

## Άσκηση 35

### Ακτινοβολία μέλανος σώματος

#### 35.1 Σκοπός

Σκοπός αυτής της άσκησης είναι ο πειραματικός έλεγχος της μαθηματικής σχέσης που προτάθηκε από τον Planck για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, καθώς επίσης και της ισχύος του νόμου μετατόπισης του Wien και του νόμου των Stefan-Boltzmann.

#### 35.2 Γενικά

##### 35.2.1 Εισαγωγή

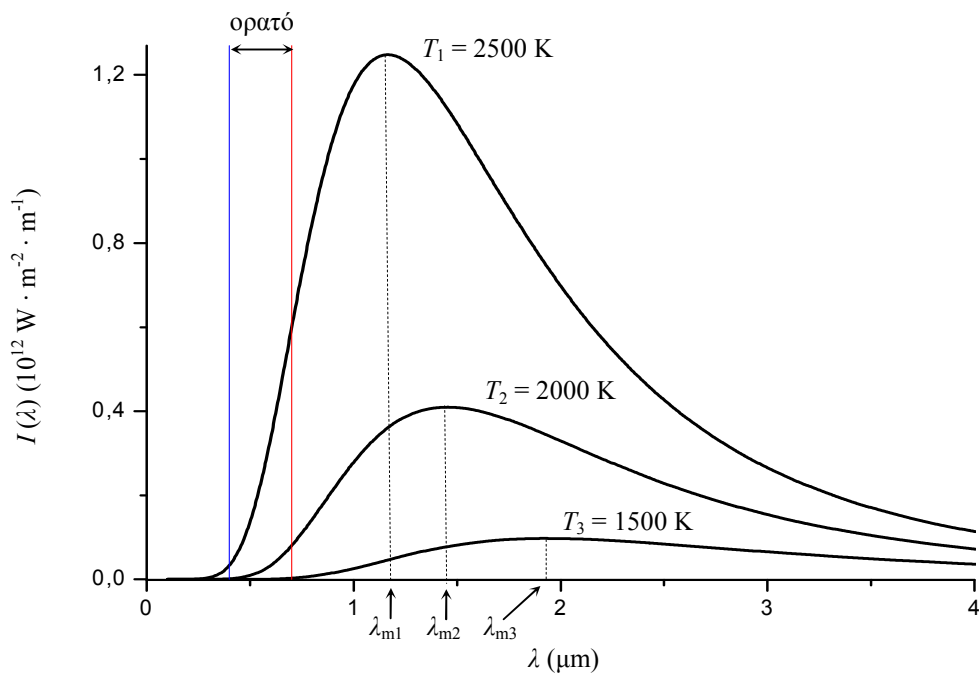
Όλα τα σώματα που βρίσκονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός ακτινοβολούν συνεχώς ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (θερμική ακτινοβολία). Σε περίπτωση προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όλα τα σώματα απορροφούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έως κάποιο βαθμό. **Μέλαν σώμα** είναι το σώμα που απορροφά πλήρως την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κάθε συχνότητας που προσπίπτει επάνω του. Αυτό σημαίνει ότι ένα τέτοιο σώμα δεν ανακλά ούτε διαχέει την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία, ούτε αφήνει το φως να το διαπεράσει. Ένα μέλαν σώμα που βρίσκεται σε θερμοκήνωση με το περιβάλλον, που έχει θερμοκρασία  $T$  (K), εκπέμπει επίσης ακτινοβολία, το φάσμα της οποίας εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.

Πειραματικά, καλή προσέγγιση μέλανος σώματος είναι μια κλειστή κοιλότητα στο εσωτερικό ενός σώματος με ομοιόμορφη θερμοκρασία, που επικοινωνεί με τον έξω κόσμο μέσω μίας μικρής οπής. Η οπή αυτή απορροφά σχεδόν όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτή. Η ακτινοβολία που διαφεύγει από την οπή έχει τις φασματοσκοπικές ιδιότητες της ακτινοβολίας στο εσωτερικό της κοιλότητας, δηλαδή αυτής του μέλανος σώματος.

Στο Σχ. 35.1 απεικονίζονται τα φάσματα εκπομπής μέλανος σώματος σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, όπου φαίνεται ότι η ενέργεια που εκπέμπεται δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε όλα τα μήκη κύματος. Η εκπεμπόμενη ενέργεια μπορεί να περιγραφεί από μία συνάρτηση  $I(\lambda, T)$  για την οποία το γινόμενο  $I(\lambda, T) d\lambda$  δίνει την εκπεμπόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος μεταξύ  $\lambda$  και  $\lambda + d\lambda$ . Η **ολική εκπεμπόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας  $I(T)$  (ένταση)**, για κάθε θερμοκρασία  $T$ , δίνεται ως το εμβαδόν κάτω από κάθε καμπύλη  $I(\lambda, T)$ , άρα από το ολοκλήρωμα της  $I(\lambda, T)$  για όλα τα μήκη κύματος:

$$I(T) = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda \quad (35.1)$$

Η συνάρτηση  $I(\lambda, T)$  ονομάζεται **φασματική κατανομή της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ή φασματική κατανομή αφετικής ικανότητας**. Στο τέλος του 19ου αιώνα ο προσδιορισμός της αναδείχθηκε σε μείζον και δισεπίλυτο πρόβλημα, καθώς έπρεπε να βρεθεί μια έκφραση που να συμφωνεί με τους πρώτους πειραματικούς νόμους που είχαν διατυπωθεί. Η επίλυση αυτού του προβλήματος οδήγησε τελικά στη γένεση της κβαντικής θεωρίας.



**Σχήμα 35.1** Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες. Παρατηρούμε ότι, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και η ολική εκπεμπόμενη ένταση,  $I(T)$ , ενώ η θέση της κορυφής του  $I(\lambda)$  μετατοπίζεται προς τα μικρότερα μήκη κύματος (μεγαλύτερες συχνότητες).

### 35.2.2 Ο νόμος Stefan-Boltzmann

Σύμφωνα με αυτό το νόμο, ο οποίος διατυπώθηκε από τον Stefan και αποδείχθηκε θεωρητικά από τον Boltzmann, στο μέλαν σώμα η ολική εκπεμπόμενη ένταση είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας,  $T$ , όπως περιγράφεται από τη σχέση:

$$I(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (35.2)$$

όπου  $\sigma$  είναι μια θεμελιώδης φυσική σταθερά, γνωστή ως σταθερά Stefan-Boltzmann, η οποία έχει τιμή  $\sigma = 5,6705 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

### 35.2.3 Ο νόμος μετατόπισης του Wien

Η ακτινοβολία μέλανος σώματος κατανέμεται στα διάφορα μήκη κύματος σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του Σχ. 35.1. Καθεμία από αυτές έχει ένα μήκος κύματος  $\lambda_{\max}$  ( $\lambda_{m1}$ ,  $\lambda_{m2}$ ,  $\lambda_{m3}$  για τις θερμοκρασίες  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , αντίστοιχα) στο οποίο η συνάρτηση  $I(\lambda, T)$  παρουσιάζει μέγιστο και είχε βρεθεί πειραματικά ότι είναι αντιστρόφως ανάλογο της θερμοκρασίας  $T$ . Πιο συγκεκριμένα, ισχύει ότι:

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{σταθερά} = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (35.3)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί το νόμο μετατόπισης του Wien που ονομάζεται έτσι επειδή συνεπάγεται ότι, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το σημείο μεγίστου της συνάρτησης  $I(\lambda, T)$  μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος (μεγαλύτερες συχνότητες).

