	—	0,19
Ραδόνιο ${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,825 d	5,49	—	—
Πολώνιο ${}_{84}\text{Po}^{218}$	3,05 min	5,998	—	—
Μόλυβδος ${}_{82}\text{Pb}^{214}$	26,8 min	—	0,72	0,053
Βισμουθίο ${}_{83}\text{Bi}^{214}$	19,7 min	5,44	3,15	0,426
Πολώνιο ${}_{84}\text{Po}^{214}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$ sec	7,68	—	—
Μόλυβδος ${}_{82}\text{Pb}^{210}$	25 y	—	0,025	0,047
Βισμουθίο ${}_{83}\text{Bi}^{210}$	4,85 d	5,00	1,17	0,08
Πολώνιο ${}_{84}\text{Po}^{210}$	138 d	5,30	—	0,80
Μόλυβδος ${}_{82}\text{Pb}^{206}$	σταθερό	—	—	—

(y = έτη, από τό year, και d = ήμέρες από τό day)

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

162. Ένας ραδιενεργός πυρήνας εκπέμπει σωματίδια α , που έχουν ταχύτητα $v = 2 \cdot 10^7$ m/sec. 1) Πόση είναι σε MeV ή κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου α ; 2) Πόση τάση χρειάζεται, για να επιταχυνθεί ένα σωματίδιο α και να αποκτήσει αυτή την κινητική ενέργεια; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb. $m_\alpha = 6,6 \cdot 10^{-27}$ kg.

163. Βρήκαμε ότι από 1 gr ραδίου εκπέμπονται κάθε δευτερόλεπτο $1,5 \cdot 10^{11}$ σωματίδια α . 'Αφήνουμε να πέσουν πάνω σε ένα μονωμένο μεταλλικό συλλέκτη τα σωματίδια α που εκπέμπονται από 0,01 gr ραδίου. 'Ο συλλέκτης έχει χωρητικότητα $C = 10^{-12}$ F. Παρατηρούμε ότι μέσα σε 1 sec ο συλλέκτης αποκτά δυναμικό $U = 500$ V. Πόσο φορτίο έχει κάθε σωματίδιο α ;

164. Ξέρουμε ότι από 1 gr ραδίου εκπέμπονται κάθε δευτερόλεπτο $1,5 \cdot 10^{11}$ σωματίδια α . 'Η κινητική ενέργεια αυτών των σωματιδίων, όταν μετατραπεί σε θερμότητα, δίνει 576 Joule την ώρα. Πόση είναι κατά μέσο όρο η ταχύτητα ενός σωματιδίου α ; $m_\alpha = 6,6 \cdot 10^{-27}$ kg.

165. Τα σωματίδια α που εκπέμπει ένας ραδιενεργός πυρήνας έχουν ταχύτητα $v = \sqrt{3} \cdot 10^7$ m/sec και στόν αέρα η εμβέλειά τους είναι ίση με $l = 5$ cm. 'Ολόκληρη ή κινητική ενέργεια κάθε σωματιδίου χρησιμοποιείται για τον ιονισμό των μορίων του αέρα τα οποία το σωματίδιο συναντά στο δρόμο του. Για τον ιονισμό ενός μορίου του αέρα πρέπει να δαπανηθεί ενέργεια ίση με 25 eV. Κάθε σωματίδιο α πόσα ζεύγη ιόντων δημιουργεί κατά έκαστοστόμετρο της διαδρομής του; $m_\alpha = 6,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

166. 'Ο πυρήνας ουρανίου $^{238}_{92}\text{U}$, μεταστοιχειώνεται τελικά σε πυρήνα μόλυβδου $^{206}_{82}\text{Pb}$, με μία σειρά μεταστοιχειώσεων, κατά τις οποίες εκπέμπονται x σωματίδια α και y ηλεκτρόνια. 1) Νά γραφεί μία συνοπτική πυρηνική αντίδραση, που νά δείχνει το σύνολο των διασπάσεων. 2) Νά βρεθεί πόσα σωματίδια α και πόσα ηλεκτρόνια εκπέμπονται, όταν συμβαίνουν αυτές οι διασπάσεις.

167. 'Από την ύλοποίηση της ενέργειας ενός φωτονίου ($h\nu$) σχηματίζεται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο, που τό καθένα έχει κινητική ενέργεια ίση με 0,09 MeV. 'Η μάζα ήρεμίας m_0 του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου ισοδυναμεί με ενέργεια 0,51 MeV. Πόση είναι η ενέργεια του φωτονίου, ή συχνότητα και τό μήκος κύματος;

168. Για τό πολώνιο ^{210}Po ό χρόνος ύποδιπλασιασμού είναι $T = 138,6$ ήμέρες. 'Από μία αρχική μάζα πολωνίου ^{210}Po ίση με $m_0 = 0,8$ mgr πόση μάζα απομένει έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 415,8$ ήμέρες;

169. 'Εχουμε μία αρχική μάζα m_0 ραδονίου (^{222}Rn). 'Εξαιτίας των ραδιενεργών διασπάσεων έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 15,2$ ήμέρες απομένει τό $1/16$ της αρχικής μάζας. Πόσος είναι για τό ραδόνιο ό χρόνος ύποδιπλασιασμού T ;

170. 'Ενα ραδιενεργό ισότοπο (^{218}Po) έχει χρόνο ύποδιπλασιασμού $T = 3$ min. Πόσο τοίς έκατό από τοίς πυρήνες που ύπάρχουν διασπώνται στη διάρκεια 1 sec;

171. Σε 1 gr ραδίου (^{226}Ra) ύπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες. 'Ο χρόνος ύποδιπλασιασμού του ραδίου είναι $T = 1600$ έτη (y) και ή σταθερή διασπάσεως είναι :

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{1600 y} \quad \eta \quad \lambda = 43 \cdot 10^{-6} y^{-1}$$

Στή διάρκεια ενός έτους (1 y) πόσοι πυρήνες διασπώνται κατά γραμμάριο ραδίου;

172. Σέ 1 gr ραδίου (Ra^{226}) υπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες. Ἡ σταθερή διασπάσεως τοῦ ραδίου εἶναι :

$$\lambda = \frac{0,693}{7,24 \cdot 10^{10} \text{ sec}} \quad \text{ἢ} \quad \lambda = 1,73 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

Ἀπό ἀρχική μάζα ραδίου $m_0 = 1 \text{ gr}$, πόση μάζα ραδίου μεταστοιχειώνεται στή διάρκεια ἑνός δευτερολέπτου (1 sec);

173. Σέ 1 mgr ραδίου Ra^{226} υπάρχουν $N_1 = 2,665 \cdot 10^{18}$ πυρήνες ραδίου, ἐνῶ σέ 1 mgr θορίου (Th^{232}) υπάρχουν $N_2 = 2,596 \cdot 10^{18}$ πυρήνες θορίου. Ἡ σταθερή διασπάσεως λ εἶναι ἀντίστοιχα :

$$\begin{aligned} \text{γιά τό ράδιο} \quad \lambda_1 &= 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1} \\ \text{γιά τό θόριο} \quad \lambda_2 &= 1,58 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

Πόσοι πυρήνες ραδίου καί πόσοι πυρήνες θορίου διασπῶνται στή διάρκεια 1 sec;

174. Σέ μιά μάζα m_0 θορίου Th^{232} στή διάρκεια 1 sec διασπᾶται ὁ πυρήνας μόνο ἑνός ἀτόμου. Πόσα ἄτομα υπάρχουν σ' αὐτή τή μάζα θορίου; Σταθερή διασπάσεως τοῦ θορίου : $\lambda = 1,58 \cdot 10^{-18} \text{ sec}^{-1}$

175. Τό τελικό προϊόν τῶν διαδοχικῶν μεταστοιχειώσεων τοῦ οὐρανίου 238 (${}_{92}\text{U}^{238}$) εἶναι τό σταθερό ἰσότοπο μόλυβδος 206 (${}_{82}\text{Pb}^{206}$). 1) Πόσος εἶναι ὁ λόγος τῶν νετρονίων (N) πρὸς τά πρωτόνια (Z) σέ αὐτούς τούς δύο πυρήνες; 2) Τί προσπαθεῖ νά πετύχει ἕνας ραδιενεργός πυρήνας μέ τίς διαδοχικές μεταστοιχειώσεις του;

Πυρηνικές αντιδράσεις

114. Πυρηνικές αντιδράσεις

Ἡ φυσική μεταστοιχείωση πού παρατηρεῖται στά φυσικά ραδιενεργά στοιχεῖα ὀφείλεται στό ὅτι οἱ πυρήνες μέ μεγάλο ἀτομικό ἀριθμό εἶναι ἀσταθεῖς καί αὐτόματα διασπῶνται, γιά νά μεταπέσουν σέ σταθεροῦς πυρήνες. Ἀλλά καί οἱ σταθεροί πυρήνες (π.χ. τοῦ ὀξυγόνου, τοῦ ἄζωτου) μποροῦν νά γίνουν ἀσταθεῖς πυρήνες, ἂν βομβαρδιστοῦν μέ κατάλληλα βλήματα. Τότε συμβαίνουν πυρηνικές αντιδράσεις καί σχηματίζονται νέοι πυρήνες ἢ καί σωματίδια. Μέ τήν πυρηνική ἀντίδραση προκαλοῦμε τεχνητή μεταστοιχείωση, δηλαδή τή μετατροπή τοῦ ἑνός στοιχείου σέ ἄλλο. Κατά τίς πυρηνικές ἀντιδράσεις ἰσχύουν οἱ δύο ἀρχές, τῆς διατηρήσεως τῶν νουκλεονίων καί τῆς διατηρήσεως τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου.

