

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ – ΑΓΩΓΙΜΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ

Διδάσκων: Κ. Ι. Παπαχρήστου

\* Όλες οι παραπομπές αναφέρονται στο βιβλίο

«ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ  
ΚΑΙ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΑΓΩΓΙΜΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ»

### 1. ΑΓΩΓΙΜΑ ΣΤΕΡΕΑ

1. Περιγράψτε το ατομικό μοντέλο που πρότεινε ο Rutherford για το άτομο του υδρογόνου. Ποια θεωρητικά προβλήματα παρουσιάζει το μοντέλο αυτό;

*Απάντηση:* Ο Rutherford έκανε την υπόθεση ότι το άτομο του υδρογόνου αποτελείται από έναν θετικά φορτισμένο πυρήνα (το πρωτόνιο) γύρω από τον οποίο κινείται κυκλικά το ηλεκτρόνιο με σταθερό μέτρο ταχύτητας και σε αυθαίρετες τροχιές. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει δύο θεωρητικά προβλήματα: (α) Δεν εξηγεί την *ευστάθεια* του ατόμου: Το κυκλικά κινούμενο ηλεκτρόνιο έχει κεντρομόλο επιτάχυνση, αφού αλλάζει συνεχώς η διεύθυνση της ταχύτητάς του. Σύμφωνα, όμως, με την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, κάθε επιταχυνόμενο ηλεκτρικό φορτίο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χάνοντας έτσι συνεχώς ενέργεια. Το αποτέλεσμα θα ήταν να πέσει το ηλεκτρόνιο μέσα στον πυρήνα και το άτομο να καταρρεύσει! Κάτι τέτοιο (ευτυχώς) δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, αφού τα άτομα είναι ευσταθείς δομές. (β) Το μοντέλο δεν εξηγεί επίσης την *γραμμικότητα του φάσματος εκπομπής* του ατόμου. Δηλαδή, τον λόγο για τον οποίο το υδρογόνο (όπως και όλα, γενικά, τα άτομα) δεν εκπέμπει όλες τις συχνότητες ακτινοβολίας αλλά πολύ συγκεκριμένες, χαρακτηριστικές για το άτομο.

2. Περιγράψτε το μοντέλο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου. Πώς το μοντέλο αυτό εξηγεί την γραμμικότητα του φάσματος εκπομπής του υδρογόνου; Σχεδιάστε τις ενεργειακές στάθμες του ατόμου.

*Απάντηση:* Ο Bohr υπέθεσε ότι το ηλεκτρόνιο του ατόμου δεν επιτρέπεται να κινείται σε αυθαίρετες κυκλικές τροχιές αλλά μόνο σε πολύ συγκεκριμένες. Κάθε τροχιά χαρακτηρίζεται από μία καθορισμένη τιμή της ενέργειας που γίνεται μεγαλύτερη καθώς πηγαίνουμε από τις μικρότερες προς τις μεγαλύτερες τροχιές. Στις τροχιές αυτές το ηλεκτρόνιο (και το άτομο στο σύνολό του) δεν ακτινοβολεί. Όταν όμως το ηλεκτρόνιο μεταπέσει από μία τροχιά υψηλότερης ενέργειας  $E_1$  σε μία τροχιά μικρότερης ενέργειας  $E_2$ , τότε το άτομο εκπέμπει ενέργεια στη μορφή ενός φωτονίου. Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ισούται με  $f = \Delta E/h$ , όπου  $\Delta E = E_1 - E_2$  η διαφορά ενέργειας μεταξύ της αρχικής και της τελικής τροχιάς, και όπου  $h$  η σταθερά του Planck. Επειδή το πλήθος των δυνατών μεταπτώσεων του ηλεκτρονίου είναι *διακριτό*, το ίδιο θα ισχύει και για το σύνολο των εκπεμπόμενων συχνοτήτων  $f$ , πράγμα που εξηγεί την γραμμικότητα του φάσματος εκπομπής του ατόμου.

Οι *ενεργειακές στάθμες* του ατόμου του υδρογόνου παρίστανται σχηματικά στη σελ. 7. Κάθε στάθμη αντιστοιχεί σε μία επιτρεπτή τροχιά του ηλεκτρονίου και σε μία αντίστοιχη επιτρεπτή τιμή της ενέργειας  $E$  του ατόμου.

