

Φυσική Προσανατολισμού Γ΄ Τάξης Γενικού Λυκείου

Διακτέα ύλη (Περιεχόμενο - Διαχείριση και ενδεικτικός προγραμματισμός)

Σύνολο ελάχιστων προβλεπόμενων ωρών: **132**

Από το βιβλίο: «ΦΥΣΙΚΗ-ΤΕΥΧΟΣ Γ΄» των Ιωάννου Α., Ντάνου Γ., Πήττα Α., Ράπτη Στ., ΙΤΥΕ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

ΚΕΦ 5. ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ (ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ: 12 ΔΩ)

5.2	Κρούσεις
5.3	Κεντρική ελαστική κρούση δύο σφαιρών
5.4	Ελαστική κρούση σώματος με άλλο ακίνητο πολύ μεγάλης μάζας

Ερωτήσεις – Ασκήσεις - Προβλήματα

Ερωτήσεις σελ. 174, 5.1 - 5.9. Ασκήσεις, σελ. 177, 5.22 - 5.30.

Προβλήματα, σελ. 180, 5.41 - 5.45, 5.47, 5.48.

Να μη διδαχθούν τα προβλήματα: 5.46, 5.49, 5.50 - 5.53.

Το ένθετο δεν περιλαμβάνεται στην εξεταστέα ύλη.

Παρατηρήσεις: -Η εισαγωγή είναι εκτός ύλης.

Από το βιβλίο: «ΦΥΣΙΚΗ-ΤΕΥΧΟΣ Γ΄» των Ιωάννου Α., Ντάνου Γ., Πήττα Α., Ράπτη Στ., ΙΤΥΕ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

ΚΕΦ 4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΤΕΡΕΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ: 18 ΔΩ)

4.1	Εισαγωγή
4.2	Κινήσεις των στερεών σωμάτων
4.3	Ροπή δύναμης
4.4	Ισορροπία στερεού σώματος
4.7	Στροφορμή (Εκτός από : (α) την παράγραφο 4.7 Β, (β) την απόδειξη και λεκτική διατύπωση της σχέσης 4.18 της παραγράφου 4.7 Γ για στερεό)
4.8	Διατήρηση στροφορμής. (Μέχρι και την διατύπωση της, δηλαδή έως την έκφραση «Εάν η συνολική εξωτερική ροπή σε ένα σύστημα είναι μηδέν η ολική στροφορμή του συστήματος παραμένει σταθερή»)

Ερωτήσεις – Ασκήσεις - Προβλήματα

Ερωτήσεις: 4.1 - 4.11, 4.23 Ασκήσεις: 4.32 - 4.43, 4.47

Προβλήματα: 4.56 – 4.59, 4,64

Να μη διδαχθούν οι ασκήσεις 4.48 και 4.49 και τα προβλήματα: 4.60-4.63, 4.65-4.71

Οι δραστηριότητες και τα ένθετα δεν περιλαμβάνονται στην εξεταστέα ύλη.

ΚΕΦ 1. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ – ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ (ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ: 16 ΔΩ)

1.2	Περιοδικά φαινόμενα
1.3	Απλή αρμονική ταλάντωση (Εκτός από το πρόβλημα 1.37 και γενικά εκτός από ερωτήματα σε ασκήσεις και προβλήματα με αρχική φάση διάφορη του 0 και $\pi/2$ στις εξισώσεις κίνησης)
1.5	Φθίνουσες ταλαντώσεις (Εκτός από «β. Ηλεκτρικές Ταλαντώσεις»)
1.6	Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις – (εκτός από «β. Ηλεκτρικές Ταλαντώσεις», από το 1-6β: Μόνο τις εφαρμογές του συντονισμού στις μηχανικές ταλαντώσεις)

Ερωτήσεις – Ασκήσεις - Προβλήματα

Ερωτήσεις για την απλή αρμονική ταλάντωση, σελ. 31, (1.1 - 1.8)

Ερωτήσεις για φθίνουσα, ελεύθερη και εξαναγκασμένη ταλάντωση. Συντονισμός σελ. 34: (1.17 - 1.24), εκτός της 1.20.

Ασκήσεις για την Απλή αρμονική ταλάντωση, σελ. 36, (1.27, 1.28, 1.29)

Ασκήσεις για Φθίνουσες και εξαναγκασμένες ταλαντώσεις. Συντονισμός, σελ. 36, (1.32)

Προβλήματα, σελ. 38: (1.38-1.41, 1.46 - 1.48) (δεν περιλαμβάνονται 1.37, 1.42, 1.43, 1.44, 1.45, 1.49, 1.50.)

Οι δραστηριότητες και τα ένθετα δεν περιλαμβάνονται στην εξεταστέα ύλη.

Παρατηρήσεις:

-Η εισαγωγή είναι εκτός ύλης

-Η εξαίρεση ερωτημάτων με αρχική φάση διάφορη του 0 και $\pi/2$, αφορά μόνο στις εξισώσεις κίνησης. Να μη δίνονται και να μη ζητούνται δηλαδή οι εξισώσεις κίνησης με αρχική φάση διάφορη του 0 και του $\pi/2$ σε ερωτήματα ασκήσεων και προβλημάτων. Οι μαθητές/-ήτριες όμως θα πρέπει να γνωρίζουν την έννοια αρχική φάση. Για παράδειγμα η ερώτηση 1.7 στην οποία η αρχική φάση είναι $3\pi/2$ ή και ερωτήσεις με αρχική φάση π δεν είναι εκτός ύλης αρκεί να μη δίνονται ή να μη ζητούνται οι εξισώσεις κίνησης.

-Στο σχήμα 1.28 του βιβλίου, το διάγραμμα για $b=0$ να θεωρηθεί ως καμπύλη η οποία περιβάλλει τις υπόλοιπες καμπύλες.

ΚΕΦ 2. ΚΥΜΑΤΑ (ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ: 16 ΔΩ)

2.2	Μηχανικά Κύματα
2.3	Επαλληλία ή Υπέρθυση Κυμάτων
2.4	Συμβολή Δύο Κυμάτων Στην Επιφάνεια Υγρού(Εφαρμογή της αρχής της επαλληλίας μόνο για σύγχρονες πηγές και εύρεση των σημείων ενισχυτικής και καταστροφικής συμβολής κοντά στις πηγές. Εκτός η μαθηματική μελέτη των σελίδων 50,51 και η εύρεση του πλάτους σε τυχόν σημείο. Εκτός οι ασκήσεις και τα προβλήματα με πηγές οι οποίες δεν είναι σύγχρονες όπως το πρόβλημα 2.52 και με σημεία τα οποία έχουν ενδιάμεσο πλάτος όπως το πρόβλημα 2.46)
2.5	Στάσιμα Κύματα

Ερωτήσεις – Ασκήσεις - Προβλήματα

Ερωτήσεις (2.1 - 2.12) Ασκήσεις (2.29-2.36)

Προβλήματα (2.46, 2.47, 2.51, 2.53, 2.54) δεν περιλαμβάνονται τα (2.48, 2.49, 2.50, 2.52)

Οι δραστηριότητες και τα ένθετα δεν περιλαμβάνονται στην εξεταστέα ύλη.

Παρατηρήσεις:

-Γίνεται μελέτη κυμάτων που διαδίδονται σε γραμμικά ελαστικά μέσα π.χ χορδές χωρίς απώλειες ενέργειας. Στην περίπτωση κυκλικών ή σφαιρικών κυμάτων όπως εκείνα στην επιφάνεια υγρού, επειδή διαδίδονται σε όλο και μεγαλύτερο χώρο ακόμα και χωρίς απώλειες η διατήρηση της ενέργειας επιβάλλει τη μείωση του πλάτους. Η εξίσωση 2.5 προκύπτει από τη μονοδιάστατη περίπτωση 2.4 όπου το x έχει αντικατασταθεί από την πιο γενική ακτινική συντεταγμένη r . Σε μια αυστηρή θεώρηση το πλάτος A ενός κυκλικού ή σφαιρικού κύματος μειώνεται καθώς το r αυξάνεται. Παρόλα αυτά θα υποθέτουμε ότι το πλάτος A παραμένει πρακτικά σταθερό στην περιοχή στην οποία θα μελετάμε τη συμβολή των κυμάτων.

-Στο σχολικό βιβλίο (σελ.51) ορίζονται ως σύγχρονες οι πηγές οι οποίες βρίσκονται σε φάση.

-Στο διπλανό σχήμα φαίνονται δύο επικαλυπτόμενα μοτίβα κυκλικών ή σφαιρικών κυματισμών από δύο σύγχρονες (και σύμφωνες) πηγές. Σε σημεία στα οποία φτάνουν ταυτόχρονα δύο όρη ή δύο κοιλάδες έχουμε ενισχυτική συμβολή. Μερικά από τα σημεία αυτά εμφανίζονται με τελείες. Σε σημεία στα οποία φτάνουν ταυτόχρονα ένα όρος και μία κοιλάδα έχουμε απόσβεση ή καταστροφική συμβολή. Μερικά από τα σημεία αυτά εμφανίζονται με x . (Το σχήμα αυτό είναι στατικό αλλά τα μέτωπα των κυμάτων κινούνται και σε μισή περίοδο απομακρύνονται κατά μισό μήκος κύματος από τις πηγές)

Είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται ότι η διάδοση των κυμάτων δεν επιδρά στα σημεία ενισχυτικής και καταστροφικής συμβολής. Δηλαδή σημείο στο οποίο φτάνουν ταυτόχρονα δύο όρη μετά από μισή περίοδο θα γίνει σημείο στο οποίο φτάνουν ταυτόχρονα δύο κοιλάδες.

4.1	Εισαγωγή
4.2	Νόμος των Biot και Savart
4.3	Εφαρμογές του νόμου των Biot και Savart. Εκτός από: (α) ερωτήσεις ασκήσεις και προβλήματα με χρήση της σχέσης 4.2 της σελίδας 149 (β) προβλήματα όπως το 4.57 στα οποία απαιτείται ανάλυση του ΔB . Να διδαχθούν και θέματα με εύρεση του $B_{ολ}$ από συνδυασμούς ευθύγραμμων και κυκλικών ρευματοφόρων αγωγών καθώς και σωληνοειδών σε απλά κυκλώματα.
4.4	Νόμος του Ampere (εκτός από το πρόβλημα 4.55)
4.5	Μαγνητική ροή
4.7	Δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σε κινούμενο φορτίο
4.8	Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε μαγνητικό πεδίο (εκτός από «Δ. Κίνηση σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο»)
4.9	Εφαρμογές της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων
4.10	Δύναμη Laplace (εκτός από την απόδειξη της σχέσης $F = BIl\eta\mu\phi$)
4.11	Μαγνητική δύναμη ανάμεσα σε δύο παράλληλους ρευματοφόρους αγωγούς

Ερωτήσεις – Ασκήσεις – Προβλήματα

Ερωτήσεις: Όλες οι ερωτήσεις από 4.1 έως 4.11 και από 4.14 έως 4.35

Ασκήσεις: Όλες οι ασκήσεις από 4.36 έως 4.54.

Προβλήματα: Προβλήματα (4.56 και από 4.58 έως 4.64). Δεν περιλαμβάνονται τα προβλήματα 4.55 και 4.57.

Οι δραστηριότητες και τα ένθετα δεν περιλαμβάνονται στην εξεταστέα ύλη.

Παρατηρήσεις:

- Η σχέση 4.2 της σελίδας 149 δεν θα χρειαστεί σε ερωτήσεις ασκήσεις ή προβλήματα, αφού σε αυτά τυχόν υπολογισμός του B θα αφορά πάντα σημεία τα οποία απέχουν από τον αγωγό απόσταση r πολύ μικρότερη από το μήκος του ώστε να μπορεί ο ευθύγραμμος αγωγός να θεωρείται ως αγωγός απείρου μήκους.

- Η σχέση 4.6 του παραδείγματος 4-2 για το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς μπορεί να χρησιμοποιείται χωρίς απόδειξη, εκτός αν αυτή ζητείται.

- Ο νόμος των Biot και Savart, όπως αναφέρεται και στο βιβλίο, αποτελεί μια πειραματικά προσδιορισμένη σχέση. Το διάνυσμα r είναι ένα διάνυσμα που δείχνει από τη θέση του στοιχειώδους τμήματος ρευματοφόρου αγωγού, μήκους Δl , στη θέση A στην οποία αναζητούμε το του στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο ΔB το οποίο οφείλεται στο στοιχειώδες τμήμα του ρευματοφόρου αγωγού. Το r είναι το μέτρο της απόστασης μεταξύ αυτών των δύο θέσεων/σημείων.