Ἰδιαίτερη ἀξία ὡς βλήμα ἔχει τό νετρόνιο, ἐπειδή δέν ἔχει ἠλεκτρικό φορτίο καί μπορεῖ ἐλεύθερα νά πλησιάζει τούς πυρήνες καί νά ἐνώνεται μέ

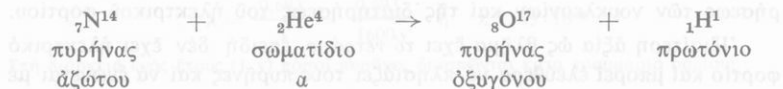
αυτούς. Ἄλλὰ ἡ πρόσθεση ἑνός νετρονίου σέ ἕνα σταθερό πυρήνα μεταβάλλει τόν πυρήνα σέ ἀσταθῆ καί ἔτσι προκαλεῖται διάσπασή του.

Ἄλλα βλήματα εἶναι τά σωματίδια πού ἔχουν θετικό φορτίο, ὅπως εἶναι τό πρωτόνιο (${}_1\text{H}^1$), τό δευτερόνιο (${}_1\text{H}^2$), τό σωματίδιο α (${}_2\text{He}^4$). Τά σωματίδια αὐτά, γιά νά φτάσουν σέ ἕνα σταθερό πυρήνα, πρέπει νά ἔχουν μεγάλη κινητική ἐνέργεια, ὥστε νά μπορέσουν νά ὑπερνικήσουν τήν ἀπόσπασή πού ἐξασκεῖ πάνω τους τό ἠλεκτρικό πεδίο τοῦ σταθεροῦ πυρήνα. Σημαντική κινητική ἐνέργεια ἔχουν τά σωματίδια α, πού ἐκπέμπονται ἀπό μερικά φυσικά ραδιοϊσότοπα (βλ. πίνακα σελ. 213). Σήμερα, γιά νά δημιουργήσουμε βλήματα μέ μεγάλη κινητική ἐνέργεια, χρησιμοποιοῦμε εἰδικές διατάξεις, πού ὀνομάζονται ἐπιταχυντές.

α. Ἐπιταχυντές. Ἐνα σωματίδιο μέ θετικό φορτίο, π.χ. ἕνα πρωτόνιο, ἀποκτᾷ μεγάλη κινητική ἐνέργεια, ἂν ἐπιταχυνθεῖ μέσα σέ ἕνα ἠλεκτρικό πεδίο. Ἄν ἡ τάση πού χρησιμοποιοῦμε εἶναι U , τότε τό πρωτόνιο ἀποκτᾷ κινητική ἐνέργεια $E_{\text{κιν}} = eU$. Ἐπειδή, ὅμως, δέν μποροῦμε νά ἔχουμε πολύ μεγάλες τάσεις, γι' αὐτό ἐπινοήσαμε διάφορες διατάξεις, στίς ὁποῖες τό ἠλεκτρικό πεδίο δίνει στό θετικό φορτισμένο σωματίδιο πολύ συχνές διαδοχικές ἐπιταχύνσεις.

Ἐπάρχουν δύο κατηγορίες ἐπιταχυντῶν, οἱ εὐθύγραμμοι καί οἱ κυκλικοί ἐπιταχυντές. Στούς εὐθύγραμμοις ἐπιταχυντές ἡ ταχύτητα (v) τοῦ σωματιδίου ἔχει πάντοτε τήν ἴδια διεύθυνση, γιατί στό σωματίδιο ἐπιδρᾷ μόνο τό ἠλεκτρικό πεδίο. Στούς κυκλικούς ἐπιταχυντές στό σωματίδιο ἐπιδρᾷ ἐκτός ἀπό τό ἠλεκτρικό πεδίο καί ἕνα μαγνητικό πεδίο, πού δέ δίνει ἐπιτάχυνση, ἀλλά ὀδηγεῖ τό σωματίδιο πάνω σέ μιά κυκλική τροχιά. Τό σωματίδιο ἀποκτᾷ ἐπιτάχυνση ρυθμικά, π.χ. στό τέλος κάθε μισῆς στροφῆς. Τά σωματίδια α πού ἐκπέμπονται ἀπό τά φυσικά ραδιοϊσότοπα ἔχουν ἐνέργεια μικρότερη ἀπό 10 MeV (βλ. πίνακα σελ. 213), ἐνῶ μέ τούς σημερινούς ἐπιταχυντές δημιουργοῦμε βλήματα πού ἡ ἐνέργειά τους φτάνει σέ δεκάδες ἢ καί ἑκατοντάδες GeV ($1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV}$).

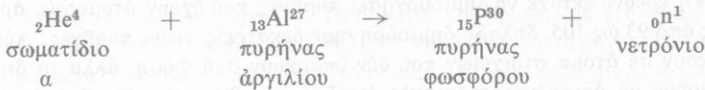
β. Ἡ πρώτη τεχνητή μεταστοιχείωση. Ὁ Rutherford (1919) ἔκαμε τήν πρώτη πυρηνική ἀντίδραση καί πέτυχε τήν πρώτη τεχνητή μεταστοιχείωση. Μέ σωματίδια α βομβάρδισε πυρήνες ἀζώτου καί παρατήρησε ὅτι σχηματίστηκαν ἰόντα ὕδρογόνου, δηλ. πρωτόνια. Ἀργότερα διαπιστώθηκε ὅτι ἐκτός ἀπό τά πρωτόνια σχηματίζονται καί πορῆνες ὀξυγόνο. Τό πείραμα τοῦ Rutherford ἐκφράζεται μέ τήν ἐξῆς πυρηνική ἀντίδραση:



“Ωστε τὸ πείραμα τοῦ Rutherford ἀπέδειξε ὅτι μπορούμε νὰ πετύχουμε τὴν τεχνητὴ μεταστοιχείωση τῶν σταθερῶν φυσικῶν πυρῆνων.

115. Τεχνητὴ ραδιενέργεια

Σὲ πολλές περιπτώσεις πυρηνικῶν ἀντιδράσεων ἐμφανίζονται νέοι πυρῆνες πού εἶναι ἀσταθεῖς καὶ αὐτόματα διασπῶνται, γιὰ νὰ μεταβληθοῦν σὲ σταθεροὺς πυρῆνες. Οἱ νέοι ἀσταθεῖς πυρῆνες μεταστοιχειώνονται ἐκπέμποντας πυρηνικὲς ἀκτινοβολίες (σωματίδια α, ἠλεκτρόνια, ποζιτρόνια, φωτόνια γ). Ἔτσι δημιουργοῦνται τεχνητοὶ ραδιενεργοὶ πυρῆνες, πού ἀνήκουν σὲ ἄτομα στοιχείων τὰ ὁποῖα εἶναι ἰσότοπα μὲ τὰ σταθερὰ φυσικὰ στοιχεῖα. Αὐτὰ τὰ καινούρια ἰσότοπα στοιχεῖα δὲν ὑπάρχουν στὴ Φύση, ἀλλὰ τὰ δημιουργοῦμε μὲ ὀρισμένες πυρηνικὲς ἀντιδράσεις καὶ γι' αὐτὸ ὀνομάζονται τεχνητὰ ραδιοἰσότοπα. Καὶ γιὰ τὴν τεχνητὴ ραδιενέργεια ἰσχύει ὁ νόμος τῆς ραδιενέργειας, ὅπως καὶ στὴ φυσικὴ ραδιενέργεια. Κάθε τεχνητὸ ραδιοἰσότοπο ἔχει χαρακτηριστικὸ χρόνο ὑποδιπλασιασμοῦ (T). Ἐνα παράδειγμα πυρηνικῆς ἀντιδράσεως, κατὰ τὴν ὁποία δημιουργεῖται τεχνητὸ ραδιοἰσότοπο εἶναι τὸ ἑξῆς: Ἐν βομβαρδίσουμε μὲ σωματίδια α τοὺς πυρῆνες ἀργιλίου, σχηματίζεται ραδιενεργὸς φωσφόρος καὶ νετρόνιο:



Ὁ πυρῆνας τοῦ ραδιενεργοῦ φωσφόρου εἶναι ἀσταθῆς καὶ ἐκπέμποντας ἓνα ποζιτρόνιο καὶ ἓνα νετρόνιο μεταστοιχειώνεται σὲ σταθερὸ πυρῆνα πυριτίου.



Ὁ ραδιενεργὸς φωσφόρος P^{30} ἔχει χρόνο ὑποδιπλασιασμοῦ $T = 2,5 \text{ min}$.

Στὸν πίνακα τῆς σελίδας 218 ἀναφέρονται μερικοὶ ἰσότοποι πυρῆνες. Ὅσοι σημειώνονται μὲ μαδρα στοιχεῖα δημιουργήθηκαν μὲ πυρηνικὲς ἀντιδράσεις καὶ εἶναι ἀσταθεῖς (τεχνητὰ ραδιοἰσότοπα).