3. Περιγράψτε συνοπτικά τη δομή ενός ατόμου με δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Τι ονομάζουμε *κατάσταση* ενός ηλεκτρονίου του ατόμου; Τι αναφέρει η *απαγορευτική αρχή του Pauli*; Ποιο φυσικό μέγεθος είναι κοινό για όλα τα ηλεκτρόνια μίας υποστοιβάδας;

*Απάντηση:* Τα ηλεκτρόνια του ατόμου κατανέμονται σε *στοιβάδες* και *υποστοιβάδες*. Η πρώτη στοιβάδα έχει μία μόνο υποστοιβάδα, η δεύτερη στοιβάδα έχει δύο υποστοιβάδες, η τρίτη στοιβάδα έχει τρεις υποστοιβάδες, κ.ο.κ. Σαν κανόνας, η τελευταία στοιβάδα δεν επιτρέπεται να έχει περισσότερα από 8 ηλεκτρόνια.

Κάθε ηλεκτρόνιο του ατόμου χαρακτηρίζεται από καθορισμένες (*κβαντισμένες*) τιμές φυσικών μεγεθών όπως η στροφορμή, η ιδιοστροφορμή (*spin*) και η ενέργεια. Το σύνολο των τιμών αυτών αποτελεί μία *κατάσταση* για το ηλεκτρόνιο. Σύμφωνα με την *απαγορευτική αρχή του Pauli*, σε ένα άτομο δεν επιτρέπεται να υπάρχουν δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια που να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι κάθε υποστοιβάδα χωρά έναν καθορισμένο, μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων.

Όλα τα ηλεκτρόνια μίας υποστοιβάδας έχουν την ίδια ενέργεια, δηλαδή καταλαμβάνουν την ίδια *ενεργειακή στάθμη* στο ενεργειακό διάγραμμα του ατόμου (σελ. 11). Οι ενεργειακές στάθμες αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες (*κβαντισμένες*) τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων του ατόμου.

4. Πώς εξηγείται η τάση των ατόμων να συνενώνονται ώστε να σχηματίσουν μόρια; Να συγκριθούν οι ενεργειακές στάθμες ενός διατομικού μορίου με τις ενεργειακές στάθμες των ατόμων που το αποτελούν, σχεδιάζοντας και το σχετικό ενεργειακό διάγραμμα. Πώς τροποποιείται το διάγραμμα αν έχουμε ένα τριατομικό μόριο; Ένα μόριο με  $N$  όμοια άτομα (όπου  $N > 1$ );

*Απάντηση:* Τα άτομα σχηματίζουν μόρια γιατί αυτό είναι ενεργειακά σύμφερο: η ενέργεια του μορίου είναι μικρότερη από την ολική ενέργεια των μεμονωμένων ατόμων που το απαρτίζουν.

Κατά τον σχηματισμό ενός διατομικού μορίου, από κάθε ατομική ενεργειακή στάθμη προκύπτουν *τουλάχιστον δύο* (μπορεί και περισσότερες) μοριακές στάθμες (βλ. διάγραμμα στη σελ. 12). Στην περίπτωση τριατομικού μορίου, από κάθε ατομική στάθμη προκύπτουν *τουλάχιστον τρεις* μοριακές στάθμες. Γενικά, σε ένα  $N$ -ατομικό μόριο έχουμε *τουλάχιστον  $N$*  μοριακές στάθμες για κάθε ατομική στάθμη.

5. Γιατί στους κρυστάλλους των στερεών παρατηρούνται *ενεργειακές ζώνες*, αντί για τις διακριτές ενεργειακές στάθμες που χαρακτηρίζουν τα άτομα και τα μόρια; Τι είναι οι ζώνες *σθένους* και *αγωγιμότητας*; Τι είναι η *απαγορευμένη ζώνη* και το *ενεργειακό χάσμα*;

*Απάντηση:* Όπως γνωρίζουμε, κατά τον σχηματισμό ενός  $N$ -ατομικού μορίου κάθε ατομική ενεργειακή στάθμη διαχωρίζεται σε (τουλάχιστον)  $N$  μοριακές στάθμες. Ο κρύσταλλος, τώρα, είναι μία δομή με ασύλληπτα μεγάλο αριθμό ατόμων. Έτσι, κατά τον σχηματισμό του κρυστάλλου κάθε ατομική ενεργειακή στάθμη διαχωρίζεται σε ένα τεράστιο πλήθος κρυσταλλικών σταθμών που είναι τόσο κοντά η μία στην άλλη ώστε να μην ξεχωρίζουν μεταξύ τους. Αυτό που προκύπτει, λοιπόν, είναι μία *συνεχής ενεργειακή ζώνη*, από κάθε ατομική ενεργειακή στάθμη (βλ. σχήμα, σελ. 15).

Αν η τελευταία κατειλημμένη ζώνη του κρυστάλλου είναι *μερικώς συμπληρωμένη* από ηλεκτρόνια (δηλ., όχι πλήρης), η ζώνη αυτή λέγεται *ζώνη αγωγιμότητας*. Αν όμως η τελευταία ζώνη είναι *πλήρως κατειλημμένη* από ηλεκτρόνια, τότε λέγεται

ζώνη σθένους ενώ η επόμενη, κενή ζώνη ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας. Η ενεργειακή περιοχή ανάμεσα στις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας δεν επιτρέπεται να περιέχει ηλεκτρόνια, γι' αυτό ονομάζεται *απαγορευμένη ζώνη*, και το ενεργειακό εύρος της καλείται *ενεργειακό χάσμα*. (Βλ. σχήματα, σελ. 16.)

6. Να περιγραφεί η δομή των ενεργειακών ζωνών στα μέταλλα (αγωγούς), τους μονωτές και τους ημιαγωγούς. Πώς η δομή αυτή εξηγεί τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κρυστάλλου σε κάθε περίπτωση;

*Απάντηση:* Στα μέταλλα η τελευταία κατειλημμένη ζώνη είναι *μερικώς συμπληρωμένη* από ηλεκτρόνια, δηλαδή είναι *ζώνη αγωγιμότητας*. Από φυσική άποψη αυτό σημαίνει ότι τα *ελεύθερα ηλεκτρόνια* του μετάλλου μπορούν να παίρνουν ενέργεια από ένα ηλεκτρικό πεδίο και να δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι, το μέταλλο είναι *ηλεκτρικά αγώγιμο*.

Στους μονωτές η τελευταία κατειλημμένη ζώνη είναι *πλήρης* από ηλεκτρόνια (είναι, δηλαδή, *ζώνη σθένους*) ενώ το *ενεργειακό χάσμα* (η ενεργειακή απόσταση ανάμεσα στην πλήρη ζώνη σθένους και την κενή ζώνη αγωγιμότητας) είναι μεγάλο. Από φυσική άποψη αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων του κρυστάλλου μένουν στις θέσεις τους και δεν σχηματίζουν ηλεκτρικό ρεύμα κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

Στους ημιαγωγούς υπάρχει και πάλι μία πλήρης ζώνη σθένους και μία κενή ζώνη αγωγιμότητας, όμως το ενεργειακό χάσμα (η απόσταση μεταξύ τους) είναι *σχετικά μικρό*. Έτσι, ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους μπορούν εύκολα να ανυψώνονται ενεργειακά στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω τους κενές θέσεις (*οπές*) στη ζώνη σθένους. Η αγωγιμότητα του κρυστάλλου οφείλεται στα *αρνητικά* φορτισμένα ηλεκτρόνια και τις *θετικά* φορτισμένες οπές.

7. Ποιοι είναι οι φορείς αγωγιμότητας στα μέταλλα, και ποιοι στους ημιαγωγούς; Ποιες ενεργειακές ζώνες καταλαμβάνουν οι φορείς αυτοί σε κάθε περίπτωση;

*Απάντηση:* Στα μέταλλα η αγωγιμότητα οφείλεται στα *ελεύθερα ηλεκτρόνια*, τα οποία καταλαμβάνουν ενεργειακές στάθμες της *ζώνης αγωγιμότητας*.

Η αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς οφείλεται στα *ηλεκτρόνια* της *ζώνης αγωγιμότητας* και τις *θετικά φορτισμένες οπές* της *ζώνης σθένους*. Στην ουσία, μία οπή είναι ένας «σπασμένος» (ατελής) ομοιοπολικός δεσμός που προκύπτει κατά την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους από ένα άτομο του κρυστάλλου, έτσι ώστε το ηλεκτρόνιο να κινείται πλέον ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο. Από ενεργειακή άποψη, το ηλεκτρόνιο ανυψώνεται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω του μία κενή θέση (οπή) στη ζώνη σθένους.

8. Να γραφεί η γενική μορφή του νόμου του Ohm για ένα μέταλλο και έναν ημιαγωγό, και να δοθούν οι αντίστοιχες εκφράσεις της ειδικής αγωγιμότητας. Να γραφεί η ειδική μορφή του νόμου του Ohm για ένα μεταλλικό σύρμα σταθερής διατομής.

*Απάντηση:* Μέταλλο - μεταλλικό σύρμα: Βλ. Παρ. 2.4, σελ. 28, σχέσεις (2.5), (2.6), (2.9). Ημιαγωγός: Βλ. Παρ. 2.5, σελ. 30, σχέσεις (2.13)-(2.15).

9. Τι αποτέλεσμα έχει η αύξηση της θερμοκρασίας στην αγωγιμότητα των μετάλλων και των ημιαγωγών; Εξηγήστε.

*Απάντηση:* Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί *ελάττωση* της αγωγιμότητας των μετάλλων και *αύξηση* της αγωγιμότητας των ημιαγωγών. Στα μέταλλα η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα να γίνονται πιο έντονες οι ταλαντώσεις των ιόντων στο κρυσταλλικό πλέγμα και έτσι να δυσχεραίνεται η κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Στους ημιαγωγούς η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα να απελευθερώνονται περισσότερα ηλεκτρόνια από τα άτομα στα οποία ανήκουν και έτσι να αυξάνει το πλήθος τόσο των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας, όσο και των οπών της ζώνης σθένους.

10. (α) Πότε ένας ημιαγωγός λέγεται *καθαρός*; Ποια σχέση υπάρχει ανάμεσα στις συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών σε αυτόν; (β) Ποια είδη *ημιαγωγών προσμείξεως* υπάρχουν; Τι καλούμε *φορείς πλειονότητας* και *φορείς μειονότητας* σε κάθε περίπτωση;

*Απάντηση:* (α) Ένας ημιαγωγός είναι καθαρός όταν δεν έχει υποστεί προσμείξεις. Σε καθαρό ημιαγωγό η συγκέντρωση  $n$  των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας είναι ίση με την συγκέντρωση  $p$  των οπών της ζώνης σθένους:  $n=p=n_i$ , όπου  $n_i$  η *αυτογενής πυκνότητα* του ημιαγωγού. (β) Βλ. Παρ. 2.7, σελ. 33-34.

11. Να διατυπωθεί ο *νόμος δράσεως των μαζών* για έναν ημιαγωγό. Με βάση αυτόν τον νόμο, να εξηγηθεί γιατί μία πρόσμειξη σε καθαρό ημιαγωγό επιφέρει αύξηση της αγωγιμότητας του κρυστάλλου.

*Απάντηση:* Βλ. Παρ. 2.8, σελ. 35-36.

12. Ποια φυσική πληροφορία μάς δίνει η τιμή της *ενέργειας Fermi* για την ενεργειακή κατανομή των ελεύθερων ηλεκτρονίων ενός μετάλλου σε απόλυτη θερμοκρασία  $T=0$ ; Από ποια φυσική ιδιότητα εξαρτάται η τιμή της ενέργειας Fermi του μετάλλου;

*Απάντηση:* Όπως γνωρίζουμε, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου (στα οποία οφείλεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα) καταλαμβάνουν ενεργειακές στάθμες μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας. Επειδή θεωρούμε ότι στα ηλεκτρόνια αυτά δεν ασκούνται δυνάμεις, η δυναμική ενέργειά τους είναι μηδέν και, επομένως, η ολική ενέργειά τους  $E$  είναι *κινητική*. Αυτό σημαίνει ότι  $E \geq 0$ . Τώρα, σε απόλυτη θερμοκρασία  $T=0$  τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας καταλαμβάνουν όλες τις ενεργειακές στάθμες από  $E=0$  έως  $E=E_F$ , όπου  $E_F$  η ενέργεια Fermi του μετάλλου (βλ. σχήμα στη σελ. 51). Δηλαδή, κανένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο δεν έχει κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από  $E_F$ . Έτσι, η ενέργεια Fermi ενός μετάλλου παριστά την *μέγιστη κινητική ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων σε απόλυτη θερμοκρασία  $T=0$* . (Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ένα μέρος των ηλεκτρονίων αποκτά κινητικές ενέργειες που υπερβαίνουν την  $E_F$ .)

Η τιμή της ενέργειας Fermi εξαρτάται από την *ηλεκτρονική πυκνότητα  $n$* , δηλαδή, την *συγκέντρωση* των ελευθέρων ηλεκτρονίων του μετάλλου (αριθμός ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου του μετάλλου) και είναι πρακτικά ανεξάρτητη της θερμοκρασίας.

13. Πού τοποθετείται στο διάγραμμα ενεργειακών ζωνών η στάθμη Fermi ενός καθαρού ημιαγωγού; Πώς τροποποιείται η θέση της στάθμης αυτής στο διάγραμμα αν κάνουμε πρόσμειξη τύπου  $n$  ή τύπου  $p$ ; Να σχεδιαστούν τα ενεργειακά διαγράμματα για κάθε περίπτωση.

*Απάντηση:* Η στάθμη Fermi ενός καθαρού ημιαγωγού τοποθετείται στο μέσο, ακριβώς, της απαγορευμένης ζώνης. Σε ημιαγωγό τύπου  $n$  μετατοπίζεται προς τη ζώνη αγωγιμότητας, ενώ σε ημιαγωγό τύπου  $p$  μετατοπίζεται προς τη ζώνη σθένους. Βλ. σχετικά ενεργειακά διαγράμματα στις σελ. 54 και 55.

## 2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

14. Να γραφεί ο νόμος του Coulomb και να οριστεί η έννοια ενός ηλεκτρικού πεδίου. Να υπολογιστεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από ένα σημειακό φορτίο  $q$ , σε απόσταση  $r$  από το φορτίο αυτό. Τι καλούμε ηλεκτροστατικό πεδίο;

*Απάντηση:* Ο νόμος του Coulomb δίνεται από τη σχέση (5.1), σελ. 69. Η έννοια του ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται στη σελ. 69, και η ένταση του πεδίου δίνεται από τη σχέση (5.2). Η ένταση του πεδίου που παράγεται από σημειακό φορτίο  $q$  υπολογίζεται στη σελ. 70 και δίνεται από τη σχέση (5.3). Ηλεκτροστατικό πεδίο είναι το χρονικά σταθερό πεδίο που παράγεται από ένα σύστημα ακίνητων φορτίων.

15. Να δοθεί η έκφραση του δυναμικού  $V(r)$  του πεδίου Coulomb που παράγεται από σημειακό φορτίο  $q$ , σε απόσταση  $r$  από το φορτίο αυτό. Ποιες είναι οι ισοδυναμικές επιφάνειες του πεδίου; Ποια είναι η μορφή των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών, και ποια είναι η γεωμετρική σχέση των γραμμών αυτών με τις ισοδυναμικές επιφάνειες;

*Απάντηση:* Το δυναμικό του πεδίου Coulomb δίνεται από τη σχέση (5.18), σελ. 77. Παρατηρούμε ότι το  $V(r)$  παίρνει σταθερή τιμή για σταθερό  $r$ , δηλαδή, έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σημεία μιας σφαιρικής επιφάνειας ακτίνας  $r$ , όπου  $r$  η απόσταση από το σημειακό φορτίο  $q$ . Άρα, οι ισοδυναμικές επιφάνειες του πεδίου Coulomb είναι σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το φορτίο από το οποίο παράγεται το πεδίο.

Οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές του πεδίου είναι ευθείες γραμμές που ξεκινούν ακτινικά από το  $q$  και τέμνουν κάθετα τις σφαιρικές ισοδυναμικές επιφάνειες. (Σχεδιάστε τις δυναμικές γραμμές και τις ισοδυναμικές επιφάνειες.)

16. Έστω μεταλλικός αγωγός, στο εσωτερικό και την επιφάνεια του οποίου τα ηλεκτρικά φορτία είναι ακίνητα. (α) Με τι ισούται το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού; Τι διεύθυνση έχει το πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού; (β) Με τι ισούται το ολικό φορτίο στο εσωτερικό του αγωγού; (γ) Πώς μεταβάλλεται το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό και στην επιφάνεια του αγωγού;

*Απάντηση:* (α) Στο εσωτερικό του αγωγού το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν, ενώ στην επιφάνεια του αγωγού το πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια. (β) Ηλεκτρικό φορτίο διάφορο του μηδενός μπορεί να υπάρχει μόνο στην επιφάνεια του αγωγού. Έτσι, το ολικό φορτίο στο εσωτερικό του αγωγού είναι μηδέν. (γ) Το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου είναι σταθερό σε όλο τον χώρο που καταλαμβάνει ο αγωγός. Άρα,

το δυναμικό δεν μεταβάλλεται αν μετακινηθούμε από ένα σημείο του αγωγού σε ένα άλλο, όπου κι αν βρίσκονται τα σημεία αυτά (στο εσωτερικό ή στην επιφάνεια του μετάλλου). Βλ. και σχήμα στη σελ. 81.

17. Τι ονομάζουμε *πυκνωτή*; Με ποια γενική έκφραση ορίζεται η χωρητικότητά του;

*Απάντηση:* Βλ. τελευταία παράγραφο στη σελ. 81. Η χωρητικότητα του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση (5.30).

18. Πώς παράγεται και πάνω σε τι επιδρά ένα μαγνητικό πεδίο; Ποια έκφραση δίνει την δύναμη που ασκεί το πεδίο σε ένα ηλεκτρικό φορτίο; Πώς μεταβάλλεται το *μέτρο* της ταχύτητας του φορτίου κατά την κίνησή του μέσα στο πεδίο;

*Απάντηση:* Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από *κινούμενα* φορτία ή ηλεκτρικά ρεύματα, και επιδρά μόνο σε *κινούμενα* φορτία και ηλεκτρικά ρεύματα. Η μαγνητική δύναμη που ασκείται πάνω σε κινούμενο φορτίο δίνεται από τη σχέση (7.1), σελ. 101. Η δύναμη αυτή είναι κάθετη στην κίνηση του φορτίου, άρα δεν παράγει έργο. Έτσι, σύμφωνα με το θεώρημα μεταβολής της κινητικής ενέργειας, η κινητική ενέργεια του φορτίου μένει σταθερή, πράγμα που σημαίνει ότι και το *μέτρο* της ταχύτητας μένει σταθερό (μεταβάλλεται μόνο η διεύθυνση της κίνησης).

19. Ποιους φυσικούς νόμους περιγράφουν οι *εξισώσεις του Maxwell*; Ποιοι θεμελιώδεις *νόμοι διατήρησης* προκύπτουν από τις εξισώσεις αυτές;

*Απάντηση:* Οι εξισώσεις του Maxwell [σχέσεις (9.20), σελ. 133] εκφράζουν τις ακόλουθες φυσικές αρχές: (α) Νόμος του Gauss για τον Ηλεκτρισμό. Εκφράζει μαθηματικά τον νόμο του Coulomb. (β) Νόμος του Gauss για τον Μαγνητισμό. Εκφράζει μαθηματικά την απουσία ελεύθερων μαγνητικών πόλων στη Φύση, ανάλογων με τα ηλεκτρικά φορτία. (γ) Νόμος του Faraday (ή, νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής): Κάθε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο «επάγει» ηλεκτρικό πεδίο. Δηλαδή, όταν το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται χρονικά σε μία περιοχή του χώρου, τότε στην περιοχή αυτή εμφανίζεται και ηλεκτρικό πεδίο. (δ) Νόμος των Ampère-Maxwell: Κάθε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο «επάγει» μαγνητικό πεδίο. Δηλαδή, όταν το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται χρονικά σε μία περιοχή του χώρου, τότε στην περιοχή αυτή εμφανίζεται και μαγνητικό πεδίο.

Οι σημαντικότεροι νόμοι διατήρησης που προκύπτουν από τις εξισώσεις του Maxwell είναι η *διατήρηση του φορτίου* και η *διατήρηση της ενέργειας*.

20. Ποιο φυσικό φαινόμενο ονομάζουμε *κύμα*; Τι είναι το *ηλεκτρομαγνητικό κύμα*, και με ποια ταχύτητα διαδίδεται στον κενό χώρο; Ποια ιδιότητα κάνει το φως να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;

*Απάντηση:* Γενικά μιλώντας, *κύμα* ονομάζεται κάθε φυσική κατάσταση που, παραγόμενη σε ένα σημείο του χώρου, διαδίδεται με πεπερασμένη (δηλ., όχι άπειρη) ταχύτητα και γίνεται αργότερα αντιληπτή σε άλλα σημεία του χώρου. Ειδικά, αυτό που διαδίδεται στην περίπτωση ενός ηλεκτρομαγνητικού (H/M) κύματος είναι η *χρονική μεταβολή (διαταραχή)* του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που συμβαίνει σε ένα σημείο του χώρου και διαδίδεται σε άλλα σημεία με την ταχύτητα του φωτός

( $c=300,000 \text{ Km/sec}$ ). Αυτό που ονομάζουμε *φως* δεν είναι τίποτα άλλο από ένα Η/Μ κύμα που έχει τέτοια συχνότητα ώστε να γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι.

21. Πότε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα λέγεται *επίπεδο* και πότε λέγεται *μονοχρωματικό*; Να περιγραφούν τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός μονοχρωματικού επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τι μεταφέρει το κύμα στην κατεύθυνση διαδόσεώς του;

*Απάντηση:* Ένα Η/Μ κύμα λέγεται *επίπεδο* αν, καθώς αυτό διαδίδεται στον χώρο, το Η/Μ πεδίο λαμβάνει σταθερή τιμή πάνω σε κάθε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διαδόσεως του κύματος. Το Η/Μ κύμα είναι *μονοχρωματικό* αν περιέχει μία μόνο συχνότητα  $\omega$  (δεν είναι σύνθεση διαφόρων συχνοτήτων).

Το μονοχρωματικό επίπεδο κύμα έχει τα εξής φυσικά χαρακτηριστικά: Το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  και το μαγνητικό πεδίο  $B$  είναι κάθετα μεταξύ τους, καθώς και κάθετα στη διεύθυνση διαδόσεως του κύματος (*εγκάρσιο* κύμα). Τα δύο πεδία ταλαντώνονται σε φάση (αποκτούν ταυτόχρονα τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές τους) και οι στιγμιαίες τιμές τους συνδέονται με τη σχέση  $E=cB$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Το Η/Μ κύμα μεταφέρει την *ενέργεια* του Η/Μ πεδίου στην κατεύθυνση διαδόσεώς του.

22. Ποια φαινόμενα παρατηρούνται όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια ενός ηλεκτρικά αγωγίμου μέσου; Τι καλείται *επιδερμικό βάθος* από φυσική άποψη; Πώς θα μεταβληθεί το επιδερμικό βάθος αν αυξηθεί η αγωγιμότητα του μέσου ή η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος; Γιατί η χρήση του *radar* είναι πρακτικά αδύνατη για υποθαλάσσιες ανιχνεύσεις σε μεγάλα βάθη;

*Απάντηση:* Όταν ένα Η/Μ κύμα προσπίπτει σε ένα αγωγίμο υλικό μέσο, ένα μέρος της ενέργειας του κύματος *ανακλάται* στην επιφάνεια του μέσου, ενώ ένα άλλο μέρος *διεισδύει* στον αγωγό και, τελικά, *απορροφάται* από αυτόν. Επιδερμικό βάθος καλείται το μέγιστο βάθος στο οποίο διεισδύει το κύμα πριν απορροφηθεί τελείως από τον αγωγό. Το επιδερμικό βάθος *ελαττώνεται* αν αυξηθεί η αγωγιμότητα του μέσου, καθώς και αν αυξηθεί η συχνότητα του Η/Μ κύματος. Δηλαδή, βαθύτερα διεισδύουν τα Η/Μ κύματα που έχουν *μικρότερες* συχνότητες.

Η θάλασσα είναι ηλεκτρικά αγωγίμη λόγω των ιόντων αλάτων που περιέχει. Έτσι, ανακλά και απορροφά τα Η/Μ κύματα που εκπέμπει το *radar*, πριν αυτά προλάβουν να φτάσουν στον στόχο. Για τον λόγο αυτό, σε υποθαλάσσιες ανιχνεύσεις χρησιμοποιείται το *sonar*, το οποίο εκπέμπει *ηχητικά* κύματα αντί των Η/Μ κυμάτων που εκπέμπει το *radar*.

23. Τι καλείται *συχνότητα πλάσματος* ενός αγωγίμου μέσου; Πώς αξιοποιείται η *ιονόσφαιρα* για τη διάδοση ραδιοκυμάτων AM σε μεγάλες αποστάσεις πάνω στην επιφάνεια της Γης; Γιατί η *ιονόσφαιρα* δεν εξυπηρετεί τη διάδοση ραδιοκυμάτων FM; Γιατί το φως του Ήλιου φτάνει ως την επιφάνεια της Γης αλλά δεν φτάνει ως τα βάθη των ωκεανών;

*Απάντηση:* Όταν ένα Η/Μ κύμα σχετικά χαμηλής συχνότητας  $\omega$  προσπίπτει στην επιφάνεια ενός αγωγίμου μέσου, ένα μέρος της ενέργειας του κύματος ανακλάται στην επιφάνεια ενώ ένα άλλο μέρος διεισδύει στο μέσο και τελικά απορροφάται. Αυτά ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι η συχνότητα  $\omega$  δεν ξεπερνά μία οριακή συχνότητα  $\omega_p$  που καλείται *συχνότητα πλάσματος* του αγωγίμου μέσου. Όταν όμως η

συχνότητα του κύματος *υπερβεί* τη συχνότητα πλάσματος για το συγκεκριμένο μέσο ( $\omega > \omega_p$ ) τότε το Η/Μ κύμα παύει να υφίσταται ανάκλαση και απορρόφηση και *διαπερνά* το μέσο χωρίς να υποστεί σημαντικές απώλειες. Λέμε ότι το μέσο γίνεται «*διαφανές*» για όλες τις συχνότητες  $\omega > \omega_p$ .

Τα ραδιοκύματα ΑΜ έχουν συχνότητες *μικρότερες* από τη συχνότητα πλάσματος της ιονόσφαιρας. Έτσι, *ανακλώνται* στην ιονόσφαιρα και επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης σε μεγάλες αποστάσεις από το σημείο εκπομπής (βλ. σχήμα στη σελ. 191). Αντίθετα, τα ραδιοκύματα FM έχουν συχνότητες *μεγαλύτερες* από τη συχνότητα πλάσματος της ιονόσφαιρας και για τον λόγο αυτό *διαπερνούν* την ιονόσφαιρα χωρίς να υφίστανται ανάκλαση σε αυτήν.

Το ηλιακό φως φτάνει ως την επιφάνεια της Γης, αφού μπορεί να διαπεράσει την ιονόσφαιρα χωρίς σημαντικές απώλειες. Αυτό συμβαίνει επειδή οι συχνότητες του ορατού φωτός είναι *μεγαλύτερες* από την συχνότητα πλάσματος της ιονόσφαιρας. Αντίθετα, οι συχνότητες του φωτός είναι *μικρότερες* από την συχνότητα πλάσματος της θάλασσας, με αποτέλεσμα το φως να υφίσταται ανάκλαση στην επιφάνεια της θάλασσας και απορρόφηση στο εσωτερικό της.

24. Τι καλούμε *ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία*; Με ποιους τρόπους παράγεται αυτή; Ποιο από τα παρακάτω φυσικά συστήματα ακτινοβολεί, και ποιο δεν ακτινοβολεί: (α) ένα ηλεκτρόνιο που κινείται κυκλικά με σταθερό *μέτρο* ταχύτητας; (β) ένα κυκλικό ηλεκτρικό ρεύμα *σταθερής έντασης*; Εξηγήστε.

*Απάντηση:* Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η διάδοση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η Η/Μ ακτινοβολία παράγεται με δύο τρόπους: με *επιταχυνόμενα* ηλεκτρικά φορτία, ή με *χρονικά μεταβαλλόμενα* ηλεκτρικά ρεύματα.

Αφού κινείται κυκλικά, το ηλεκτρόνιο έχει *κεντρομόλο* επιτάχυνση. Έτσι, το ηλεκτρόνιο *επιταχύνεται* (δεν έχει σημασία το ότι το *μέτρο* της ταχύτητάς του μένει σταθερό, αφού η *διεύθυνση* της ταχύτητάς του συνεχώς αλλάζει). Άρα, το ηλεκτρόνιο ακτινοβολεί κατά την κίνησή του, χάνοντας συνεχώς ενέργεια. Αντίθετα, το κυκλικό ρεύμα *δεν* ακτινοβολεί, αφού η έντασή του μένει χρονικά σταθερή.