ΚΕΦ 5. ΕΠΑΓΩΓΗ (ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ: 22 ΔΩ)

5.1	Εισαγωγή
5.2	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή
5.3	Ευθύγραμμος αγωγός κινούμενος σε μαγνητικό πεδίο (Εκτός από (α) ασκήσεις και προβλήματα απόκτησης οριακής ταχύτητας ράβδου που κινείται σε κεκλιμένο επίπεδο, (β) επαγωγικής τάσης σε ράβδο σε συνδυασμό με υπάρχουσα πηγή ΗΕΔ και (γ) το ερώτημα β της άσκησης 5.42 και γενικά ερωτήματα σε ασκήσεις και προβλήματα υπολογισμού φυσικών μεγεθών (π.χ της θερμότητας ή του διαστήματος) μέχρι την απόκτηση της οριακής ταχύτητας)
5.4	Ο κανόνας του Lenz και η αρχή διατήρησης της ενέργειας στο φαινόμενο της επαγωγής
5.5	Στρεφόμενος αγωγός
5-6	Στρεφόμενο πλαίσιο - εναλλασσόμενη τάση
5-7	Εναλλασσόμενο ρεύμα
5-8	Ενεργός ένταση - Ενεργός τάση
5-9	Ο νόμος του Joule - Ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος
5.14	Αυτεπαγωγή

Ερωτήσεις – Ασκήσεις – Προβλήματα

Ερωτήσεις: Από 5.1 έως 5.25. και από 5.27 έως 5.33. Δεν περιλαμβάνεται η 5.26

Ασκήσεις: Από 5.34 έως 5.42 ερώτημα α και από 5.44 έως 5.51. (Εκτός από τις ασκήσεις 5.42 ερώτημα β και 5.43)

Προβλήματα: Από 5.58 έως 5.60, 5.62, 5,66 έως 5.69. Εκτός από τα προβλήματα 5.61, 5.63 5.64 και 5.65

Οι δραστηριότητες και τα ένθετα δεν περιλαμβάνονται στην εξεταστέα ύλη.

Παρατηρήσεις:

1. Η παράγραφος 5-10 είναι εκτός ύλης αλλά το πρότυπο της γεννήτριας εναλλασσόμενης τάσης (εναλλακτήρας) στην παράγραφο 5-6 είναι εντός, συνεπώς αναμένεται οι μαθητές/ήτριες να γνωρίζουν την αρχή λειτουργίας της.
2. Στη σελίδα 186 και στο σχήμα 5.4 αναγράφεται αντίσταση R_2 αντί για R_1 όπως εμφανίζεται στη δίπλανη σχέση $V_{ΓΔ} = E_{επ} - IR_1$

Λόγω διαφορών που παρατηρούνται ανάμεσα στις ηλεκτρονικές εκδόσεις του σχολικού βιβλίου (pdf και html) ως προς το κείμενο της παραπάνω υποενότητας / παραγράφου 5.6 (σελ. 195), προτείνεται το κείμενο της υποενότητας/ παραγράφου, να διατυπωθεί ως εξής:

«...η μαγνητική ροή μέσα από την επιφάνεια του πλαισίου θα είναι $\Phi_B = BA\sigma\omega t$. Καθώς το πλαίσιο στρέφεται η μαγνητική ροή μέσα από την επιφάνειά του μεταβάλλεται και κατά συνέπεια εμφανίζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή. Από το νόμο του Faraday προκύπτει:

$$E_{επ} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = \omega BA\eta\mu\omega t$$

Εάν το πλαίσιο μας έχει N σπείρες τότε: $E_{επ} = NB\omega A\eta\mu(\omega t)$ ».

ΚΕΦ 2. ΚΥΜΑΤΑ (ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ: 2 ΔΩ)

2.6	Παραγωγή Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων
2.8	Το φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

Ερωτήσεις – Ασκήσεις - Προβλήματα

Ερωτήσεις (2.13 - 2.20)

Ασκήσεις (2.37 εκτός το ερώτημα 2.37γ)

Οι δραστηριότητες δεν περιλαμβάνονται στην εξεταστέα ύλη.

Παρατηρήσεις: Η περιγραφή του σχολικού βιβλίου για τη διάδοση των Η.Μ κυμάτων είναι ελλιπής αφού οι μαθητές/-ήτριες δεν γνωρίζουν ότι το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Θα μπορούσαμε να το αναφέρουμε αυτό προκειμένου να δώσουμε μια περισσότερο λειτουργική γνώση. Στη σελίδα 58 αναφέρεται ότι: “Αυτό σημαίνει ότι, κοντά στην κεραία, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο έχουν διαφορά φάσης 90° (όταν το ένα είναι μέγιστο το άλλο είναι μηδέν). Σε μεγάλη όμως απόσταση από την κεραία τα δύο πεδία είναι σε φάση”. Αυτό ισχύει προσεγγιστικά.

7.1	Εισαγωγή
7.2	Η ακτινοβολία του μέλανος σώματος (3 Δ.Ω)
7.3	Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (12 Δ.Ω)
7.4	Φαινόμενο Compton (Έως και την έκφραση «όπου K_e η κινητική ενέργεια του ανακρουόμενου ηλεκτρονίου» εκτός η απόδειξη της σχέσης $\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\varphi)$) (2 Δ.Ω)
7.5	Η κυματική φύση της ύλης (3. Δ.Ω)
7.6	Αρχή της αβεβαιότητας (2. Δ.Ω)
7.7	Κυματοσυνάρτηση και εξίσωση Schrödinger (μέχρι και τη συνθήκη κανονικοποίησης, εκτός η εξίσωση του Schrödinger δηλαδή το «Πως βρίσκουμε όμως μια κυματοσυνάρτηση») (1.Δ.Ω)

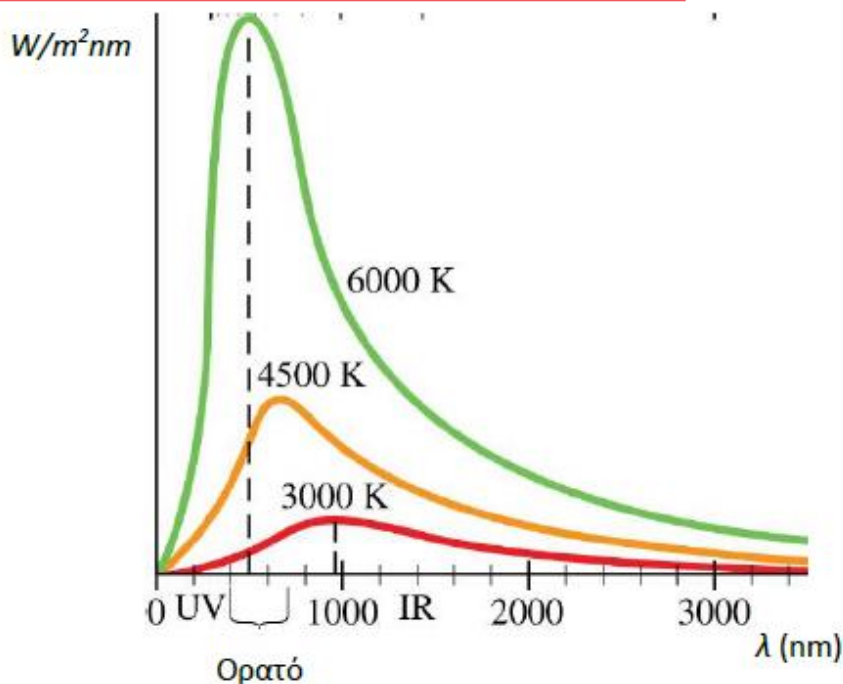
Ερωτήσεις – Ασκήσεις – Προβλήματα

Ερωτήσεις: Όλες οι ερωτήσεις από 7.1 έως 7.14 **Ασκήσεις:** Όλες οι ασκήσεις από 7.15 έως 7.35

Προβλήματα: Επίλυση προβλήματος στο εργαστήριο με θέμα: «προσδιορισμός του έργου εξαγωγής και η σταθερά του Planck» όπως περιγράφεται [στον εργαστηριακό Οδηγό](#) Φυσικής, Θετικής και Τεχνολογικής κατεύθυνσης Γ΄ Τάξης Γενικού Λυκείου, των Ιωάννου Α., Ντάνου Γ., Πήττα Α., Ράπτη Στ., σελ 42 ή αντίστοιχης προσομοίωσης. Ο εργαστηριακός οδηγός εναλλακτικά και [από εδώ](#). Αλλά και στη συνέχεια των οδηγιών, [εδώ](#).

Παρατηρήσεις

- Στο σχήμα 7.1 της σελίδας 227 οι τιμές των αναγραφόμενων θερμοκρασιών είναι εσφαλμένες. Να αντικατασταθεί το σχήμα με το παρακάτω:



-Στην ερώτηση 7.7 της σελίδας 248 του σχολικού βιβλίο στις προτάσεις α) και ε) αναφέρεται ότι $f_k > f_\pi$ αντί του ορθού $f_k < f_\pi$. Αυτό το λάθος επηρεάζει και την απάντηση η οποία υπάρχει στο βιβλίο των λύσεων στο οποίο δίδονται ως σωστές οι προτάσεις α) και ε) ενώ είναι λάθος.

-Το διάγραμμα στο σχήμα 7-1 της σελίδας 227 δείχνει τη φασματική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες. Αυτή η ονομαζόμενη θερμική ακτινοβολία είναι ανεξάρτητη από τη φύση του εκπέμποντος υλικού. Το διάγραμμα υποδεικνύει ότι η ένταση της ακτινοβολίας δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλα τα μήκη κύματος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει και η ένταση σε όλα τα μήκη κύματος και το μήκος κύματος αιχμής μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη δείχνει τη συνολική ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπει το σώμα σε ορισμένη θερμοκρασία.

-Το διάγραμμα στο σχήμα 7-1 της σελίδας 227 προκύπτει από πειραματικά δεδομένα (για τα οποία αναφέρεται το βιβλίο στη σελίδα 227, 4^η γραμμή από το τέλος) και είναι το κύριο αποτέλεσμά τους το οποίο δεν μπόρεσε να ερμηνεύσει η κλασική φυσική. Στο βιβλίο όμως δεν φαίνεται γιατί η κλασική θεωρία δεν εξηγεί τα πειραματικά δεδομένα ούτε γιατί οι παραδοχές του Planck τα ερμηνεύουν. Στο πλαίσιο του μαθήματος αρκεί η παραπάνω δήλωση, αλλά θα μπορούσαμε προαιρετικά να αναφέρουμε ότι οι Rayleigh–Jeans εφαρμόζοντας την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία και την κλασική στατιστική μηχανική / θερμοδυναμική, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε μεγάλες συχνότητες και μικρά μήκη κύματος η ένταση αυξάνεται ακατάσχετα πράγμα που έρχεται σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία όμως είναι σε πλήρη συμφωνία με την εκτός πλαισίου της κλασικής φυσικής υπόθεση του Planck για την κβάντωση της ενέργειας της Η.Μ ακτινοβολίας $E_n = nhf$.

-Επίσης χρήσιμες είναι για τον/την εκπαιδευτικό και θα μπορούσε να γίνει αναφορά αν του ζητηθεί, οι παρατηρήσεις οι οποίες αναφέρονται από τον καθηγητή Στέφανο Τραχανά στο μάθημα του Mathesis: [« Εισαγωγή στην Κβαντική Φυσική 1: Οι βασικές αρχές »](#) . Ο θερμικός χαρακτήρας της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος σε συνδυασμό με την υπόθεση του Planck μας δίνει μια φυσική ερμηνεία του διαγράμματος. Από την κινητική ενέργεια των αερίων γνωρίζουμε ότι η μέση κινητική ενέργεια ανά μόριο είναι $(3/2)kT$. Γενικά ο παράγοντας kT χαρακτηρίζει τη ζωνρότητα της θερμικής κίνησης των μορίων και είναι περίπου ίσος με 1/40 του ηλεκτρονιοβόλτ σε θερμοκρασία δωματίου η οποία είναι περίπου εκατό φορές μικρότερη από την ενέργεια των κβάντων του ορατού φωτός ($\epsilon \approx 2 \text{ eV}$) και επομένως η διέγερση αυτών των κβάντων είναι αδύνατη σε αυτή τη θερμοκρασία. Για τον λόγο αυτό τα σώματα σε θερμοκρασία δωματίου εκπέμπουν θερμική (αόρατη υπέρυθρη) ακτινοβολία αλλά όχι φως (δηλαδή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τέτοιας συχνότητας που να διεγείρει τον ανθρώπινο αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού). Σε θερμοκρασία T θα μπορούν λοιπόν να δημιουργηθούν μόνο εκείνα τα φωτεινά κβάντα με ενέργεια μικρότερη του kT , δηλαδή τα μικρής συχνότητας. Τα κβάντα με υψηλή συχνότητα και μικρό μήκος κύματος δεν θα είναι δυνατόν να δημιουργηθούν και να είναι παρόντα στο εκπεμπόμενο φάσμα πράγμα που η κλασική φυσική δεν μπορούσε να ερμηνεύσει.

-Η συνολική ένταση είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος, νόμος των Stefan- Boltzmann, οποίος δεν αναφέρεται στο σχολικό βιβλίο και είναι εκτός ύλης.

-Στο βιβλίο (σελ. 230) αναφέρεται ότι : “Για να υπερνικήσει τις δυνάμεις που το συγκρατούν στο μέταλλο ένα ηλεκτρόνιο πρέπει να προσλάβει ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται έργο εξαγωγής και συμβολίζεται με φ . Το έργο εξαγωγής ποικίλει από μέταλλο σε μέταλλο ” Όπως είναι διατυπωμένος αυτός ο ορισμός πιθανόν να οδηγεί στην

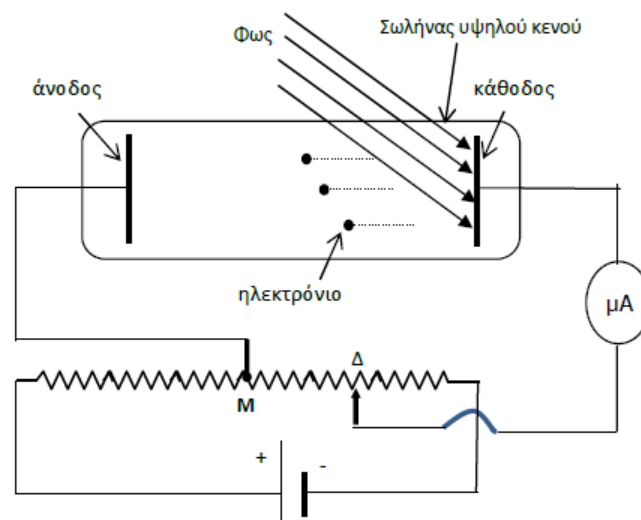
εντύπωση ότι κάθε ηλεκτρόνιο του μετάλλου αν προσλάβει την ενέργεια αυτή θα εξαχθεί. Μια σαφέστερη διατύπωση θα ήταν η εξής: “Έργο εξαγωγής είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να εξαχθούν τα υψηλότερης ενέργειας ηλεκτρόνια από μέταλλο”. Προφανώς το σχολικό βιβλίο αναφέρεται μόνο σε αυτά.

- Λόγω του ότι τα διάφορα ηλεκτρόνια απαιτούν διαφορετικές ποσότητες ενέργειας για να δραπετεύσουν θα υπάρχει μια κατανομή κινητικών ενεργειών K τις οποίες έχουν τα φωτοηλεκτρόνια. Η μέγιστη όμως κινητική ενέργεια φωτοηλεκτρονίου θα είναι:

$$K_{\max} = hf - \varphi$$

Στη σελίδα 231 του σχολικού βιβλίου αλλά και σε ασκήσεις δεν γίνεται αναφορά σε μέγιστη κινητική ενέργεια αλλά θεωρείται ότι πρόκειται γι’ αυτήν, αφού το σχολικό βιβλίο αναφέρεται μόνο σε ηλεκτρόνια τα οποία, όταν είναι στο μέταλλο, έχουν την υψηλότερη δυνατή ενέργεια.

-Η ποτενσιομετρική διάταξη του σχήματος 7.3 σελίδα 229 δεν δίνει τη δυνατότητα να έχει η άνοδος μικρότερο δυναμικό από την κάθοδο ώστε να εφαρμοστεί η τάση αποκοπής. Στη συσκευή του Philipp Lenard ο οποίος με τα πειράματά του το 1902 άνοιξε το δρόμο για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η ποτενσιομετρική διάταξη ήταν τέτοια ώστε να ρυθμίζεται και η πολικότητα της τάσης.



Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται μια αναπαράσταση της συσκευής του Philipp Lenard ο οποίος το 1902 με τα πειράματά του διερεύνησε την επίδραση της έντασης του φωτός (δηλαδή της ενέργειας που προσπίπτει σε κάθε δευτερόλεπτο στη μονάδα επιφάνειας του μετάλλου της καθόδου) και της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου, στο ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται από το φως, θέτοντας τις βάσεις για την ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Όταν ο δρομέας Δ είναι δεξιά από την επαφή M στο μέσον της αντίστασης τότε η άνοδος έχει μεγαλύτερο δυναμικό από την κάθοδο (θετική τάση) και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς την άνοδο. Όταν ο δρομέας Δ είναι στο μέσον M τότε η τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου είναι μηδενική. Αν τέλος ο δρομέας Δ είναι αριστερά του M τότε η άνοδος έχει μικρότερο δυναμικό από την κάθοδο (Αρνητική τάση) και τα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται καθώς κινούνται προς την άνοδο.

-Στις πειραματικές διαπιστώσεις θα μπορούσαν να προστεθούν και οι εξής:

A) Το ρεύμα εμφανίζεται χωρίς καθυστέρηση όταν προσπίπτει το φως. Σε νεότερα πειράματα έχει υπολογιστεί ότι η όποια καθυστέρηση είναι μικρότερη από 1 ns .

Β) Ακόμα και για πολύ μικρές τιμές της έντασης του φωτός ισχύει η αναλογία του ρεύματος κόρου με την ένταση του φωτός. Επίσης η τάση αποκοπής είναι η ίδια ανεξάρτητα από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός όπως φαίνεται και στο σχήμα 7-5.

-Τα παρακάτω αναφέρονται στη σελίδα 43 του εργαστηριακού οδηγού και θεωρείται απαραίτητο να αναφερθούν πριν την εργαστηριακή άσκηση ή την ενασχόληση με προσομοιώσεις. Σημειώνεται ότι οι προσομοιώσεις ενδείκνυνται ιδιαίτερα στην περίπτωση του υπολογισμού του έργου εξαγωγής του υλικού της φωτοκαθόδου λόγω μεγάλων σφαλμάτων της διάταξης του σχολικού εργαστηρίου.

Στην περίπτωση που η συχνότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στη φωτοκάθοδο είναι μεγαλύτερη της οριακής, για να εμποδίσουμε τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται να φτάσουν στο άλλο ηλεκτρόδιο –και επομένως για να μηδενιστεί το φωτορεύμα– θα πρέπει να εφαρμόσουμε αρνητική τάση μεταξύ ανόδου – καθόδου τέτοια ώστε

$$eV_0 = \frac{1}{2}mv^2$$

η τάση αυτή λέγεται «τάση αποκοπής» και από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση προκύπτει ότι

$$eV_0 = hf - \varphi \quad \text{ή}$$

$$V_0 = \frac{h}{e}f - \frac{\varphi}{e}$$

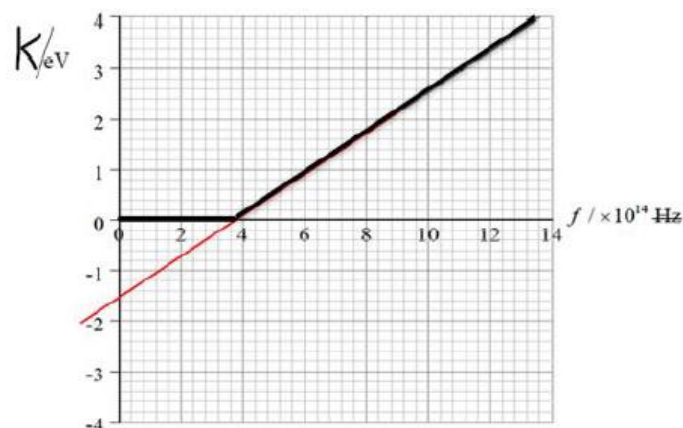
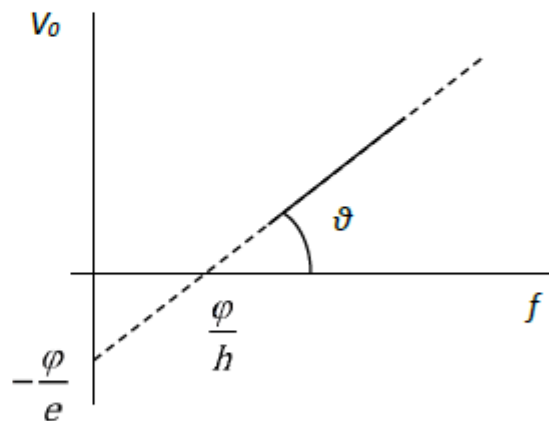
Η παραπάνω σχέση παριστάνεται γραφικά με ευθεία που έχει κλίση $k = e\phi\theta = \frac{h}{e}$ και περνάει

από τα σημεία $\left(\frac{\varphi}{h}, 0\right)$ και $\left(0, -\frac{\varphi}{e}\right)$.

Επομένως από το διάγραμμα $V_0(f)$ είναι δυνατό να υπολογιστούν η σταθερά h

(σταθερά του Planck) και το φ (έργο εξαγωγής για το υλικό της φωτοκαθόδου).

-Το παρακάτω γράφημα δείχνει την (μέγιστη) κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την επιφάνεια ενός μετάλλου σε σχέση με τη συχνότητα, του προσπίπτοντος φωτός



Από το γράφημα αυτό μπορούμε να βρούμε τη συχνότητα κατωφλίου (τομή x), το έργο εξαγωγής (τομή y) και τη σταθερά του Planck (κλίση)

-Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV) είναι η ενέργεια που μεταβιβάζεται σε ένα ηλεκτρόνιο, όταν αυτό επιταχύνεται μέσω διαφοράς δυναμικού 1V. Ισχύει ότι $1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{J}$.

-Το $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$, το $1\text{angstrom } 1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$

-Για γρήγορη εύρεση της ενέργειας φωτονίου σε eV όταν ξέρουμε το μήκος κύματος σε nm ή σε angstrom, αλλά και του μήκους κύματος σε nm ή σε angstrom όταν ξέρουμε την ενέργεια σε eV, ισχύει για την περίπτωση των nm: $E(\text{eV}) = \frac{1242(\text{eV}\cdot\text{nm})}{\lambda(\text{nm})}$ και για ευκολία με καλή προσέγγιση:

$$E(\text{eV}) \cong \frac{1200(\text{eV}\cdot\text{nm})}{\lambda(\text{nm})}$$

Απόδειξη:

$$E=hf \quad \text{αλλά } c=\lambda f \quad \text{οπότε: } E = h\frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Αλλά $h=6,62\cdot 10^{-34}\text{Js}$ και επειδή $1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{J}$

$$h = \frac{6,62}{1,6} 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s} = 4,14\cdot 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$$

Επειδή $c = 3\cdot 10^8\text{m/s}$

Προκύπτει ότι: $hc = 12,42\cdot 10^{-7}\text{eV}\cdot\text{m} = 12,42\cdot 10^{-7}\text{eV}\cdot 10^9\text{nm} = 1242\text{eV}\cdot\text{nm}$

Συνεπώς από την (1) προκύπτει $E(\text{eV}) = \frac{1242(\text{eV}\cdot\text{nm})}{\lambda(\text{nm})}$ (2) και κατά προσέγγιση

$$E(\text{eV}) \cong \frac{1200(\text{eV}\cdot\text{nm})}{\lambda(\text{nm})} \quad (3)$$

-Στη σελίδα 232 να αντικατασταθεί η έκφραση «Στην παράγραφο 6-11 είδαμε ότι ένα σωματίο μηδενική μάζα ηρεμίας -τέτοιο είναι το φωτόνιο- έχει ενέργεια $E=pc$ » με την έκφραση « Από τη θεωρία της σχετικότητας αποδεικνύεται πως το φωτόνιο έχει ενέργεια $E=pc$.», λόγω του ότι οι μαθητές/-ήτριες δεν έχουν διδαχθεί στοιχεία από τη θεωρία της σχετικότητας η οποία καλύπτεται στο κεφάλαιο 6 του βιβλίου.

- Πειραματική επιβεβαίωση της ύπαρξης φωτονίων (φαινόμενο Compton)

Ο Compton παρατήρησε ότι:

1. καθώς οι ακτίνες X αλληλεπιδρούσαν με τα ηλεκτρόνια του μετάλλου μειώνονταν η συχνότητα και αυξανόταν το μήκος κύματος του σκεδαζόμενου τμήματος τη ακτινοβολίας ενώ ταυτόχρονα μεταβαλλόταν και η διεύθυνση κίνησής τους.

2. υπήρχε συγκεκριμένη σχέση: $\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \sigma\text{ιν}\varphi)$ μεταξύ της γωνίας εκτροπής φ

και της μεταβολής του μήκους κύματος συνεπώς και της συχνότητας της ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία εκτροπής, τόσο μεγαλύτερο το μήκος κύματος και τόσο μικρότερη είναι η συχνότητα, συνεπώς και η ενέργεια της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Το γεγονός ότι η διεύθυνση στην οποία κινείται το σκεδαζόμενο φωτόνιο εξαρτάται από την ενέργεια την οποία χάνει κατά την αλληλεπίδραση $\Delta E = h \cdot \Delta f = h \cdot (f - f')$ δεν μπορεί να εξηγηθεί μόνο από τη διατήρηση της ενέργειας αφού η ενέργεια δεν εξαρτάται από την διεύθυνση διάδοσης. Για να εξηγηθεί το φαινόμενο Compton πρέπει να δεχθούμε ότι τα φωτόνια έχουν ορμή, και ότι κατά την αλληλεπίδρασή τους με τα ηλεκτρόνια του στόχου μεταβιβάζεται και ενέργεια και ορμή, σύμφωνα με τους νόμους διατήρησης αυτών των δυο μεγεθών. Σε αυτή τη διαδικασία σκέδασης το φωτόνιο απορροφάται από το ηλεκτρόνιο και αμέσως επανεκπέμπεται σε μια εν γένει διαφορετική κατεύθυνση από την αρχική του.

-Η σχέση $\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \sigma \nu \varphi)$ γράφεται και: $\Delta \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \sigma \nu \varphi)$

Η ποσότητα $\frac{h}{mc}$ προφανώς έχει διαστάσεις μήκους συμβολίζεται με λ_c και ονομάζεται μήκος κύματος Compton.

Έτσι έχουμε ότι: $\Delta \lambda = \lambda_c (1 - \sigma \nu \varphi)$ οπότε

η ποσοστιαία μεταβολή του μήκους κύματος θα είναι:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_c}{\lambda} (1 - \sigma \nu \varphi)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι αν $\lambda \gg \lambda_c$ τότε η ποσοστιαία μεταβολή θα είναι πολύ μικρή και η μεταβολή του μήκους κύματος θα είναι ανεπαίσθητη. Στην περίπτωση όμως που το λ είναι συγκρίσιμο με το λ_c τότε η μεταβολή του μήκους κύματος είναι παρατηρήσιμη.

-Στη σελίδα 235 του σχολικού βιβλίου αναφέρεται το φαινόμενο περίθλαση. Προτείνεται να γίνει περιγραφή του φαινομένου με λίγα λόγια και εικόνες ως το άπλωμα, ή η απόκλιση από την ευθύγραμμη διάδοση ενός κύματος όταν συναντά μια στενή σχισμή σε σχέση με το μήκος κύματός του. Όσο πιο στενή είναι η σχισμή τόσο μεγαλύτερο το άπλωμα.

-Στη Β' Λυκείου Γενικής παιδείας διδάσκεται το πρότυπο του Bohr για το υδρογόνο. Μετά την υπόθεση του de Broglie είναι ευκαιρία να παρουσιάσουμε την παραδοχή του Bohr για την κβάντωση της στροφορμής του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου με διαφορετικό τρόπο που ίσως θα φανεί περισσότερο λογικός στους μαθητές/τριες. Βέβαια ο Bohr δημοσίευσε τα αποτελέσματά του το 1913 ενώ ο de Broglie έκανε την υπόθεσή του το 1924 η οποία επαληθεύτηκε το 1927 από τους Davisson και Germer.

Γνωρίζουμε ότι στα στάσιμα κύματα δεν έχουμε διάδοση ενέργειας, δηλαδή η ενέργεια ενός στάσιμου κύματος περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Σύμφωνα με τα αξιώματα του Bohr, ένα ηλεκτρόνιο σε οποιαδήποτε «σταθερή» τροχιά δεν ακτινοβολεί ενέργεια. Η ενέργειά του περιορίζεται σε αυτήν την τροχιά. Άρα δεν εμπλέκεται διάδοση ενέργειας. Ως εκ τούτου, παρατηρούμε αυτή τη συμπεριφορά του ηλεκτρονίου μοιάζει με στάσιμο κύμα. Μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα μόνο σε συγκεκριμένες αποστάσεις, έτσι ώστε ως υλικά κύματα να δημιουργούν στάσιμα κύματα.

Γνωρίζουμε ήδη για τα στάσιμα κύματα και τους περιορισμούς τους, συγκεκριμένα ότι δεν μπορούμε να έχουμε στάσιμα κύματα με οποιοδήποτε μήκος κύματος.

Ειδικότερα σε σχοινί μήκους l με τα δύο άκρα του ακλόνητα πρέπει:

$$l = n \frac{\lambda}{2} \quad \text{δηλαδή το μήκος κύματος θα είναι: } \lambda = \frac{2l}{n}$$

Ας φανταστούμε το σχοινί λυγισμένο κατά μήκος ενός κύκλου και τα δύο άκρα του σχοινοῦ να είναι πλέον ενωμένα. Αυτό επιφέρει μια «συνέχεια» στο κύμα στα δύο άκρα. Στην ουσία, η μετατόπιση του σχοινοῦ στα δύο άκρα είναι η ίδια. Επίσης, στο μισό μήκος του σχοινοῦ, θα πρέπει να παρατηρήσουμε έναν κόμβο. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει το μήκος του σχοινοῦ να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος και όχι του ημίσεος μήκους κύματος δηλαδή:

$$l = n\lambda$$

Επειδή η κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα του ατόμου του υδρογόνου έχει κυματικό χαρακτήρα και όπως αναφέραμε μοιάζει με στάσιμο κύμα, προκύπτει ότι η περιφέρεια του κύκλου γύρω από τον πυρήνα να είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του ηλεκτρονίου δηλαδή:

$$2\pi r = n\lambda$$

Στη συνέχεια, συσχετίζουμε με την ορμή μέσω του μήκους κύματος de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Οπότε έχουμε: $2\pi r = n \frac{h}{p}$ από την οποία: $pr = n \frac{h}{2\pi}$ όμως pr είναι η στροφορμή L του

ηλεκτρονίου, οπότε προκύπτει η κβάντωση της στροφορμής του ηλεκτρονίου: $L = n \frac{h}{2\pi}$

Ο Erwin Schrodinger τα κατάλαβε όλα αυτά για πρώτη φορά το 1926. Βρήκε ότι τα κύματα που ταιριάζουν γύρω από τον πυρήνα έχουν ενέργειες και μήκη κύματος που ταιριάζουν ακριβώς στο πειραματικά γνωστό φάσμα του υδρογόνου. Σημειώνουμε ότι αυτή η “κυματική συμπεριφορά” προκύπτει λόγω του πλάτους της ταλαντούμενης πιθανότητας του ηλεκτρονίου που αντιστοιχεί σε δεδομένο σημείο σύμφωνα με την κυματοσυνάρτηση η οποία το περιγράφει.

- Στα ερωτήματα που θα μας απασχολήσουν εδώ δεν θα έχουμε ταχύτητες οι οποίες υπερβαίνουν το μισό της ταχύτητας του φωτός. Συνεπώς θα θεωρούμε ότι ισχύουν με πολύ καλή προσέγγιση οι τύποι της κλασικής φυσικής για την ενέργεια και την ορμή. Συνήθως δεν γνωρίζουμε την ταχύτητα αλλά την κινητική ενέργεια σε eV ηλεκτρονίων ή πρωτονίων τα

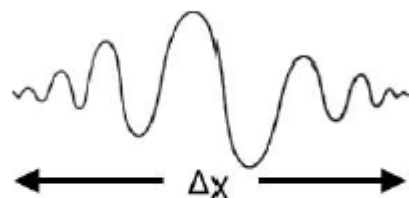
οποία επιταχύνονται από τάση V . Καλό είναι να αναφέρουμε και τη σχέση: $K = \frac{p^2}{2m}$ από την

οποία έχουμε: $p = \sqrt{2mK}$ και έτσι το μήκος κύματος de Broglie θα είναι: $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mK}}$.

-Στην κλασική Φυσική έχουμε αναπτύξει δύο πρότυπα, ή περιγραφές, με τις οποίες είμαστε εξοικειωμένοι, το κυματικό και το σωματιδιακό. Τα κύματα μπορούν να συμβάλλουν, έχουν ορισμένα μήκη κύματος, συχνότητες και εντάσεις. Μεταφέρουν ενέργεια και ορμή μέσω των διαταραχών. Η έντασή τους είναι συνεχής και μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Τα σωματίδια από την άλλη μεριά είναι «βώλοι». Έχουν συγκεκριμένες μάζες, ενέργειες και

ορμές. Τα σωματίδια βεβαίως δεν συμβάλλουν. Επίσης τα σωματίδια εμφανίζονται πάντα σε ακέραιες ποσότητες (μπορείτε να έχετε ένα ή δύο ή 925991257 σωματίδια αλλά δεν μπορούμε να έχουμε μισό σωματίδιο. Το φως δεν ταιριάζει σε καμία από αυτές τις περιγραφές. Το ηλεκτρόνιο δεν ταιριάζει επίσης σε καμία από αυτές τις περιγραφές. Το κυματικό και σωματιδιακό πρότυπο αποτελούν υπεραπλουστευτικές περιγραφές. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις όπου η σωματιδιακή περιγραφή ταιριάζει καλά, όχι όμως πάντα και περιπτώσεις όπου η κυματική περιγραφή ταιριάζει καλά, όχι όμως πάντα. Το φως αποτελείται από φωτόνια τα οποία έχουν και κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες. Ο συνολικός αριθμός σωματιδίων (στο σωματιδιακό πρότυπο) σχετίζεται με την ένταση της ακτινοβολίας (στο κυματικό πρότυπο). Η ενέργεια κάθε σωματιδίου (στο σωματιδιακό πρότυπο) αντιστοιχεί στη συχνότητα (στο κυματικό πρότυπο) μέσω της σχέσης: $E=hf$ Όπου h είναι η σταθερά του Planck, και είναι $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Js. Η ορμή κάθε σωματιδίου (στο σωματιδιακό πρότυπο) αντιστοιχεί στο μήκος κύματος (στο κυματικό πρότυπο) μέσω της σχέσης $p=h/\lambda$

-Στη σελίδα 237 το σχολικό βιβλίο αναφέρει ότι η υπέρθεση δύο κυμάτων με πολύ μικρή διαφορά στο μήκος κύματος (συνεπώς και στη συχνότητα) δίνει το διακρότημα που φαίνεται στο σχήμα 7-10 β. Στο σημείο αυτό με [κατάλληλη προσομοίωση](#) θα μπορούσαμε να δείξουμε στους/στις μαθητές/-ήτριες ότι όσο πιο μικρή είναι η διαφορά των συχνοτήτων, δηλαδή όσο το Δf είναι πιο μικρό, τόσο πιο πολύ απλώνει το διακρότημα στον άξονα των χρόνων, δηλαδή το Δt μεγαλώνει συνεπώς και το Δx αφού $\Delta x=v\Delta t$. Με την υπέρθεση μεγάλου αριθμού κυμάτων μπορούμε να συνθέσουμε ένα κυματοπακέτο.



Γενικά, αποδεικνύεται ότι όσο μικρότερο είναι μήκος Δx ενός κυματοπακέτου, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των μηκών κύματος των κυμάτων που συμβάλλουν για το σχηματισμό του κυματοπακέτου. Αυτό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά μέσω του $2\pi/\lambda$ (κυματαριθμός) και της σχέσης $p=h/\lambda$ ως εξής:

$$\Delta x \Delta \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \approx 1 \Rightarrow 2\pi \Delta \left(\frac{1}{\lambda} \right) \Delta x \approx 1 \Rightarrow 2\pi \Delta \left(\frac{p_x}{h} \right) \Delta x \approx 1$$

Οπότε: $\Delta p_x \Delta x \approx \frac{h}{2\pi}$. Λόγω τεχνικών περιορισμών οι αβεβαιότητες είναι μεγαλύτερες

οπότε η μαθηματική διατύπωση της αρχής απροσδιοριστίας ορμής – θέσης που διατύπωσε ο Heisenberg και αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση κίνησης – στον άξονα x είναι η

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

Παρόμοιες σχέσεις ισχύουν και για τους άλλους δυο άξονες συντεταγμένων.

Στην πραγματικότητα το κάτω όριο του γινομένου των αβεβαιοτήτων είναι: $\Delta p_x \Delta x \approx \frac{h}{4\pi}$

αλλά αυτό προέκυψε με μεταγενέστερους υπολογισμούς. Έτσι προκύπτει η μορφή: $\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$

Αυτό όμως που έχει σημασία δεν είναι η μικρή αυτή διαφορά αλλά η τάξη μεγέθους της ποσότητας στο δεύτερο μέλος της ανισότητας.

-Ένας τρόπος θεώρησης της σχέσης αβεβαιότητας ενέργειας χρόνου $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2\pi}$ είναι ότι

αναφέρεται στη μεταφορά ενέργειας. Έτσι ο περιορισμός τίθεται στην ακρίβεια με την οποία μπορούμε να καθορίσουμε την ποσότητα της μεταφερόμενης ενέργειας με τη γνώση σχετικά με το χρόνο που έλαβε χώρα η μεταφορά. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι μόνο κάτι που διαρκεί πολύ μπορεί να έχει μια πολύ καλά καθορισμένη ενέργεια.