Μερικοί ισότοποι πυρήνες

Άτομικός αριθμός Z	Στοιχείο	Μαζικός αριθμός A	Ήλεκτρόνια Z	Πρωτόνια Z
1	H	1 2 3	1	1
2	He	3 4 5 6	2	2
3	Li	6 7 8	3	3
4	Be	7 8 9 10	4	4
5	B	8 9 10 11 12	5	5
6	C	10 11 12 13 14	6	6
7	N	12 13 14 15 16 17	7	7
8	O	14 15 16 17 18 19	8	8

116. Τά υπερούρνια στοιχεία

Στή Φύση ο βαρύτερος πυρήνας είναι ο πυρήνας του ουρανίου 238, δηλαδή ο πυρήνας ${}_{92}\text{U}^{238}$ που έχει άτομικό αριθμό $Z = 92$. Η πειραματική έρευνα πέτυχε να δημιουργήσει πυρήνες που έχουν ατομικούς αριθμούς από 93 ως 105, δηλαδή δημιούργησε δεκατρείς νέους πυρήνες. Αυτοί ανήκουν σε άτομα στοιχείων που δεν υπάρχουν στη Φύση, αλλά τά δημιουργούμε με όρισμένες πυρηνικές αντιδράσεις. Τά στοιχεία αυτά ονομάζονται *υπερούρνια στοιχεία*, είναι όλα ραδιενεργά και σχηματίζονται, όταν πυρήνες του ουρανίου ή άλλου υπερούρνιου στοιχείου βομβαρδίζονται με νετρόνια μεγάλης ενέργειας ή με ιόντα ήλιου, άνθρακα, αζώτου κ.ά. που έχουν μεγάλη ενέργεια.

Ίδιαίτερη σημασία έχουν τά δύο πρώτα υπερούρνια στοιχεία, δηλαδή *νεπτούνιο* (Np, $Z = 93$) και *πλουτώνιο* (Pu, $Z = 94$). Τό νεπτούνιο σχηματίζεται, όταν οί πυρήνες ουρανίου 238 βομβαρδίζονται με νετρόνια. Τότε σχηματίζεται ο άσταθής πυρήνας *ουρανίου* 239, που μεταστοιχείωνεται σε πυρήνα *νεπτουνίου* 239. Αυτός ο πυρήνας μεταστοιχείωνεται τελικά σε πυρήνα *πλουτονίου* 239. Τό ισότοπο αυτό έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 24\,000$ έτη και παίζει σήμερα σπουδαίο ρόλο στην εκμετάλλευση τής πυρηνικής ενέργειας. Οί παραπάνω ενδιαφέρουσες μεταστοιχειώσεις εκφράζονται σχηματικά ως εξής:



Οί δύο πυρήνες οϋρανίου είναι *ισότοποι*, ενώ οί πυρήνες τοϋ νεπτοϋνίου καί τοϋ πλουτωνίου είναι *ισοβαρείς*.
Τά γνωστά υπερουράνια στοιχεΐα είναι τά εξής:

93 Νεπτούνιο	Np	98 Καλιφόρνιο	Cf	103 Λωρέντσιο	Lw
94 Πλουτόνιο	Pu	99 Άϊνστάνιο	Es	104 Κουρτσατόβιο	Ku
95 Άμερίκιο	Am	100 Φέρμιο	Fm	105 Χάνιο	Ha
96 Κιούριο	Cm	101 Μεντελέβιο	Md		
97 Μπερκέλιο	Bk	102 Νομπέλιο	No		

117. Σχάση τών βαριών πυρήνων

Οί βαριοί πυρήνες, όταν *βομβαρδίζονται* μέ σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια, δευτερόνια, σωματίδια α) ή καί μέ φωτόνια γ πολύ μεγάλης ενέργειας ($h\nu > 5 \text{ MeV}$), *διασπώνται* σέ δύο άλλους πυρήνες πού έχουν περίπου ίσες μάζες. Τό φαινόμενο αυτό ονομάζεται **σχάση**. Μερικοί βαριοί πυρήνες καί κυρίως πυρήνες πού άνήκουν σέ πολλά υπερουράνια ισότοπα παθαίνουν *αυτόματη σχάση*, χωρίς νά προηγηθεΐ βομβαρδισμός τους μέ σωματίδια. "Ωστε ή σχάση είναι ένα φαινόμενο πού εμφανίζεται κυρίως *στούς βαριούς πυρήνες*. Ίδιαίτερη σημασία έχει ή σχάση τοϋ πυρήνα οϋρανίου.

Σχάση τοϋ πυρήνα οϋρανίου. Τό οϋράνιο πού βρίσκουμε στή Φύση άποτελείται από τά τρία ισότοπα U^{238} , U^{235} καί U^{234} . Τό οϋράνιο 238 ύπάρχει σέ μεγάλη άναλογία (99,3 %), τό οϋράνιο 235 σέ πολύ μικρή άναλογία (0,7 %) καί τό οϋράνιο 234 σέ άσήμαντη άναλογία (0,006 %).

"Όταν οί πυρήνες οϋρανίου 238 καί οϋρανίου 235 συλλάβουν ένα νετρόνιο, τότε συμβαίνει *σχάση* αυτών των δύο πυρήνων. Τά νετρόνια πού μποροϋν νά προκαλέσουν τή σχάση των δύο πυρήνων οϋρανίου, κατατάσσονται στίς εξής δύο κατηγορίες:

1) Τά νετρόνια πού έχουν μεγάλη ταχύτητα καί ονομάζονται *νετρόνια ψηλής ενέργειας*, γιατί έχουν πολύ μεγάλη ενέργεια ($E > 1 \text{ MeV}$).

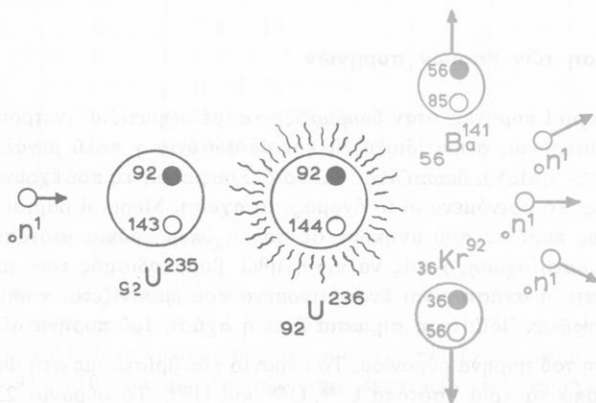
2) Τά νετρόνια πού έχουν μικρή ταχύτητα καί ονομάζονται *θερμικά νετρόνια*, γιατί έχουν μικρή ενέργεια (0,025 eV) ίση περίπου μέ τήν ενέργεια πού έχουν τά μόρια των αερίων εξαιτίας τής θερμικής κινήσεώς τους. Άποδείχτηκε ότι:

I. Ό πυρήνας οϋρανίου 235 παθαίνει σχάση κυρίως μέ θερμικά νετρόνια.

II. Ό πυρήνας οϋρανίου 238 παθαίνει σχάση μόνο μέ νετρόνια ψηλής ενέργειας, ενώ μέ τά θερμικά νετρόνια μεταστοιχειώνεται σέ πυρήνα νεπτοϋνίου (Np) καί τελικά σέ πυρήνα πλουτωνίου (Pu).

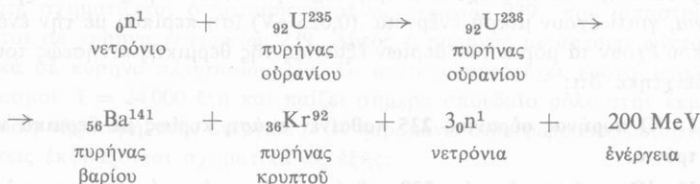
118. Σχάση του πυρήνα ουρανίου 235

α. Προϊόντα τής σχάσεως. Ἡ σχάση τοῦ πυρήνα οὐρανίου μέ τά θερμικά νετρόνια ἔχει σήμερα μεγάλες ἐφαρμογές. Ὄταν ὁ πυρήνας οὐρανίου 235 συλλάβει ἕνα θερμικό νετρόνιο, τότε σχηματίζεται ὁ πυρήνας οὐρανίου 236 πού εἶναι ἀσταθής καί ἀμέσως διασπᾶται σέ δύο μικρότερους πυρήνες πού ὁ καθένας ἔχει μάζα περίπου ἴση μέ τή μισή μάζα τοῦ ἀρχικοῦ πυρήνα. Ταυτόχρονα ἐλευθερώνονται μερικά νετρόνια (σχ. 151). Οἱ δύο νέοι πυ-



Σχ. 151. Σχηματική παράσταση τής σχάσεως τοῦ πυρήνα οὐρανίου 235 σέ πυρήνα βαρίου 144 καί πυρήνα κρυπτοῦ 89.

ρήνες ἐκτοξεύονται μέ μεγάλη ταχύτητα καί ἐπομένως ἔχουν μεγάλη κινητική ἐνέργεια, ἡ ὁποία τελικά μετατρέπεται σέ *θερμότητα*. Οἱ δύο νέοι πυρήνες εἶναι *ραδιενεργοί* καί μέ μιᾶ σειρά διαδοχικῶν μεταστοιχειώσεων καταλήγουν σέ σταθεροῦς πυρήνες. Ἡ ἐπόμενη πυρηνική ἀντίδραση ἐκφράζει ἕναν τρόπο σχάσεως τοῦ πυρήνα οὐρανίου 235:



Ἀπό τά παραπάνω βγάζουμε τό ἐξῆς συμπέρασμα:

Ο πυρήνας ουρανίου 235, όταν συλλάβει ένα θερμικό νετρόνιο, μεταβάλλεται σε άσταθη πυρήνα ουρανίου 236, ο οποίος άμεσα 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 η ενέργεια των αντινετρίνων, που συνοδεύουν την εκπομπή 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 ποού 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 μάζας* 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

ένεργεια 200 MeV. Αυτή ή ένεργεια είναι τεράστια. Εύκολα βρίσκουμε ότι κατά τη διάσπαση των πυρήνων που περιέχονται σε ένα γραμμάριο ουρανίου 235 ελευθερώνεται ένεργεια ίση με $8,2 \cdot 10^{10}$ Joule (δηλαδή περίπου 23 000 kWh). Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

I. Η πυρηνική ένεργεια που ελευθερώνεται κατά τη σχάση των πυρήνων ουρανίου 235 προέρχεται από τη μετατροπή ελάχιστης πυρηνικής μάζας σε ισοδύναμη ένεργεια.

