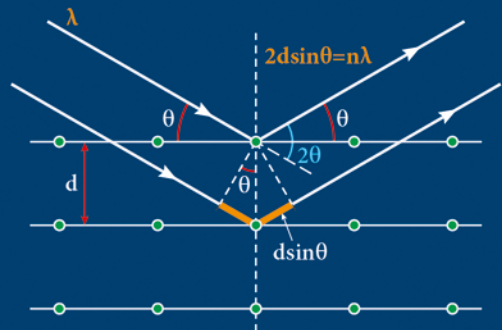
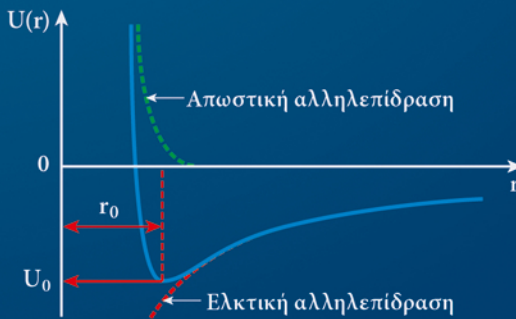


Γ. Π. Τριμπέρης - Μ. Τσέτσερη

Ανακαλύπτοντας τη Φυσική της Στερεάς Κατάστασης



ISBN 978-960-456-606-8

© Copyright, Ιούnius 2023, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Γεώργιος Π. Τριμπέρης, Μαρία Τσέτσερη

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

| | |
|--------------------------|---|
| Φωτοστοιχειοθεσία | Π. ΖΗΤΗ & ΣΙΑ Ι.Κ.Ε. |
| Εκτύπωση | 18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας |
| Βιβλιοδεσία | Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19 |
| | Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr |



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:
Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:
Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα
Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Σε όσους εξακολουθούν να διερωτώνται

Πρόλογος

Στη χώρα μας η ανάπτυξη της Θεωρητικής Φυσικής της Στερεάς Κατάστασης (Φ.Σ.Κ.) άργησε να ξεκινήσει. Οι πρώτοι καθηγητές της Θεωρητικής Φυσικής, οι οποίοι επάνδρωσαν τα ελληνικά πανεπιστήμια τη δεκαετία του '60, ήταν όλοι Φυσικοί των υψηλών ενεργειών – στοιχειωδών σωματιδίων οι οποίοι, πλην ελαχίστων, όπως ήταν φυσικό, προσανατόλισαν τη νεότερη γενιά των Φυσικών εκείνης της εποχής προς την ίδια κατεύθυνση. Στην Ελλάδα, ουσιαστικά, η Θεωρητική Φ.Σ.Κ. άρχισε να αναπτύσσεται μετά τα τέλη της δεκαετίας του '70.

Διαχρονικά, τα μέσα μαζικής ενημέρωσης εστιάζουν, συνήθως, το ενδιαφέρον τους στην Αστρονομία, στη Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων ή και στη Βιολογία απ' ό,τι στη Φυσική της Στερεάς Κατάστασης. Ένας από τους λόγους της προβολής αυτών των πεδίων της Φυσικής είναι το ότι το κοινό βλέπει καθημερινά τον εντυπωσιακό ουράνιο θόλο, γοητεύεται από το διάστημα, θέλει να μάθει πώς άρχισαν όλα, πώς λειτουργούν οι ατομικές βόμβες ή οι ζώντες οργανισμοί, τι είναι το CERN. Αυτός είναι ο λόγος προβολής από τα ΜΜΕ των σχετικών περιοχών της Φυσικής, σε «βάρους» της Φ.Σ.Κ.

Βεβαίως, το ενδιαφέρον του κοινού για τους υπολογιστές ή για τις ηλεκτρονικές διατάξεις έχει ως αποτέλεσμα, κατά καιρούς, να πέσει λίγο φως σε συγκεκριμένα αντικείμενα της Φ.Σ.Κ., αλλά τελικά είδηση αποτελεί πάντα κάθε τι που εμπλέκει τον Αϊνστάιν. Παρ' όλα αυτά, η αλήθεια είναι πως κατά τα τελευταία χρόνια έχουν δοθεί περισσότερα από 25 Nobel σε Φυσικούς που εργάζονται στη Φ.Σ.Κ. ή ακριβέστερα στη «Φυσική Συμπυκνωμένης Ύλης», η οποία αποτελεί τη σύγχρονη διευρυμένη μορφή της, και σε συναφή πεδία.

Παρά τη σημαντική πρόοδο η οποία έχει σημειωθεί, από τότε μέχρι σήμερα, με την ενίσχυση του ακαδημαϊκού και ερευνητικού δυναμικού της χώρας με αξιόλογους Φυσικούς στο αντικείμενο αυτό, η Φ.Σ.Κ. γίνεται, συνήθως, αντικείμενο συστηματικής μελέτης στην πανεπιστημιακή εκπαίδευση, κατά το έβδομο ή το όγδοο εξάμηνο των σπουδών, ως μάθημα κατεύθυνσης, με εξαίρεση, ίσως, ένα εισαγωγικό μάθημα στο έκτο εξάμηνο. Ο λόγος είναι ότι η Κλασική και η Κβαντική Μηχανική, η Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία, η Ατομική Φυσική καθώς και η Στατιστική Φυσική, οι οποίες αποτελούν προαπαιτούμενο γνωστικό πλαίσιο πάνω στο οποίο θεμελιώνεται η διδασκαλία σε πανεπιστημιακό επίπεδο της Φ.Σ.Κ., προηγούνται χρονικά

στο πρόγραμμα σπουδών. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένας φοιτητής Τμήματος Φυσικής, εάν δεν επιλέξει τη σχετική κατεύθυνση, να αποφοιτήσει χωρίς να έχει παρακολουθήσει ούτε ένα εξάμηνο Φυσική Στερεάς Κατάστασης.

Επίσης, προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι ένας πρωτοετής φοιτητής εισάγεται σε ένα Τμήμα Φυσικής αγνοώντας ακόμα και την ύπαρξη της Φ.Σ.Κ. ως κλάδου της Φυσικής επιστήμης, γεγονός το οποίο επηρεάζει την επιλογή της κατεύθυνσης που θα ακολουθήσει, και συνακόλουθα το επιστημονικό του μέλλον.

Εάν ερωτηθούν οι 250 πρωτοετείς φοιτητές Φυσικής μέσα σε ένα αμφιθέατρο –πραγματική κατ’ έτος διερευνητική ερώτηση ενός εκ των συγγραφέων (Γ.Π.Τ.)– πόσοι από αυτούς έχουν ακούσει τον όρο «Φυσική Συμπυκνωμένης Ύλης» ή «Φυσική Στερεάς Κατάστασης» στο λυκειακό τους περιβάλλον, δεν θα βρεθούν περισσότεροι από 1-2 (ίσως) που θα απαντήσουν θετικά. Το γεγονός αυτό, παράλληλα με την πανεπιστημιακή διδασκαλία του αντικείμενου σε προχωρημένα εξάμηνα, λειτουργεί ανασταλτικά στην προσέλευση νέων επιστημόνων στην κατεύθυνση αυτή.

Αυτό είναι αποτέλεσμα της απουσίας της οποιασδήποτε αναφοράς στη Φ.Σ.Κ. στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση. Εκεί οι ηλεκτρικές ή οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών αναφέρονται ως εάν να ήταν αντικείμενα αυτοτελών και ανεξάρτητων κλάδων της Φυσικής που ονομάζονται «Ηλεκτρισμός» ή «Μαγνητισμός». Σε μια εποχή εντυπωσιακών εφαρμογών των ημιαγωγών, απουσιάζει ακόμα και η αναφορά σε θεμελιώδη χαρακτηριστικά και ιδιότητές τους, τόσο στα «αναλυτικά προγράμματα σπουδών» όσο και στη λυκειακή βιβλιογραφία. Ακόμα και αν υπάρξει κάποια αναφορά, οι ημιαγωγοί αποδίδονται ως αντικείμενα της «Ηλεκτρονικής». Δεν αναφέρεται, ως γεγονός τουλάχιστον, ότι οι ημιαγωγοί αποτελούν ένα ιδιαίτερο είδος υλικών, διαφορετικό από τα μέταλλα ή τους μονωτές, η μελέτη όμως των οποίων, όπως και οι ηλεκτρικές, οι μαγνητικές και τόσες άλλες ιδιότητες των στερεών, μελετώνται στα πλαίσια της «Φυσικής της Στερεάς Κατάστασης».

Επιδίωξη μας είναι να αποκαταστήσουμε τη θέση της Φ.Σ.Κ. ως αντικείμενο της Φυσικής επιστήμης, αναδεικνύοντας τον πλούτο και τη σημασία της, τόσο στα μάτια των φοιτητών, όσο και σε εκείνα των μαθητών Λυκείου... και όχι μόνο. Όσον αφορά τους τελευταίους φιλοδοξούμε να συμβάλλουμε στη διδασκαλία της Φυσικής, στα σύγχρονα πλαίσια της διδακτέας ύλης, διεγείροντας και το ενδιαφέρον των καθηγητών τους.

Στην καθημερινή μας ζωή όταν χρησιμοποιούμε τη λέξη «υλικό» συνήθως εννοούμε κάτι ουσιαστικό, κάτι με χρηστική αξία, ενώ όταν χρησιμοποιούμε τη λέξη «ύλη» εννοούμε κάτι λιγότερο συγκεκριμένο και περισσότερο θεμελιακό. Έτσι οδηγούμαστε στη χρησιμοποίηση όρων όπως «Καταστάσεις της Ύλης», «Φυσική της

Συμπυκνωμένης Ύλης», «Φυσική της Στερεάς Κατάστασης» ή και «Επιστήμη των Υλικών». Τη σημασία του καθενός από τους όρους αυτούς φιλοδοξούμε επίσης να αναδείξουμε.

Το παρόν βιβλίο με τίτλο «*Ανακαλύπτοντας τη Φυσική της Στερεάς Κατάστασης*», είναι μια περιήγηση επιλεγμένης, σχετικά περιορισμένης σε έκταση, αν αναλογιστεί κανείς το εύρος του αντικειμένου, ώστε να μην κουράζει, αλλά χαρακτηριστικής θεματολογίας. Η διδακτική προσέγγιση αναδεικνύει τη σημασία, αλλά και την αναγκαιότητα της διερεύνησης των ιδιοτήτων των στερεών και σε «μικροσκοπικό επίπεδο», πέρα από τη «μακροσκοπική» διαπίστωση της ύπαρξής τους.

Ένα μέρος αυτού του βιβλίου αποτέλεσε τη βάση σειράς διαλέξεων τις οποίες ένας εκ των συγγραφέων (Γ.Π.Τ.) έδωσε επί σειρά ετών στο Τμήμα Φυσικής του Ε.Κ.Π.Α., στα πλαίσια του εξαμηνιαίου μαθήματος «Φυσική Στερεάς Κατάστασης», με αντικείμενο τη θεωρία των ζωνών, καθώς και την ανάδειξη και ερμηνεία των βασικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των μετάλλων και των ημιαγωγών. Περιλαμβάνεται επίσης μέρος των διαλέξεων που έχουν δοθεί επί σειρά ετών, μετά από πρόσκληση σε διάφορα θερινά σχολεία, επιμορφωτικά σεμινάρια καθηγητών της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης και Λύκεια.

Πρόθεσή μας είναι, με ένα ευχάριστο και κατανοητό τρόπο να αποκαλύψουμε στους φοιτητές αλλά και στους μαθητές, ένα καινούργιο μονοπάτι στο θαυμαστό ταξίδι τους στη Φυσική, και γιατί όχι να τους γοητεύσουμε σε τέτοιο βαθμό, ώστε να στραφούν σε μια συστηματικότερη αναζήτηση και επιστημονική ενασχόληση στον κόσμο της Φυσικής της Στερεάς Κατάστασης, στη συνέχεια των σπουδών τους.

Συγκεκριμένα στην κατεύθυνση αυτή:

Εισαγωγικά κάνουμε την *Πρώτη Γνωριμία* με τη «Φυσική της Στερεάς Κατάστασης», ακόμα και στη διευρυμένη της μορφή ως «Φυσική της Συμπυκνωμένης Ύλης», μέσα από μια ιστορική αναδρομή από την αρχαιότητα μέχρι τις ημέρες μας, με αναφορές σε σημαντικούς σταθμούς στην εξέλιξή της, στη σημασία τους στην ανάπτυξη της γνώσης μας αναφορικά με τις ιδιότητες των κρυσταλλικών στερεών, των ετεροδομών τους, των μη κρυσταλλικών-άμορφων στερεών, της μαλακής ύλης, και των εφαρμογών τους. Παρατίθεται σε ένα πρώτο επίπεδο το πως διαμορφώνεται μια θεωρητική μοντελοποίηση - απεικόνιση ενός στερεού με σκοπό τη μελέτη, στην απλούστερη μορφή του, των γεωμετρικών του ιδιοτήτων και προοδευτικά συνθετότερων ιδιοτήτων του, όπως των στατικών, των δυναμικών, των ηλεκτρικών, των μαγνητικών κ.ά.

Το *Κεφάλαιο 1* επιγράφεται *Το Άτομο και οι Ατομικοί Δεσμοί*. Εδώ παρουσιάζονται κριτικά οι πρώτες προσπάθειες για την αναπαραγωγή του γραμμικού φάσμα-

τος εκπομπής του υδρογόνου, ο εμπειρικός τύπος του Balmer, το ατομικό μοντέλο του Rutherford, καθώς και το μοντέλο του Bohr, όπου εισάγεται η έννοια της κβάντωσης της τροχιακής στροφορμής του ηλεκτρονίου. Στη συνέχεια εισάγονται αναλυτικά οι κβαντικοί αριθμοί οι οποίοι καθορίζουν τα ατομικά τροχιακά και οδηγούν στην ηλεκτρονιακή διαμόρφωση των ατόμων και στη σύσταση του περιοδικού πίνακα. Τέλος, πλησιάζοντας τα απομονωμένα άτομα, με σχετική εικονογράφηση και ποσοτική-φαινομενολογική ανάλυση των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων, δικαιολογείται η δημιουργία των τεσσάρων κυρίων ατομικών δεσμών, του Van der Waals ή μοριακού δεσμού, του ιοντικού, του ομοιοπολικού και του μεταλλικού.

Το **Κεφάλαιο 2** έχει τίτλο **Ακτινογραφώντας τα Στερεά***, και είναι αφιερωμένο στους πολύμορφους σχηματισμούς στους οποίους συντίθενται τα κρυσταλλικά στερεά και βοηθά στην κατανόηση της κρυσταλλικής δομής τους. Η μελέτη του μπορεί να ακολουθήσει μετά από μια πρώτη ανάγνωση των υπολοίπων κεφαλαίων, αποσαφηνίζοντας όρους που ίσως συναντώνται σε άλλα κεφάλαια. Εισάγεται ιστορικά ο νόμος του Bragg, και αναπτύσσεται η δημιουργία των διαφόρων κρυσταλλικών δομών στα πλαίσια του πλέγματος Bravais. Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κρυσταλλικών συμμετριών, οι κρυσταλλικές διευθύνσεις, τα κρυσταλλικά επίπεδα και οι δείκτες Miller. Παρατίθενται τα διάφορα είδη κρυσταλλικών πλεγμάτων και η περιήγηση ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του υπολογισμού χαρακτηριστικών της κρυσταλλικής δομής, με χρήση πειραματικών δεδομένων περίθλασης ακτίνων X.

Το **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζει τις **Ενεργειακές Ζώνες στα Στερεά**. Εδώ περιγράφεται το πώς οι ατομικές ενεργειακές στάθμες των ανεξάρτητων και απομακρυσμένων μεταξύ τους ατόμων, οι οποίες φιλοξενούν τα ηλεκτρόνια τους, όταν τα άτομα αυτά πλησιάσουν τόσο κοντά ώστε να σχηματιστεί ένα κρυσταλλικό υλικό, στοιχείο ή ένωση, διαμορφώνονται σε συνεχείς επιτρεπόμενες και απαγορευμένες ενεργειακές περιοχές (ζώνες). Εισάγονται η ζώνη σθένους, η ζώνη αγωγιμότητας και το ενεργειακό χάσμα, και απαντώνται ερωτήματα όπως «γιατί κάποια υλικά επιτρέπουν την αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος» ενώ «άλλα την απαγορεύουν», καθώς και «γιατί κάποια άλλα υλικά επιτρέπουν την αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος υπό συνθήκες». Για το σκοπό αυτόν, επιλέγονται ο άνθρακας (C), με δομή αδάμαντα, με ηλεκτρονιακή διαμόρφωση $1s^2 2s^2 2p^2$, το νάτριο (Na), με ηλεκτρονιακή διαμόρφωση $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$, το πυρίτιο (Si), με ηλεκτρονιακή διαμόρφωση $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$, και ο ιοντικός κρύσταλλος χλωριούχο νάτριο (NaCl).

Το **Κεφάλαιο 4** υπό τον τίτλο **Φαινόμενα Μεταφοράς στα Μέταλλα - Ο νόμος του Ohm reloaded**, αναλύει την ανταπόκριση ενός μετάλλου στην εφαρμογή εξω-

τερικών «πεδίων». Η αναλυτική κριτική παρουσίαση του μοντέλου του Drude (Πρώιμες θεωρίες) οδηγεί στην παραγωγή του νόμου του Ohm, αναδεικνύοντας με απλό τρόπο τους «μηχανισμούς σκέδασης» που οδηγούν στην εμφάνιση της ηλεκτρικής αντίστασης.

Ο τρόπος παρουσίασής του, υποθέσεις-ανάλυση-σύγκριση με το πείραμα-συμπεράσματα-αξιολόγηση, χρησιμεύει, ως ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, για να γίνει κατανοητό το πώς κτίζεται ένα θεωρητικό μοντέλο, στη βάση των γνώσεων της εποχής κατά την οποία δημιουργήθηκε, προκειμένου να ερμηνεύσει μακροσκοπικά παρατηρούμενες ιδιότητες της ύλης.

Η ανάλυση συμπληρώνεται με τη μελέτη της επίδρασης της μεταβολής της θερμοκρασίας κατά μήκος ενός μεταλλικού αγωγού, με τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας και την επαλήθευση του νόμου των Wiedemann-Franz.

Τα αποτελέσματα μοντέλων όπως του Lorentz και του Sommerfeld, στη βάση ρεαλιστικότερων υποθέσεων, σε ύστερους χρόνους, για τη θερμοδυναμική-στατιστική συμπεριφορά των φορέων, παρουσιάζονται χωρίς λεπτομερή ανάλυση, καθώς εκτιμάται πως αυτή υπερβαίνει το γνωσιακό επίπεδο φοιτητών των πρώτων ετών, καθώς και μαθητών Λυκείου. Η σύγκριση των τριών αυτών μοντέλων οδηγεί στην κατανόηση του γεγονότος ότι ρεαλιστικότερες προσεγγίσεις οδηγούν σε ακόμα ορθότερη, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, ερμηνεία της φυσικής πραγματικότητας.

Τέλος, με ένα ευρηματικό-φαινομενολογικό τρόπο παρουσιάζονται οι μηχανισμοί σκέδασης που οδηγούν στη διαφορετική θερμοκρασιακή εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης των μετάλλων, σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες.

Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει τους *Ημιαγωγούς* ως αναπόσπαστο μέρος της Φυσικής της Στερεάς Κατάστασης. Παρουσιάζεται η δομή και η σύστασή τους, η σχηματική απεικόνισή τους τόσο στην εικόνα των δεσμών όσο και των ζωνών, ώστε να συνδεθεί με την αντίστοιχη εικόνα των μετάλλων. Η ιδιαιτερότητα της παρουσίας δύο ειδών φορέων, ηλεκτρονίων και οπών, αναπτύσσεται παράλληλα με την εισαγωγή της ενεργούς μάζας.

Εισάγεται η πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας και θεωρώντας δεδομένη τη μαθηματική της έκφραση, παρουσιάζεται η κατανομή των φορέων σε κατάσταση ισορροπίας.

Αναλύεται η εισαγωγή και ο ρόλος των προσμίξεων στους ημιαγωγούς και υπολογίζεται η ενέργεια ιονισμού τους. Δεδομένης της συνάρτησης κατανομής και της πυκνότητας καταστάσεων, υπολογίζεται η συγκέντρωση των φορέων για διάφορες χαρακτηριστικές περιπτώσεις και αναλύεται η θερμοκρασιακή της εξάρτηση.

Τέλος, αναπτύσσεται η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στους ημιαγωγούς που καταλήγει στην έκφραση του αντίστοιχου νόμου του Ohm, καθώς και του μαγνητικού πεδίου, αναδεικνύοντας τη σημασία του φαινομένου Hall.

Το **Κεφάλαιο 6** πραγματεύεται τα **Μαγνητικά Υλικά**. Εισάγονται οι έννοιες της μαγνητικής διπολικής ροπής και της μαγνήτισης, στα πλαίσια του ατομικού προτύπου (1^ο Κεφάλαιο), της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Μελετώνται και αναλύονται οι μηχανισμοί και οι νόμοι, που χαρακτηρίζουν την παραμαγνητική (νόμος Curie), την διαμαγνητική (συχνότητα Larmor) και τη σιδηρομαγνητική συμπεριφορά (νόμος Curie-Weiss) των στερεών και γίνεται αναφορά στις εφαρμογές τους.

Το **Κεφάλαιο 7**, το οποίο επιγράφεται **Μη-Κρυσταλλικά Υλικά**, έρχεται να δικαιολογήσει, από άποψη περιεχομένου, την διεύρυνση της «Φυσικής της Στερεάς Κατάστασης» σε «Φυσική της Συμπυκνωμένης Ύλης», κάνοντας αναφορά στα **Άμορφα Στερεά** και στη **Μαλακή Ύλη**, επιχειρώντας ένα τολμηρό, κατά τη γνώμη μας, αλλά αναγκαίο άλμα στη «διδασκτέα ύλη» της Φυσικής. Περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής άμορφων υλικών, και συγκρίνοντας τη δομή τους με εκείνη των κρυσταλλικών υλικών, εισάγεται η έννοια της «αταξίας» και των «παραμέτρων τάξης». Αναπτύσσεται η βασική ιδέα της θεωρίας «διαφυγής» σε άτακτα συστήματα, χρησιμοποιώντας τόσο ιστορικά στοιχεία για τον τρόπο γέννησής της, όσο και παραδείγματα «διαφυγής δεσμού» σε αγωγίμο δικτυωτό πλαίσιο, καθώς και «διαφυγής θέσης» στη μεταφορά φορτίου σε ένα σύστημα με χωρική και ενεργειακή αταξία. Δίνονται χαρακτηριστικές εφαρμογές της χρήσης των άμορφων υλικών.

Η «Φυσική της απαλότητας», όπως είναι το χαϊδευτικό όνομα της Φυσικής που αναδεικνύεται από τη μελέτη των ιδιοτήτων των κολλοειδών, των πολυμερών (μαλλί, βαμβάκι, μετάξι, πλαστικό, νάιλον, πολυεστέρας), των αφρών, των κοκκωδών υλικών, των υγρών κρυστάλλων κ.ά., παρουσιάζεται μέσα από ιστορικά στοιχεία της ανάπτυξής της και τις βασικές ιδιότητες των υλικών αυτών όπως η θερμική κίνηση των συστατικών τους μορίων, η ιδιαίτερη δομή τους, η δυναμική τους καθώς και η ικανότητα αυτοσυναρμολόγησης.

Ένας **Επίλογος** κλείνει αυτή τη σύντομη περιήγηση στον θαυμαστό κόσμο της Φυσικής της Συμπυκνωμένης Ύλης.

Όπου η λεπτομερής ανάλυση απαιτούσε προχωρημένη γνώση Κβαντικής Μηχανικής ή Στατιστικής Φυσικής χρησιμοποιείται, όπου αυτό είναι δυνατό, μια ημικλασική ή περιγραφική προσέγγιση, προσαρμοσμένη σε προϋπάρχουσες γνώσεις, με δόκιμο ελπίζουμε τρόπο. Σε κάποιες, λίγες, περιπτώσεις, παρουσιάζονται τα α-

ποτελέσματα χωρίς να μπαίνει ο αναγνώστης σε εννοιολογικές ή υπολογιστικές λεπτομέρειες, ικανοποιώντας όμως τη συνέχεια της ανάλυσης και τη χρηστικότητα των αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου υπό μελέτη αντικειμένου.

Παρατίθενται δύο **Παραρτήματα**, όπου στο *I. Η συνάρτηση Fermi-Dirac*, δίνονται περισσότερες πληροφορίες για το φυσικό της περιεχόμενο και τη συμπεριφορά της, και στο *IIΑ. υπολογίζεται η στάθμη Fermi σε έναν ενδογενή ημιαγωγό*, στο *IIΒ. υπολογίζεται η στάθμη Fermi, σε ένα εμπλουτισμένο ημιαγωγό, μη-εκφυλισμένο, με ολικά ιονισμένους δότες ή αποδέκτες*, και στο *III. σχολιάζεται η θέση της στάθμης Fermi ως συνάρτηση της θερμοκρασίας*, συμπληρώνοντας το περιεχόμενο του Κεφαλαίου 5, χωρίς να επιβαρύνεται το κυρίως μέρος του.

Τέλος, προτείνεται σχετική *Βιβλιογραφία*.

Ευχαριστούμε τον κ. Νίκο Ζήτη, των Εκδόσεων Ζήτη, για την ευαισθησία και τον ενθουσιασμό που αγκάλιασε την έκδοση αυτού του βιβλίου. Τόσο προς τον ίδιο, όσο και προς τους συνεργάτες του, και ιδιαίτερα προς τον κ. Άρη Σύρμο, καθώς και την κα Άννα Παναγοπούλου, εκφράζουμε τον πραγματικό θαυμασμό μας για την ποιότητα της δουλειάς τους, τον επαγγελματισμό τους, τον χαρακτήρα τους και την αισθητική τους. Ευχόμαστε οι Εκδόσεις Ζήτη να συνεχίσουν να εκδίδουν όμορφα και χρήσιμα βιβλία, που και εμείς αγαπάμε. Ευχαριστούμε τον κ. Δ. Δρε του εκδοτικού οίκου Bookpath για την άδεια χρησιμοποίησης στο παρόν βιβλίο, μέρους υλικού από το βιβλίο ενός εκ των συγγραφέων (Γ. Π. Τ.), «Φυσική Ημιαγωγών» των εκδόσεων Liberal Books.

Τέλος, ευχαριστούμε τους φοιτητές και τους μαθητές που επιζητούν και απαιτούν υψηλού επιπέδου Εκπαίδευση, ολόπλευρη μόρφωση με ανάπτυξη της κριτικής τους σκέψης, που εξακολουθούν να διερωτώνται, γιατί με τη στάση τους μας θυμίζουν τις ευθύνες μας.

Γ. Π. Τριμπέρης, Μ. Τσέτσερη

Αθήνα 2023

Περιεχόμενα

| | |
|----------------------|---|
| Πρώτη Γνωριμία | 1 |
|----------------------|---|

Κεφάλαιο 1

| | |
|--|-----------|
| Το Άτομο και οι Ατομικοί Δεσμοί | 15 |
|--|-----------|

| | |
|---|----|
| 1.1. Το Ατομικό Μοντέλο του Rutherford | 17 |
| 1.2. Το Ατομικό Μοντέλο του Bohr | 20 |
| 1.3. Η Ηλεκτρονιακή δομή των ατόμων | 24 |
| 1.4. Χτίζοντας τον περιοδικό πίνακα | 30 |
| 1.5. Οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων | 33 |
| 1.5.1. Δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης | 34 |
| 1.5.2. Είδη δεσμών | 35 |
| ✦ Αλληλεπίδραση Van der Waals-London | 36 |
| ✦ Ιοντικός δεσμός | 38 |
| ✦ Ομοιοπολικός δεσμός | 40 |
| ✦ Μεταλλικός δεσμός | 41 |

Κεφάλαιο 2

| | |
|--|-----------|
| Ακτινογραφώντας τα Στερεά | 43 |
|--|-----------|

| | |
|---|----|
| 2.1. Οι πρώτες εικόνες | 43 |
| 2.2. Κρυσταλλική δομή | 45 |
| 2.2.1. Το κρυσταλλικό πλέγμα | 45 |
| 2.2.2. Κρυσταλλικές συμμετρίες | 48 |
| 2.2.3. Τύποι κρυσταλλικών πλεγμάτων | 49 |
| 2.3. Κρυσταλλικές διευθύνσεις - Κρυσταλλικά επίπεδα | 52 |
| 2.4. Πειραματική μελέτη της κρυσταλλικής δομής | 54 |

Κεφάλαιο 3

Ενεργειακές Ζώνες στα Στερεά 59

- 3.1. Μέταλλα, Μονωτές, Ημιαγωγοί 60

Κεφάλαιο 4

Φαινόμενα Μεταφοράς στα Μέταλλα Ο Νόμος του *Ohm reloaded* ... και όχι μόνο 65

- 4.1. Πρώιμες θεωρίες – Το μοντέλο του Drude 67
- Βασικές υποθέσεις του Μοντέλου του Drude 68
- ✦ Η ηλεκτρική αγωγιμότητα 70
- ✦ Η θερμική αγωγιμότητα 73
- ✦ Ο νόμος των Wiedemann-Franz 76
- 4.2. Ρεαλιστικότερες θεωρίες 76
- ✦ Το μοντέλο του Lorentz 78
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα 78
- Η θερμική αγωγιμότητα 78
- Ο νόμος των Wiedemann-Franz 79
- Η σχέση του Einstein 79
- ✦ Το μοντέλο του Sommerfeld 80
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα 80
- Η θερμική αγωγιμότητα 82
- Ο νόμος των Wiedemann-Franz 82
- 4.3. Φαινομενολογική ερμηνεία της θερμοκρασιακής εξάρτησης
της ηλεκτρικής αγωγιμότητας 82
- 4.3.1. Μέση ελεύθερη διαδρομή μεταφοράς 82
- 4.3.2. Υπολογισμός της θερμοκρασιακής εξάρτησης της ηλεκτρικής
αγωγιμότητας 84
- (I) Περιοχή υψηλών θερμοκρασιών 84
- (II) Περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών 85

Κεφάλαιο 5

Ημιαγωγοί 89

- 5.1. Σύσταση - Δομή 90
- 5.2. Τα μοντέλα των δεσμών και των ζωνών 92

| | |
|---|-----|
| 5.2.1. Χωρική απεικόνιση των δεσμών στο πυρίτιο | 92 |
| 5.2.2. Απεικόνιση των ενεργειακών ζωνών στο πυρίτιο | 93 |
| 5.3. Χαρακτηριστικά των φορέων | 96 |
| 5.3.1. Η ενεργός μάζα – Η οπή – Τα φορτία | 96 |
| 5.3.2. Πυκνότητα καταστάσεων | 100 |
| 5.4. Κατανομή φορέων σε κατάσταση ισορροπίας | 102 |
| 5.5. Εισάγοντας προσμίξεις – Εμπλουτισμός | 104 |
| ♣ Ποιοτική περιγραφή | 105 |
| ♣ Ενέργεια ιονισμού | 108 |
| 5.6. Συγκέντρωση φορέων σε κατάσταση ισορροπίας | 110 |
| 5.6.1. Εύχρηστες εκφράσεις για τις συγκεντρώσεις φορέων | 112 |
| 5.6.2. Σχέση ουδετερότητας φορτίου | 114 |
| 5.6.3. Συγκέντρωση φορέων σε ολικά ιονισμένο εξωγενή ημιαγωγό | 114 |
| 5.6.4. Θερμοκρασιακή εξάρτηση της συγκέντρωσης των φορέων | 115 |
| 5.7. Φαινόμενα μεταφοράς στους ημιαγωγούς | 117 |
| 5.7.1. Ρεύμα ολίσθησης – Αγωγιμότητα – Ευκινησία | 117 |
| 5.7.2. Ο Νόμος του Ohm στους ημιαγωγούς | 119 |
| 5.8. Το φαινόμενο Hall – Μια πρώτη ανάγνωση | 121 |

Κεφάλαιο 6

Μαγνητικά Υλικά 127

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 6.1. Μαγνητική ροπή - Μαγνήτιση | 127 |
| 6.2. Παραμαγνητικά υλικά | 131 |
| 6.3. Διαμαγνητικά υλικά | 133 |
| 6.4. Σιδηρομαγνητικά υλικά | 136 |

Κεφάλαιο 7

Μη-Κρυσταλλικά Υλικά 139

| | |
|---|-----|
| 7.1. Άμορφα στερεά – Η έννοια της «αταξίας» | 139 |
| 7.2. Μαλακή ύλη – «Η Φυσική της απαλότητας» | 147 |
| ♣ Θερμική κίνηση | 149 |
| ♣ Δομή | 151 |
| ♣ Δυναμική | 152 |
| ♣ Μοριακή αυτοσυναρμολόγηση | 152 |

| | |
|--|-----|
| Επίλογος | 154 |
| Παραρτήματα | 155 |
| Παράρτημα I | 155 |
| • Η συνάρτηση Fermi-Dirac | 155 |
| Παράρτημα II | 159 |
| A. Υπολογισμός της στάθμης Fermi σε έναν ενδογενή ημιαγωγό | 159 |
| B. Υπολογισμός της στάθμης Fermi σε έναν εμπλουτισμένο ημιαγωγό, μη-εκφυλισμένο, με ολικά ιονισμένους δότες ή αποδέκτες | 160 |
| Γ. Η θέση της στάθμης Fermi ως συνάρτηση της θερμοκρασίας | 161 |
| Βιβλιογραφία | 163 |
| Ευρετήριο Πινάκων | 165 |
| Ευρετήριο όρων | 166 |
| Ευρετήριο ονομάτων | 170 |
| Οι Συγγραφείς | 172 |

Το Άτομο και οι Ατομικοί Δεσμοί

Προκειμένου να έχουμε μια οπτική αναπαράσταση της πολύπλοκης πραγματικότητας, φτιάχνουμε μοντέλα ή εικόνες των υλικών και των σωματιδίων που τα συνιστούν, ακόμα και του τρόπου που αυτά συμπεριφέρονται. Σε αυτό μας βοηθούν η παρατήρηση, η εμπειρία και η φαντασία μας. Το πείραμα, εκτός από τις διεργασίες και τα φαινόμενα που συμβαίνουν σε άμεσα παρατηρήσιμη κλίμακα σε ένα υλικό, μπορεί να μας αποκαλύψει, με κατάλληλες επεμβατικές πειραματικές τεχνικές, διεργασίες και εικόνες σε κλίμακα που αδυνατούμε να έχουμε άμεση οπτική επιβεβαίωση. Προφανώς, σε κάθε νέα διερεύνηση τα πρώτα μοντέλα είναι αρκετά απλοποιημένα δεδομένης της ελλιπούς γνώσης μας. Με την πάροδο του χρόνου, συγκεντρώνοντας νέες πληροφορίες, αλλάζουμε, βελτιώνουμε τα μοντέλα μας, πλησιάζοντας όλο και περισσότερο σε μια αξιόπιστη περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας.

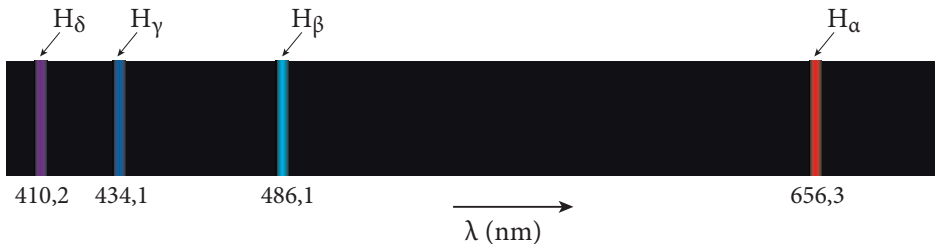
Το 1865 ο J. C. Maxwell απέδειξε ότι μια διαταραχή που συνίσταται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που μεταβάλλονται με τον χρόνο μπορεί να αποδώσει με ένα ενιαίο τρόπο το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο χώρο με την ταχύτητα του φωτός και ικανοποιεί τέσσερεις εξισώσεις που αποτελούν το θεμελιώδες πλαίσιο του ηλεκτρομαγνητισμού, τους νόμους του Gauss, του Ampere και του Faraday.

Το 1887 ο H. Hertz χρησιμοποιώντας κυκλώματα L-C (πηνίου - πυκνωτή) παρήγαγε ταλαντούμενα φορτία. Τα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανιχνεύτηκαν χρησιμοποιώντας κυκλώματα συντονισμένα στην ίδια συχνότητα. Από τα στάσιμα κύματα που δημιουργήθηκαν, γνωρίζοντας την συχνότητα συντονισμού, f , και μετρώντας την απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων, δηλαδή το μισό μήκος κύματος, $\lambda/2$, χρησιμοποιώντας τη σχέση $v = \lambda f$, επιβεβαίωσε τον

Maxwell, ότι δηλαδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός.

Τα φαινόμενα της συμβολής, της πόλωσης και της περίθλασης επιβεβαίωσαν την κυματική φύση του φωτός. Εάν περάσουμε το φως που ακτινοβολείται από μια φωτεινή πηγή μέσα από ένα πρίσμα ή ένα πέτασμα περίθλασης διαχωρίζονται τα διάφορα μήκη κύματος που το συνιστούν και εμφανίζεται ένα φάσμα. Σε υψηλή θερμοκρασία στερεά ή υγρά δίνουν ένα φάσμα εκπομπής που συνίσταται από φως όλων των μηκών κύματος, το οποίο για τον λόγο αυτόν ονομάζουμε *συνεχές φάσμα*. Εάν όμως η πηγή είναι αέριο, το φάσμα εκπομπής συνίσταται μόνο από μερικά χρώματα, που έχουν τη μορφή ξεχωριστών διακεκριμένων παράλληλων γραμμών, και αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο μήκος κύματος και συχνότητα. Το φάσμα αυτό ονομάζεται *γραμμικό φάσμα*. Η ερμηνεία αυτών των φασμάτων, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η φύση των ακτίνων X, υπήρξαν ανοικτά ερωτήματα για τους Φυσικούς του 19^{ου} αιώνα.

Το ατομικό υδρογόνο σε ηλεκτρικό σωλήνα εκκένωσης ακτινοβολεί δίνοντας το γραμμικό φάσμα (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1. Ατομικό φάσμα εκπομπής του Υδρογόνου. Η σειρά Balmer.

Το 1885 ο J. Balmer προσπάθησε, χωρίς να αναπτύξει κάποια συγκεκριμένη θεωρία, αλλά κάνοντας δοκιμές, να βρει ένα τύπο που να δίνει τις πειραματικές τιμές των μηκών κύματος των γραμμών οι οποίες παρατηρούνται στο φάσμα του υδρογόνου.

Ο εμπειρικός τύπος στον οποίο κατέληξε ο Balmer γράφεται ως

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1.1.1)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος, R είναι μια σταθερά της οποίας οι μονάδες επιλέγονται ώστε το δεξιό μέλος της εξίσωσης να δίνει διαστάσεις $[\text{μήκος}]^{-1}$ και τιμή τέτοια ώστε για ακέραιες τιμές του $n = 3, 4, 5, \dots$ να αναπαράγονται τα παρατηρούμενα μήκη κύματος του γραμμικού φάσματος. Αυτές οι γραμμές του φάσματος είναι γνωστές ως *σειρά Balmer*.

Ακτινογραφώντας τα Στερεά

2.1 Οι πρώτες εικόνες

Τον Δεκέμβριο του 1912 ένας προπτυχιακός φοιτητής του Cambridge πρότεινε μία εξίσωση που άνοιξε νέους ορίζοντες στην επιστήμη. Ο προπτυχιακός φοιτητής ήταν ο William Lawrence Bragg και η εργασία του δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Nature* (Bragg, W. L. *Nature* **90**, 410 (1912)). Στην ηλικία των 25, βραβεύτηκε με το βραβείο Nobel και αποτελεί, ακόμα και σήμερα, τον νεότερο επιστήμονα που βραβεύτηκε με τη μέγιστη αυτή διάκριση. Μάλιστα το βραβείο αυτό είναι ένα από τα πολλά βραβεία Nobel που έχουν δοθεί στην κρυσταλλογραφία ακτίνων X. Αλλά ας τα πάρουμε τα πράγματα από την αρχή ή σχεδόν από την αρχή...

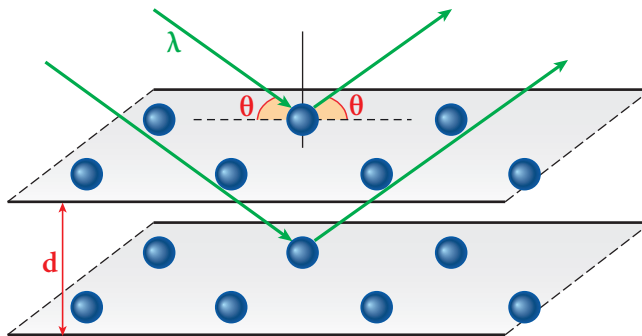
Το 1912, στη Βαυαρική Ακαδημία Επιστημών, εμφανίστηκε μία μονοσέλιδη παρουσίαση ανακάλυψης η οποία ανέφερε: «Οι υπογράφωντες ασχολούνται από τις 21 Απριλίου 1912 με πειράματα σχετικά με τη συμβολή ακτίνων X που περνούν μέσα από κρυστάλλους». Οι υπογράφωντες ήταν οι W. Friedrich, P. Knipping και M. Laue και όλα είχαν ξεκινήσει από την ιδέα του Max von Laue (Nobel 1914) να μελετήσουν τι θα συμβεί αν βομβαρδίσουν κρυστάλλους θειικού χαλκού (CuSO_4) και θειούχου ψευδαργύρου (ZnS) με ακτίνες X (που μέχρι τότε δεν είχε αποσαφηνιστεί η φύση τους) και αποτυπώσουν την εικόνα που προέκυπτε σε φωτογραφικές πλάκες. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν από τους W. Friedrich και P. Knipping (διδακτορικός φοιτητής του Wilhelm Röntgen, ο οποίος το 1895 είχε ανακαλύψει τις ακτίνες X (Nobel 1901)), που είχαν μεγαλύτερη εμπειρία σε τέτοιου είδους πειράματα. Τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι οι ακτίνες X έχουν όντως κυματική φύση και δίνουν εικόνες που συνδέονται με την κυματική τους φύση. Η εικόνα που προέκυψε (Εικόνα 2.1.1) περιείχε κηλίδες, διαφορετικής έντασης και σχήματος, γύρω από την

κεντρική κηλίδα της αρχικής ακτίνας.

Η ανακοίνωση προσέελκυσε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και οδήγησε σε μία γόνιμη περίοδο παραγωγής επιστημονικών ιδεών, ανάμεσα στις οποίες βασική ιδέα ήταν ότι η εικόνα, η οποία αποτυπώνεται στα σχετικά πειράματα, προέρχεται από την *περίθλαση των ακτίνων X*. Ότι δηλαδή οι ακτίνες X, με συγκεκριμένο μήκος κύματος, εκτρέπονται από την ευθύγραμμη διάδοση, όταν συναντήσουν εμπόδιο ή σχισμή με διαστάσεις παραπλήσιες του μήκους κύματός τους.

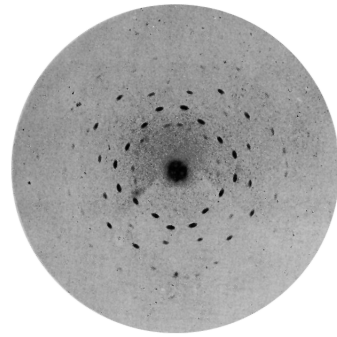
Ειδικότερα, ο W. L. Bragg σε συνεργασία με τον πατέρα του W. H. Bragg, καθηγητή τότε στο Πανεπιστήμιο του Leeds, μελέτησαν συστηματικά κρυσταλλικές δομές με τη βοήθεια της περίθλασης ακτίνων X. Ο W. L. Bragg για να ερμηνεύσει αυτά τα πειραματικά ευρήματα θεώρησε ότι οι ακτίνες X ανακλώνται από επίπεδα ατόμων που σχηματίζονται μέσα στον κρύσταλλο. Ο W. L. Bragg συνέδεσε το μήκος κύματος, λ , των μονοχρωματικών ακτίνων X, με την απόσταση των κρυσταλλικών επιπέδων, d , (Εικόνα 2.1.2), μέσω της ομώνυμης εξίσωσης του,

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1.1)$$



Εικόνα 2.1.2. Μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος λ προσπίπτει πάνω σε κρυσταλλικά επίπεδα που απέχουν απόσταση d .

Επομένως η ανάλυση ανάλογων αποτελεσμάτων, σε διάφορα κρυσταλλικά υλικά, θα μπορούσε να αποκαλύψει τη γεωμετρική διεύθυνση των ατόμων τους. Η προσέγγιση αυτή παρείχε έναν αξιόπιστο τρόπο καθορισμού της εσωτερικής δομής – αρχιτεκτονικής των κρυσταλλικών στερεών και κατά συνέπεια ερμηνείας των ιδιο-



Εικόνα 2.1.1. Φωτογραφία της περίθλασης ακτίνων X από κρύσταλλο ZnS. (Laue, Friedrich & Knipping, Sitzungberichte der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 1912)

τήτων τους. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτέλεσε το διαμάντι και ο γραφίτης που, ενώ πρόκειται για το ίδιο χημικό στοιχείο, τον άνθρακα, η διαφορετική δομή - αρχιτεκτονική κατασκευή τους, που αποκαλύφθηκε με πειράματα κρυσταλλογραφίας ακτίνων X, ερμήνευσε τις εντελώς διαφορετικές μηχανικές, χημικές και ηλεκτρονικές τους ιδιότητες. Η δομή του NaCl που προτάθηκε, ως ένας κρύσταλλος όπου ιόντα Na^+ και Cl^- εναλλάσσονται σε συγκεκριμένες θέσεις, ήταν ρηξικέλυθη, καθώς καταργούσε την έννοια του μορίου του NaCl ως βασικό συστατικό του άλατος αυτού.

Η κρυσταλλογραφία ακτίνων X αποκάλυψε τη δομή ορυκτών, μετάλλων, οξειδίων καθώς και κραμάτων. Κατάφερε να «δει» τη δομή βιολογικών συστημάτων και να αποκαλύψει τη δομή πρωτεϊνών, όπως της αιμοσφαιρίνης και της μυοσφαιρίνης και να οδηγήσει στο μοντέλο της διπλής έλικας του DNA.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την κρυσταλλική δομή των στερεών, όπως προέκυψε από τη μελέτη πειραματικών δεδομένων περίθλασης ακτίνων X. Θα ασχοληθούμε εκτενώς με την περιοδικότητα των κρυσταλλικών δομών, καθώς η περιοδικότητα είναι το χαρακτηριστικό που δίνει ένα πλήθος μοναδικών χαρακτηριστικών στα στερεά.

2.2 Κρυσταλλική δομή

2.2.1 Το κρυσταλλικό πλέγμα

Παρατηρώντας ένα κρυσταλλικό στερεό, το πλέον αναγνωρίσιμο χαρακτηριστικό τους είναι η περιοδική επανάληψη στο χώρο μιας συγκεκριμένης ομάδας ατόμων, ιόντων ή μορίων, τα οποία συνιστούν τα δομικά στοιχεία του κρυστάλλου. Η ομάδα αυτή ονομάζεται *βάση* και τοποθετείται στις θέσεις που καθορίζει το *πλέγμα*, το οποίο είναι ένα σύνολο γεωμετρικών σημείων που συνιστούν την περιοδική δομή. Η βάση τοποθετημένη επαναληπτικά και το πλέγμα συνθέτουν την κρυσταλλική δομή, τον κρύσταλλο (Εικόνα 2.2.1.1).



Εικόνα 2.2.1.1. Σχηματίζοντας μια κρυσταλλική δομή.

Φαινόμενα Μεταφοράς στα Μέταλλα *Ο Νόμος του Ohm reloaded ... και όχι μόνο*

Συνήθως κατά τη διερεύνηση των ιδιοτήτων των υλικών προηγείται η πειραματική τους αποκάλυψη. Όμως η θεωρητική ερμηνεία ενός φαινομένου, η κατανόηση των «μικροσκοπικών» διεργασιών που συμβαίνουν στο εσωτερικό του υλικού, και έχουν ως αποτέλεσμα την ανάδειξή τους, είναι εξ ίσου σημαντική, γιατί τότε και μόνο τότε έχουμε μια πλήρη και ολοκληρωμένη γνώση του τι αλλά και γιατί συμβαίνει αυτό που πειραματικά παρατηρήσαμε. Παράλληλα, η πειραματική αποκάλυψη μαζί με την θεωρητική ερμηνεία αποτελούν βασικές προϋποθέσεις τόσο για την απόκτηση ολοκληρωμένης επιστημονικής γνώσης, όσο και για την καλλίτερη αξιοποίηση των υπό μελέτη φαινομένων σε πρακτικές εφαρμογές. Ο νόμος του Ohm που θα διερευνήσουμε στη συνέχεια αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα.

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο διακρίναμε τα υλικά στη βάση της ηλεκτρικής τους συμπεριφοράς σε μέταλλα, μονωτές ή ημιαγωγούς. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα διερευνήσουμε το πως ανταποκρίνεται ένα μέταλλο, με τη μορφή ενός μεταλλικού σύρματος, αν εφαρμόσουμε σε αυτό ένα ηλεκτρικό πεδίο, μέσω μιας διαφοράς δυναμικού στα άκρα του. Επίσης θα μελετήσουμε τον τρόπο που μεταφέρεται η θερμική ενέργεια αν τα άκρα του βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία ή τι συμβαίνει αν η πυκνότητα των φορτισμένων φορέων του αλλάζει κατά μήκος του υλικού. Στη Φυσική της Στερεάς Κατάστασης τα φαινόμενα αυτά ονομάζονται *φαινόμενα μεταφοράς*, για προφανείς λόγους ή *φαινόμενα γραμμικής ανταπόκρισης* λόγω της αναλογικής σχέσης μεταξύ του αιτίου (πεδίου) και του αποτελέσματος που προκαλεί (αντίστοιχη ροή).

Συνήθως η περιγραφή αυτής της συμπεριφοράς αντιμετωπίζεται «μακροσκοπικά». Σε ένα κλειστό κύκλωμα όταν μια σταθερή τάση V εφαρμόζεται σε ένα με-

ταλλικό αγωγό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σθένους του αγωγού προσανατολίζονται ανάλογα δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I , και η σχέση ανάμεσα στην ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και στην τάση V , εκφράζεται από τον περίφημο νόμο του Ohm

$$I = \frac{V}{R}. \quad (4.1)$$

όπου R η αντίσταση του υλικού.

Η ανάλυση προχωρά στη σχέση της αντίστασης με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύρματος

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}, \quad (4.2)$$

όπου l το μήκος του σύρματος, S η διατομή του, ρ η ειδική αντίσταση (σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ίση με $1/\rho$), και που συνήθως αναφέρεται ότι «εξαρτάται από το υλικό που είναι φτιαγμένο το σύρμα», και ίσως ότι «η αντίσταση εξαρτάται από την θερμοκρασία». Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος J , που διαρρέει έναν αγωγό διατομής S , εκφράζεται ως $J = I/S$.

Εκεί συνήθως ολοκληρώνεται στα πλαίσια του «Ηλεκτρισμού» η παρουσίαση της ανταπόκρισης ενός μεταλλικού υλικού στην εφαρμογή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου!

Όμως υπάρχουν αρκετά ερωτήματα αναπάντητα:

- ▶ Μέσα σε ποιο περιβάλλον κινούνται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, και πώς αλληλεπιδρούν με αυτό, όταν εφαρμόσουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο;
- ▶ Πώς αυτό το περιβάλλον και με ποιους μηχανισμούς δίνει γένεση στην εμφάνιση της ηλεκτρικής αντίστασης;
- ▶ Πώς επιδρά και γιατί η θερμοκρασία στην ηλεκτρική αντίσταση;
- ▶ Έχει σημασία αν η θερμοκρασία είναι υψηλή ή χαμηλή και γιατί;

Η «μακροσκοπική» περιγραφή του νόμου του Ohm αφήνει αναπάντητα αυτά τα ερωτήματα. Είναι η Φυσική της Στερεάς Κατάστασης που μελετά, ανάμεσα στα άλλα, και τους μηχανισμούς, τα αίτια της εμφάνισης των ιδιοτήτων των στερεών.

Όπως προαναφέραμε, η ανταπόκρισή του στερεού στην εφαρμογή ενός εξωτερικού ασθενούς ή μέτριας έντασης πεδίου εκφράζεται ποσοτικά από φυσικούς νόμους, από αναλογικές σχέσεις, που συνδέουν το εφαρμοζόμενο αίτιο (πεδίο) με το προκαλούμενο αποτέλεσμα (πυκνότητα ρεύματος-ροή). Θεωρώντας, για απλότητας, ότι τα εξωτερικά πεδία εφαρμόζονται κατά τη x - διεύθυνση ενός μεταλλικού σύρματος, οι νόμοι αυτοί είναι:

Επίλογος

Με το βιβλίο αυτό επιχειρήσαμε μια επιλεκτική ξενάγηση στον θαυμαστό κόσμο της Φυσικής της Στερεάς Κατάστασης, ακόμα και στη διευρυμένη της μορφή ως Φυσική της Συμπυκνωμένης Ύλης.

Ένα πλήθος αντικειμένων εξαιρετικού ενδιαφέροντος, όπως οι οπτικές ιδιότητες των στερεών, η υπεραγωγιμότητα, τα χαμηλοδιάστατα συστήματα, η Φυσική ημιαγωγικών διατάξεων, και τόσα άλλα, σας περιμένουν να τα ανακαλύψετε. Φιλοδοξία μας είναι εξερεύνηση που ξεκίνησε με πυξίδα τις σελίδες αυτού του βιβλίου, να συνεχιστεί.

Φθάνοντας στον «Επίλογο», ελπίζουμε ότι αποκαλύφθηκε ότι πίσω από την «μακροσκοπικά» παρατηρούμενη συμπεριφορά των υλικών, οι «μικροσκοπικοί μηχανισμοί» που την προκαλούν, αποτελούν ένα γοητευτικό πεδίο επιστημονικής αναζήτησης. *Και κάτι ακόμα που αφορά τους νεότερους:*

Το οικοδόμημα της Φυσικής περιλαμβάνει έννοιες, θεωρίες, νόμους καθώς επίσης και αρχές.

Αν αυτά δεν συνδέονται με νοητικές δραστηριότητες οι οποίες τα παράγουν ή τα θέτουν σε λειτουργία, τότε δεν αποτελούν παρά ένα σύνολο διατυπώσεων δηλ. γραπτά ίχνη ή φράσεις πάνω στον πίνακα ή σε ένα κομμάτι χαρτί.

Πράγμα που σημαίνει σε απλά Ελληνικά ότι:

- ♦ *Αν όλα αυτά σας εντυπωσιάζουν,*
- ♦ *Αν πιστεύετε ότι αντί να τα βλέπετε στην τηλεόραση, σαν παθητικοί καταναλωτές,*

θέλετε να είσαστε εσείς.....

- ♦ *εκείνοι που τα σκέφτονται,*
- ♦ *εκείνοι που θα πάνε τη γνώση μας ένα βήμα πιο μπροστά,*
- ♦ *εκείνοι που θα συμβάλλουν στην επίλυση των προβλημάτων της κοινωνίας μας με τις επιστημονικές τους προτάσεις,*

τότε πρέπει να μελετήσετε σοβαρά και να είσαστε σίγουροι ότι οι κόποι σας θα πιάσουν τόπο.

Και ...επειδή η Φυσική είναι πραγματικά διασκεδαστική...

*αν θελήσετε να εξερευνήσετε τον κόσμο αυτόν
σας ευχόμαστε ... καλή διασκέδαση!!!*

Γ. Π. Τριμπέρης - Μ. Τσέτσερη

Ευρετήριο όρων

- αγωγιμότητα ηλεκτρική, μετάλλων
 - » μοντέλο Drude, 70, 72
 - » μοντέλο Lorentz, 78
 - » μοντέλο Sommerfeld, 80
 - » πειραματικές τιμές, 81
- αγωγιμότητα ηλεκτρική, ημιαγωγών, 119
- αγωγιμότητα θερμική, μετάλλων
 - » πειραματικές τιμές, 73
 - » μοντέλο Drude, 75
 - » μοντέλο Lorentz, 78
 - » μοντέλο Sommerfeld, 82
- ακτίνες X, 43
- αλκαλικά μέταλλα, 31
- αλκαλικές γαίες, 31
- αλληλεπίδραση
 - » Coulomb, 39
 - » VanderWaals-London, 36
 - » απωστική, 34
 - » ελκτική, 34
- αλογόνα, 31
- άμορφο στερεό, 90
- αντίσταση
 - » ειδική, 66
 - » παραμένουσα, 86
- απαγορευτική αρχή του Pauli, 30
- αποδέκτης, 100, 107
- απομαγνήτιση αδιαβατική, 132
- αριθμός Avogadro, 69
- αρσενικούχο γάλλιο,
 - » κρυσταλλική δομή, 91
 - » τιμές ευκινησίας, 119
- αταξία, 143
- ατομικό μοντέλο
 - » Bohr, 20
 - » Rutherford 17
- ατομικό τροχιακό, 26
- ατομικός αριθμός, 20
- αυτοσυνέπεια, 72
- βαθμίδα
 - » θερμοκρασίας, 67
 - » πυκνότητας σωματιδίων, 67
- βάση κρυσταλλική, 45,
- βρόχος υστέρησης, 137
- γερμάνιο,
 - » ηλεκτρονιακή διαμόρφωση, 94
 - » κρυσταλλική δομή, 91
 - » μικτοί κρύσταλλοι, 142
 - » ομοιοπολικός δεσμός, 41
 - » τιμές ευκινησίας 119
- δείκτες Miller, 53
- δέσμιες καταστάσεις, 25
- δεσμός
 - » ατομικός, 20
 - » ιοντικός, 38
 - » κατευθυντικός, 41
 - » μη κατευθυντικός, 37, 40
 - » μεταλλικός, 41
 - » μοριακός, 37
 - » ομοιοπολικός, 38
- διάγραμμα ενεργειακών ζωνών
 - » αδάμαντα, 61
 - » πυριτίου, 95
 - » χλωριούχο νάτριο, 64
- διανύσματα
 - » θεμελιώδη, 46
 - » μοναδιαία, 48
- διατομή σκέδασης ενεργός, 84
- διαφυγή
 - » δεσμού, 145
 - » θέσης, 146
 - » θεωρία, 145

διπολική ροπή ηλεκτρική, 36

δομή

- » αδάμαντα, 91
- » σφαλερίτη, 91

δομική τάξη, 143

δότης, 100, 105, 106

δυνάμεις

- » μακράς εμβέλειας, 34
- » μικρής εμβέλειας, 34

δύναμη Lorentz, 122

δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης, 34

δυναμικό Lennard-Jones, 38

εμπλουτισμός, 105

ενέργεια

- » Fermi, 77
- » Rydberg, 24
- » ιονισμού προσμιξεων, 108, 110
- » συνοχής, 33

ενεργειακές ζώνες

- » αδάμαντα, 61
- » πυριτίου, 63, 95
- » νατρίου, 63
- » χλωριούχου νατρίου, 64

ενεργειακή κατάσταση

- » διεγερμένη, 22
- » εκφυλισμένη, 26
- » θεμελιώδης, 22

εξίσωση

- » Boltzmann, 78
- » Schrodinger, 25

ευγενή αέρια, 30, 31

ευκινησία,

- » ηλεκτρονίων, 80, 118, 119
- » οπών, 118, 119
- » Hall, 125

ζώνη

- » αγωγιμότητας, 60, 61
- » σθένους, 60, 61

ηλεκτραρνητικότητα, 41

ηλεκτρονιακή διαμόρφωση, 29

ηλεκτρονιακή πολωσιμότητα, 36

ηλεκτρονιακό αέριο

- » κλασικό, 84
- » φερμιονικό, 85

ηλεκτρόνιο

- » αγωγιμότητας, 69
- » πυρήνα, 69
- » σθένους, 30

ημιαγωγικό κράμα, 90

ημιαγωγός, 59, 63

- » n -τύπου, 106
- » p-τύπου, 107
- » εκφυλισμένος, 111
- » εμπλουτισμένος, 105
- » ενδογενής, 100
- » εξωγενής, 100, 105
- » μη εκφυλισμένος, 111
- » στοιχειώδης, 90
- » σύνθετος, 90

θερμοκρασία

- » Curie, 137
- » βρασμού, 140
- » παγώματος, 140
- » υαλώδους μετάβασης, 141

θερμοκρασιακή εξάρτηση

- » ειδικής αντίστασης μετάλλων 85-87
- » ενεργειακού χάσματος ημιαγωγών 96
- » ευκινησίας μετάλλων, 85-87
- » ηλεκτρικής αγωγιμότητας μετάλλων, 85-87
- » στάθμης Fermi, 162
- » συγκέντρωσης φορέων, 115

ιονισμός, 20

κανόνας τάξης, 143

κβαντικός αριθμός

- » δευτερεύων, 26
- » κύριος, 21
- » μαγνητικός, 28
- » σπιν, 29

κβάντωση στροφορμής, 21

- κέντρα επανασύνδεσης – δημιουργίας, 109
- κίνηση Brown, 150
- κινητική θεωρία των ιδανικών αερίων, 72
- κολλοειδή, 150
- κρυσταλλική
 - » διεύθυνση, 52
 - » δομή, 45
- κρυσταλλικό
 - » επίπεδο, 53
 - » ισοδύναμα επίπεδα, 54
 - » πλέγμα, 45
- κρυσταλλογραφία ακτίνων X, 45
- κρύσταλλος, 45
- κρύσταλλος
 - » μικτός, 142
 - » ιοντικός, 40
- κυματοσυνάρτηση, 25
- κυψελίδα
 - » θεμελιώδης, 47
 - » θεμελιώδης Wigner-Seitz, 47
 - » μοναδιαία, 48
- μαγνητικά υλικά
 - » μαλακά, 138
 - » σκληρά, 138
- μαγνητική
 - » ροπή, 28, 128
 - » διαπερατότητα του κενού, 130
 - » επιδεκτικότητα, 130
 - » ροπή σπιν, 28, 129
- μαγνήτιση, 129
 - » κόρου, 136
 - » παραμένουσα, 137
- μαγνητόνη του Bohr, 129
- μαγνητική διαπερατότητα, σχετική, 130
- μάζα ενεργός
 - » δομής ζωνών, 102
 - » ηλεκτρονίου, 98
 - » οπής, 98
 - » πυκνότητας καταστάσεων, 99, 102
- μαζικός αριθμός, 20
- “μαλακή” συμπυκνωμένη ύλη, 148
- μέθοδος περιστροφής τήγματος, 143
- μέση ελεύθερη διαδρομή, 72
 - » μεταφοράς, 83
- μοντέλο
 - » Drude, 68
 - » Lorentz, 78
 - » Sommerfeld, 80
- μονωτής, 59, 62
- μοριακή αυτοσυναρμολόγηση, 151
- νάτριο
 - » ηλεκτρονιακή διαμόρφωση, 29
 - » μεταλλικός δεσμός, 41
- νόμος
 - » Curie-Weiss, 137
 - » δράσης των μαζών, 113
 - » Bragg 44, 55
 - » Curie, 132
 - » Fick 67
 - » Fourier, 67
 - » Ohm, 67
 - » Ohm για τους ημιαγωγούς, 120
 - » Wiedemann Franz, 73, 76, 79, 82
- οπή, 97
- οπτικές ίνες, 147
- παγίδες, 109
- παράμετρος τάξης, 143
- πεδίο
 - » αταξίας, 144
 - » Hall, 123
- περίθλαση ακτίνων X, 44
- περιοδική δομή, 45
- περιοχές Weiss, 136
- πλέγμα
 - » Bravais, 46
 - » εξαγωνικό, 50
 - » κυβικό, 51
 - » απλό κυβικό, 51
 - » εδροκεντρωμένο κυβικό, 51
 - » χωροκεντρωμένο κυβικό, 51
 - » μονοκλινές, 49

πλέγμα

- » ορθορομβικό, 50
- » ρομβοεδρικό, 50
- » τετραγωνικό, 50
- » τριγωνικό, 50
- » τρικλινές, 49

πλεγματική σταθερά, 48

πλεγματικό κενό, 93

πολυμερή, 150

προσέγγιση

- » ανεξάρτητου ηλεκτρονίου, 69
- » ελεύθερου ηλεκτρονίου, 69
- » ηλεκτρικού ρεύματος, 66
- » ηλεκτρικού ρεύματος ολίσθησης, 119
- » θερμικού ρεύματος, 67
- » καταστάσεων, 100
- » καταστάσεων ενεργός, 111
- » σωματιδιακού ρεύματος, 67

πυρίτιο

- » ηλεκτρονιακή διαμόρφωση, 94
- » μικτοί κρύσταλλοι, 142
- » ομοιοπολικός δεσμός, 40, 92
- » τιμές ευκινησίας, 119

σειρά Balmer, 16

σημειακή ατέλεια, 93

σπιν, 28

σταθερά

- » Boltzmann, 72
- » Curie, 132
- » Planck, 20
- » Rydberg, 24
- » διάχυσης, 67

στάθμη Fermi, 157

συγκέντρωση

- » ηλεκτρονίων, 112
- » οπών, 112
- » φορέων, 112
- » θερμοκρασιακή εξάρτηση, 113

συμμετρία

- » μετατόπισης, 46 48
- » σημειακής ομάδας, 48
- » περιστροφής, 48

συμμετρία

- » άξονας, 48
- » τάξη άξονα, 48
- » ανάκλαση, 48
- » επίπεδο ανάκλασης, 48
- » αντιστροφή, 48

συνάρτηση κατανομής

- » Fermi-Dirac, 77, 155-158
- » Maxwell-Boltzmann, 77

συνεκτικό πεδίο, 137

συνθήκες ισορροπίας, 101

συντελεστές μεταφοράς, 67

συντελεστής Hall, 123

συντονισμός κύκλου, 99

συχνότητα

- » Larmor, 135
- » κύκλου, 99

σχέση

- » Einstein, 80
- » ουδετερότητας φορτίου, 114

σωματίδια άλφα, 17

τάξη

- » μεγάλης εμβέλειας, 141
- » μικρής εμβέλειας, 142

τάση Hall, 124

ταχύτητα ολίσθησης, 118

τύπος του Balmer, 16

υλικά

- » άμορφα, 146, 147
- » διαμαγνητικά, 134
- » κρυσταλλικά, 45, 90
- » «μαλακά», 148
- » παραμαγνητικά, 131
- » πολυκρυσταλλικά, 90
- » σιδηρομαγνητικά, 138

υποφλοιός, 27

υστέρηση μαγνητική, 137

φαινόμενα

- » μεταφοράς, 65
- » γραμμικής απόκρισης, 65

φαινόμενο
 » Hall, 121
 » Zeeman, 27
 » σήραγγας, 98
 φάσμα εκπομπής
 » γραμμικό 16
 » συνεχές, 16
 φλοιός, 26

φορείς
 » μειονότητας, 108
 » πλειονότητας, 108
 χάσμα ενεργειακό 61
 χρόνος
 » αποκατάστασης, 69
 » μέσης ελεύθερης διαδρομής, 69
 » εφησυχασμού, 80

Ευρετήριο ονομάτων

Αναξίμανδρος, 2
 Αριστοτέλης, 2

Δημόκριτος, 2

Ευκλείδης, 2
 Πλάτωνας, 2
 Πυθαγόρας, 2

Alferov Z., 10
 Anderson P. W., 6

Bohr N., 20
 Balmer J., 16
 Bardeen J., 4, 7
 Bloch F., 5
 Boltzmann L., 5
 Bragg W. H., 44
 Bragg W. L., 43
 Brattain W. H., 7
 Broadbent S. R., 145
 Brown R., 149

Cooper L., 4

Descartes R., 3
 De Gennes P. G., 149

Dorda G., 10
 Drude P., 4

Einstein A., 20

Faraday M., 5
 Flory P., 6
 Friedrich W., 43

Geim A., 10

Hall E., 6
 Hammersley J. M., 145
 Hertz H., 15
 Hooke R., 3
 Horovitz K. L., 7

Kepler J., 3
 Kilby J., 10
 Knipping P., 43
 Kroemer H., 10

Laughlin R., 8
 Lennard-Jones J., 37
 London F., 36
 Lorentz H., 4

Maxwell J.C., 15
Mersenne M., 3
Mott N., 6

Novoselov K., 10

Ohm G., 5
Omnes K., 4

Paracelsus, 3
Pauli W., 5
Pepper M., 10
Perrin J., 150
Planck M., 20

Röntgen W., 43
Rutherford E., 17

Schottky W. H., 5
Schrieffer J., 4
Shockley W. B., 7
Smoluchowski M., 150
Sommerfeld A., 5
Störmer H., 10

Thompson J. J., 4
Tsui D., 10

Van der Waals J. D., 36
Van Musschenbroek P., 3
Von Klitzing K., 10
Von Laue M., 4

Wilson K.G., 5

Zeeman P., 28

Οι Συγγραφείς

Ο **Γ. Π. Τριμπέρης** είναι Ομότιμος Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Ε.Κ.Π.Α.), το οποίο εξακολουθεί να υπηρετεί και μετά την τυπική αφηρητήσή του το 2016, μετά από 42 χρόνια ενεργής παρουσίας. Αριστούχος απόφοιτος του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών (1972), με μεταπτυχιακές σπουδές και Διδακτορικό Δίπλωμα στη Θεωρητική Φυσική της Στερεάς Κατάστασης (Φ.Σ.Κ.), στο Πανεπιστήμιο του St Andrews (Scotland) (1981). Εισήγαγε το μάθημα της (Θεωρητικής) Φυσικής της Στερεάς Κατάστασης στο Τμήμα Φυσικής του Ε.Κ.Π.Α. (1982).

Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα επικεντρώνονται στα φαινόμενα μεταφοράς σε 3D και 1D άτακτα υλικά, στις χαμηλοδιάστατες ετεροδομές, στο κβαντικό φαινόμενο Hall και στη μεταφορά φορτίου σε βιολογικά συστήματα, αποτυπώνονται δε σε δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά, συνέδρια, και βιβλία τα οποία έχει εκδώσει.

Διετέλεσε Πρόεδρος του Τμήματος Φυσικής, Διευθυντής του Τομέα Φ.Σ.Κ., της Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών, και μέλος της Επιτροπής του Προγράμματος Σπουδών του Τμήματός του από την άτυπη λειτουργία του το 1981 έως το 2016.

e-mail: gtreiber@phys.uoa.gr

Συγγραφικό έργο του ιδίου

1. *The Physics of Low-Dimensional Structures: From Quantum Wells to DNA and Artificial Structures*. G. P. Triberis, 2007 Nova Science Publishers, Inc. N.Y.
2. *Low-Dimensional Carriers Under In-Plane Magnetic Field: Novel Phenomena*, E. C. Simserides, A. Zora, G. P. Triberis, 2010 Nova Science Publishers, Inc. N.Y.
3. *Φυσική Ημιαγωγών*, Γ. Π. Τριμπέρης, 2013 Liberal Books, Αθήνα
4. *Small Polaron Hopping DC Conductivity in 3D and 1D Disordered Materials*, G. P. Triberis 2017, Materials science and Technologies, Nova Science Publishers, Inc. N.Y.

Η **Μ. Τσέτσερη** είναι Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (Ε.ΔΙ.Π) στο Τμήμα Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Ε.Κ.Π.Α.). Αποφοίτησε από το Τμήμα Φυσικής του Ε.Κ.Π.Α. το 1996 και στην συνέχεια απέκτησε Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης Βασικής Φυσικής στην ειδικότητα: «Φυσική Συμπυκνωμένης Ύλης» (1998) και Διδακτορικό Δίπλωμα Φυσικών Επιστημών στη Θεωρητική Φυσική Συμπυκνωμένης Ύλης (2004) από το ίδιο Τμήμα.

Διορίστηκε το 2006 στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση μετά από επιτυχία σε διαγωνισμό του Α.Σ.Ε.Π. Δίδαξε σε σχολεία της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης και ασχολήθηκε ερευνητικά με την Εκπαίδευση στις Φυσικές Επιστήμες. Το 2017 έλαβε το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης: «Διδακτικής της Χημείας και Νέες Εκπαιδευτικές Τεχνολογίες» στην κατεύθυνση: «Διδακτική της Χημείας» από το Τμήμα Χημείας του Ε.Κ.Π.Α.

Μετατάχθηκε το 2017 στο Τμήμα Φυσικής του Ε.Κ.Π.Α. Τα ερευνητικά της ενδιαφέροντα επικεντρώνονται στη θεωρητική μελέτη Χαμηλοδιάστατων Ημιαγωγικών Δομών καθώς και σε θέματα Εκπαιδευτικής Έρευνας στις Φυσικές Επιστήμες και Ανάπτυξης Εκπαιδευτικού Υλικού. Η ερευνητική της δραστηριότητα αποτυπώνεται σε δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά και συνέδρια.

e-mail: mtsetse@phys.uoa.gr