### 35.2.4 Φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος – Παραδοχή του Planck

Οι Rayleigh και Jeans, μελετώντας θεωρητικά το πρόβλημα του προσδιορισμού της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, οδηγήθηκαν στη διατύπωση της σχέσης:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT \quad (35.4)$$

όπου  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann ίση με  $1,381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  και  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Η σχέση αυτή, γνωστή ως νόμος Rayleigh- Jeans, αποτελεί την κλασική πρόβλεψη για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος. Η έκφραση αυτή βασίστηκε στην παραδοχή ότι, κατά τις ταλαντώσεις μέσα στην κοιλότητα του μέλανος σώματος, οι ταλαντωτές έχουν ένα συνεχές ενεργειακό φάσμα. Παρότι η πρόβλεψη αυτή συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα στα μεγάλα μήκη κύματος, διαφέρει ριζικά στα μικρά, καθώς προβλέπει ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία αυξάνει απεριόριστα όσο μειώνεται το μήκος κύματος, ένα συμπέρασμα που ασφαλώς δεν συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα και έγινε γνωστό ως «υπεριώδης καταστροφή».

Το 1900 ο Planck κατέληξε σε μια έκφραση για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, η οποία συμφωνούσε εξαιρετικά με τις πειραματικές καμπύλες και έγινε γνωστή ως **νόμος ακτινοβολίας του Planck**. Για να το καταφέρει αυτό έκανε την παραδοχή ότι η ολική ενέργεια των ταλαντωτών στην κοιλότητα του μέλανος σώματος ήταν διαιρεμένη σε πεπερασμένα «στοιχεία ενέργειας», τα οποία ήταν ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας  $h\nu$ , όπου  $\nu$  η συχνότητα της ακτινοβολίας και  $h$  η σταθερά του Planck, μία παραδοχή που ερχόταν σε ρήξη με την κλασική φυσική. Ο Planck πρότεινε την ακόλουθη σχέση για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (35.5)$$

όπου  $h$  η σταθερά του Planck ( $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

Ο νόμος του Planck όχι μόνο συμφωνεί με τις πειραματικές καμπύλες (Σχ. 35.1), αλλά εμπεριέχει τόσο το νόμο μετατόπισης του Wien όσο και το νόμο Stefan-Boltzmann. Αν ολοκληρώσουμε την Εξ. 35.5 για όλα τα μήκη κύματος θα καταλήξουμε στο νόμο Stefan-Boltzmann, ενώ αν την παραγωγίσουμε ως προς το μήκος κύματος, και θέσουμε την παράγωγο ίση με το μηδέν, θα προκύψει ο νόμος μετατόπισης του Wien.

### 35.2.5 Ακτινοβολία του μη μέλανος σώματος

Αναφέραμε ότι το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κάθε συχνότητας που προσπίπτει επάνω του. Επομένως, ο **συντελεστής απορρόφησης**, που ορίζεται από τη σχέση

$$a_\lambda = \frac{\text{απορροφούμενη ισχύς}}{\text{προσπίπτουσα ισχύς}} \quad (35.6)$$

για το μέλαν σώμα είναι προφανώς  $a_\lambda = 1$ .

Τα φυσικά σώματα όμως δεν απορροφούν όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία και συνεπώς έχουν συντελεστή απορρόφησης  $a_\lambda < 1$ . Το ερώτημα είναι πώς ακτινοβολούν αυτά τα σώματα

όταν θερμανθούν. Βάσει απλών θερμοδυναμικών συλλογισμών, ο Kirchhoff κατέληξε στη σχέση

$$I_{\text{μη μέλαν}} = \alpha_{\lambda} I_{\text{μέλαν}} = \alpha_{\lambda} \sigma T^4 \quad (35.7)$$

όπου  $\alpha_{\lambda}$  ο συντελεστής απορρόφησης ή συντελεστής εκπομπής.

Επομένως, ένα τέτοιο σώμα με επιφάνεια εμβαδού  $A$ , που βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T$ , θα ακτινοβολεί με ισχύ:

$$P = A \alpha_{\lambda} \sigma T^4 \quad (35.8)$$

Η σχέση αυτή εξηγεί γιατί τα σώματα με μικρό συντελεστή απορρόφησης (π.χ. ο αέρας) ή με κατοπτρική επιφάνεια, που ελάχιστα απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ακτινοβολούν ελάχιστα όταν θερμανθούν.

### 35.3 Μέθοδος

Για τον προσδιορισμό της έντασης της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ως συνάρτηση του μήκους κύματος θα χρησιμοποιηθεί μία πηγή ακτινοβολίας μέλανος σώματος και ένα φασματοφωτόμετρο πρίσματος.

Ως πηγή ακτινοβολίας μέλανος σώματος θα χρησιμοποιηθεί ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως στο εσωτερικό μίας μαύρης κοιλότητας, που εκπέμπει φωτεινή δέσμη μέσα από μία σχισμή. Η διάταξη αυτή μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική προσέγγιση μέλανος σώματος, παρότι το νήμα του λαμπτήρα δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον. Η θερμοκρασία του νήματος καθορίζεται από την καταβαλλόμενη ηλεκτρική ισχύ ή από τη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στους πόλους του. Θα επιλεγούν τέσσερις διαφορετικές τιμές εφαρμοζόμενης τάσης, οι οποίες αντιστοιχούν σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία του νήματος του λαμπτήρα πυρακτώσεως, που είναι κατασκευασμένο από βολφράμιο, προσδιορίζεται εμμέσως από την τιμή της ειδικής αντίστασης, η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και υπολογίζεται από τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει και της εφαρμοζόμενης τάσης (βλ. Εξ. 35.11-35.13).

Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος της ακτινοβολίας εκμεταλλευόμαστε το φαινόμενο της ανάλυσης του λευκού φωτός (διασκορπισμός). Η φωτεινή δέσμη, αφού γίνει παράλληλη με τη διέλευσή της από σχισμή συγκεκριμένου εύρους και από έναν φακό ευθυγράμμισης, προσπίπτει σε πρίσμα και αναλύεται στις διάφορες συνιστώσες της. Στη συνέχεια, με την επιλογή κατάλληλης γωνίας στο φασματοφωτόμετρο, επιλέγεται μια συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος και καταγράφεται η σχετική έντασή της, με τη χρήση ειδικού αισθητήρα φωτός υψηλής ευαισθησίας.

Με την περιστροφή του φασματοφωτομέτρου γίνεται συνεχής καταγραφή της σχετικής έντασης της ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματός της. Το μήκος κύματος της μετρούμενης κάθε φορά ακτινοβολίας υπολογίζεται από τη γωνία εκτροπής της δέσμης από το πρίσμα και από το δείκτη διάθλασης του πρίσματος (βλ. Εξ. 35.17-35.22)

Οι μετρήσεις συλλέγονται μέσω ειδικών διατάξεων στο πρόγραμμα DataStudio της PASCO, όπου γίνεται και η επεξεργασία τους. Η βασική πειραματική καμπύλη που θα χρειαστεί για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι η ένταση της ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας. Στις καμπύλες αυτές θα γίνει προσαρμογή και επαλήθευση της σχέσης του Planck για τη συνάρτηση κατανομής της ακτινοβολίας μέλανος σώματος (Εξ. 35.5). Θα μετρηθεί επίσης, για κάθε θερμοκρασία, το μήκος

κύματος  $\lambda_{\max}$  στο οποίο η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι μέγιστη και θα ελεγχθεί ο νόμος μετατόπισης του Wien (Εξ. 35.3). Τέλος, θα εκτιμηθεί, για κάθε θερμοκρασία, η ολική εκπεμπόμενη ένταση  $I(T)$ , ως το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες, ώστε να ελεγχθεί ο νόμος Stefan-Boltzmann (Εξ. 35.2).