II. Η πυρηνική ένεργεια 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 ένεργεια. Άλλά το ουράνιο 235 είναι ένα σπάνιο φυσικό ισότοπο. Πειραματικά αποδείχτηκε ότι:

Με θερμικά νετρόνια παθαίνουν σχάση μόνο οι πυρήνες του ουρανίου 235, του πλουτωνίου 239 και του ουρανίου 233.

Τό πλουτόνιο 239 και τό ουράνιο 233 δέν υπάρχουν στή Φύση καί τά δημιουργούμε μέ όρισμένες πυρηνικές αντιδράσεις.

Τό πλουτόνιο 239 σχηματίζεται, όταν τό ουράνιο 238 (πού είναι άφθονο) βομβαρδίζεται μέ νετρόνια κατάλληλης ένέργειας. Αυτό συμβαίνει μέσα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες καί έτσι μπορούμε νά έχουμε άρκετό πλουτόνιο, πού είναι μακρόβιο ($T = 24\ 000$ έτη).

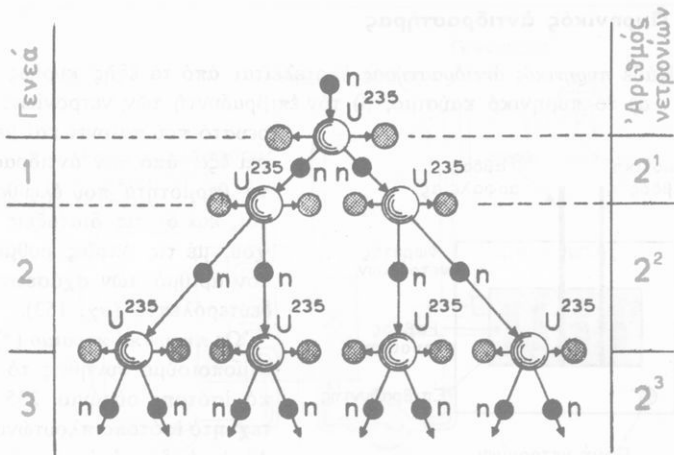
Τό άλλο σχάσιμο ισότοπο, δηλαδή τό ουράνιο 233, πού καί αυτό είναι μακρόβιο ($T = 163\ 000$ έτη), τό παίρνουμε βομβαρδίζοντας μέ νετρόνια τό φυσικό ισότοπο θόριο 232.

Σχηματικά ή παραγωγή του πλουτωνίου 239 καί του ουρανίου 233 έχει ως εξής:



119. Άλυσιδωτή αντίδραση

Κατά τη σχάση ενός πυρήνα ουρανίου 235 ελευθερώνονται δύο ως τρία νετρόνια. Άς δεχθούμε ότι μέσα σε μία μάζα ουρανίου 235 ελευθερώνονται 2 νετρόνια (πρώτη γενεά) από έναν πυρήνα ουρανίου που αρχικά διασπάται. Άν αυτά τά 2 νετρόνια συναντήσουν δύο πυρήνες ουρανίου

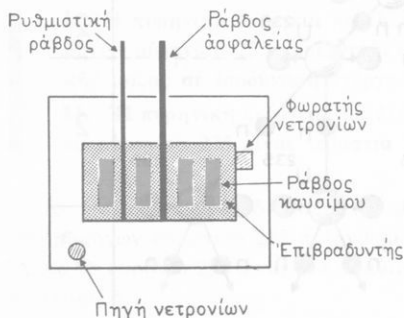


Σχ. 152. Άλυσιδωτή αντίδραση συμβαίνει, όταν τὰ νετρόνια κάθε γενεάς προκαλούν καινούριες σχάσεις πυρήνων ουρανίου 235.

235, θά προκαλέσουν δύο καινούριες σχάσεις καί τότε θά ελευθερωθούν 4 νετρόνια ή 2^2 νετρόνια (δεύτερη γενεά). Αὐτά τὰ 4 νετρόνια θά προκαλέσουν τέσσερις καινούριες σχάσεις καί ἔτσι θά σχηματιστοῦν 2^3 νετρόνια (τρίτη γενεά) κ.ο.κ. Ὡστε ἡ ἑβδομηκοστή γενεά θά ἀποτελεῖται ἀπό 2^{70} νετρόνια ($12 \cdot 10^{20}$ νετρόνια), πού θά προκαλέσουν ἰσάριθμες σχάσεις. Αὐτή ἡ αὐτοσυντηρούμενη πυρηνική ἀντίδραση ὀνομάζεται *άλυσιδωτή ἀντίδραση* (σχ. 152). Ὁ χρόνος πού μεσολαβεῖ μεταξύ δύο διαδοχικῶν γενεῶν νετρονίων εἶναι ἐλάχιστος (τῆς τάξεως τοῦ 10^{-9} sec). Ἐπομένως, οἱ παραπάνω ἑβδομήντα γενεές νετρονίων παράγονται μέσα σέ χρονικό διάστημα μικρότερο ἀπό τό ἕνα ἑκατομμυριοστό τοῦ δευτερολέπτου. Ἀλλά μέσα σέ αὐτό τό ἐλάχιστο χρονικό διάστημα ελευθερώνεται τεράστια ποσότητα ἐνέργειας, δηλαδή συμβαίνει *ἐκρηξη* (ἀτομική βόμβα). Ἄν ὁμως, μπορέσουμε νά ἐπιδράσουμε στήν ἐξέλιξη τῶν σχάσεων ἔτσι, ὥστε ἕπειτα ἀπό κάθε σχάση πυρήνα ουρανίου 235 *ἕνα καί μόνο νετρόνιο* νά προκαλεῖ καινούρια σχάση, τότε ὁ ἀριθμός τῶν σχάσεων διατηρεῖται *σταθερός* καί ἡ αλυσιδωτή ἀντίδραση εἶναι *ἐλεγχόμενη*. Αὐτό τό πετυχαίνουμε στόν *πυρηνικό ἀντιδραστήρα*.

120. Πυρηνικός αντιδραστήρας

Κάθε πυρηνικός αντιδραστήρας αποτελείται από τὰ ἑξῆς κυρίως στοιχεῖα : α) τὸ πυρηνικὸ καύσιμο, β) τὸν ἐπιβραδυντὴ τῶν νετρονίων, γ) τὸ ρευστὸ πού παίρνει καὶ μεταφέρει ἔξω ἀπὸ τὸν ἀντιδραστήρα τὴ θερμότητα πού ἐλευθερώνεται, καὶ δ) τίς διατάξεις ἐλέγχου, μέ τίς ὁποῖες ρυθμίζουμε τὸν ἀριθμὸ τῶν σχάσεων κατὰ δευτερόλεπτο (σχ. 153).



σχ. 153. Σχηματικὴ παράσταση πυρηνικοῦ ἀντιδραστήρα. Οἱ ράβδοι ἀσφάλειας καὶ ἐλέγχου εἶναι τελείως κατεβασμένες μέσα στὸν ἀντιδραστήρα, ἢ πηγή τῶν νετρονίων ἔχει ἀπομακρυνθεῖ ἀπὸ τὸ πυρηνικὸ καύσιμο καὶ ἐτσι ὁ ἀντιδραστήρας δὲν λειτουργεῖ.

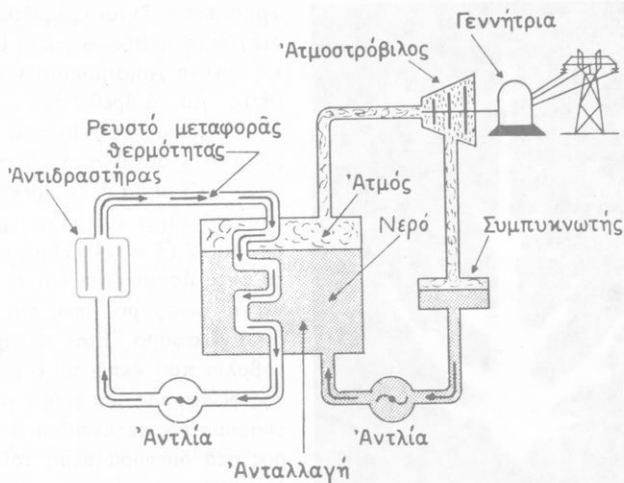
καθὼς ὁμως περνοῦν μέσα ἀπὸ τὸν ἐπιβραδυντὴ συγκρούονται μέ τὰ ἄτομα τοῦ ἐπιβραδυντὴ καὶ τελικὰ μεταβάλλονται σέ θερμικὰ νετρόνια. Τὸ πυρηνικὸ καύσιμο ἔχει τὴ μορφή ράβδων καὶ βυθίζεται μέσα στὸν ἐπιβραδυντὴ.

Ὡς ρευστὸ μεταφορᾶς τῆς θερμότητας χρησιμοποιεῖται ἕνα κατάλληλο ὑγρὸ ἢ ἀέριο, πού θερμαίνεται καὶ μεταφέρει ἔξω ἀπὸ τὸν ἀντιδραστήρα τεράστια ποσότητα θερμότητας. Αὐτὴ προκαλεῖ τὴν ἐξαέρωση νεροῦ. Οἱ ὕδατμοὶ πού παράγονται κινοῦν ἀτμοστρόβιλο (τουρμπίνα), ὁ ὁποῖος ἐξασφαλίζει τὴ λειτουργία μιᾶς γεννήτριας ἠλεκτρικοῦ ρεύματος (σχ. 154) ἢ τὴν κίνηση πλοίου.

