

**Κ. Ι. ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ**

**ΟΔΗΓΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**  
**ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ**

Με βάση το βιβλίο  
*«Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία  
και τη Φυσική των Αγώγιμων Στερεών»<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> <https://eclass.hna.gr/modules/document/file.php/TOM6104/EM%20Volume%20PDF.pdf>



**ΜΕΡΟΣ Α: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ****Κεφάλαιο 1**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετούμε δομές της ύλης όπως τα άτομα, τα μόρια και οι κρύσταλλοι των στερεών (κατά σειρά αύξουσας συνθετότητας) από τη σκοπιά της Κβαντικής Φυσικής. Το απλούστερο άτομο είναι, φυσικά, το άτομο του υδρογόνου. Στην Παρ. 1.3 του βιβλίου εξετάζουμε το καθαρά κλασικό μοντέλο που πρότεινε ο Rutherford για το υδρογόνο, και εξηγούμε τους λόγους για τους οποίους το μοντέλο αυτό δεν ευσταθεί. Στην Παρ. 1.4 βλέπουμε πώς ο Bohr εμπλούτισε το ατομικό μοντέλο του Rutherford εισάγοντας κβαντικές αρχές αλλά διατηρώντας, παράλληλα, κάποιες κλασικές έννοιες όπως η τροχιά του ηλεκτρονίου. Εισάγεται εδώ η σημαντική έννοια των **ατομικών ενεργειακών σταθμών** (βλ. διάγραμμα, σελ. 7).

Αν και επιτυχημένο για το υδρογόνο, το ατομικό μοντέλο του Bohr δεν μπορεί να εξηγήσει τα φαινόμενα που σχετίζονται με άτομα που διαθέτουν δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Αυτό το επιτυγχάνει η Κβαντομηχανική, στην οποία κλασικές έννοιες όπως η τροχιά του ηλεκτρονίου καταργούνται ολότελα λόγω της **αρχής της αβεβαιότητας**, ενώ εισάγεται η έννοια των **κβαντικών καταστάσεων** στις οποίες επιτρέπεται να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου. Επίσης, διατυπώνεται η **απαγορευτική αρχή του Pauli**, σύμφωνα με την οποία δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια ενός ατόμου δεν επιτρέπεται να μοιράζονται (να «καταλαμβάνουν») την ίδια κατάσταση. Όλα αυτά εκτίθενται στην Παρ. 1.5, αρκούν όμως όσα αναφέρονται περιληπτικά εδώ:

<https://eclass.hna.gr/modules/document/file.php/TOM6104/Atomic%20Structure.pdf>

Το **μόριο** (Παρ. 1.6) παριστά μία πιο σύνθετη κβαντική δομή, αφού συντίθεται από δύο ή περισσότερα άτομα. Η συζήτηση στην τελευταία παράγραφο της σελ. 12, με το σχετικό διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για το διατομικό μόριο (π.χ.,  $O_2$ ), είναι πολύ σημαντική! (Ερώτηση: Πώς θα τροποποιηθεί το διάγραμμα για ένα τριατομικό μόριο όπως, π.χ., το  $O_3$ ;) )

Στην Παρ. 1.7 εξηγούμε γιατί ένας **κρύσταλλος στερεού** έχει συνεχείς **ενεργειακές ζώνες** στη θέση των διακριτών ενεργειακών σταθμών που έχουν τα άτομα και τα μόρια. Η συζήτηση που μας ενδιαφέρει ξεκινά από το μέσον της σελ. 14. Δείτε το διάγραμμα στη σελ. 15, καθώς και την εξήγηση για το εύρος των ζωνών στην παράγραφο που ακολουθεί. Στην σελ. 16 εισάγονται οι πολύ σημαντικές έννοιες των ζωνών **σθένους** και **αγωγιμότητας**.

Τέλος, στην Παρ. 1.8 παρακολουθούμε τον σχηματισμό ενεργειακών ζωνών σε κρυστάλλους τετρασθενών στοιχείων (τέτοιοι είναι οι κρύσταλλοι των ημιαγωγών που θα συναντήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο).

Ας συνοψίσουμε κάποια βασικά πράγματα που πρέπει να μάθετε καλά στο Κεφ. 1, πριν προχωρήσετε στα επόμενα κεφάλαια:

- Τι είναι **ενεργειακή στάθμη** ενός ατόμου ή ενός μορίου (Παρ. 1.4 - 1.6).
- Πώς συγκρίνεται το διάγραμμα ενεργειακών σταθμών ενός μορίου που αποτελείται από  $N$  όμοια άτομα, με το διάγραμμα σταθμών του κάθε ατόμου (Παρ. 1.6, διάγραμμα και σχετική συζήτηση στη σελ. 12).

- Γιατί στους κρυστάλλους των στερεών έχουμε συνεχείς **ενεργειακές ζώνες** αντί για διακριτές ενεργειακές στάθμες όπως στα άτομα και τα μόρια (Παρ. 1.7, μέσο της σελ. 14).
- Πώς εξηγείται η αύξηση του εύρους των ενεργειακών ζωνών από τις κατώτερες προς τις ανώτερες ζώνες (Παρ. 1.7, σελ. 15).
- Τι είναι οι ζώνες **σθένους** και **αγωγιμότητας**, η **απαγορευμένη ζώνη** και το **ενεργειακό χάσμα** (Παρ. 1.7, σελ. 16).

## Κεφάλαιο 2

Στο Κεφάλαιο αυτό μελετούμε την ηλεκτρική αγωγιμότητα των **μετάλλων** και των **ημιαγωγών**. Γενικά μιλώντας, τα μέταλλα τα συναντούμε σε εφαρμογές της ηλεκτροτεχνίας (σύρματα, αντιστάσεις, πηνία, κλπ.) ενώ τους ημιαγωγούς σε εφαρμογές της ηλεκτρονικής (κρυσταλλοδίοδοι, τρανζίστορ, κλπ.). Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις βασικές διαφορές ανάμεσα στα μέταλλα και τους ημιαγωγούς. Για παράδειγμα:

- Η αγωγιμότητα των μετάλλων οφείλεται στα **ελεύθερα ηλεκτρόνια** που διαθέτουν, ενώ η αγωγιμότητα των ημιαγωγών οφείλεται τόσο σε ηλεκτρόνια, όσο και σε **οπές**.
- Η αγωγιμότητα των μετάλλων **ελαττώνεται** με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ η αγωγιμότητα των ημιαγωγών **αυξάνει** με τη θερμοκρασία.

Τα μέταλλα (αγωγοί) είναι πολύ πιο αγώγιμα από τους ημιαγωγούς. Κάποια στερεά, όπως το **διαμάντι**, έχουν μηδενική αγωγιμότητα (είναι **μονωτές**). Επί πλέον, τα μέταλλα και οι ημιαγωγοί είναι **αδιαφανείς** στο φως, ενώ το διαμάντι είναι **διαφανές**. Γιατί συμβαίνουν όλα αυτά;

Την απάντηση δίνει η θεώρηση της δομής των ενεργειακών ζωνών σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Στην Παρ. 2.2 μελετούμε τα μέταλλα και τους μονωτές, ενώ στην Παρ. 2.3 μελετούμε τους ημιαγωγούς.

Πάμε τώρα στον **νόμο του Ohm**. Είναι ένας εμπειρικός νόμος που ισχύει προσεγγιστικά κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, γι' αυτό και δεν περιλαμβάνεται στους ακριβείς νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού που εκφράζονται με τις εξισώσεις του Maxwell.