### 35.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα άσκηση εικονίζεται στα Σχ. 35.2 και 35.3 και αποτελείται από τα εξής μέρη:

#### 1. Πηγή ακτινοβολίας και διάταξη ευθυγράμμισης φωτεινής δέσμης που περιλαμβάνει:

- Λαμπτήρα πυρακτώσεως βολφραμίου ως πηγή φωτός, ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό μιας μαύρης κοιλότητας, διάταξη που προσομοιάζει σε κάποιο βαθμό την ακτινοβολία μέλανος σώματος.
- Διάταξη διέλευσης της φωτεινής δέσμης από σχισμές επιθυμητού εύρους για τη δημιουργία παράλληλης δέσμης καθορισμένου πλάτους. Υπάρχουν πέντε διαφορετικές σχισμές, η κάθε μία με γνωστό εύρος.
- Φακό ευθυγράμμισης της φωτεινής δέσμης με εστιακή απόσταση περίπου 10 cm.

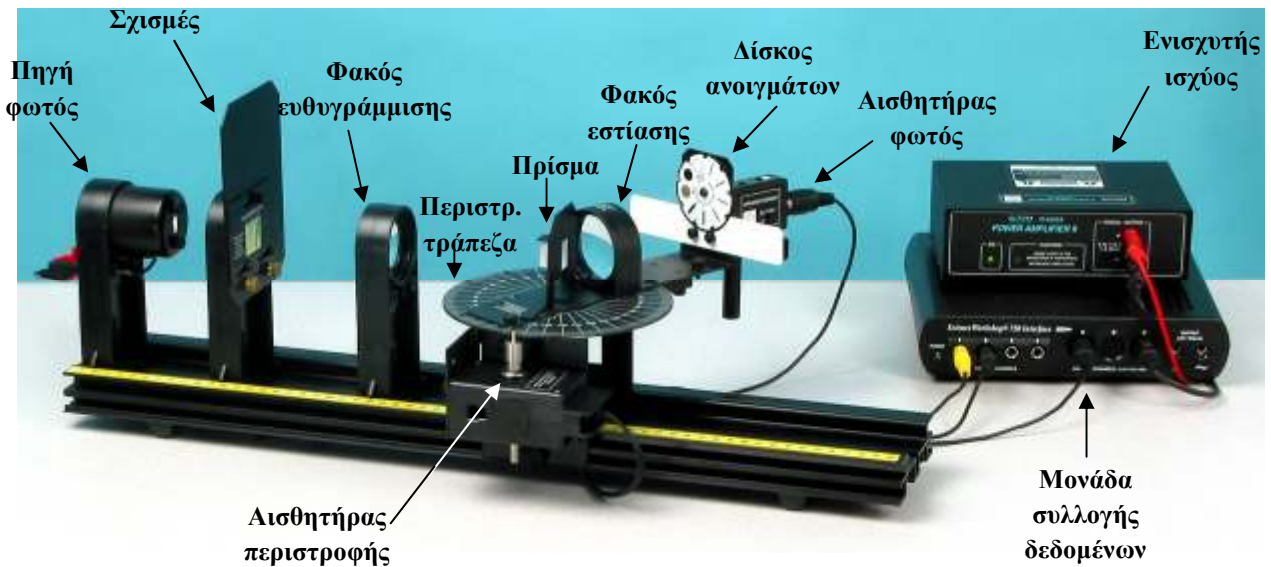
#### 2. Διάταξη φασματοφωτόμετρου πρίσματος που περιλαμβάνει τα εξής εξαρτήματα:

- Βάση του φασματοφωτόμετρου.
- Βαθμονομημένη περιστρεφόμενη τράπεζα, πάνω στην οποία προσαρμόζονται ο περιστρεφόμενος βραχίονας, το οπτικό πρίσμα, ο δίσκος ανοιγμάτων και ο αισθητήρας μέτρησης της έντασης της ακτινοβολίας.
- Οπτικό πρίσμα, με γωνία κορυφής  $60^\circ$ , για την ανάλυση της μη μονοχρωματικής φωτεινής δέσμης.
- Φακό εστίασης με εστιακή απόσταση περίπου 10 cm.
- Οθόνη και δίσκος ανοιγμάτων.
- Αισθητήρα περιστροφής για την απευθείας (on-line) μέτρηση με ακρίβεια και την καταγραφή της γωνίας περιστροφής της τράπεζας.
- Αισθητήρα φωτός μεγάλης ευαισθησίας.

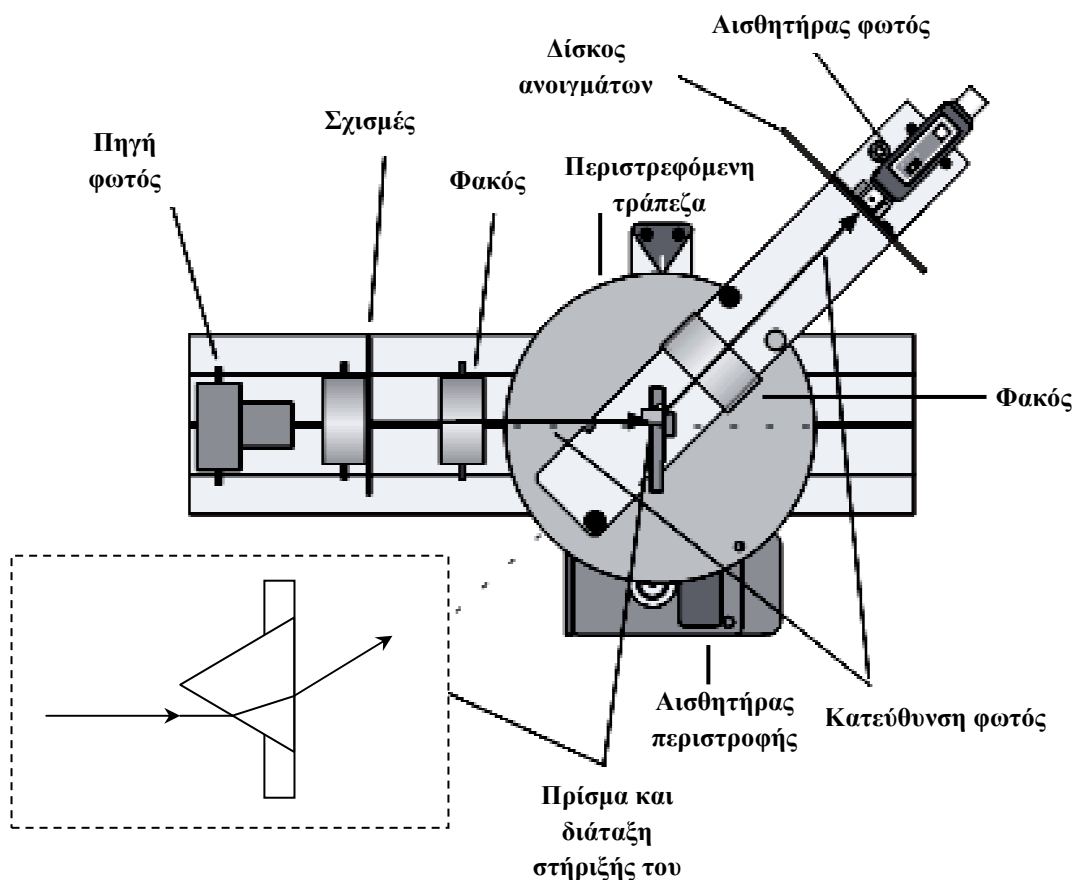
#### 3. Σύστημα συλλογής πληροφοριών και ελέγχου της διάταξης μέσω Η/Υ που περιλαμβάνει:

- Μονάδα συλλογής δεδομένων από τους αισθητήρες. Το σύστημα αυτό συλλέγει τα δεδομένα από τους αισθητήρες (αισθητήρας κίνησης, αισθητήρας φωτός, βολτόμετρο/αμπερόμετρο) που συνδέονται με την πειραματική διάταξη και τα εισάγει, μέσω θύρας USB, στον υπολογιστή, ο οποίος τα επεξεργάζεται με το πρόγραμμα DataStudio. Επίσης, στέλνει πληροφορίες προς τον ενισχυτή ισχύος, για τη ρύθμιση της τάσης που θα εφαρμοσθεί στον λαμπτήρα πυρακτώσεως, ο οποίος αποτελεί την πηγή ακτινοβολίας μέλανος σώματος. (Υπενθυμίζουμε ότι η ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας έχει ως αποτέλεσμα τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του μέλανος σώματος.)
- Ενισχυτή ισχύος. Ενισχύει το σήμα του Η/Υ, που είναι ασθενές, για τη ρύθμιση της τάσης που θα εφαρμοσθεί στον λαμπτήρα πυρακτώσεως, ο οποίος είναι σχετικά μεγάλης ισχύος.
- Λογισμικό DataStudio, όπου εισάγονται ορισμένα δεδομένα λειτουργίας και κυρίως συλλέγονται και υπόκεινται σε επεξεργασία τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων.

Στο Σχ. 35.2 παρουσιάζεται μια φωτογραφία της πειραματικής διάταξης, ενώ στο Σχ. 35.3 βλέπουμε μια σχηματική απεικόνιση της κάτωψης της ίδιας διάταξης.



**Σχήμα 35.2** Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης για τη μελέτη της ακτινοβολίας μέλανος σώματος. Διακρίνονται όλα τα στοιχεία της διάταξης που περιγράφηκαν στο κείμενο της άσκησης πλην του H/Y.



**Σχήμα 35.3** Σχηματική απεικόνιση της κάτωψης της πειραματικής διάταξης, όπου φαίνονται τα κυριότερα τμήματά της, καθώς και η πορεία του φωτός από την πηγή προς τον αισθητήρα. Το πρίσμα δεν διακρίνεται στο κυρίως σχήμα, αλλά απεικονίζεται, μαζί με την πορεία του φωτός μέσα σε αυτό, στο ένθετο, αριστερά κάτω (βλ. και Σχ. 35.5)

### 35.4.1 Θερμοκρασία μέλανος σώματος

Στην παρούσα άσκηση ως πηγή ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας πυρακτώσεως, που επικοινωνεί με τον έξω κόσμο μέσω μιας σχισμής. Η αύξηση της θερμοκρασίας του λαμπτήρα επιτυγχάνεται με την αύξηση της τάσης,  $U$ , που εφαρμόζεται σε αυτόν μέσω της αντίστοιχης ρύθμισης στο πρόγραμμα DataStudio, και της μεταφοράς της σχετικής εντολής στη διάταξη ενίσχυσης ισχύος.

Η θερμοκρασία του νήματος πυρακτώσεως του ηλεκτρικού λαμπτήρα μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα, από τη μέτρηση της τάσης,  $U$ , και της έντασης του ρεύματος,  $I$ , που τον διαρρέει. Η τιμή της αντίστασης,  $R$ , προσδιορίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:

$$R = \frac{U}{I} \quad (35.9)$$

Γνωρίζουμε ότι η αντίσταση ενός μεταλλικού αγωγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύμφωνα με τη σχέση

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (35.10)$$

όπου  $L$  και  $S$  το μήκος και η διατομή του αγωγού, αντίστοιχα, και  $\rho$  η ειδική αντίστασή (*resistivity*) του.

Επομένως, από την προηγούμενη εξίσωση προκύπτει ότι

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{R}{R_0} = \frac{R - R_w}{R_0} \quad \text{ή} \quad \rho = \rho_0 \left( \frac{R - R_w}{R_0} \right) \quad (35.11)$$

όπου  $\rho_0$  και  $R_0$  η ειδική αντίσταση και η αντίσταση του αγωγού, αντίστοιχα, σε θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως θερμοκρασία δωματίου, 300 K) και  $R_w$  η αντίσταση των καλωδίων που συνδέουν τον ενισχυτή ισχύος με τον λαμπτήρα.

Ο λαμπτήρας πυρακτώσεως είναι κατασκευασμένος από βολφράμιο, το οποίο σε θερμοκρασία δωματίου έχει ειδική αντίσταση  $\rho_0 = 5,65 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . Η αντίσταση του λαμπτήρα στη θερμοκρασία δωματίου είναι ίση με  $R_0 = 0,93 \Omega$  και η αντίσταση των καλωδίων ισούται με  $R_w = 0,2 \Omega$ , τιμές που μπορούν και να μετρηθούν απευθείας. Αντικαθιστώντας στην Εξ. (35.11) το  $R$  από την Εξ. (35.9) και τα  $\rho_0$ ,  $R_w$  και  $R_0$ , με τις αριθμητικές τους τιμές, προκύπτει

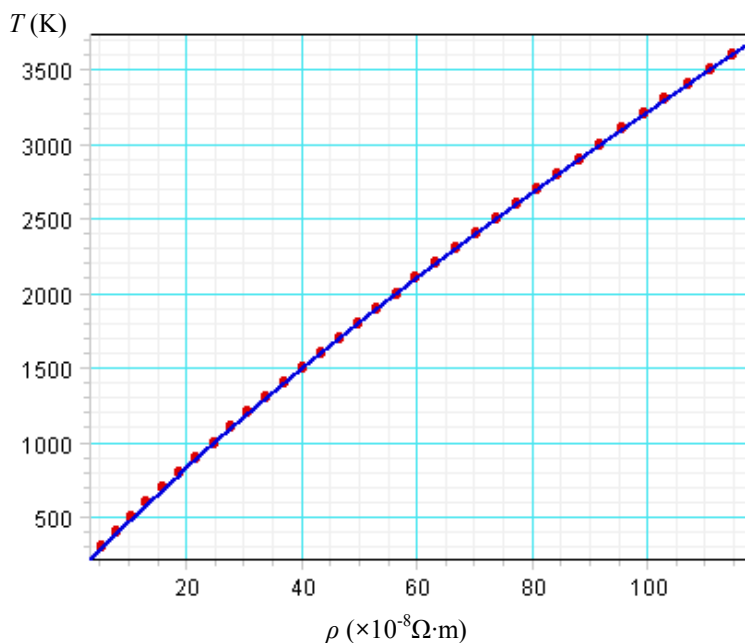
$$\rho = 5,65 \left( \frac{\frac{U}{I} - 0,2}{0,93} \right) (\mu\Omega \cdot \text{cm}) \quad (35.12)$$

Αυτή την εξίσωση χρησιμοποιεί το λογισμικό της άσκησης για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του λαμπτήρα, βάσει των μετρήσεων της εφαρμοζόμενης τάσης,  $U$  (V), και της έντασης του ρεύματος,  $I$  (A), που διαρρέει τον λαμπτήρα:

Όπως είναι γνωστό, η αντίσταση ενός αγωγού ηλεκτρικού ρεύματος είναι μη γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας (βλ. Άσκηση 8, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος Ι). Στον Πίνακα I και στο Σχ. 35.4 δίνονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης του βολφραμίου σε διάφορες θερμοκρασίες, καθώς και η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας,  $T$ , ως συνάρτηση της ειδικής αντίστασης,  $\rho$ .

**Πίνακας I**

$\rho$ ( $\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ )	$T$ (K)	$\rho$ ( $\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ )	$T$ (K)
5,65	300	56,67	2000
8,06	400	60,06	2100
10,56	500	63,48	2200
13,23	600	66,91	2300
16,09	700	70,39	2400
19,00	800	73,91	2500
21,94	900	77,49	2600
24,93	1000	81,04	2700
27,94	1100	84,70	2800
30,98	1200	88,33	2900
34,08	1300	92,04	3000
37,19	1400	95,76	3100
40,36	1500	99,54	3200
43,55	1600	103,3	3300
46,78	1700	107,2	3400
50,05	1800	111,1	3500
53,35	1900	115,0	3600



**Σχήμα 35.4** Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας,  $T$ , ως συνάρτηση της ειδικής αντίστασης,  $\rho$ , για το βολφράμιο.

Για την καλύτερη προσομοίωση αυτών των πειραματικών τιμών χρησιμοποιείται τελικά η συνάρτηση:

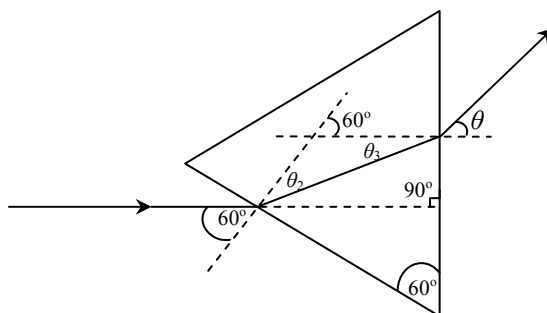
$$T = 103 + 38,1\rho - 0,095\rho^2 + (2,48 \times 10^{-4})\rho^3 \quad (\text{K}) \quad (35.13)$$

η οποία, σε συνδυασμό με την Εξ.35.12, υπολογίζει τελικά τη θερμοκρασία του νήματος του λαμπτήρα για κάθε εφαρμοζόμενη τάση.

Τονίζεται ότι όλοι αυτοί οι υπολογισμοί γίνονται αυτόματα από το πρόγραμμα DataStudio.

### 35.4.2 Υπολογισμός μήκους κύματος

Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος της ακτινοβολίας εκμεταλλευόμαστε το φαινόμενο του διασκορπισμού του φωτός όταν διέρχεται από ένα γυάλινο πρίσμα. Το πρίσμα, με γωνία κορυφής  $60^\circ$ , τοποθετείται με τρόπο τέτοιο ώστε η πίσω πλευρά του να είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης, όπως φαίνεται στο Σχ. 35.3. Με αυτόν τον τρόπο, η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία κορυφής του πρίσματος, δηλαδή  $60^\circ$ . Μια σχηματική παράσταση του πρίσματος και της πορείας μιας φωτεινής μονοχρωματικής ακτίνας που προσπίπτει πάνω σε αυτό δίνεται στο Σχ. 35.5.



**Σχήμα 35.5** Η πορεία φωτεινής ακτίνας στο πρίσμα όταν η προσπίπτουσα ακτίνα έχει διεύθυνση κάθετη στη δεξιά (πίσω) πλευρά του πρίσματος.



Επειδή η γωνία του πρίσματος είναι  $60^\circ$ , μπορεί να αποδειχθεί ότι:

$$\theta_2 + \theta_3 = 60^\circ \quad (35.14)$$

Εξάλλου, εφαρμόζοντας το **νόμο του Snell** σε κάθε διεπιφάνεια, παίρνουμε:

$$\sin 60^\circ = n \sin \theta_2 \quad (35.15)$$

$$\sin \theta = n \sin \theta_3 \quad (35.16)$$

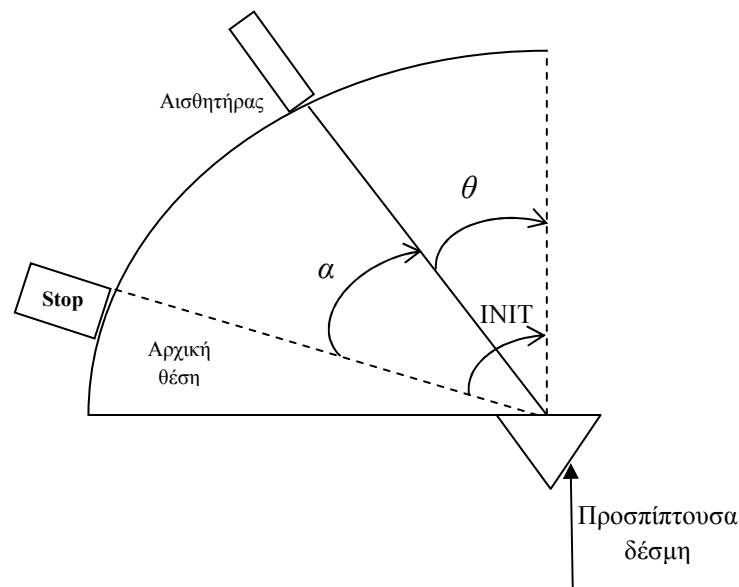
Συνδυάζοντας τις τρεις τελευταίες εξισώσεις και επιλύοντας ως προς  $n$  βρίσκουμε:

$$n = \sqrt{\left(\frac{\sin \theta}{\sin 60^\circ} + \cos 60^\circ\right)^2 + \sin^2(60^\circ)}$$

ή

$$n = \sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \theta + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}} \quad (35.17)$$

Στο σημείο αυτό χρειάζεται προσοχή, καθώς η γωνία εκτροπής,  $\theta$ , δεν ταυτίζεται με τη γωνία που καταγράφει ο αισθητήρας περιστροφής, όπως φαίνεται στο Σχ. 35.6.



**Σχήμα 35.6** Σχηματική παράσταση της περιστροφής του βραχίονα στήριξης του αισθητήρα φωτός πάνω στη βαθμονομημένη κυκλική τράπεζα.

Η γωνία εκτροπής,  $\theta$ , μετράται από την κάθετη στην πίσω πλευρά του πρίσματος (σημείο εξόδου του φωτός), όμως ο αισθητήρας καταγράφει τη γωνία  $\alpha$  από την αρχική θέση του βραχίονα στήριξης του αισθητήρα φωτός. Αν ονομάσουμε *INIT* τη γωνία μεταξύ της αρχικής θέσης του βραχίονα στήριξης (τερματική θέση, STOP) και της κάθετης στην πίσω πλευρά του πρίσματος, τότε προκύπτει ότι

$$\theta = INIT - \alpha \quad (35.18)$$

Η περιστροφή της βαθμονομημένης τράπεζας μεταδίδεται στον αισθητήρα περιστροφής μέσω μιας ακίδας που εφάπτεται σε αυτήν. Μία πλήρης περιστροφή της τράπεζας οδηγεί σε περίπου 60 περιστροφές της ακίδας, καθώς ο λόγος (*Ratio*) των διαμέτρων της τράπεζας και της

ακίδας είναι περίπου 60:1. Επομένως, η γωνία που καταγράφει ο αισθητήρας είναι περίπου 60 φορές μεγαλύτερη από τη γωνία στροφής της τράπεζας, άρα η γωνία εκτροπής,  $\theta$ , θα προκύψει τελικά από τη σχέση

$$\theta = \frac{INIT - \alpha}{Ratio} \quad (35.19)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (35.19) στην Εξ. (35.17), προκύπτει η εξίσωση από την οποία υπολογίζεται τελικά ο δείκτης διάθλασης:

$$n = \sqrt{\left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{INIT - \alpha}{Ratio}\right) + \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{3}{4}} \quad (35.20)$$

Ο ακριβής υπολογισμός των τιμών  $INIT$  και  $Ratio$  είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την επιτυχία της άσκησης και περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα αυτής της άσκησης.

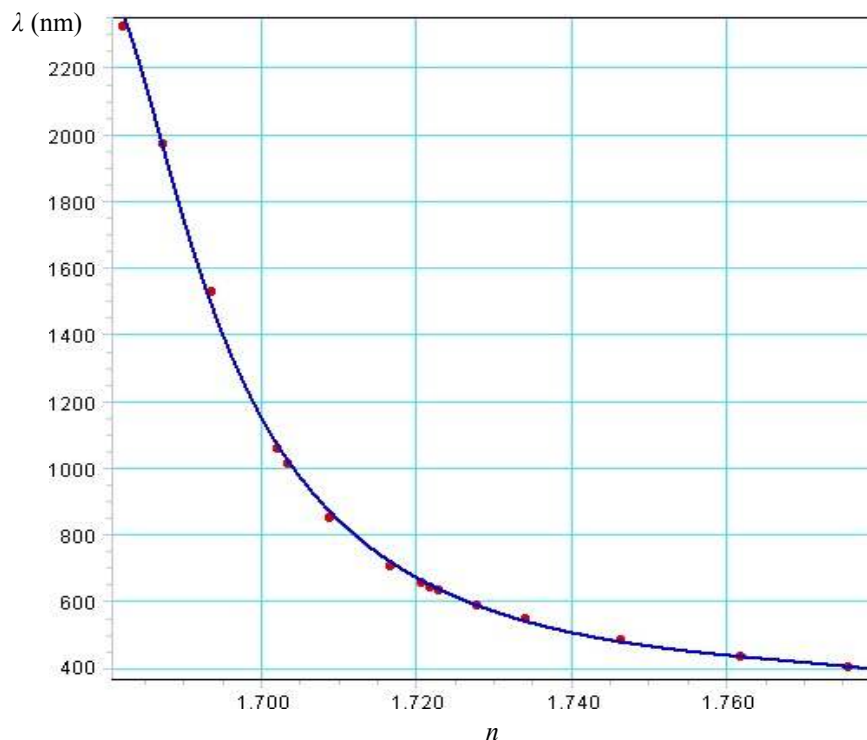
Η σχέση μεταξύ του δείκτη διάθλασης,  $n$ , ενός διαφανούς μέσου και του μήκους κύματος,  $\lambda$ , του φωτός δίνεται από την **εξίσωση Cauchy**

$$n(\lambda) = \frac{A}{\lambda^2} + B \quad (35.21)$$

όπου τα  $A$  και  $B$  εξαρτώνται από το είδος του μέσου. Στον Πίνακα II και στο Σχ. 35.7 δίνονται από τον κατασκευαστή οι τιμές του δείκτη διάθλασης για το πρίσμα που χρησιμοποιείται στην άσκηση, καθώς και η γραφική παράσταση του μήκους κύματος,  $\lambda$ , ως συνάρτηση του δείκτη διάθλασης,  $n$ .

**Πίνακας II**

$\lambda$ ( nm )	$n$
404,7	1,776
435,8	1,762
486,1	1,746
546,1	1,734
589,3	1,728
643,0	1,723
656,3	1,722
632,8	1,721
706,5	1,717
852,1	1,709
1014,0	1,703
1060,0	1,702
1529,6	1,694
1970,1	1,689
2325,4	1,682



**Σχήμα 35.7** Γραφική παράσταση του μήκους κύματος,  $\lambda$ , ως συνάρτηση του δείκτη διάθλασης,  $n$ , για το φως που διέρχεται από το πρίσμα της άσκησης.

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό του μήκους κύματος,  $\lambda$ , από τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα, το πρόγραμμα DataStudio χρησιμοποιεί την ακόλουθη σχέση

$$\lambda = \frac{3 \times 10^3}{\sqrt{A + Bn + Cn^2 + Dn^3 + Jn^4 + Fn^5 + Gn^6 + Hn^7 + In^8}} \text{ (nm)} \quad (35.22)$$

όπου οι τιμές των συντελεστών  $A, B, C, D, J, F, G, H, I$  έχουν συμπληρωθεί ήδη στο αρχείο της άσκησης.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η πυριτύλαος, από την οποία είναι κατασκευασμένο το πρίσμα της άσκησης, δεν μεταδίδει μήκη κύματος μεγαλύτερα από **2.500 nm**, επομένως αυτό είναι περίπου το όριο στο οποίο σταματούν αυτόματα οι υπολογισμοί, άρα και το σημείο όπου πρέπει να σταματά η καταγραφή των δεδομένων.

### 35.4.3. Αισθητήρας φωτός ευρέως φάσματος – υψηλής ευαισθησίας

Ο αισθητήρας φωτός ευρέως φάσματος χρησιμοποιεί θερμοπύλες ως στοιχεία ανίχνευσης. Οι θερμοπύλες είναι μικροδιατάξεις, στις οποίες αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού όταν προσπίπτει πάνω σε αυτές ακτινοβολία, και στο σύνολό τους λειτουργούν τελικά ως διαφορικό θερμοζεύγος, το οποίο αποτελείται από το θερμοζεύγος αναφοράς, που μετρά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, και το θερμοζεύγος εργασίας, που θερμαίνεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα μέτρησης φασμάτων με μήκος κύματος από 300 έως 10.000 nm και είναι εφοδιασμένος στο πάνω μέρος του με διακόπτη επιλογής κλίμακας ευαισθησίας (1×, 10×, 100×), ο οποίος μεταβάλλει κατάλληλα το σήμα εξόδου (τάση) για μια δεδομένη ένταση ακτινοβολίας. Στην άσκηση θα χρησιμοποιηθεί η κλίμακα ευαισθησίας 100×, που μπορεί να δώσει τάση έως  $\pm 10$  V. Επίσης, ο αισθητήρας διαθέτει διακόπτη μηδενισμού των μετρήσεων (TARE), ώστε να μηδενίζεται πριν την έναρξη κάθε μέτρησης.

### 35.4.4 Το πρόγραμμα DataStudio

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται στην παρούσα άσκηση για:

- να καταγράψει, να αποθηκεύσει και να παρουσιάσει τα πρωτογενή αποτελέσματα των μετρήσεων των αισθητήρων ως συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή την τάση που μετράει ο αισθητήρας φωτός (ChA), την τάση (ChB) και την ένταση του ρεύματος (ChC) στους ακροδέκτες του λαμπτήρα πυρακτώσεως και τη γωνία περιστροφής (Ch1 & 2)
- να πραγματοποιήσει τους απαραίτητους υπολογισμούς βάσει των απευθείας μετρήσεων και σταθερών παραμέτρων, εδώ τη θερμοκρασία,  $T$ , του μέλανος σώματος με τη χρήση της Εξ. (35.13) και του μήκους κύματος,  $\lambda$ , της ακτινοβολίας με τη χρήση της Εξ. (35.22).
- να ρυθμίσει τις παραμέτρους λειτουργίας της δοκιμής, όπως είναι η τάση στους ακροδέκτες της πηγής ακτινοβολίας μέλανος σώματος.
- να μας βοηθήσει σε μια πρώτη επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στο αρχείο **Blackbody.ds** υπάρχουν έτοιμες όλες οι ρυθμίσεις ως προς τις τιμές των σταθερών παραμέτρων και τις απαιτήσεις εμφάνισης των αποτελεσμάτων.

### Βιβλιογραφία

1. E. H. Wichmann, *Μαθήματα Φυσικής του Πανεπιστημίου Berkeley*, Τόμος 4: *Κβαντική Φυσική*, Εργαστήρια Φυσικής ΕΜΠ (Αθήνα 1985), Κεφ. 1: Παράγρ. 1.33-1.40.
2. H. D. Young, *Πανεπιστημιακή Φυσική*, Τόμος Β': *Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική, Σύγχρονη Φυσική*, Εκδόσεις Παπαζήση (Αθήνα 1994), Κεφ. 40: Παράγρ. 40.8.

3. R. A. Serway, C. J. Moses, C. A. Moyer, *Σύγχρονη Φυσική*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης (Ηράκλειο 2000), Κεφ. 2: Παράγρ. 2.2-2.4.
4. H. J. Pain, *Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων*, Εκδόσεις Συμμετρία (Αθήνα <sup>3</sup>1990), Κεφ. 8: Παράγρ. 8.8(1).
5. F. Mandl, *Στατιστική Φυσική*, Εκδόσεις Γ. Α. Πνευματικού (Αθήνα 1976), Κεφ. 10: Παράγρ. 10.1-10.4.
6. Max Planck, *The Theory of Heat Radiation* (Philadelphia 1914).
7. E. Hecht, *Optics*, (San Francisco: Addison Wesley, <sup>4</sup>2002), Κεφ. 3: Παράγρ. 3.5-3.6, Κεφ. 5: Παράγρ. 5.5.1, Κεφ. 13: Παράγρ. 13.1.1.

### 35.5 Εκτέλεση

Στόχος της άσκησης είναι η καταγραφή των καμπυλών της σχετικής έντασης της ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας.

**ΔΙΕΚΡΙΝΙΣΗ:** Διευκρινίζεται ότι η καταγραφή των καμπυλών της έντασης της σχετικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος γίνεται αυτομάτως από το πρόγραμμα *DataStudio*, και οι τιμές του μήκους κύματος,  $\lambda$ , της ακτινοβολίας, καθώς και της θερμοκρασίας,  $T$ , υπολογίζονται επίσης από το πρόγραμμα *DataStudio*, με τη χρήση των Εξ. (35.22) και (35.13), αντιστοίχως.

Τα διαδοχικά βήματα για την εκτέλεση της Άσκησης είναι τα ακόλουθα:

1. Θέστε σε λειτουργία τη μονάδα συλλογής δεδομένων και τον ενισχυτή ισχύος και ακολούθως ανοίξτε το αρχείο *Blackbody.ds*. Αναγνωρίστε τα μετρούμενα μεγέθη και εξοικειωθείτε με τα διάφορα παράθυρα που εμφανίζονται.
2. Επιλέξτε για την πηγή ακτινοβολίας την τιμή τάσης 7 V, μέσω του παραθύρου *Signal Generator*, και θέστε σε λειτουργία τον λαμπτήρα. Η εφαρμοζόμενη τάση,  $U$ , αντιστοιχεί σε μια τιμή θερμοκρασίας,  $T$ , του νήματος του λαμπτήρα.
3. Παρατηρήστε το χρώμα του νήματος του λαμπτήρα πυρακτώσεως, του φωτός που προέρχεται από αυτόν και τη σύνθεση του ορατού φάσματος πάνω στον δίσκο ανοιγμάτων.
4. Περιστρέψτε το βραχίονα στήριξης του αισθητήρα φωτός (και επομένως και τη βαθμονομημένη τράπεζα) με φορά αντίθετη της κίνησης των δεικτών του ρολογιού, μέχρι την τερματική του θέση (STOP).
5. Καλύψτε τη δέσμη του φωτός, τοποθετώντας το χέρι σας μεταξύ των σχισμών και του φακού ευθυγράμμισης και, με καλυμμένο το φως, μηδενίστε τον αισθητήρα πατώντας το κουμπί TARE στο πάνω μέρος του.
6. Απομακρύνετε το χέρι από την πορεία του φωτός και ξεκινήστε την καταγραφή των μετρήσεων στο *DataStudio* (πάτημα του πράσινου κουμπιού Start).
7. Περιστρέψτε τον βραχίονα αργά και σταθερά, έτσι ώστε να σαρώσει όλο το φάσμα του φωτός που διαθλάται μέσω του πρίσματος. Παρατηρήστε ότι καταγράφεται απευθείας στην οθόνη του *DataStudio* η καμπύλη της σχετικής έντασης του φωτός (σε μονάδες V) ως συνάρτηση του μήκους κύματος, για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία.



14. Η σχέση του Planck (Εξ. 35.5) υπάρχει ήδη ως στοιχείο υπολογισμού. Αφού εισάγετε τη θερμοκρασία που σημειώσατε και πατήσετε το κουμπί Calculate, σύρετε τον υπολογισμό αυτόν από την περιοχή Data στα αριστερά της οθόνης, στο αντίστοιχο γράφημα της έντασης ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Αλλάξτε τις κλίμακες, έτσι ώστε να ταιριάζει η θεωρητική με την πειραματική καμπύλη, και σημειώστε τις ενδεχόμενες διαφορές.

15. Κλείστε το αρχείο της άσκησης χωρίς να αποθηκεύσετε τα δεδομένα.

### 35.6 Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Με βάση τα δεδομένα που έχετε καταγράψει, σχεδιάστε, στο ίδιο διάγραμμα, τη γραφική παράσταση της έντασης της ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος, για κάθε θερμοκρασία.

2. Συμπληρώστε τον παρακάτω Πίνακα IV:

Πίνακας IV

$T$ (K)	$\lambda_{\max}$ (nm)	$1/T$ (K <sup>-1</sup> )	$\lambda_{\max} T$ (m · K)	Εμβαδόν	$T^4$ (K <sup>4</sup> )

3. Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση του  $\lambda_{\max}$  ως συνάρτηση του  $1/T$ .

4. Προσδιορίστε τη μέση τιμή και το σφάλμα του γινομένου  $\lambda_{\max} T$ .

5. Σχολιάστε την ισχύ του νόμου μετατόπισης του Wien.

6. Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση του εμβαδού που υπολογίσατε ως συνάρτηση του  $T^4$ .

7. Σχολιάστε την ισχύ του νόμου Stefan-Boltzmann.

8. Πώς αλλάζει το χρώμα του νήματος και του φωτός του λαμπτήρα με τη θερμοκρασία και πώς η σύνθεση του χρώματος του φάσματος; Ερμηνεύστε τις παρατηρήσεις σας. Για τη μεγαλύτερη θερμοκρασία που μελετήσατε, σε ποια περιοχή του φάσματος βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος της έντασης της ακτινοβολίας;

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (Π35)

**ΔΙΕΥΚΡΙΝΙΣΗ:** Διευκρινίζεται ότι όλες οι εργασίες του Παραρτήματος της άσκησης γίνονται μόνο από τον υπεύθυνο της άσκησης, στην αρχή του εξαμήνου ή όποτε χρειαστεί, και όχι από τους σπουδαστές.

### Π.35.1 Ρυθμίσεις πειραματικής διάταξης

Ο φακός ευθυγράμμισης πρέπει να βρίσκεται περίπου 10 cm από τις σχισμές ευθυγράμμισης της δέσμης. Η ακριβής θέση του φακού βρίσκεται με τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της δέσμης, η οποία θα πρέπει να έχει σταθερό πλάτος σε όλη τη διαδρομή της μέχρι το πρίσμα. Συνήθως επιλέγεται η σχισμή Νο 4. Η ίδια επιλογή θα πρέπει να γίνεται και στον δίσκο ανοιγμάτων.

Η θέση της βάσης του φασματοφωτόμετρου δεν απαιτείται να είναι ακριβώς καθορισμένη. Τοποθετείται περίπου 20 cm από το άκρο του πάγκου στήριξης της πειραματικής διάταξης. Η βάση μπορεί να μετακινηθεί έτσι, ώστε η δέσμη να καταλήγει στη σωστή θέση πάνω στο δίσκο ανοιγμάτων και κατ' επέκταση στον αισθητήρα φωτός.

*Η βάση στήριξης του πρίσματος δεν θα πρέπει να βιδωθεί μέχρι την τερματική της θέση, έτσι ώστε να παραμένει σταθερή στη θέση της όταν η βαθμονομημένη τράπεζα περιστρέφεται.*

### Π35.2 Συνδέσεις με τη μονάδα συλλογής δεδομένων και τον ενισχυτή ισχύος

Οι συνδέσεις που θα γίνουν μεταξύ της πειραματικής διάταξης, της μονάδας συλλογής δεδομένων, του ενισχυτή ισχύος και του H/Y περιλαμβάνουν:

1. Σύνδεση του αισθητήρα περιστροφής στα ψηφιακά κανάλια 1 και 2 της μονάδας συλλογής δεδομένων.
2. Σύνδεση του αισθητήρα φωτός στο αναλογικό κανάλι A της μονάδας συλλογής δεδομένων.
3. Σύνδεση του ενισχυτή ισχύος με τους ακροδέκτες της πηγής ακτινοβολίας.
4. Σύνδεση του ενισχυτή ισχύος με το αναλογικό κανάλι C της μονάδας συλλογής δεδομένων, με στόχο τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον λαμπτήρα πυρακτώσεως.
5. Σύνδεση των ακροδεκτών της πηγής ακτινοβολίας με το αναλογικό κανάλι B της μονάδας συλλογής δεδομένων, με στόχο τη μέτρηση της τάσης στα άκρα του λαμπτήρα πυρακτώσεως.
6. Σύνδεση της μονάδας συλλογής δεδομένων με τον H/Y μέσω της θύρας USB.

### Π35.3 Βαθμονόμηση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι εξαιρετικά κρίσιμο για την επιτυχία του πειράματος να μετρηθεί με ακρίβεια η γωνία περιστροφής, ώστε να υπολογιστεί σωστά το μήκος κύματος. Για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα της περιστροφικής κίνησης, είναι καταρχάς απαραίτητος ο προσδιορισμός του λόγου (*Ratio*) των διαμέτρων της βαθμονομημένης τράπεζας και της ακίδας

του αισθητήρα (ο οποίος είναι περίπου 60 προς 1). Για να γίνει αυτό ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Αφαίρεση του συστήματος συγκράτησης του πρίσματος και του βραχίονα στον οποίο έχουν προσαρτηθεί ο δίσκος ανοιγμάτων και ο αισθητήρας φωτός.
2. Άνοιγμα του αρχείου Calibration.ds.
3. Περιστροφή της βαθμονομημένης τράπεζας μέχρι τη θέση 0.
4. Εκκίνηση καταγραφής δεδομένων (πράσινο κουμπί Start). Αργή και συνεχής περιστροφή της βαθμονομημένης κυκλικής τράπεζας κατά έναν πλήρη κύκλο.
5. Αν η γωνία που καταγράφεται έχει αρνητικό πρόσημο, αντιστρέψτε τα καλώδια στα κανάλια 1 και 2 της μονάδας συλλογής δεδομένων και επαναλάβετε το βήμα 4.
6. Διακοπή της καταγραφής δεδομένων (κόκκινο κουμπί Stop). Διαίρεση της μέγιστης τιμής της γωνίας που έχει καταγραφεί με 360 (όταν το αποτέλεσμα έχει εκφραστεί σε μοίρες) ή  $2\pi$  (όταν το αποτέλεσμα έχει εκφραστεί σε ακτίνια).

Το αποτέλεσμα της διαίρεσης είναι ο λόγος (*Ratio*) που ζητείται, ο οποίος θα πρέπει να δοθεί ως μία από τις παραμέτρους υπολογισμού του μήκους κύματος.

Η γωνία μεταξύ της αρχικής θέσης του βραχίονα στήριξης και της κάθετης στην πίσω πλευρά του πρίσματος (*INIT*) αποτελεί τη δεύτερη κρίσιμη παράμετρο του πειράματος. Για τον υπολογισμό της ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Πραγματοποιείτε μία μέτρηση σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην «Εκτέλεση» της άσκησης.
2. Όταν σταματήσει η καταγραφή των μετρήσεων, συνεχίστε την περιστροφή του βραχίονα μέχρι να περάσει μία φωτεινή δέσμη που εμφανίζεται πίσω από το πρίσμα, η οποία οφείλεται σε μικρό τμήμα του φωτός που περνάει δίπλα από το πρίσμα χωρίς να διέρχεται από αυτό. Έτσι, θα εμφανιστεί μια δεύτερη, μικρή κορυφή στην ένταση της μετρούμενης ακτινοβολίας.
3. Στη γραφική παράσταση ένταση ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας περιστροφής προσδιορίστε, με το εργαλείο Smart Cursor, την ακριβή τιμή της γωνίας (σε ακτίνια) στην οποία εμφανίζεται το δεύτερο μέγιστο. Αυτή είναι η τιμή της γωνίας *INIT*.

Βάλτε τις τιμές των *Ratio* και *INIT* στη συνάρτηση υπολογισμού του δείκτη διάθλασης, η τιμή του οποίου θα προκύψει μόλις πατηθεί το κουμπί Calculate.