Οἱ διατάξεις ἐλέγχου εἶναι ράβδοι ἀπὸ κάδμιο ἢ βόριο. Αὐτὰ τὰ δύο στοιχεῖα ἔχουν τὴν ιδιότητα νὰ ἀπορροφοῦν ἰσχυρὰ τὰ νετρόνια.

Σήμερα ὑπάρχουν διάφοροι τύποι πυρηνικῶν ἀντιδραστήρων. Οἱ ἀντιδραστήρες ἰσχύος χρησιμοποιοῦνται γιὰ τὴν παραγωγή ἠλεκτρικοῦ ρεύματος ἢ γιὰ τὴν κίνηση μεγάλων πλοίων καὶ ὑποβρυχίων. Οἱ ἀντιδραστή-

(*) Κατ' ἀναλογία μέ τίς κλασσικὲς πηγές παραγωγῆς θερμικῆς ἐνέργειας (γαϊάνθρακας, πετρέλαιο, γαιαέρια κ.ἄ.).



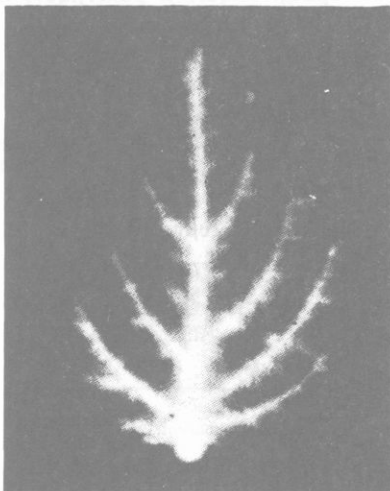
Σχ. 154. Σχηματική παράσταση εγκατάστασας που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνική ενέργεια.

ρες έρευνας χρησιμοποιούνται για επιστημονικές έρευνες. Τέτοιος αντιδραστήρας υπάρχει στο Έλληνικό Κέντρο Πυρηνικών Έρευνών «Δημόκριτος» και είναι τύπου «κολυμβητικής δεξαμενής», δηλαδή οι ράβδοι ουρανίου είναι βυθισμένες μέσα στο νερό, που είναι και ο επιβραδυντής.

121. Έφαρμογές των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων

Σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούμε τεχνητά ραδιοϊσότοπα, δηλαδή ραδιενεργά ισότοπα των φυσικών στοιχείων, π.χ. του ιωδίου, του νατρίου, του φωσφόρου, του χρυσού κ.ά. Συνήθως τά ραδιοϊσότοπα παρασκευάζονται με τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Τοποθετούμε τά φυσικά στοιχεία μέσα στον αντιδραστήρα και τότε οί πυρήνες βομβαρδίζονται με νετρόνια και μεταστοιχειώνονται σε ραδιενεργούς πυρήνες.

Ίχνηθέτες. Τά ραδιοϊσότοπα, με την άκτινοβολία που εκπέμπουν, δείχνουν την παρουσία τους και έτσι μπορούμε να παρακολουθήσουμε την πορεία ενός φαινομένου. Σ' αυτή την περίπτωση τά ραδιοϊσότοπα ονομάζονται *ίχνηθέτες*. Με αυτούς μπορούμε π.χ. να παρακολουθήσουμε τή ροή ενός ύγρου ή τή μετακίνηση τής άμμου σε έναν κόλπο κ.ά. Ίχνηθέτες χρησιμοποιούν και οί βιομηχανίες που κατεργάζονται μίγματα (όπως είναι τά υλικά του τσιμέντου, των λιπασμάτων, του γυαλιού κ.ά.). Στην ιατρική



Σχ. 155. Αυτόραδιογράφημα φύλλου έπειτα από τήν άφομοίωση του ραδιενεργού φωσφόρου.

χρησιμοποιούνται ίχνηθέτες για τή διάγνωση παθήσεων. Στή βιολογική έρευνα χρησιμοποιούνται ίχνηθέτες, για νά βρεθεί πώς κυκλοφορεί τό κάθε στοιχείο πού μπαίνει μέσα στόν όργανισμό. Άν π.χ. ένα φυτό μαζί μέ τά άλλα θρεπτικά συστατικά πάρει καί ραδιενεργό φωσφόρο 32 ($T = 14,3$ ήμέρες), τότε τό φυτό άφομοιώνει καί τό ραδιενεργό φωσφόρο, όπως καί τό φυσικό φωσφόρο. Έτσι μέ τήν άκτινοβολία πού εκπέμπει ό ραδιενεργός φωσφόρος μπορούμε νά μελετήσουμε πώς κατανέμεται ό φωσφόρος στά διάφορα μέρη του φυτού (σχ. 155).

Άρχαιολογικά εύρήματα, στήριζόμενα στή ραδιενέργεια του άνθρακα 14 (C^{14}) πού βρίσκεται στό διοξείδιο του άνθρακα τής άτμόσφαιρας καί έχει χρόνο ήμιζωής $T = 5600$ έτη. Ό άνθρακας 14 σχηματίζεται (*), όταν οί πυρήνες άζώτου (N^{14}) βομβαρδίζονται μέ νετρόνια των κοσμικών άκτινων. Ό άνθρακας 14 άφομοιώνεται από τά φυτά, όπως καί ό φυσικός άνθρακας 12.

Μετά τό θάνατο του όργανισμού ή ποσότητα του άνθρακα 14, πού περιέχεται στό σώμα του, μειώνεται με τήν ίδια ταχύτητα πού μειώνεται ή ποσότητα του άνθρακα 14 στή φύση. Έτσι από τό ρυθμό μέ τον όποιο τό ούράνιο 238 (U^{238}) μεταστοιχείωνεται τελικά σέ σταθερό μόλυβδο 206 (Pb^{206}) βρίσκουμε ότι ή πιθανή ήλικία τής Γης είναι 4,5 δισεκατομμύρια έτη καί ότι ό στερεός φλοιός τής Γης σχηματίστηκε πριν από 3,5 δισεκατομμύρια έτη.

Μετά τό θάνατο του όργανισμού ή ποσότητα του άνθρακα 14, πού

(*) Ό άνθρακας 14 σχηματίζεται καί μεταστοιχείωνεται ως εξής :



υπάρχει μέσα στά λείψανα του οργανισμού, αρχίζει νά ελαττώνεται σύμφωνα μέ τό νόμο τής ραδιενέργειας.

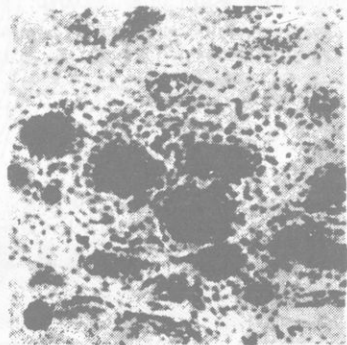
Βιομηχανικές εφαρμογές. Οί άκτινοβολίες πού έκπέμπουν τά ραδιοϊσότοπα, όταν περνούν μέσα από τά διάφορα υλικά, παθαίνουν *απορρόφηση*. Έτσι μπορούμε νά ελέγξουμε τό πάχος πού έχουν φύλλα ή πλάκες από αυτά τά υλικά (χαρτί, πλαστικές ύλες, νήματα κ.λ.) ή αν ένα υλικό έχει σταθερή πυκνότητα καί επομένως δέν περιέχει άλλα υλικά.

Μέ άκτίνες γ παίρνουμε πάνω σέ φωτογραφικές πλάκες ραδιογραφήματα κομματιών μετάλλων (*ραδιομεταλλογραφία*) καί εξετάζουμε τή δομή ενός υλικού (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.

Άποστείρωση καί ραδιοθεραπεία. Τά βιολογικά άποτελέσματα τών πυρηνικών άκτινοβολιών έχουν εφαρμογές στήν *άποστείρωση* καί τή *ραδιοθεραπεία*. Τό γάλα καί τό κρέας πού πρόκειται νά διατηρηθούν *άποστειρώνονται* μέ άκτίνες γ, οί όποιες σταματούν τίς ζυμώσεις, χωρίς νά καταστρέφουν τίς βιταμίνες. Οί άκτίνες γ εμποδίζουν τίς πατάτες νά βλαστήσουν καί έτσι μπορούν νά διατηρηθούν γιά πολλά χρόνια. Μέ τίς άκτίνες γ λύθηκε τό πρόβλημα τής άποστειρώσεως όρισμένων φαρμακευτικών προϊόντων καί ιδίως τών αντιβιοτικών.

Γιά τή *ραδιοθεραπεία* μέ άκτινοβολία άκτίνων 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. 156).