Ο νόμος του Ohm είναι μία σχέση αίτιου - αποτελέσματος. Σε ένα απλό κύκλωμα πηγής - αντίστασης, η ένταση του ρεύματος (αποτέλεσμα) είναι ανάλογη της τάσης της πηγής (αίτιο):  $I = V/R$ . Αυτός ο τύπος, όμως, είναι ειδική περίπτωση ενός γενικότερου νόμου, του **γενικού νόμου του Ohm**:  $J = \sigma E$ , ο οποίος συνδέει την **πυκνότητα ρεύματος**  $J$  μέσα σε έναν αγωγό **ειδικής αγωγιμότητας**  $\sigma$ , με την ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον αγωγό. Όλα αυτά συζητούνται αναλυτικά στην Παρ. 2.4. Ο γενικός νόμος του Ohm εκφράζεται από τη σχέση 2.6 (ή, διανυσματικά, από την 2.7). Από εκεί αποδεικνύουμε την ειδική μορφή 2.9 του νόμου.

Όμως, ο νόμος του Ohm ισχύει και για τους ημιαγωγούς. Δείτε τη σχετική συζήτηση στην Παρ. 2.5. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η παρατήρηση στην τελευταία παράγραφο της σελ. 30.

Μία σημαντική διαφορά ανάμεσα στα μέταλλα και τους ημιαγωγούς είναι η συμπεριφορά της αγωγιμότητάς τους όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, η αγωγιμότητα των μετάλλων **μειώνεται** με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ η αγωγιμότητα των ημιαγωγών **αυξάνει**. Γιατί συμβαίνουν όλα αυτά; Δείτε την εξήγηση στην Παρ. 2.6, με βάση τον νόμο του Ohm.

Όπως εξηγήσαμε στην Παρ. 2.5, οι καθαροί ημιαγωγοί είναι λιγότερο αγωγιμοί από τα μέταλλα αφού δεν διαθέτουν εξαρχής την ίδια αφθονία ελεύθερων φορτίων (τα μέταλλα έχουν έναν μεγάλο αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ οι ημιαγωγοί διαθέτουν έναν πολύ μικρότερο αριθμό ηλεκτρονίων και οπών). Για να αυξήσουμε την αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού (χωρίς να αυξήσουμε τη θερμοκρασία) θα πρέπει με κάποιον τρόπο να του προσφέρουμε είτε περισσότερα ηλεκτρόνια, είτε περισσότερες οπές. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλων **πρόσμιξεων**, όπως συζητούμε στην Παρ. 2.7 του βιβλίου. Ας δούμε τα βασικότερα σημεία:

Στον **καθαρό ημιαγωγό**, ο οποίος αποτελείται από άτομα **τετρασθενούς** στοιχείου (π.χ. πυρίτιο ή γερμάνιο), οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών είναι ίσες:  $n=p=n_i$ , όπου  $n_i$  είναι η **αυτογενής πυκνότητα** του καθαρού ημιαγωγού. Αν, τώρα, αντικαταστήσουμε μερικά άτομα του καθαρού ημιαγωγού με άτομα **πεντασθενούς** στοιχείου (π.χ. φωσφόρος ή αρσενικό) θα προκύψει **ημιαγωγός τύπου  $n$** , ο οποίος έχει περισσότερα ηλεκτρόνια απ' ό,τι οπές:  $n>p$ . Αυτό συμβαίνει διότι το ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο του πεντασθενούς στοιχείου θα προστεθεί στη ζώνη αγωγιμότητας, αυξάνοντας τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό. Αντίστοιχα, αν αντικαταστήσουμε μερικά άτομα του καθαρού ημιαγωγού με άτομα **τρισθενούς** στοιχείου (π.χ. βόριο) θα προκύψει **ημιαγωγός τύπου  $p$** , ο οποίος έχει περισσότερες οπές απ' ό,τι ηλεκτρόνια:  $p>n$ . Αυτό συμβαίνει διότι η μία παραπάνω οπή λόγω της παρουσίας του τρισθενούς στοιχείου θα προστεθεί στη ζώνη σθένους, αυξάνοντας τη συγκέντρωση των οπών στον κρύσταλλο.

Αποτέλεσμα της πρόσμιξης είναι να εμφανιστούν **νέες**, επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες **μέσα στην απαγορευμένη ζώνη** του ημιαγωγού (δείτε τα διαγράμματα στις σελ. 33 και 34). Επί πλέον, αύξηση του ενός φορέα (ηλεκτρονίων ή οπών) επιφέρει και **ελάττωση** του άλλου φορέα (οπών ή ηλεκτρονίων, αντίστοιχα). Δείτε την εξήγηση του φαινομένου στις σελ. 33 και 34.

Στις Παρ. 2.8 και 2.9 μαθαίνουμε τον πολύ σημαντικό **νόμο δράσεως των μαζών**. Προσέξτε την διατύπωσή του στη σελ. 35. Με βάση τον νόμο αυτό μπορούμε να εξηγήσουμε γιατί μία πρόσμιξη σε καθαρό ημιαγωγό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας του κρυστάλλου (βλ. σελ. 35-36).

Τέλος, στην Παρ. 2.10 μελετούμε τα **ρεύματα διάχυσης** σε έναν ημιαγωγό. Αυτό που θέλω να κατανοήσετε είναι η ερμηνεία των προσήμων στις σχέσεις (2.24) (βλ. σελ. 38-39).

Σαν ερωτήσεις επανάληψης του Κεφ. 2, δείτε τις Ερωτήσεις 1, 2, και 5 - 10.

### Κεφάλαιο 3

Το Κεφάλαιο 3 είναι σημαντικό προαπαιτούμενο για την παρακολούθηση του μαθήματος των Η/Ν του 3ου έτους. Γι' αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή!

Το γενικό πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Ας πάρουμε ως παράδειγμα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ενός μετάλλου. Όπως γνωρίζουμε, αυτά καταλαμβάνουν ενεργειακές στάθμες μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας. Κάθε στάθμη περιέχει έναν αριθμό επιτρεπόμενων **ενεργειακών καταστάσεων** και, σύμφωνα με την **απαγορευτική αρχή του Pauli**, κάθε κατάσταση μπορεί να φιλοξενήσει το πολύ ένα ηλεκτρόνιο. Για να έχετε μία εικόνα, φανταστείτε ότι η ζώνη αγωγιμότητας του μετάλλου είναι η τάξη σας, και οι ενεργειακές στάθμες της ζώνης είναι οι σειρές των θρανίων. Κάθε θρανίο αντιπροσωπεύει μία επιτρεπτή ενεργειακή κατάσταση, ενώ κάθε μαθητής αντιστοιχεί σε ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Όπως σε κάθε θρανίο μπορεί να κάθεται μόνο ένας (ή κανένας) μαθητής, έτσι και κάθε ενεργειακή κατάσταση μπορεί να περιέχει μόνο ένα (ή κανένα) ηλεκτρόνιο. Τέλος, η ζώνη αγωγιμότητας του μετάλλου έχει και κάποιες κενές ενεργειακές στάθμες, όπως μία τάξη μπορεί να έχει άδειες σειρές θρανίων.

Ερώτηση: Αν ξέρω πόσα θρανία και πόσους μαθητές έχει μία τάξη, πώς θα γνωρίσω με ποιον τρόπο οι μαθητές είναι κατανεμημένοι στα θρανία της τάξης; Βέβαια, αν αφήσουμε τους μαθητές να διαλέξουν ελεύθερα, κάποιες σειρές θρανίων θα αποδειχθούν περισσότερο «δημοφιλείς» από άλλες, αφού θα συγκεντρώνουν πιο πολλούς μαθητές. Αντίστοιχα, αν ξέρουμε πόσες ενεργειακές καταστάσεις και πόσα ηλεκτρόνια έχει μία ενεργειακή ζώνη, πώς θα γνωρίζουμε πώς είναι κατανεμημένα τα ηλεκτρόνια στις ενεργειακές στάθμες της ζώνης; Δεδομένο είναι ότι κάποιες ενεργειακές στάθμες θα είναι πιο «δημοφιλείς» από άλλες, με την έννοια ότι θα συγκεντρώνουν μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρονίων.

Όμως, τι σημαίνει «δημοφιλής ενεργειακή στάθμη»; Πώς θα μετρήσουμε αυτή τη «δημοφιλία»; Αυτό το πετυχαίνουμε ορίζοντας μία συνάρτηση  $n(E)$  που ονομάζεται **ενεργειακή πυκνότητα** και ορίζεται έτσι ώστε το γινόμενο  $n(E)dE$  να παριστά το πλήθος των ηλεκτρονίων (ανά μονάδα όγκου του υλικού) που καταλαμβάνουν ενεργειακές στάθμες με ενέργειες μεταξύ  $E$  και  $E+dE$ .

Βέβαια, για να υπάρξει αριθμός ηλεκτρονίων σε μία ενεργειακή στάθμη, πρέπει καταρχήν να υπάρχει ο ίδιος ή μεγαλύτερος αριθμός ενεργειακών καταστάσεων (όπως, για να υπάρχουν 4 μαθητές σε μία σειρά, θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 4 θρανία στη σειρά αυτή). Αντίστοιχα με την ενεργειακή πυκνότητα  $n(E)$  που αφορά ηλεκτρόνια, ορίζουμε την **πυκνότητα καταστάσεων**  $N(E)$  που αφορά καταστάσεις. Έτσι, το γινόμενο  $N(E)dE$  παριστά το πλήθος των ενεργειακών καταστάσεων (ανά μονάδα όγκου του υλικού) που υπάρχουν στις ενεργειακές στάθμες με ενέργειες μεταξύ  $E$  και  $E+dE$ .

Όπως καταλαβαίνετε, η κατανομή των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας ενός μετάλλου προσδιορίζεται από την ενεργειακή πυκνότητα  $n(E)$ . Πώς όμως θα την υπολογίσουμε; Ας σκεφτούμε ως εξής: Μία σειρά θρανίων στην τάξη σας έχει 4 θρανία αλλά μόνο 3 μαθητές. Δηλαδή, ποσοστό κατάληψης των θρανίων 75%. Τώρα, ας πούμε ότι δένετε σε κάποιον τα μάτια και τον αφήνετε να πάει στην τύχη σε ένα από τα 4 θρανία. Τι πιθανότητα έχει να βρει εκεί κάποιον μαθητή; Απάντηση: και πάλι 75%! Με άλλα λόγια, το ποσοστό κατάληψης των θρανίων μίας σειράς ισούται με την πιθανότητα να βρούμε μαθητή σε οποιοδήποτε θρανίο της σειράς αν το διαλέξουμε στην τύχη.

Με ανάλογο τρόπο, αν η ενεργειακή πυκνότητα  $n(E)$  αφορά πλήθος ηλεκτρονίων στην περιοχή της ενεργειακής στάθμης  $E$ , ενώ η πυκνότητα καταστάσεων  $N(E)$  αφορά πλήθος ενεργειακών καταστάσεων στην ίδια περιοχή, τότε το πηλίκο  $n(E)/N(E)$  παριστά το **ποσοστό κατάληψης** των καταστάσεων της στάθμης  $E$  από ηλεκτρόνια, ή ισοδύναμα, την **πιθανότητα** να είναι κατειλημμένη οποιαδήποτε κατάσταση της στάθμης  $E$  από ένα ηλεκτρόνιο. Ορίζουμε, λοιπόν, μία νέα συνάρτηση  $f(E)$ , την **συνάρτηση πιθανότητας**, σαν το πηλίκο των  $n(E)$  και  $N(E)$ :

$$f(E) = n(E) / N(E) \Leftrightarrow n(E) = f(E) N(E) .$$

Η συνάρτηση  $N(E)$  δίνεται από τη σχέση (3.9), σελ. 49, ενώ η συνάρτηση  $f(E)$  δίνεται από τη σχέση (3.11) και καλείται **συνάρτηση πιθανότητας των Fermi-Dirac** για ένα σύστημα ηλεκτρονίων (ειδικά, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας ενός μετάλλου). Όπως αναφέραμε, η συνάρτηση  $f(E)$  παριστά την πιθανότητα να είναι κατειλημμένη μία οποιαδήποτε κατάσταση στην ενεργειακή στάθμη  $E$ . Η παράμετρος  $T$  στη σχέση (3.11) είναι η απόλυτη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το σύστημα, ενώ η παράμετρος  $E_F$  καλείται **ενέργεια Fermi** του συστήματος. Η ενεργειακή στάθμη  $E_F$  καλείται **στάθμη Fermi**. Όμως, τι ακριβώς παριστά από φυσική άποψη η  $E_F$ ;

Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

(α) Σε απόλυτη θερμοκρασία  $T=0$ , **όλες** οι καταστάσεις με ενέργειες  $E < E_F$  είναι **κατειλημμένες** από ηλεκτρόνια, ενώ **όλες** οι καταστάσεις με ενέργειες  $E > E_F$  είναι **κενές**. (Δείτε το σχήμα στη σελ. 50. Προσέξτε ότι η ασυνέχεια της συνάρτησης  $f(E)$  για  $T=0$  δεν μας επιτρέπει να γνωρίζουμε τι ποσοστό καταστάσεων είναι κατειλημμένες πάνω στην ίδια τη στάθμη Fermi.)

(β) Σε θερμοκρασίες  $T > 0$ , οι **μισές** καταστάσεις **πάνω ακριβώς στη στάθμη Fermi**  $E_F$  είναι κατειλημμένες από ηλεκτρόνια. Δηλαδή, κάθε κατάσταση στη στάθμη Fermi έχει πιθανότητα 50% να είναι κατειλημμένη από ένα ηλεκτρόνιο.

Τώρα, ειδικά στην περίπτωση των μετάλλων, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας έχουν μηδενική δυναμική ενέργεια, αφού (θεωρητικά) δεν τους ασκούνται δυνάμεις. Έτσι, η ολική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου είναι **κινητική**. Με βάση αυτά που είπαμε πιο πάνω, σε απόλυτη θερμοκρασία  $T=0$  **καμία** κατάσταση πάνω από τη στάθμη Fermi δεν είναι κατειλημμένη. Άρα, δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια με κινητικές ενέργειες μεγαλύτερες από την  $E_F$ . Με άλλα λόγια,

- η ενέργεια Fermi του μετάλλου είναι η **μέγιστη** κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας για  $T=0$ .

(Δείτε το σχήμα στη σελ. 51.) Σε θερμοκρασίες  $T > 0$ , όμως, ένας αριθμός ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας θα περάσει **πάνω** από τη στάθμη Fermi και θα καταλάβει καταστάσεις με (κινητικές) ενέργειες  $E > E_F$ .

Μία σημαντική παρατήρηση υπάρχει στην παράγραφο κάτω από το σχήμα στη σελ. 51, και αφορά την σύγκριση ανάμεσα στα ελεύθερα ηλεκτρόνια ενός μετάλλου και τα μόρια ενός ιδανικού αερίου. Στη συνέχεια, βλέπουμε μία μέθοδο υπολογισμού της ενέργειας Fermi ενός μετάλλου. Από την τελική έκφραση (3.20) συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια Fermi του μετάλλου εξαρτάται μόνο από την **ηλεκτρονική πυκνότητα**  $n$ , δηλαδή την **συγκέντρωση** των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον κρύσταλλο (αριθμός ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου), και είναι πρακτικά **ανεξάρτητη της θερμοκρασίας**.

Ένας ενδιαφέρων υπολογισμός στην Παρ. 3.6 είναι η συνάρτηση Fermi-Dirac για τις **οπές** στη ζώνη σθένους ενός ημιαγωγού. Η σχετική έκφραση δίνεται από τη σχέση (3.27).

Η τελευταία παράγραφος του κεφαλαίου (Παρ. 3.7, σελ. 54-56) είναι πολύ σημαντική. Αφορά την ενέργεια Fermi σε έναν ημιαγωγό, θέμα που θα συναντήσετε του χρόνου στα Η/Ν. Συνοπτικά: Η στάθμη Fermi ενός **καθαρού** ημιαγωγού βρίσκεται στο **μέσο της απαγορευμένης ζώνης** και είναι **ανεξάρτητη της θερμοκρασίας**, ενώ σε ημιαγωγούς προσμειξωσ τύπων  $n$  και  $p$  η στάθμη Fermi μετατοπίζεται προς τη ζώνη αγωγιμότητας και τη ζώνη σθένους, αντίστοιχα, και εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, όσο και από το ποσοστό της πρόσμειξης.

Θέλω να κοιτάξετε και τις Ερωτήσεις στις σελ. 57-58.

Εδώ κλείνει το πρώτο μέρος του μαθήματος, που αφορά τη φυσική των κρυσταλλικών στερεών.



## ΜΕΡΟΣ Β: ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΑ

Το δεύτερο μέρος του μαθήματός μας αφορά την θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού. Αυτή εκτίθεται στα κεφάλαια 5 - 10. Τα Κεφ. 5 - 8 μελετούν τα **στατικά** (χρονικά αμετάβλητα) πεδία (ηλεκτρικό και μαγνητικό). Το Κεφ. 9 μελετά το **χρονικά μεταβαλλόμενο** ηλεκτρομαγνητικό (H/M) πεδίο. Τέλος, το Κεφ. 10 μελετά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και την H/M ακτινοβολία.

### Κεφάλαιο 4

Στο Κεφ. 4 περιέχονται βασικές μαθηματικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση του ηλεκτρομαγνητισμού. Να τι θέλω να ξέρετε από αυτό:

1. Την Παρ. 4.1, κυρίως τις σχέσεις (4.11), (4.12) και (4.16) έως (4.22).
2. Από την Παρ. 4.2, τα πολύ σημαντικά θεωρήματα **Gauss** και **Stokes**, σχέσεις (4.27) και (4.28). Τι μας χρειάζονται; Για να πηγαίνουμε από τις ολοκληρωτικές εξισώσεις Maxwell στις εξισώσεις Maxwell σε διαφορική μορφή. Και, τι μας χρειάζεται η διαφορική μορφή αν ξέρουμε την ολοκληρωτική; Μας είναι απαραίτητη στη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Κεφ. 10).
3. Από την Παρ. 4.3, απλά τους ορισμούς του **αστρόβιλου** και του **σωληνωτού** πεδίου. Μια ματιά στην γεωμετρική και τη φυσική σημασία τους, επίσης.
4. Τον ορισμό του **συντηρητικού πεδίου δυνάμεων** τον είδαμε πέρυσι, στη Μηχανική. Όπως σας είχα πει, την επόμενη χρονιά θα βλέπαμε μερικούς ισοδύναμους ορισμούς που απαιτούν περισσότερες μαθηματικές γνώσεις. Αυτούς τους ορισμούς τους βλέπουμε στην Παρ. 4.4. Έχει το θέμα ενδιαφέρον στον ηλεκτρομαγνητισμό; Ναι, το **ηλεκτροστατικό** πεδίο είναι συντηρητικό.

### Κεφάλαια 5 - 8

Για τα Κεφ. 5 - 8, που αφορούν **στατικά** (χρονικά αμετάβλητα) πεδία, δείτε την περίληψη που υπάρχει στο eClass:

[https://eclass.snd.edu.gr/modules/document/file.php/TOM6104/EM\\_Summary.pdf](https://eclass.snd.edu.gr/modules/document/file.php/TOM6104/EM_Summary.pdf)

Αν και δεν ανήκουν στην εξεταστέα ύλη, μία περιληπτική (τουλάχιστον) ανάγνωση τους θα ήταν χρήσιμη για την καλύτερη κατανόηση της ύλης που ακολουθεί.

### Κεφάλαιο 9

Στην Παρ. 9.1 γίνεται μία εισαγωγική συζήτηση με μεγάλη σημασία! Παραθέτω κάποιες ιδέες: Προσέξτε τις σχέσεις (9.1). Είναι οι εξισώσεις του Maxwell για **στατικά** (χρονικά σταθερά) πεδία. Αυτό που προκαλεί εντύπωση είναι ότι χωρίζονται σε δύο ανεξάρτητα ζεύγη εξισώσεων, ένα για το ηλεκτρικό και ένα για το μαγνητικό πεδίο. Πουθενά όμως δεν εμπλέκονται τα δύο πεδία μεταξύ τους. Μα, πώς σχετίζονται τότε ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός; Και, γιατί μιλούμε για «ηλεκτρομαγνητισμό»; Όπως θα δούμε στη συνέχεια, αυτή η (φαινομενική) ανεξαρτησία ανάμεσα στα δύο πεδία - ηλεκτρικό και μαγνητικό - παύει να ισχύει όταν τα πεδία **μεταβάλλονται στον χρόνο** (δεν είναι στατικά). Δηλαδή, **μόλις μεταβληθεί χρονικά το ένα πεδίο, εμφανίζεται αυτόματα στον ίδιο χώρο και το άλλο πεδίο!**

Η πρώτη σημαντική έννοια που συναντούμε στο Κεφ. 9 είναι αυτή της **ηλεκτρεγερτικής δύναμης** (ΗΕΔ). Το θέμα αναπτύσσεται στην Παρ. 9.2. Δείτε και ένα άρθρο που έχει γίνει “viral” στο Διαδίκτυο:

<https://eclass.snd.edu.gr/modules/document/file.php/TOM6104/nausivios.2014.papachristou-magoulas.pdf>

Υπάρχει και σε ελληνική μετάφραση:

<https://eclass.snd.edu.gr/modules/document/file.php/TOM6104/emf.grk.v2.pdf>

Αφού πήραμε μία ιδέα για τον ορισμό της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, καιρός είναι να προχωρήσουμε στην «καρδιά» του ηλεκτρομαγνητισμού: τις **εξισώσεις του Maxwell**. Τις έχετε δει ίσως σε ολοκληρωτική μορφή. Όμως, η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας απαιτεί την διαφορική μορφή των εξισώσεων. Η σύνδεση ανάμεσα στην ολοκληρωτική και την διαφορική μορφή γίνεται με τη βοήθεια των θεωρημάτων Gauss και Stokes που εκτίθενται στο Κεφ. 4 (λεπτομέρειες στις Παρ. 9.3 και 9.4). Πάμε τώρα στην Παρ. 9.5, σελ. 133. Από εκεί θέλω να ξέρετε τις εξισώσεις του Maxwell στη μορφή (9.20), καθώς και την φυσική σημασία των εξισώσεων όπως αυτή περιγράφεται στην παράγραφο κάτω από την (9.20).

Ο Maxwell φρόντισε ώστε οι εξισώσεις του να προβλέπουν μία θεμελιώδη φυσική αρχή: την **διατήρηση του φορτίου**. Στην Παρ. 9.6 αποδεικνύεται ότι οι εξισώσεις του Maxwell πράγματι οδηγούν στην αρχή διατήρησης του φορτίου. Να γνωρίζετε τις βασικές σχέσεις: την **εξίσωση συνέχειας** (9.29) και τις σχέσεις (9.31) έως (9.33).

Δεν ξέρω αν θυμάστε μία συζήτηση που είχαμε πέρυσι όταν μελετούσαμε την μηχανική συστημάτων σωματιδίων. Είχαμε πει ότι, όταν οι σχετικές ταχύτητες φορτισμένων σωματιδίων είναι αρκετά μεγάλες, φαίνεται να παραβιάζονται οι αρχές διατήρησης της ορμής και της στροφορμής. Τι σώζει τη Φυσική από την καταστροφή; Το γεγονός ότι τα μεγέθη που λείπουν τα συμπληρώνει το ίδιο το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο κουβαλά τόσο ορμή, όσο και στροφορμή. Μαντέψτε τι άλλο κουβαλά: Φυσικά, ενέργεια!

Βέβαια, στην κβαντική θεωρία αυτά είναι αυτονόητα: το H/M πεδίο αποτελείται από **φωτόνια**, και κάθε φωτόνιο κουβαλά ορμή, ενέργεια και στροφορμή. Πώς το ξέρουμε αυτό; Το ξέρουμε διότι, κάθε φορά που ένα άτομο απορροφά ένα φωτόνιο, αυξάνουν τα αντίστοιχα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του ατόμου.

Όμως, ο Maxwell δεν γνώριζε τίποτα για κβαντισμό και φωτόνια. Υπάρχει πιο «κλασικός» τρόπος να καταλάβουμε γιατί το H/M πεδίο περιέχει ενέργεια; Ναι. Δείτε τη συζήτηση στις δύο πρώτες παραγράφους της Παρ. 9.8 (σελ. 138). Τι άλλο θέλω να ξέρετε από την Παρ. 9.8: τον ορισμό του **διανύσματος Poynting**, σχέση (9.44), και την φυσική σημασία του διανύσματος αυτού [δείτε τη συζήτηση που ξεκινά κάτω από την (9.44) και τελειώνει με την δεύτερη παράγραφο της σελ. 140].

Από τις Ερωτήσεις στο τέλος του κεφαλαίου (σελ. 141) ξεχωρίζω την Ερώτηση 5. Την απαντούμε με βάση όσα εκτέθηκαν στην Παρ. 9.6.

## Κεφάλαιο 10

Μπαίνουμε τώρα στο ομορφότερο αλλά και πιο απαιτητικό κεφάλαιο της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας: τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**. Τα προέβλεψε ο ίδιος ο Maxwell με βάση τις εξισώσεις του. Ήταν μια πρόβλεψη όχι λιγότερο σημαντική από την Θεωρία της Σχετικότητας του Einstein! Μόνο που ο Maxwell δεν πρόλαβε να δει τον **Heinrich Hertz** να επιβεβαιώνει πειραματικά τις προβλέψεις του: έφυγε νεότερος και επιστημονικά ακμαίος, στα 48 του...

Πώς θα ήταν η ζωή μας χωρίς τα Η/Μ κύματα; Μεταξύ άλλων, δεν θα είχαμε ραδιόφωνο, τηλεόραση και κινητό τηλέφωνο, αλλά και δεν θα ζούσαμε, γενικότερα, αφού δεν θα παίρναμε φως και ζέστη από τον Ήλιο!

Όμως, πριν πούμε τι είναι Η/Μ κύμα θα πρέπει να πούμε τι είναι **κύμα**, γενικά. Και, επειδή με ξέρετε να μιλώ με παραβολές, θα πω μία ακόμα: Φανταστείτε ότι επιλέγω στην τύχη έναν σπουδαστή και του ψιθυρίζω την είδηση ότι θα δοθεί σήμερα εκτάκτως «εξόδο» σε όλους. Φυσικά, του ζητώ να μην το διαδώσει. Άσκηση: Υπολογίστε τον χρόνο που θα απαιτηθεί για να το μάθει όλη η σχολή!

Τι συνέβη εδώ; Μία «διαταραχή» - η πληροφορία που έδωσα σε έναν σπουδαστή - διαδίδεται με πεπερασμένη (όχι άπειρη) ταχύτητα σε άλλους σπουδαστές απομακρυσμένους από αυτόν. Αυτό είναι το κύμα: μία **διαταραχή** σε ένα σημείο του χώρου, που διαδίδεται με συγκεκριμένη ταχύτητα σε άλλα σημεία του χώρου. Π.χ., όταν μιλώ προκαλώ ταλαντώσεις στα μόρια του αέρα (ή, ισοδύναμα, αυξομειώσεις στην πίεση του αέρα) οι οποίες διαδίδονται στον χώρο και φτάνουν σε εσάς ως ήχος. Έτσι, με ακούτε όλοι στην τάξη, όπου κι αν κάθεστε.

Όπως βλέπετε, για να διαδοθεί ο ήχος χρειάζεται ένα υλικό μέσο: ο αέρας. Το ίδιο καλά, όμως, διαδίδεται και στα υγρά και τα στερεά. Έτσι, π.χ., μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το sonar, το οποίο εκπέμπει ηχητικά κύματα, για τον εντοπισμό υποθαλάσσιων αντικειμένων.

Όμως, υπάρχει μία σημαντική κατηγορία κυμάτων που δεν χρειάζονται υλικό μέσο για να διαδοθούν. Μάλιστα, διαδίδονται με τη μέγιστη ταχύτητα στο κενό! Αυτά είναι τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**. Τι είναι αυτά; Είναι μία **διαταραχή** (δηλαδή, χρονική μεταβολή) **του Η/Μ πεδίου** σε κάποιο σημείο του χώρου, η οποία διαδίδεται με απίστευτα μεγάλη ταχύτητα σε άλλα σημεία του χώρου. Ναι, σωστά το μαντέψατε: είναι η **ταχύτητα του φωτός**. Που σημαίνει ότι το φως δεν είναι παρά ένα Η/Μ κύμα που, απλά, έχει τέτοια συχνότητα ώστε να ευαισθητοποιεί το μάτι μας και να γίνεται αντιληπτό με την όραση.

Πάμε τώρα σε πρακτικά ζητήματα: τι πρέπει να διαβάσετε. Τα γενικά περί κυμάτων συζητούνται στις Παρ. 10.1 - 10.3. Δεν χρειάζεται να τα διαβάσετε από το βιβλίο, αρκεί η σελ. 14 στην περίληψη της Η/Μ θεωρίας που υπάρχει στο eClass:

[https://eclass.hna.gr/modules/document/file.php/TOM6104/EM\\_Summary.pdf](https://eclass.hna.gr/modules/document/file.php/TOM6104/EM_Summary.pdf)

Τα Η/Μ κύματα καθαυτά συζητούνται στην Παρ. 10.4. Από αυτήν θέλω τα εξής: τις σχέσεις (10.22) (εξισώσεις του Maxwell στο κενό) καθώς και τις σχέσεις (10.27) έως (10.31), χωρίς απόδειξη. Τέλος, θέλω την **φυσική σημασία** που αναφέρεται με bold στο πάνω μέρος της σελ. 165.

Πάμε στην Παρ. 10.5, που αφορά τα επίπεδα Η/Μ κύματα και, ειδικά, το **μονοχρωματικό επίπεδο κύμα**. Τι σημαίνει «**μονοχρωματικό**»; Σημαίνει ότι περιέχει μόνο μία (κυκλική) συχνότητα  $\omega$  (ένα «χρώμα») που αποτελεί την κοινή συχνότητα

ταλάντωσης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Από την Παρ. 10.5 θέλω να ξέρετε τα εξής: τις σχέσεις (10.35) έως (10.38) και όλα τα συμπεράσματα που αναφέρονται με bold, χωρίς τις μαθηματικές αποδείξεις. Επίσης, θέλω να δείτε την παράγραφο που υπάρχει κάτω από το σχήμα στη σελ. 168. Λέει ότι η κατεύθυνση διαδόσεως του H/M κύματος συμπίπτει με την κατεύθυνση του διανύσματος Poynting, δηλαδή την κατεύθυνση διαδόσεως της ενέργειας του H/M πεδίου. Λογικό!

Ας φτιάξουμε τώρα ένα σκηνικό που δεν είναι διόλου απίθανο να συμβεί στ' αλήθεια: Ανεβαίνει ένα τηλεοπτικό συνεργείο στο πλοίο, να πάρει εικόνες από την καθημερινότητά του και συνέντευξη από έναν αξιωματικό, δηλαδή εσάς. Μεταξύ άλλων, αναφέρεστε στην ανίχνευση υποθαλάσσιων αντικειμένων με χρήση του sonar. Ξάφνου, η νεαρή αλλά ενημερωμένη δημοσιογράφος σάς ρωτά: «*Μα, γιατί χρησιμοποιείτε το sonar, που εκπέμπει κύματα ήχου, και όχι το radar, που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα που τρέχουν με απείρως μεγαλύτερη ταχύτητα από τον ήχο; Εξ άλλου, το radar χρησιμοποιείται για ανιχνεύσεις αντικειμένων πάνω από τη θάλασσα.*» Τι απαντάτε στην νεαρή δημοσιογράφο; Βέβαια, την ίδια ερώτηση μπορεί να σας κάνει οποιοδήποτε άλλο άτομο, στο καράβι ή αλλού.

Ερώτηση: Θα μπορούσε ο Maxwell (θεωρητικά) να απαντήσει στο ερώτημα, ή θα έπρεπε να περιμένει κάποιος την κβαντική θεωρία ή τη σχετικότητα για να δώσουν απάντηση; Όχι, ο Maxwell θα τα κατάφερνε μια χαρά, αφού η απάντηση «κρύβεται» μέσα στις ίδιες τις εξισώσεις του! Όμως, γιατί το radar δεν «δουλεύει» κάτω από τη θάλασσα;

Θυμίζω ότι η θάλασσα δεν είναι απεσταγμένο, καθαρό νερό, αλλά περιέχει ιόντα από διάσπαση αλάτων. Τα ιόντα είναι ηλεκτρικά φορτισμένα, και έτσι το θαλάσσιο νερό, σε αντίθεση με το απολύτως καθαρό, είναι ηλεκτρικά αγώγιμο. Τι μας λέει ο Maxwell; Μας λέει ότι τα **αγώγιμα** υλικά μέσα, γενικά, έχουν την ιδιότητα να **απορροφούν** τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εισέρχονται σε αυτά. Όμως, πριν εισέλθει το H/M κύμα στον αγωγό, υφίσταται και ένα άλλο φαινόμενο: **ανάκλαση** στην επιφάνεια του αγώγιμου μέσου. Και, όσο πιο μεγάλη είναι η αγωγιμότητα του μέσου, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της ενέργειας του κύματος που ανακλάται, ενώ το μικρό μέρος του κύματος που εισέρχεται απορροφάται πολύ γρήγορα (δηλαδή, φτάνει σε μικρό μόνο βάθος πριν απορροφηθεί τελείως από τον αγωγό).

Το μέγιστο βάθος στο οποίο διεισδύει ένα H/M κύμα σε έναν αγωγό ονομάζεται **επιδερμικό βάθος**. Προσέξτε δύο σημαντικές παρατηρήσεις:

1. Το επιδερμικό βάθος είναι τόσο μικρότερο όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του υλικού μέσου. Οριακά, ένας «τέλειος» αγωγός δεν επιτρέπει καν την διείσδυση H/M κυμάτων στο εσωτερικό του (γίνεται ολική ανάκλαση στην επιφάνεια του μέσου).
2. Το επιδερμικό βάθος **ελαττώνεται** καθώς αυξάνει η συχνότητα του H/M κύματος που διεισδύει. Δηλαδή, τα πιο **χαμηλόσυχνα** κύματα είναι και **περισσότερο διεισδυτικά** στο αγώγιμο μέσο.

Όλα αυτά, φυσικά, αποδεικνύονται και μαθηματικά, με βάση τις εξισώσεις του Maxwell. Η μαθηματική επεξεργασία του θέματος υπάρχει στην Παρ. 10.9 του βιβλίου (σελ. 175) καθώς και στο Πρόβλημα 7 (σελ. 200).

Τώρα, τι θέλω να ξέρετε: Από την Παρ. 10.9, την παρατήρηση (4) στη σελ. 177 (όλο το κείμενο από το 4 και κάτω, μέχρι το τέλος της σελ. 177) και, από το υπόλοιπο της Παρ. 10.9, μόνο τα φυσικά συμπεράσματα που γράφονται με bold. Τέλος, πολύ καλά την Παρ.10.10, που αφορά ανάκλαση H/M κύματος στην επιφάνεια αγωγού.

Ας συνοψίσουμε: Είδαμε πώς προκύπτει η κυματική ιδιότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις εξισώσεις του Maxwell, καθώς και τι υφίσταται ένα Η/Μ κύμα όταν διέρχεται μέσα από ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό μέσο. Αναφέραμε επίσης ότι το Η/Μ κύμα μεταφέρει ενέργεια στην κατεύθυνση διαδόσεώς του. Το φαινόμενο διάδοσης της ενέργειας μέσω Η/Μ κυμάτων ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**. Φυσικά συστήματα που παράγουν Η/Μ ακτινοβολία λέμε ότι **ακτινοβολούν**. Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι, π.χ., ένα άτομο, ένα μόριο, ένας πυρήνας, μία κεραία ραδιοφωνικού σταθμού, κλπ. Αλλά, πώς παράγεται η Η/Μ ακτινοβολία από τέτοια συστήματα;

Όπως προκύπτει από τις εξισώσεις του Maxwell, η Η/Μ ακτινοβολία παράγεται από

- **επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία**, ή
- **χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά ρεύματα**.

Λεπτομέρειες στην Παρ. 10.11, από την οποία θέλω μόνο αυτά που αναφέρονται στη σελ. 181 (όχι τις μαθηματικές αποδείξεις στη σελ. 182).

Πάμε τώρα στην Παρ. 10.12 (σελ. 183). Εκεί μαθαίνουμε ότι

- *ένα φορτίο που κινείται με **σταθερή** ταχύτητα (ευθύγραμμο και ομαλά) **δεν εκπέμπει** Η/Μ ακτινοβολία, αλλά*
- *ένα φορτίο που **επιταχύνεται**, **εκπέμπει** Η/Μ ακτινοβολία.*

Θέλω να προσέξετε τις Παρατηρήσεις στη σελ. 184, ιδιαίτερα την Παρατήρηση 3.

Δείτε και ένα εκλαϊκευμένο επιστημονικό άρθρο που συζητά την πρόβλεψη της Η/Μ ακτινοβολίας από τον Maxwell, καθώς και την πρόβλεψη των κυμάτων βαρύτητας από τον Einstein:

<https://eclass.hna.gr/modules/document/file.php/TOM6106/maxwell-einstein-waves.pdf>

Εκεί δίνω το πιο κάτω μεταφορικό παράδειγμα:

*Μια ζεστή μέρα του καλοκαιριού, πάτε ως το περίπτερο να αγοράσετε ένα παγωτό. Για να προλάβετε πριν λιώσει, αποφασίζετε να το φάτε στο δρόμο. Βαδίζετε αμέριμνοι σε ένα ευθύγραμμο μονοπάτι με σταθερό βήμα (άρα, με σταθερή ταχύτητα) χωρίς να πάρετε είδηση ένα σμήνος από μέλισσες που σας ακολουθούν πολιορκώντας το παγωτό σας! Όταν ξαφνικά τις αντιλαμβάνεστε, επιταχύνετε την κίνησή σας για να τους ξεφύγετε (είτε τρέχετε πιο γρήγορα προς τα μπρος, είτε απλά αλλάζετε κατεύθυνση πορείας). Τρομαγμένες, τότε, από την κίνησή σας αυτή, κάποιες μέλισσες αποκόπτονται από το σμήνος και πετούν μακριά, χωρίς ποτέ να επιστρέψουν.*

*Τι σημαίνουν όλα αυτά; Το «παγωτό» είναι ένα ηλεκτρικό φορτίο που αρχικά κινείται με σταθερή ταχύτητα, μεταφέροντας στην κατεύθυνση της κίνησής του την ολική ενέργεια του Η/Μ πεδίου του (το «σμήνος των μελισσών») η οποία μένει σταθερή. Όταν το φορτίο επιταχύνεται, ένα μέρος της ενέργειας αυτής (οι «μέλισσες» που πέταξαν μακριά) αποσπάται, κατά κάποιον τρόπο, και απομακρύνεται προς το άπειρο με την ταχύτητα του φωτός, υπό μορφή Η/Μ κύματος. Και, όσο πιο μεγάλη είναι η επιτάχυνση του φορτίου, τόσο πιο μεγάλη είναι και η ενέργεια της εκπεμπόμενης Η/Μ ακτινοβολίας στη μονάδα του χρόνου.*

Μάθαμε, λοιπόν, τι είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και με ποιους τρόπους παράγεται. Θυμίζω: (α) με **επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία**, ή (β) με **χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά ρεύματα**. Ένα φυσικό παράδειγμα της περίπτωσης (α) είναι η ακτινοβολία που εκπέμπει ένα **παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο**, όπως π.χ. η γραμμική κεραία ενός ραδιοφωνικού σταθμού. Αντίστοιχα για την περίπτωση (β) έχουμε την ακτινοβολία από **παλλόμενο μαγνητικό δίπολο**, όπως είναι μία κυκλική κεραία εκπομπής. Αυτά συζητούνται στις Παρ. 10.13 και 10.14.

Στην Παρ. 10.15 παραθέτουμε το **φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας**, που σημαίνει την συστηματική ταξινόμηση της ακτινοβολίας ανάλογα με τις διάφορες περιοχές συχνοτήτων της. Θέλω μόνο τα ονόματα των περιοχών 1 έως 7 (ραδιοκύματα έως ακτίνες γ), όχι άλλες λεπτομέρειες.

Στην Παρ. 10.9 μάθαμε ότι οι αγωγοί απορροφούν την Η/Μ ακτινοβολία που «τολμά» να εισέλθει στο εσωτερικό τους. Δηλαδή, οι μονωτές (διηλεκτρικά) δεν την απορροφούν; Και όμως, κι εκείνοι την απορροφούν, αλλά με διαφορετικό τρόπο: Ενώ οι αγωγοί την απορροφούν λόγω των **ελεύθερων** φορτίων που διαθέτουν (π.χ., ελεύθερα ηλεκτρόνια στα μέταλλα, ιόντα αλάτων στη θάλασσα, κλπ), οι μονωτές, που δεν διαθέτουν ελεύθερα φορτία, απορροφούν την ακτινοβολία μέσω των **δέσμιων** ηλεκτρονίων των ατόμων. Αυτό περιγράφεται στην Παρ. 10.16. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξήγηση του χρώματος του ουρανού, στην τελευταία παράγραφο της σελ. 189.

Μας μένει τώρα η Παρ. 10.17, ίσως το ωραιότερο θέμα αυτού του κεφαλαίου! Και, αυτά που θα δούμε θα ανατρέψουν μερικά από εκείνα που έχουμε πει σχετικά με τη διάδοση Η/Μ κυμάτων μέσα σε αγωγούς...

Για να θυμηθούμε τι έχουμε μάθει ως τώρα: Όταν ένα Η/Μ κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια ενός αγωγίμου μέσου, ένα μέρος της ενέργειας του κύματος **ανακλάται** στην επιφάνεια του μέσου, ενώ ένα άλλο μέρος του κύματος διεισδύει στον αγωγό και, τελικά, **απορροφάται**, φτάνοντας μέχρι ένα μέγιστο βάθος που ονομάσαμε **επιδερμικό βάθος** (σύμβολο:  $\Delta$ ). Και μάλιστα, όσο **μεγαλύτερη** είναι η συχνότητα  $\omega$  του κύματος, τόσο **μικρότερο** είναι το  $\Delta$  (δηλαδή, όσο αυξάνει η συχνότητα, τόσο λιγότερο διεισδύει το κύμα μέσα στον αγωγό).

Ας φανταστούμε, τώρα, ότι επιτρέπουμε στη συχνότητα  $\omega$  να αυξάνει συνεχώς. Λογικά, αυτό θα επιφέρει συνεχή ελάττωση του  $\Delta$ . Όμως, συμβαίνει κάτι περίεργο: Όταν το  $\omega$  ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή  $\omega_p$ , χαρακτηριστική για το θεωρούμενο αγωγίμο υλικό, τότε όλα αυτά που είπαμε πιο πάνω παύουν να ισχύουν. Δηλαδή, το Η/Μ κύμα διέρχεται μέσα από τον αγωγό χωρίς σχεδόν να ανακλάται στην επιφάνειά του και χωρίς να απορροφάται στο εσωτερικό του! Σαν να λέμε, ο αγωγός γίνεται «διαφανής» στην Η/Μ ακτινοβολία για συχνότητες  $\omega > \omega_p$ . Η χαρακτηριστική συχνότητα  $\omega_p$  ονομάζεται **συχνότητα πλάσματος** για τον θεωρούμενο αγωγό.

Γιατί συμβαίνει αυτό; Φανταστείτε την εξής σκηνή: Ένας χορευτής προσπαθεί να χορεύει στον ρυθμό που κάποιος του χτυπά παλαμάκια. Και, όσο πιο γρήγορα ο δεύτερος χτυπά τα χέρια του, τόσο πιο γρήγορα χορεύει ο χορευτής. Όμως, κάποια στιγμή ο ρυθμός γίνεται τόσο γρήγορος που ο χορευτής δεν μπορεί πλέον να ανταποκριθεί. Λέει, τότε, «*παραιτούμαι, δεν χορεύω άλλο!*»! Και σταματά να χορεύει...

Τα «παλαμάκια» είναι το ηλεκτρικό πεδίο του Η/Μ κύματος, που ταλαντώνεται με συχνότητα  $\omega$ . Με την ίδια συχνότητα, τότε, ταλαντώνονται και τα ελεύθερα φορτία (ηλεκτρόνια ή ιόντα) στον αγωγό (αυτό λέγεται φαινόμενο συντονισμού). Και, καθώς τα φορτία ταλαντώνονται σε συντονισμό με το Η/Μ κύμα, «κλέβουν» ένα ποσό ενέργειας από το κύμα (έτσι, έχουμε απορρόφηση της ενέργειας του κύματος μέσα



στον αγωγό). Αν, όμως, το  $\omega$  γίνει υπερβολικά μεγάλο - μεγαλύτερο από τη συχνότητα πλάσματος  $\omega_p$  για το δεδομένο αγώγιμο υλικό - τότε τα ελεύθερα φορτία του αγωγού δεν προλαβαίνουν πλέον να ανταποκρίνονται στις ταλαντώσεις του ηλεκτρικού πεδίου και «παραιτούνται» από την προσπάθεια. Έτσι, ο αγωγός παύει να απορροφά το κύμα, το οποίο πλέον διέρχεται ανεμπόδιστα μέσα από το υλικό.

Ας ανακεφαλαιώσουμε: **Συχνότητα πλάσματος** ενός αγώγιμου μέσου είναι η συχνότητα ακτινοβολίας  $\omega_p$  για την οποία ισχύουν τα εξής: Κάθε Η/Μ κύμα με συχνότητα  $\omega < \omega_p$  που προσπίπτει στην επιφάνεια του αγωγού, εν μέρει ανακλάται στην επιφάνεια και εν μέρει απορροφάται όταν διεισδύσει στο εσωτερικό του αγωγού. Αντίθετα, κάθε Η/Μ κύμα με συχνότητα  $\omega > \omega_p$  διέρχεται μέσα από τον αγωγό με αμελητέα ανάκλαση στην επιφάνεια και αμελητέα απορρόφηση στο εσωτερικό του.

Ένα αγώγιμο μέσο που περιβάλλει τη Γη είναι η **ιονόσφαιρα**, ένα στρώμα της ατμόσφαιρας που εκτείνεται από περίπου 60 έως 300 χμ. πάνω από την επιφάνεια της Γης. Παλιότερα, όταν η ραδιοφωνία γινόταν μέσω των σχετικά χαμηλόσυχνων ραδιοκυμάτων AM (Amplitude-Modulated Radio Waves), η ιονόσφαιρα χρησίμευε σαν «ανακλαστήρας» των κυμάτων αυτών ώστε να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις πάνω στη Γη. Με την ανάπτυξη, όμως, των σχετικά υψηλόσυχνων ραδιοκυμάτων FM (Frequency-Modulated Radio Waves) η ιονόσφαιρα έχασε αυτή τη σημασία της, αφού τα FM την διαπερνούν.

Πού βρίσκεται η διαφορά; Απλούστατα, οι συχνότητες των AM βρίσκονται **κάτω** από τη συχνότητα πλάσματος της ιονόσφαιρας, οπότε τα AM υφίστανται **ανάκλαση** (και μερική απορρόφηση) όταν φτάνουν στην ιονόσφαιρα. Αντίθετα, οι συχνότητες των FM είναι **πάνω** από τη συχνότητα πλάσματος της ιονόσφαιρας, και έτσι τα FM **διαπερνούν** την ιονόσφαιρα χωρίς να ανακλώνται ή να απορροφώνται. Και τότε, πώς φτάνουν τα FM (αλλά και τα Η/Μ κύματα της τηλεόρασης, καθώς και των κινητών σας) σε πάρα πολύ μακρινές αποστάσεις; Απλά, τον ρόλο της ιονόσφαιρας παίζουν κατάλληλα τοποθετημένοι δορυφόροι!

## Κεφ. 10, Ερωτήσεις

Αφού τελειώσαμε την θεωρία, ας επικεντρωθούμε τώρα στις Ερωτήσεις του Κεφαλαίου 10 (σελ. 193). Επιλέγω μερικές από αυτές:

Ερώτηση 6: Ποιο από τα δύο κύματα έχει μικρότερη συχνότητα; Δείτε το βασικό συμπέρασμα (γραμμένο με bold) στη σελ. 179. Εύκολο!

Ερώτηση 7: Μικρό επιδερμικό βάθος σημαίνει καλός απορροφητής, άρα και καλός ανακλαστήρας (Παρ. 10.10, σελ. 180). Άρα, ποιο μέταλλο θα διαλέγατε για να φτιάξετε έναν καθρέφτη;

Ερώτηση 8: Πολύ σημαντική! Δείτε σελ. 184, Παρατήρηση 3. Τα λέει όλα!

Ερώτηση 11: Τα μέταλλα απορροφούν την ορατή ακτινοβολία επειδή οι συχνότητες της ακτινοβολίας αυτής είναι μικρότερες από τη συχνότητα πλάσματος των περισσότερων μετάλλων. Η υπεριώδης ακτινοβολία, όμως, έχει συχνότητα που υπερβαίνει τη συχνότητα πλάσματος των μετάλλων (δείτε Παρ. 10.17, σελ. 190, κάτω από τα bold). Συμπέρασμα: Καλύτερα πάρτε το αντηλιακό μέσα στο σκοτεινό δωμάτιο!

Ερώτηση 12: (α) Τόσο τα AM, όσο και τα FM, έχουν συχνότητες πολύ μικρότερες από τη συχνότητα πλάσματος της θάλασσας. Έτσι, και τα δύο κύματα θα απορροφηθούν μέσα στο νερό. Όμως, τα AM θα φτάσουν σε μεγαλύτερο βάθος, αφού έχουν μικρότερη συχνότητα από τα FM. (β) Για να φτάσουν στο διάστημα τα ραδιοκύματα θα πρέπει να διαπεράσουν την ιονόσφαιρα. Όμως τα AM ανακλώνται πίσω στη Γη, αφού οι συχνότητές τους είναι μικρότερες από τη συχνότητα πλάσματος της ιονόσφαιρας. Αντίθετα, τα FM έχουν συχνότητες μεγαλύτερες από τη συχνότητα πλάσματος της ιονόσφαιρας, και έτσι διαπερνούν την ιονόσφαιρα και φτάνουν στο διάστημα.

Ερώτηση 13: (1) Μόνο το ηχητικό κύμα του sonar μπορεί να φτάσει σε μεγάλα βάθη στη θάλασσα. (2) Το radar δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα σε ανιχνεύσεις επιφανείας. (3) & (4) Βλ. Ερώτηση 12.

Ερώτηση 14: Βλ. σελ. 191 του βιβλίου.

Ερώτηση 15: Δείτε την Υπόδειξη. Θα μπορούσαν η ορατή και η υπέρυθρη ακτινοβολία από τον Ήλιο να διαπεράσουν την ιονόσφαιρα και να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης; Θα υπήρχε, επομένως, μέρα και νύχτα, ή καλοκαίρι και χειμώνας;

### **Ερωτήσεις φυλλαδίου (για ολόκληρο το μάθημα)**

Βρείτε το φυλλάδιο εδώ:

[https://eclass.hna.gr/modules/document/file.php/TOM6104/EM\\_Theory\\_Questions.pdf](https://eclass.hna.gr/modules/document/file.php/TOM6104/EM_Theory_Questions.pdf)

Οι ερωτήσεις είναι πιθανά θέματα εξετάσεων!