Πρόκληση μεταλλάξεων. Οί πυρηνικές άκτινοβολίες προκαλούν τροποποιήσεις στά γονίδια, πού είναι οί φορείς τών κληρονομικών ιδιοτήτων, καί έτσι προκαλούν *μεταλλάξεις*. Μέ αυτό τόν τρόπο δημιουργήθηκαν καινούριες ποικιλίες φυτών, πού έχουν νέες ιδιότητες (π.χ. άντέχουν περισσότερο στίς άσθένειες ή μπορούν νά

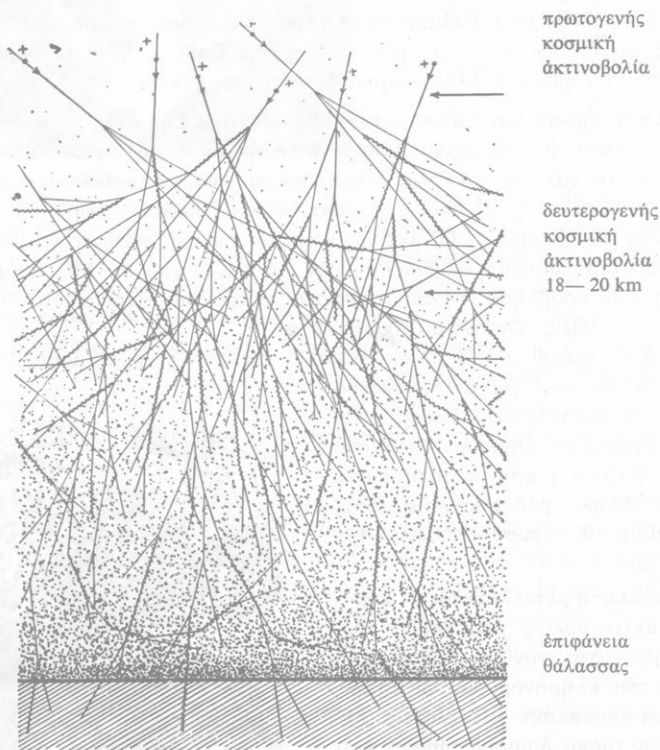


Σχ. 156. Συγκέντρωση του ιωδίου 131 στο έσωτερικό τών λοβών του θυρεοειδή άδένα.

άναπτυχθούν σε περισσότερο ψυχρά ή θερμά κλίματα). Ο νέος αυτός κλάδος της γενετικής δεν ξέρουμε τί μπορεί να μας δώσει στο μέλλον.

122. Κοσμικές ακτίνες

Ένα ηλεκτροσκόπιο που έχει θετικό ή αρνητικό φορτίο, όταν μείνει μέσα στον αέρα, χάνει τό φορτίο του, γιατί, όπως ξέρουμε, πάντοτε μέσα στον αέρα υπάρχουν ιόντα. Ο διαρκής ιονισμός του αέρα οφείλεται σε ακτινοβολίες που προέρχονται από τό κοσμικό διάστημα και ονομάζονται *κοσμικές ακτίνες* ή *κοσμική ακτινοβολία*. Στα ανώτατα στρώματα της



Σχ. 157. Σχηματική παράσταση της παραγωγής των δευτερογενών κοσμικών ακτίνων μέσα στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

ατμόσφαιρας φτάνουν από όλες τις διευθύνσεις οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες, που αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια (85%), υπάρχουν όμως σ' αυτές και ηλεκτρόνια, φωτόνια, σωματίδια α και μερικοί βαρύτεροι πυρήνες (άνθρακα, άζωτου, σιδήρου κ.ά.). Τα σωματίδια των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων έχουν συνήθως πολύ μεγάλη ενέργεια, που μπορεί να φτάσει ως 10^{10} GeV (ένώ με τους σύγχρονους επιταχυντές μας δίνουμε στα σωματίδια ενέργεια ως 400 GeV). Αυτή η ενέργεια συγκεντρωμένη πάνω σε ένα σωματίδιο είναι τεράστια.

Όταν ένα πρωτόνιο των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων μπει μέσα στην ατμόσφαιρα, το πρωτόνιο συγκρούεται με έναν πυρήνα αζώτου ή οξυγόνου. Τότε ο πυρήνας αυτός διαμελίζεται σε πολλά νουκλεόνια που έχουν μεγάλη ενέργεια και καθώς κατεβαίνουν μέσα στην ατμόσφαιρα προκαλούν καινούριες πυρηνικές αντιδράσεις. Ένα μεγάλο όμως μέρος από την ενέργεια που είχε το πρωτογενές πρωτόνιο μεταβάλλεται κατά τη σύγκρουσή του σε άσταθεις μορφές ύλης, που είναι μίονια και κυρίως πιόνια (*). Αυτά άμεσα διασπώνται και σχηματίζονται ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια γ. Έτσι στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας φτάνουν οι δευτερογενείς κοσμικές ακτίνες, που αποτελούνται από μίονια (75%), ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, νουκλεόνια, μερικά σωματίδια α και φωτόνια γ (σχ. 157).

Υπολογίζεται ότι κάθε δευτερόλεπτο σε κάθε τετραγωνικό εκατοστόμετρο της επιφάνειας της Γης φτάνει ένα κοσμικό σωματίδιο. Μερικά πρωτογενή κοσμικά σωματίδια που έχουν πάρα πολύ μεγάλη ενέργεια κατορθώνουν να φτάσουν ως την επιφάνεια της Γης (σχ. 158). Αυτά τα κοσμικά σωματίδια με την ενέργειά τους ίσως να εξασκοῦν επίδραση σε όρισμένα κύτταρα των οργανισμών.

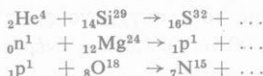
Οι κοσμικές ακτίνες βοήθησαν σημαντικά στην εξέλιξη της Πυρηνικής Φυσικής, γιατί στίς κοσμικές ακτίνες ανακαλύψαμε για πρώτη φορά το ποζιτρόνιο (Anderson 1932), και πολλά από τα άλλα στοιχειώδη σωματίδια (μίονια, πιόνια, υπερόνια) που ήταν άγνωστα ως τότε.

* Τά μίονια και τά πιόνια είναι άσταθι σωματίδια που αντίστοιχα έχουν μάζα 207 και 270 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

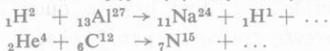
176. Ο ατομικός πυρήνας άζώτου ${}^7\text{N}^{14}$, όταν βομβαρδίζεται με νετρόνιο, μετασχηματίζεται εκπέμποντας δύο σωματίδια α. Νά γραφεί ή πυρηνική αντίδραση.

177. Νά συμπληρωθούν οι έπόμενες πυρηνικές αντιδράσεις :



178. Οι δύο τεχνητοί ραδιενεργοί πυρήνες ${}_{9}\text{F}^{20}$ και ${}_{28}\text{Ni}^{65}$ μετασχηματίζονται με έκπομπή ηλεκτρονίου, ενώ οι δύο τεχνητοί ραδιενεργοί πυρήνες ${}^7\text{N}^{13}$ και ${}_{19}\text{K}^{38}$ μετασχηματίζονται με έκπομπή ποζιτρονίου. Νά γραφούν οι αντιδράσεις τής μετασχηματισμού.

179. Νά συμπληρωθούν οι έξής πυρηνικές αντιδράσεις :



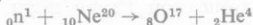
180. Νά βρεθεί πόση ένέργεια σε Joule έλευθερώνεται, όταν συμβαίνει ή έξής πυρηνική αντίδραση :



Ατομικές μάζες σε amu :



181. Νά βρεθεί πόση έξωτερική ενέργεια σε Joule άπορροφάται, όταν συμβαίνει ή έξής πυρηνική αντίδραση :



Ατομικές μάζες σε amu :



182. Όταν ο πυρήνας λιθίου ${}^7({}_3\text{Li}^7)$ βομβαρδίζεται με πρωτόνιο που έχει κινητική ενέργεια $E_p = 0,25$ MeV, τότε σχηματίζονται δύο σωματίδια α και τό καθένα από αυτά έχει τήν ίδια κινητική ενέργεια. Πόση κινητική ενέργεια E_α έχει τό κάθε σωματίδιο α; $\text{H}^1 = 1,007\ 825$ amu, $\text{Li}^7 = 7,016\ 004$ amu, $\text{He}^4 = 4,002\ 604$ amu

183. Στο σώμα του ανθρώπου υπάρχουν περίπου 0,3 gr ραδιενεργού καλίου ${}_{19}\text{K}^{40}$, 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 μετασχηματίζεται με έκπομπή ηλεκτρονίου. 1) Νά γραφεί ή έξιισωση τής διασπάσεως. 2) Πόσες διασπάσεις συμβαίνουν κάθε δευτερόλεπτο μέσα στο σώμα του ανθρώπου;

184. Τό ραδιενεργό βρώμιο ${}_{35}\text{Br}^{82}$ έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 36$ h. Από μιά άρχική μάζα βρωμίου έπειτα από πόσο χρονικό διάστημα θά έχει άπομείνει τό $1/32$ ή τό $1/2^{10}$ τής άρχικής μάζας m_0 ;

185. Ο ραδιενεργός φωσφόρος ${}_{15}\text{P}^{32}$ μετασχηματίζεται με έκπομπή ηλεκτρονίου και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 14$ ήμέρες. Με μιά κατάλληλη διάταξη (άπαριθμητή Geiger) βρίσκουμε ότι ένα διάλυμα φωσφόρου 32 εκπέμπει 1000 ηλεκτρόνια κατά λεπτό. Αν έπαναλάβουμε τό πείραμα έπειτα από χρονικό διάστημα $t = 28$ ήμέρες, πόσα ηλεκτρόνια θά καταμετρηθούν κατά λεπτό;

186. Κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα ουρανίου ^{235}U ελευθερώνεται ενέργεια 200 MeV. Πόση ενέργεια σε κιλοβατώρα ελευθερώνεται, όταν διασπώνται οι πυρήνες που υπάρχουν μέσα σε 1 gr ουρανίου; Πόσος είναι ο συντελεστής αποδόσεως σ' αυτή την περίπτωση; Πυρήνες ουρανίου $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr.

187. Κατά τη διάσπαση του πυρήνα ουρανίου ^{235}U σχηματίζονται δύο νέοι πυρήνες που ο καθένας έχει ατομικό αριθμό $Z = 92/2$ και ακτίνα $6 \cdot 10^{-15}$ m. Για μία στιγμή οι δύο νέοι πυρήνες βρίσκονται σε έπαφή. Πόση είναι τότε η άπωση που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο νέων πυρήνων;

188. Από τη διάσπαση του πυρήνα ουρανίου 235 μπορεί να σχηματιστούν άμεσως δύο σταθεροί πυρήνες, σύμφωνα με την αντίδραση :



1) Πόση ενέργεια σε MeV ελευθερώνεται, όταν συμβαίνει αυτή η αντίδραση;
2) Πόση ενέργεια σε Joule ελευθερώνεται κατά γραμμάριο ουρανίου;
 $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr.

Ατομικές μάζες σε amu :

$$n^1 = 1,009 \quad \text{U}^{235} = 235,044 \quad \text{Mo}^{98} = 97,905 \quad \text{Xe}^{136} = 135,917.$$

189. Κατά την έκρηξη μιάς βόμβας ουρανίου 235 ένας από τους νέους πυρήνες είναι ο ραδιενεργός πυρήνας ξένου $^{143}_{54}\text{Xe}$. Αυτός ο πυρήνας με διαδοχικές έκπομπές ενός ηλεκτρονίου μεταστοιχείωνεται τελικά σε σταθερό πυρήνα νεοδύμιου $^{143}_{60}\text{Nd}$. Νά γραφεί παραστατικά ή σειρά των διαδοχικών μεταστοιχειώσεων του αρχικού πυρήνα $^{143}_{54}\text{Xe}$.

190. Βρέθηκε ότι κατά την έκρηξη μιάς βόμβας ουρανίου 235 διασπώνται $n = 5 \cdot 10^{23}$ πυρήνες ουρανίου μέσα σε χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,001$ sec. 1) Πόση ενέργεια σε Joule ελευθερώνεται κατά την έκρηξη, αν από κάθε έναν πυρήνα ουρανίου ελευθερώνεται ενέργεια 200 MeV; 2) Πόση είναι κατά μέσο όρο η ισχύς που ελευθερώνεται;

191. Μιά μηχανή σιδηρόδρομο αναπτύσσει σταθερή ισχύ $P = 1200$ kW επί 10 ώρες. Η μηχανή κινείται με πυρηνικό αντιδραστήρα, που τροφοδοτείται με ούρανο 235 και έχει συντελεστή αποδόσεως $\eta = 0,20$. Πόση μάζα ουρανίου θα καταναλωθεί γι' αυτή τη διαδρομή; Πυρήνες ουρανίου $N = 2,55 \cdot 10^{21}$ πυρήνες/gr. Ένέργεια που ελευθερώνεται 180 MeV/πυρήνα.

192. Σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα τά 8/10 000 τής μάζας του ουρανίου 235 μετατρέπονται σε ισοδύναμη ενέργεια. Αν κάθε ημέρα ο αντιδραστήρας καταναλώνει 24 gr ουρανίου 235, πόση είναι η ισχύς του αντιδραστήρα.

193. Σε 1 gr ραδίου υπάρχουν $N_0 = 2,65 \cdot 10^{21}$ πυρήνες και η σταθερή διασπάσεως του ραδίου είναι :

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \quad \text{ή} \quad \lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

Πόσες διασπάσεις τό δευτερόλεπτο συμβαίνουν μέσα στη μάζα 1 gr ραδίου; Ποιά σχέση έχουν αυτές οι διασπάσεις με τη μονάδα έντασεως ραδιενέργειας 1 κιουρί (1 Ci);

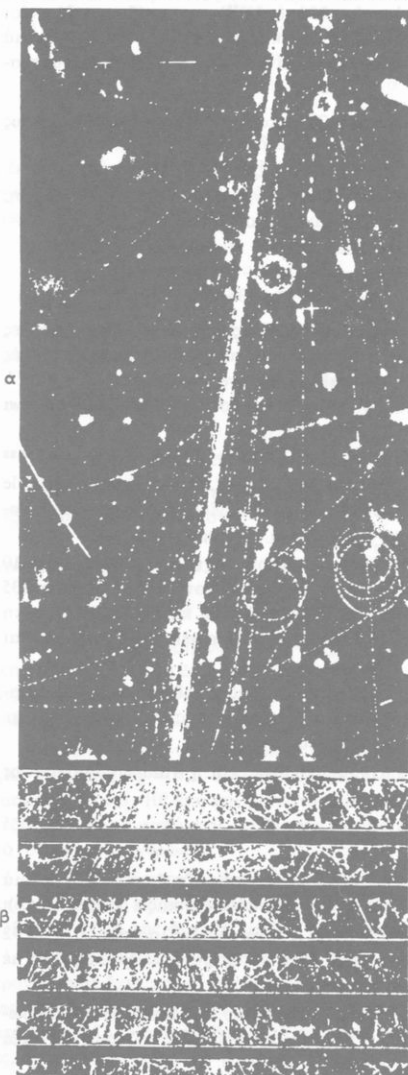
194. Τό ραδιενεργό κοβάλτιο $^{58}_{27}\text{Co}$ έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 72$ ημέρες. Πόση μάζα m από αυτό τό ραδιοϊσότοπο έχει ένταση ραδιενέργειας ίση με 1 μιλικιουρί (1 mCi); $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ άτομα/gr - άτομα.

195. Στη διάρκεια ενός δευτερολέπτου μιά μάζα ουρανίου 238 εκπέμπει 18 500 φωτατρία. Α πόση είναι σε μικροκιουρί (μCi) ή ένταση ραδιενέργειας γι' αυτή τη μάζα του ουρανίου;

196. Πόση μάζα m από ραδιενεργό κοβάλτιο 55 ($_{27}\text{Co}^{55}$) έχει ένταση ραδιενέργειας ίση με 10 μιλικιουρί (mCi); Χρόνος υποδιπλασιασμού $T = 18$ h.
 $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ άτομα/gr-atom.

197. Τό αίμα ενός άσθενή έχει όγκο 3500 cm^3 . Στο αίμα αυτού του άσθενή εισά-

γεται μιά ποσότητα ραδιενεργού φωσφόρου 32 ($_{15}\text{P}^{32}$) ή οποία έχει ένταση ραδιενέργειας $A = 5 \text{ mCi}$. Ο φωσφόρος 32 έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $T = 14$ ημέρες. Αν έπειτα από χρόνο $t = 28$ ημέρες πάρουμε από αυτόν τον άσθενή 1 cm^3 αίματος, πόσες διασπάσεις το δευτερόλεπτο θά βρούμε ότι συμβαίνουν;



Σχ. 158. Ένα πρωτογενές κοσμικό σωματίδιο με ενέργεια πολλών εκατομμυρίων MeV μπήκε μέσα στον πρώτο θάλαμο Wilson (α) και έπειτα μπήκε σε δεύτερο θάλαμο Wilson που είχε πολλές παράλληλες μεταλλικές πλάκες (β). Εκεί τό σωματίδιο διαμελίζοντας πυρηνές τών ατόμων του μετάλλου δημιούργησε πάρα πολλά σωματίδια και φωτόνια γ μεγάλης ενέργειας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Φυσικές σταθερές

Ταχύτητα φωτός στο κενό	c	$3 \cdot 10^8$ m/sec
Έπιτάχυνση βαρύτητας ($45^\circ, 0$ m)	g	9,80665 m/sec ²
Σταθερή Faraday	F	96 490 Cb/γραμμαίσοδύναμο
Σταθερή Planck	h	$6,6256 \cdot 10^{-34}$ Joule · sec
Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο	e	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Cb
Μονάδα ατομικής μάζας	1 amu	$1,6604 \cdot 10^{-27}$ kgr
Ήλεκτρονιοβόλτ	1 eV	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Joule
Άκτινα θεμελιώδους τροχιάς	r_1	$0,529 \cdot 10^{-10}$ m
Μαγνητική διαπερατότητα κενού	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A ²
Διηλεκτρική σταθερή κενού	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Cb ² /(N · m ²)

Μάζες ήρεμίας στοιχειωδών σωματιδίων

Ήλεκτρόνιο m_e	Πρωτόνιο m_p	Νετρόνιο m_n
0,000 548 amu	1,007 825 amu	1,008 665 amu
$9,109 \cdot 10^{-31}$ kgr	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kgr	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ kgr
0,511 MeV	938,26 MeV	939,55 MeV

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Οι 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
Ένέργεια	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 αγωγού	1 Ohm	1 Ω = 1 V/A
Συντελεστής αυτεπαγωγής	1 Henry	1 H = 1 V · sec/A = = 1 J/A ² = 1 Ω·sec
Ποσότητα μαγνητισμού	1 Ampère · m	1 A · m
Μαγνητική ροή	1 Weber	1 Wb = 1 V·sec = 1 J/A
Μαγνητική έπαγωγή	1 Tesla	1 T = 1 N/(A·m) = = 1 Wb/m ²
Μαγνητική ροπή	1 Ampère · m ²	1 A · m ²

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Τά ισότοπα των 30 πρώτων φυσικῶν στοιχείων

("Όσα σημειώνονται μέ μαύρα στοιχεία εἶναι φυσικά ἢ τεχνητά ραδιοϊσότοπα)

Z	Στοιχείο		Μαζικός ἀριθμός A
1	Ύδρογόνο	H	1 2 3
2	Ἡλιο	He	3 4 5 6
3	Λίθιο	Li	6 7 8 9
4	Βηρύλλιο	Be	7 8 9 10
5	Βόριο	B	9 10 11 12
6	Ἄνθρακας	C	10 11 12 13 14
7	Ἄζωτο	N	12 13 14 15 16 17
8	Ὄξυγόνο	O	14 15 16 17 18 19
9	Φθόριο	F	17 18 19 20
10	Νέο	Ne	19 20 21 22 23
11	Νάτριο	Na	21 22 23 24 25
12	Μαγνήσιο	Mg	23 24 25 26 27
13	Ἀργίλιο	Al	25 26 27 28 29
14	Πυρίτιο	Si	27 28 29 30 31
15	Φωσφόρος	P	29 30 31 32 33
16	Θεῖο	S	31 32 33 34 35 36 37
17	Χλώριο	Cl	33 34 35 36 37 38 39
18	Ἀργό	A	35 36 37 38 39 40 41
19	Κάλιο	K	37 38 39 40 41 42 43 44
20	Ἀσβέστιο	Ca	39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49
21	Σκάνδιο	Sc	40 41 43 44 45 46 47 48 49
22	Τιτάνιο	Ti	43 44 45 46 47 48 49 50 51
23	Βανάδιο	V	46 47 48 49 50 51 52
24	Χρόμιο	Cr	49 50 51 52 53 54 55
25	Μαγγάνιο	Mn	50 51 52 53 54 55 56 57
26	Σίδηρος	Fe	52 53 54 55 56 57 58 59
27	Κοβάλτιο	Co	54 55 56 57 58 59 60 61 62
28	Νικέλιο	Ni	57 58 59 60 61 63 63 64 65 66
29	Χαλκός	Cu	58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68
30	Ψευδάργυρος	Zn	62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Ἄρμονική ταλάντωση

Ἄρμονική ταλάντωση μεταλλικῆς σφαίρας. — Μελέτη τῆς ἄρμονικῆς ταλαντώσεως. — Ἄπλό ἔκκρεμές. — Ἀμείωτη καὶ φθίνουσα ταλάντωση. — Προβολή πάνω σέ σταθερό ἄξονα ἀνύσματος στρεφόμενου ὀμαλά. — Διαφορά φάσεως μεταξύ δύο ἄρμονικῶν ταλαντώσεων. — Ἐλεύθερη καὶ ἐξαναγκασμένη ταλάντωση. — Φυσικό ἔκκρεμές.	Σελ. 5
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Κύματα

Διάδοση ἐνέργειας μέ κύματα. — Ἐγκάρσια καὶ διαμήκη κύματα. — Μῆκος κύματος καὶ ἐξίσωση τῶν κυμάτων. — Διάδοση τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας μέσα στήν ὕλη. — Κύματα στό χῶρο καὶ στήν ἐπιφάνεια ὕγρου. — Ἀνάκλαση καὶ διάθλαση τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας. Συμβολή τῶν κυμάτων. — Περίθλαση τῶν κυμάτων. — Στάσιμα κύματα.	25
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Ἦχητικά κύματα

Παραγωγή τοῦ ἤχου. — Διάδοση τοῦ ἤχου. — Εἶδη ἤχων. — Ἀνάκλαση τῶν ἡχητικῶν κυμάτων. — Διάθλαση τῶν ἡχητικῶν κυμάτων. — Περίθλαση τῶν ἡχητικῶν κυμάτων. — Συμβολή τῶν ἡχητικῶν κυμάτων. — Ἔνταση τοῦ ἤχου.	43
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Φυσιολογικά χαρακτηριστικά τοῦ ἤχου

Φυσιολογικά χαρακτηριστικά τῶν μουσικῶν ἤχων. — Ὑψος τοῦ ἤχου. — Ἀκουστότητα ἢ ἔνταση τοῦ ἀκουστικοῦ αἰσθήματος. — Χροιά τοῦ ἤχου. — Ὑπέρηχοι.	56
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Πηγές τῶν μουσικῶν ἤχων

Μουσικοί ἤχοι. — Χορδές. — Συντονισμός δύο ἡχητικῶν πηγῶν. — Ἀντηχία. — Ἦχητικοὶ σωλῆνες.	61
------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ΟΠΤΙΚΗ

Κυματική φύση τοῦ φωτός

Φυσική Ὀπτική. — Θεωρία τῆς ἐκπομπῆς. — Θεωρία τῶν κυμάτων ἐλαστικότητας. — Ἡ φύση τοῦ φωτός. — Συμβολή τοῦ φωτός. — Περί-	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

θλαση τοῦ φωτός. — Πόλωση τοῦ φωτός.	70
-------------------------------------------	----

Φάσματα ἐκπομπῆς καὶ ἀπορροφῆσεως

Φάσματα ἐκπομπῆς. — Φάσματα ἀπορροφῆσεως. — Φωταύγεια. — Τό χρώμα τοῦ οὐρανοῦ.	82
-------------------------------------------------------------------------------------	----

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Ἐπαγωγικά ρεύματα

Ἐπαγωγή. — Ἐπαγωγικά ρεύματα. — Ἐνταση τοῦ ἐπαγωγικοῦ ρεύματος. — Ἀμοιβαία ἐπαγωγή. — Αὐτεπαγωγή. — Ἐπαγωγικό πηνίο.	89
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Ἐναλλασσόμενο ρεύμα

Ἐξισώσεις τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἀποτελέσματα τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἐνεργός ἔνταση ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἐνεργός τάση. — Ὁ νόμος τοῦ Ohm σέ κύκλωμα μέ ὠμική ἀντίσταση. — Μέση ἰσχύς τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Τριφασικό ρεύμα. — Ἡ μεταφορά τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. — Μετασχηματιστής. — Ἀνόρθωση τοῦ ἐναλλασσόμενου ρεύματος. — Ἡλεκτρικές μηχανές.	102
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων

Ἡ ἀγωγιμότητα τῶν ἀερίων. — Ἡλεκτρικές ἐκκενώσεις μέσα σέ ἀραιωμένα ἀέρια. — Καθοδικές ἀκτίνες. — Θετικές ἀκτίνες.	129
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Ἀγωγιμότητα στό κενό

Ἡ ἀγωγιμότητα στό κενό. — Σωλήνας Braun. — Ἀκτίνες Röntgen. — Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. — Ἡχητικός κινηματογράφος.	140
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Ἡλεκτρομαγνητικά κύματα

Ἡλεκτρικές ταλαντώσεις. — Παραγωγή ἠλεκτρικῶν ταλαντώσεων. — Παλλόμενο ἠλεκτρικό δίπολο. — Ἐκπομπή ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. — Ἡλεκτρομαγνητική ἀκτινοβολία. — Ραδιοηλεκτρονικότητες. — Πομπές ἔρτζιανῶν κυμάτων. — Δέκτης ἔρτζιανῶν κυμάτων. — Διάδοση τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. — Τηλεόραση.	158
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Εἰσαγωγή

Ἡ θεωρία τῶν κβάντα. — Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας.	177
--------------------------------------------------------	-----

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Τά ηλεκτρόνια του ατόμου

Άτομική θεωρία του Δημόκριτου. — Μονάδα ατομικής μάζας. — Το άτομο και ό πυρήνας του. — Δομή του ατόμου. 181

Συνθήκες του Bohr

Στοιχειώδης μελέτη του ατόμου υδρογόνου. — Άτομα με πολλά ηλεκτρόνια. — Περιοδικό σύστημα των στοιχείων. 190

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ο ατομικός πυρήνας

Πυρηνική Φυσική. — Ίσότοποι και ισοβαρείς πυρήνες. — Έλλειμμα μάζας και ενέργεια συνδέσεως. 198

Φυσική ραδιενέργεια

Ραδιενέργεια. — Φύση της ακτινοβολίας των ραδιενεργών στοιχείων. — Φυσική μεταστοιχείωση. — Τό ποζιτρόνιο. — Εξήγηση της έκπομπής των ακτινοβολιών. — Νόμος της ραδιενέργειας. — Βιολογικά αποτελέσματα των πυρηνικών ακτινοβολιών. — Οί σειρές των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων. — Η μελέτη των πυρηνικών ακτινοβολιών. 202

Πυρηνικές αντιδράσεις

Πυρηνικές αντιδράσεις. — Τά υπερουράνια στοιχεία. — Σχάση των βαριών πυρήνων. — Σχάση του πυρήνα ουρανίου 235. — Άλυσιδωτή αντίδραση. — Πυρηνικός αντιδραστήρας. — Έφαρμογές των τεχνητών ραδιοισοτόπων. — Κοσμικές ακτίνες. 215

Πίνακες

1. Φυσικές σταθερές. — 2. Οί κυριότερες μονάδες του συστήματος MKSA. — 3. Τά ισότοπα των 30 πρώτων φυσικών στοιχείων. 233

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ (ΙΤΥΣΣΕ)

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ (ΙΤΥΣΣΕ)

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ (ΙΤΥΣΣΕ)

«Τά αντίτυπα του βιβλίου φέρουν τό κάτωθι βιβλιοσήμε για απόδειξη τής γνησιότητας αὐτῶν.

Ἐντίτυπο στερούμενο του βιβλιοσήμε τουτού θεωρεῖται κλεψίτυπο. Ὁ διαθέτων, πωλῶν ἢ χρησιμοποιῶν αὐτό διώκεται κατά τῆς διατάξεις του ἄρθρου 7 του Νόμου 1129 τῆς 15/21 Μαρτίου 1946 (Ἐφ. Κυβ. 1946, Α' 108)».

ΔΩΡΕΑΝ.



024000029856

ΕΚΔΟΣΗ ΙΘ', Κ', 1979 (VII) — ΑΝΤΙΤΥΠΑ 100.000 ΣΥΜΒΑΣΗ 3257 / 17 - 7 - 79

ΣΤΟΙΧΕΙΟΘΕΣΙΑ: Γ. ΤΣΙΒΕΡΙΩΤΗΣ Ε.Π.Ε. — ΕΚΤΥΠΩΣΗ: Α. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ
ΒΙΒΛΙΟΔΕΣΙΑ: Δ. ΒΑΣΙΛΑΚΟΥ & ΣΙΑ Ο.Ε.



Ψηφιοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής