

# Άσκηση 35

## Ακτινοβολία μέλανος σώματος

### 35.1. Σκοπός

Σκοπός 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 ανεξαιρέτως τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός εκπέμπουν συνεχώς ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (θερμική ακτινοβολία). Σε περίπτωση προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όλα τα σώματα απορροφούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έως έναν βαθμό.

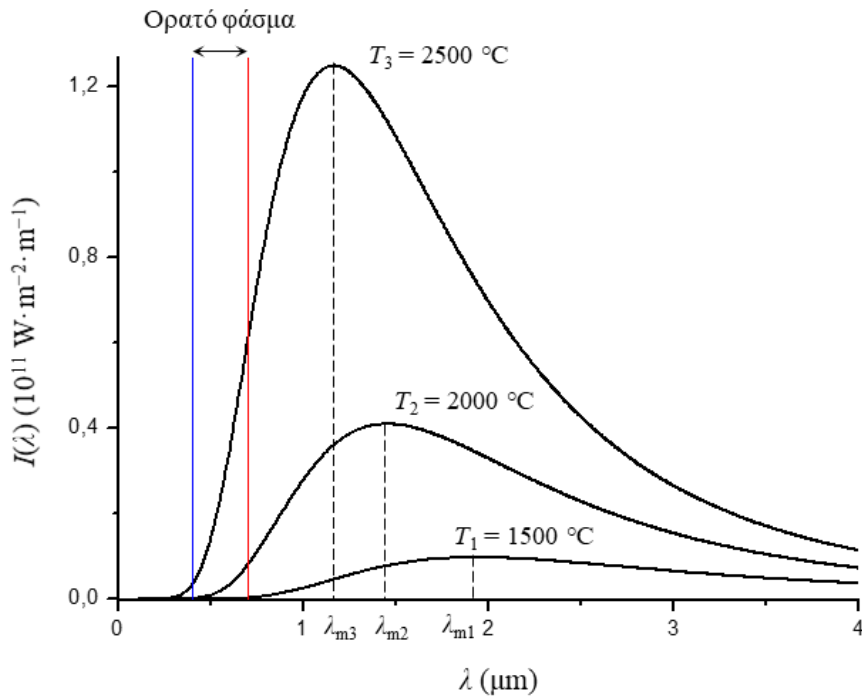
**Μέλαν σώμα** είναι το σώμα που απορροφά πλήρως την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κάθε συχνότητας που προσπίπτει επάνω του. Αυτό σημαίνει ότι ένα τέτοιο σώμα δεν ανακλά ούτε διαχέει την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία, αλλά και ούτε αφήνει το φως να το διαπεράσει, με αποτέλεσμα να φαίνεται μαύρο. Ένα μέλαν σώμα που βρίσκεται σε θερμοκή ισορροπία με το περιβάλλον εκπέμπει επίσης ακτινοβολία, το φάσμα της οποίας εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.

Μια καλή προσέγγιση μέλανος σώματος είναι μια μικρή οπή που οδηγεί σε μια κλειστή κοιλότητα στο εσωτερικό ενός σώματος με ομοιόμορφη θερμοκρασία. Η οπή αυτή απορροφά σχεδόν όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτή, ενώ η ακτινοβολία που διαφεύγει από την οπή έχει τις φασματοσκοπικές ιδιότητες της ακτινοβολίας 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 κατανομή της μπορεί να μετρηθεί και περιγράφεται από μια συνάρτηση  $I(\lambda, T)$  με την ιδιότητα ότι το γινόμενο  $I(\lambda, T)d\lambda$  είναι η 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 (ολική ένταση)  $I$** , για κάθε θερμοκρασία  $T$ , είναι το ολοκλήρωμα της  $I(\lambda, T)$  για όλα τα μήκη κύματος που ισούται με το εμβαδόν κάτω από κάθε καμπύλη  $I(\lambda, T)$ :

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

Η συνάρτηση  $I(\lambda, T)$  ονομάζεται **φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος** ή **φασματική κατανομή αφετικής ικανότητας**. Διαπιστώνουμε ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, αυξάνεται και η ολική εκπεμπόμενη ένταση  $I$ , ενώ η κορυφή της  $I(\lambda)$  γίνεται υψηλότερη και η θέση της μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος (μεγαλύτερες συχνότητες).



Σχήμα 35.1. Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες.

Στα τέλη του 19ου αιώνα ο προσδιορισμός της  $I(\lambda, T)$  αναδείχθηκε σε μείζον και δισεπίλυτο πρόβλημα, καθώς έπρεπε να βρεθεί μια έκφραση που να συμφωνεί με τους πρώτους πειραματικούς νόμους που είχαν ήδη διατυπωθεί.

### 35.2.2. Ο νόμος των Stefan–Boltzmann

Σύμφωνα με αυτό τον νόμο, ο οποίος διατυπώθηκε από τον Stefan και αποδείχθηκε θεωρητικά από τον Boltzmann, η ολική εκπεμπόμενη ένταση από την επιφάνεια ενός ιδανικού πομπού ακτινοβολίας είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του  $T$ , όπως περιγράφεται από τη σχέση

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

όπου  $\sigma$  είναι μια θεμελιώδης φυσική σταθερά, γνωστή ως σταθερά των Stefan–Boltzmann, η οποία έχει τιμή  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

### 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 εκπεμπόμενη ένταση είναι μέγιστη και είχε βρεθεί πειραματικά ότι είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόλυτης θερμοκρασίας  $T$ . Πιο συγκεκριμένα, ισχύει ότι

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

Η σχέση αυτή αποτελεί τον νόμο μετατόπισης του Wien, που ονομάζεται έτσι επειδή συνεπάγεται ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, το σημείο μέγιστου μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος (μεγαλύτερες συχνότητες).

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

Ο Λόρδος Rayleigh, εξετάζοντας θεωρητικά τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο εσωτερικό μιας κοιλότητας, και θεωρώντας ότι η ενέργεια αυτών των ταλαντωτών μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή, υπολόγισε ότι η φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από μια μικρή οπή στα τοιχώματα της κοιλότητας δίνεται από τη σχέση

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

όπου  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann ( $k = 1,380 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 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. Παρότι η πρόβλεψη αυτή συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα στα μεγάλα μήκη κύματος, διαφέρει ριζικά στα μικρά, υποδηλώνοντας απεριόριστη εκπομπή ενέργειας στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος και απείρως μεγάλη ολική ακτινοβολούμενη ένταση, με αποτέλεσμα να γίνει γνωστή ως «υπεριώδης καταστροφή».

Το 1900 ο Planck κατέληξε σε μια έκφραση για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος που 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 μέρη ενέργειας («στοιχεία ενέργειας»), τα οποία ήταν ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας  $h\nu$ , όπου  $\nu$  η συχνότητα της ακτινοβολίας και  $h$  μια σταθερά. Ο Planck πρότεινε την ακόλουθη σχέση για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος:

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

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

Ο νόμος του Planck όχι μόνο συμφωνεί εντυπωσιακά με τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά εμπεριέχει τόσο τον νόμο μετατόπισης του Wien όσο και τον νόμο των Stefan–Boltzmann. Αν ολοκληρώσουμε την Εξ. (35.5) για όλα τα μήκη κύματος, θα καταλήξουμε στον νόμο των Stefan–Boltzmann, ενώ όταν την παραγωγίσουμε ως προς το μήκος κύματος και θέσουμε την παράγωγο ίση με το μηδέν, θα προκύψει ο νόμος μετατόπισης του Wien. Η παραδοχή του Planck ερχόταν σε ρήξη με την κλασική φυσική, το ζήτημα της φυσικής ερμηνείας της κυριάρχησε στα χρόνια που ακολούθησαν και η κβαντική θεωρία χρωστά τη γένεσή της στη μελέτη αυτού του προβλήματος.

### 35.2.5. Ακτινοβολία 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

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

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

Τα φυσικά σώματα, όμως, δεν απορροφούν όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία, συνεπώς έχουν συντελεστή απορρόφησης  $\alpha_\lambda < 1$ . Τότε, 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  $\alpha_\lambda$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης, ο οποίος ισούται με τον **συντελεστή 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 ένα μέλαν σώμα αποτελεί ταυτόχρονα έναν ιδανικό πομπό ακτινοβολίας, αλλά και γιατί σώματα με μικρό συντελεστής απορρόφησης (π.χ. ο αέρας), ή με κατοπτρική επιφάνεια, τα οποία ελάχιστα απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ακτινοβολούν ελάχιστα όταν θερμανθούν.

### 35.3. Μέθοδος

Στην παρούσα άσκηση, για τη μελέτη της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, θα καταγραφούν και θα μελετηθούν οι πειραματικές καμπύλες της έντασης της ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας. Θα μετρηθεί, για κάθε θερμοκρασία, το μήκος κύματος  $\lambda_{\text{max}}$  στο οποίο η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι μέγιστη, ώστε να ελεγχθεί ο νόμος μετατόπισης του Wien [Εξ. (35.3)], και θα εκτιμηθεί η ολική εκπεμπόμενη ένταση, ως το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες, ώστε να ελεγχθεί ο νόμος των Stefan–Boltzmann [Εξ. (35.2)]. Τέλος, οι καμπύλες αυτές θα συγκριθούν με τη θεωρητική πρόβλεψη της σχέσης του Planck για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος [Εξ. (35.5)].

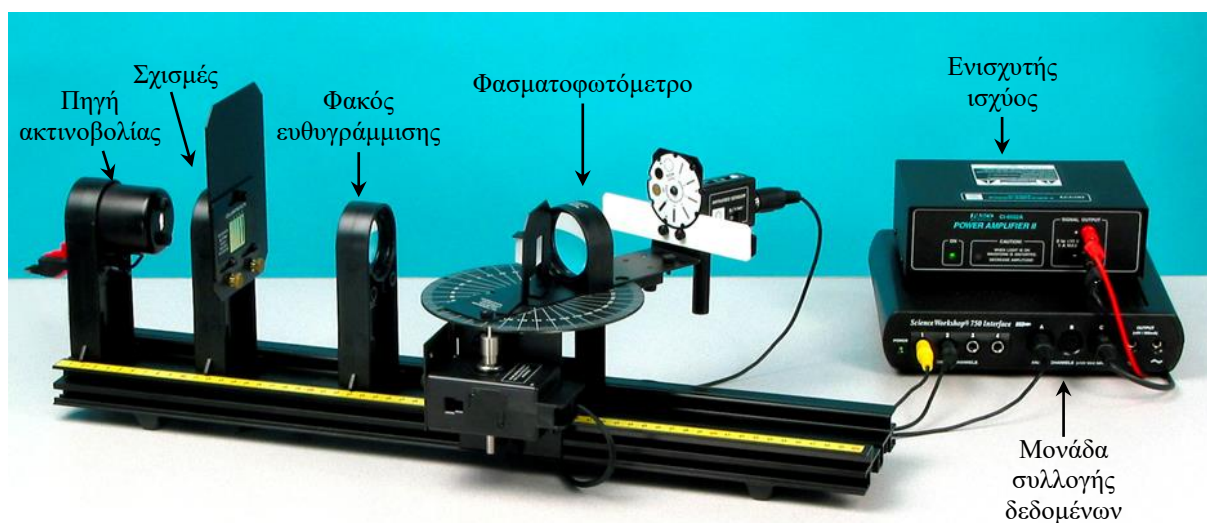
Ως πηγή ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως βολφραμίου, ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό μιας μαύρης κοιλότητας και εκπέμπει ακτινοβολία μέσα από μία σχισμή. Παρότι το νήμα του λαμπτήρα δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον, η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική προσέγγιση μέλανος σώματος. Η μεταβολή τη θερμοκρασίας του νήματος επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής της καταβαλλόμενης ηλεκτρικής ισχύος ή της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η τιμή της θερμοκρασίας υπολογίζεται έμμεσα από την τιμή της ειδικής αντίστασης του βολφραμίου, που μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, και η οποία υπολογίζεται με τη σειρά της από τη μέτρηση της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος που διαρρέει το νήμα.

Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένα φασματοφωτόμετρο πρίσματος. Η φωτεινή δέσμη που εξέρχεται από τη σχισμή προσπίπτει σε ένα γυάλινο πρίσμα. Λόγω του φαινομένου του διασκεδασμού, δηλαδή της εξάρτησης του δείκτη διάθλασης του υλικού από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τα διαφορετικά μήκη κύματος εκτρέπονται σε διαφορετικές γωνίες. Ένας ειδικός αισθητήρας ακτινοβολίας ευρέος φάσματος επιτρέπει τη μέτρηση της έντασης της ακτινοβολίας, οπότε, με την περιστροφή του φασματοφωτομέτρου σε μια συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος, καταγράφεται συνεχώς η ένταση της ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος αυτής. Το τελευταίο υπολογίζεται από τη γωνία εκτροπής της δέσμης κατά τη διέλευση από το πρίσμα και από τον δείκτη διάθλασης του πρίσματος.

Πρέπει να τονιστεί ότι όλοι αυτοί οι υπολογισμοί γίνονται αυτόματα από κατάλληλο λογισμικό σε H/Y, το οποίο συλλέγει το σύνολο των δεδομένων και ελέγχει ως επί το πλείστον τη διάταξη.

### 35.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στην παρούσα άσκηση φαίνεται στο Σχ. 35.2.



**Σχήμα 35.2.** Η πειραματική διάταξη για τη μελέτη της ακτινοβολίας μέλανος σώματος. Διακρίνονται όλα τα στοιχεία της διάταξης πλην του Η/Υ.

Για τη συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών, αλλά και για τον έλεγχο της διάταξης, είναι απαραίτητη μια μονάδα συλλογής δεδομένων από τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, η οποία τα εισάγει στον Η/Υ μέσω θύρας USB, ενώ η επεξεργασία τους γίνεται μέσω του λογισμικού DataStudio™ της PASCO.

Για τη ρύθμιση από τον Η/Υ της τάσης που εφαρμόζεται στον λαμπτήρα, δηλαδή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του πομπού ακτινοβολίας, απαιτείται επιπρόσθετα ένας ενισχυτής ισχύος, ώστε να ενισχύσει το ασθενές σήμα του Η/Υ, δεδομένου ότι ο λαμπτήρας είναι σχετικά μεγάλης ισχύος.

#### 35.4.1. Πηγή ακτινοβολίας – Υπολογισμός θερμοκρασίας μέλανος σώματος

Η θερμοκρασία του νήματος πυρακτώσεως του ηλεκτρικού λαμπτήρα μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα από τη μέτρηση της τάσης  $U$  που εφαρμόζεται στα άκρα του και του ρεύματος  $I$  που τον διαρρέει.

Γνωρίζουμε ότι η τιμή της αντίστασης  $R$  είναι

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

αλλά και 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  $S$  είναι το μήκος και η διατομή του αγωγού, αντίστοιχα, και  $\rho$  η ειδική αντίστασή 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  $R_0$  είναι 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  $\rho_0 = 5,65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Η αντίσταση του λαμπτήρα σε 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 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

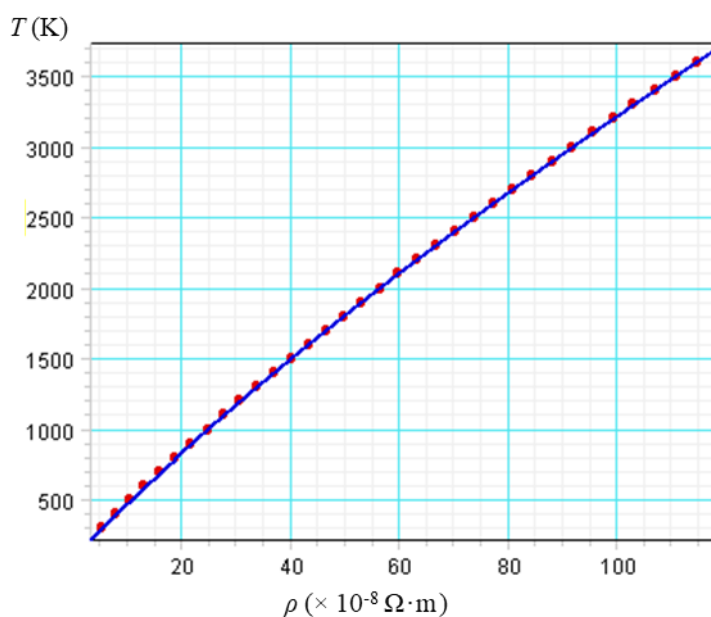
$$\rho = 5,65 \left( \frac{U}{I} - 0,2 \right) (\times 10^{-8} \Omega \cdot m) \quad (35.12)$$

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 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 D). Στον Πίνακα I και στο Σχ. 35.3 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**

$\rho$ ( $\times 10^{-8} \Omega \cdot m$ )	$T$ (K)	$\rho$ ( $\times 10^{-8} \Omega \cdot m$ )	$T$ (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 35.3.** Γραφική παράσταση της θερμοκρασίας  $T$  ως συνάρτηση της ειδικής αντίστασης  $\rho$  για το βολφράμιο.

Για την καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών τιμών, το λογισμικό χρησιμοποιεί τη συνάρτηση

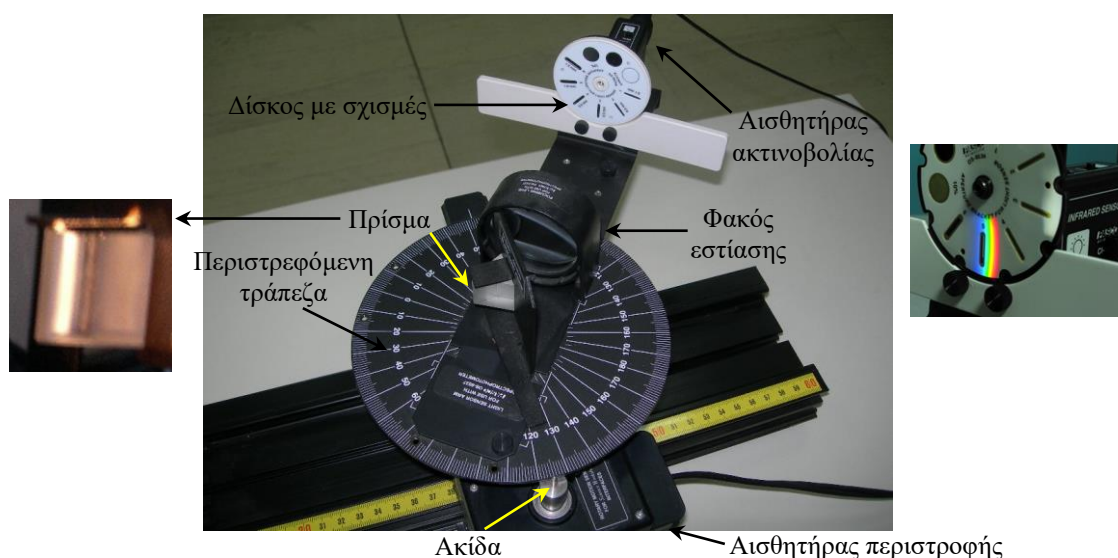
$$T = 103 + 38,1 \rho - 0,095 \rho^2 + (2,48 \times 10^{-4}) \rho^3 \quad (K) \quad (35.13)$$

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

### 35.4.2. Φασματοφωτόμετρο – Υπολογισμός μήκους κύματος

Από την πηγή ακτινοβολίας εξέρχεται μια φωτεινή δέσμη, η οποία διέρχεται διαδοχικά από μία σχισμή, καθορισμένου εύρους, και έναν φακό, με εστιακή απόσταση περίπου 10 cm, έτσι ώστε η δέσμη να αποκτήσει καθορισμένο πλάτος και να αποτελείται από παράλληλες φωτεινές ακτίνες.

Η φωτεινή δέσμη κατευθύνεται στο γυάλινο πρίσμα του φασματοφωτομέτρου, που φαίνεται στο Σχ. 35.4. Επειδή η ταχύτητα του φωτός στο γυαλί εξαρτάται από το μήκος κύματος, το ίδιο ισχύει για τον δείκτη διάθλασης  $n$ , δεδομένου ότι  $n = c/v$ , όπου  $c$  και  $v$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό και στο γυαλί, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, τα διαφορετικά μήκη κύματος θα εκτρέπονται σε διαφορετικές γωνίες κατά τη διέλευσή τους από το πρίσμα (διασκεδασμός).



Σχήμα 35.4. Το φασματοφωτόμετρο πρίσματος.

Ένας ειδικός αισθητήρας ακτινοβολίας ευρέος φάσματος, με τη βοήθεια ενός βραχίονα, στερεώνεται σε μια περιστρεφόμενη τράπεζα, οπότε με την περιστροφή αυτής μπορεί να μετρηθεί η ένταση της ακτινοβολίας σε κάθε θέση, με άλλα λόγια η ένταση της ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος αυτής. Η γωνία περιστροφής μετριέται με τη βοήθεια ενός άλλου ειδικού αισθητήρα περιστροφής, ο οποίος εφάπτεται στην τράπεζα μέσω μίας ακίδας.

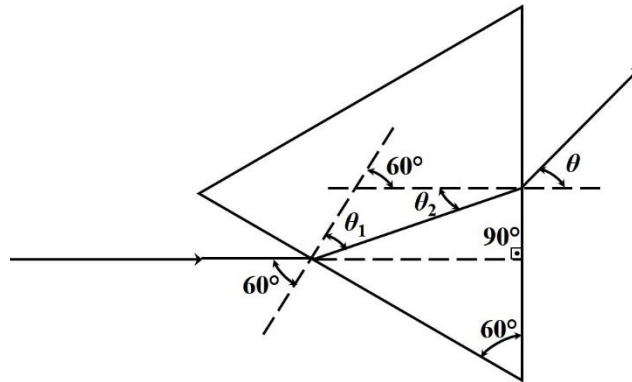
Το τριγωνικό πρίσμα, με γωνία κορυφής  $60^\circ$ , τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε η πίσω πλευρά του να είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης, όπως φαίνεται στο Σχ. 35.5. Έτσι, η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία κορυφής του πρίσματος, δηλαδή  $60^\circ$ . Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι

$$\theta_1 + \theta_2 = 60^\circ \quad (35.14)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Snell σε κάθε διεπιφάνεια, προκύπτει ότι

$$\sin 60^\circ = n \sin \theta_1 \quad (35.15)$$

$$\sin \theta = n \sin \theta_2 \quad (35.16)$$



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

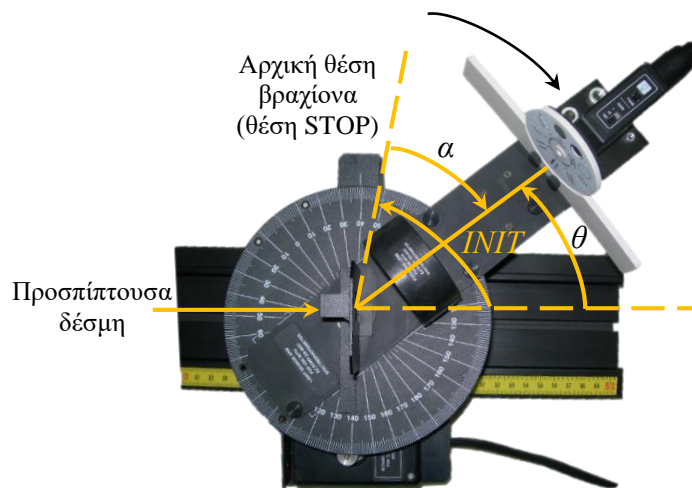
Συνδυάζοντας τις Εξ. (35.14), (35.15) και (35.16) και επιλύοντας ως προς  $n$ , βρίσκουμε ότι

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

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.** Η περιστροφή του αισθητήρα ακτινοβολίας πάνω στη βαθμονομημένη τράπεζα.

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

$$\theta = \text{INIT} - a \quad (35.18)$$

Επιπλέον, η περιστροφή της βαθμονομημένης τράπεζας μεταδίδεται στον αισθητήρα περιστροφής μέσω της ακίδας που εφάπτεται σε αυτήν. Μία πλήρης περιστροφή της τράπεζας



οδηγεί σε περίπου 60 περιστροφές της ακίδας, δεδομένου ότι 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  $\theta$  προκύπτει τελικά από τη σχέση

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

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

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

Ο **ακριβής** υπολογισμός των τιμών *INIT* και *Ratio* είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την επιτυχία της άσκησης και περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα (Π35), στο τέλος της άσκησης.

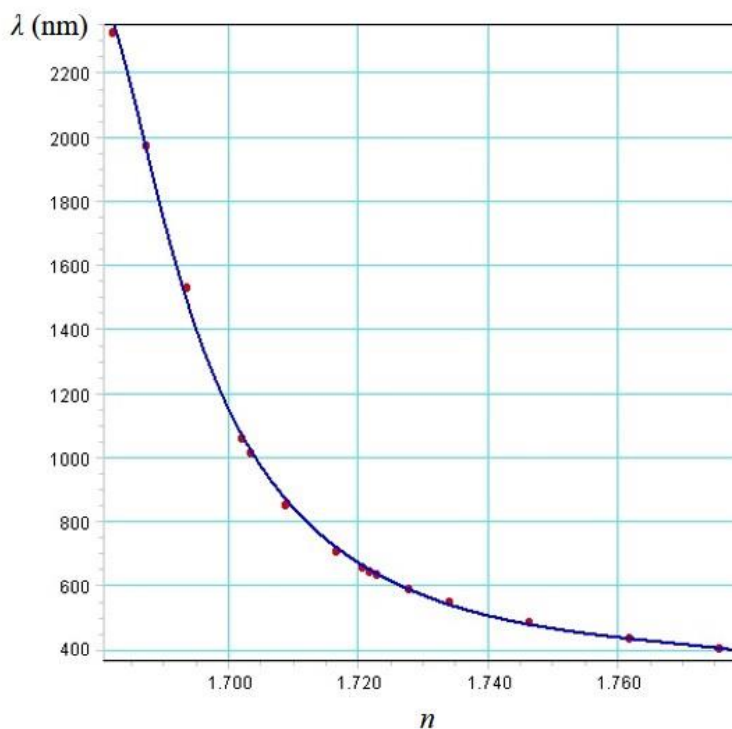
Η σχέση μεταξύ του δείκτη διάθλασης  $n$  ενός διαφανούς μέσου και του μήκους κύματος, της ακτινοβολίας δίνεται από την εμπειρική σχέση του Cauchy

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

όπου οι συντελεστές  $A$  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 πρίσμα της άσκησης.

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό του μήκους κύματος  $\lambda$  από τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα, το λογισμικό χρησιμοποιεί τελικά 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  $A, B, C, D, J, F, G, H, I$  είναι γνωστές.

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.

Μετά την ανάλυσή της από το πρίσμα, η ακτινοβολία διέρχεται από έναν φακό, με εστιακή απόσταση περίπου 10 cm, και έναν δίσκο με σχισμές καθορισμένου εύρους, ώστε να καταλήξει στον αισθητήρα που θα μετρήσει την ένταση της ακτινοβολίας.

### 35.4.3. Αισθητήρας ακτινοβολίας

Ο αισθητήρας ακτινοβολίας χρησιμοποιεί μια θερμοστήλη, δηλαδή μια διάταξη η οποία μετατρέπει τη θερμική ακτινοβολία σε ηλεκτρική τάση που μπορεί να μετρηθεί. Η θερμοστήλη λειτουργεί ως διαφορικό θερμοζεύγος, το οποίο αποτελείται από το θερμοζεύγος αναφοράς, που διατηρείται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, και το θερμοζεύγος εργασίας, το οποίο θερμαίνεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας διαφορά δυναμικού στον αισθητήρα που είναι ανάλογη της διαφοράς των δύο θερμοκρασιών, συνεπώς και της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Ο αισθητήρας είναι ευρέος φάσματος, έχοντας τη δυνατότητα μέτρησης μηκών κύματος από 300 έως 10.000 nm. 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. Τέλος, ο αισθητήρας διαθέτει διακόπτη μηδενισμού των μετρήσεων (TARE), ώστε να μηδενίζεται πριν την έναρξη κάθε μέτρησης και να μην καταγράφεται η ακτινοβολία υποβάθρου.

### 35.4.4. Το πρόγραμμα DataStudio

Για την εκτέλεση της άσκησης χρησιμοποιείται το αρχείο **Blackbody.ds** του DataStudio (Σχ. 35.8), όπου υπάρχουν έτοιμες όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις.

Στο παράθυρο πάνω αριστερά (Data) διακρίνονται τα μεγέθη που μετρούνται και υπολογίζονται. Οι πρωτογενείς μετρήσεις περιλαμβάνουν την καταγραφή των τιμών των μεγεθών που μετρούν οι αισθητήρες ως συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή

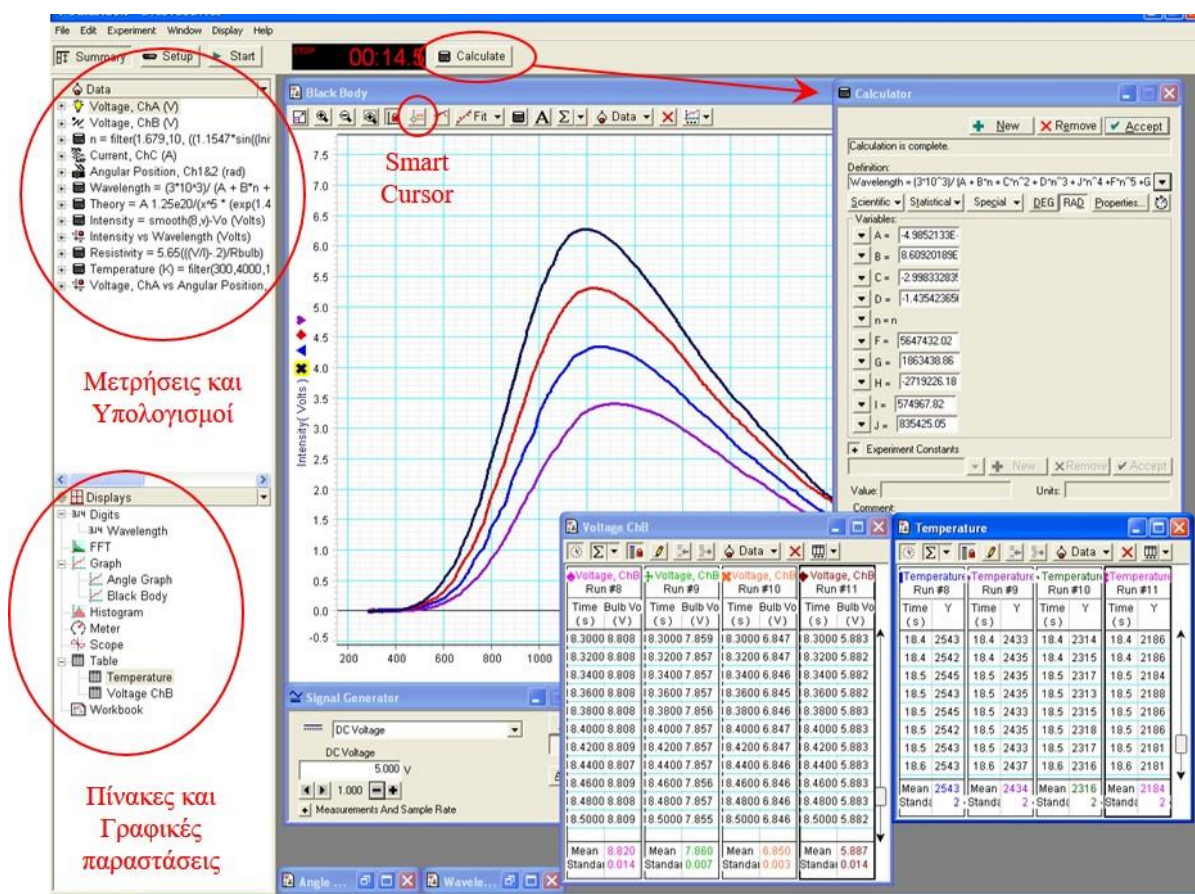
- της τάσης που μετρά ο αισθητήρας ακτινοβολίας (Voltage, ChA) (σε V),
- της τάσης στα άκρα του νήματος του λαμπτήρα πυρακτώσεως (Voltage, ChB) (σε V),
- του ρεύματος που διαρρέει το νήμα του λαμπτήρα (Current, ChC) (σε A),
- της γωνίας περιστροφής του βραχίονα (Angular Position, Ch1&2) (σε rad).

Τα μεγέθη που οι τιμές τους υπολογίζονται **αυτόματα** από το πρόγραμμα περιλαμβάνουν:

- την ειδική αντίσταση (Resistivity) του νήματος του λαμπτήρα [Εξ. (35.12)],

- τη θερμοκρασία (Temperature) του πομπού ακτινοβολίας [Εξ. (35.13)],
- τον δείκτη διάθλαση (n) του πρίσματος [Εξ. (35.20)],
- το μήκος κύματος (Wavelength) [Εξ. (35.22)],
- την ένταση της ακτινοβολίας (Intensity), σε μια προσπάθεια εξάλειψης του θορύβου που υπεισέρχεται στις μετρήσεις,
- ένα θεωρητικό μοντέλο (Theory), βάσει του νόμου του Planck [Εξ. (35.5)], για τον υπολογισμό της έντασης της ακτινοβολίας για κάθε τιμή του μήκους κύματος και της θερμοκρασίας.

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις φαίνονται στο παράθυρο «Calculator», με την επιλογή καθεμιάς από αυτές να γίνεται με τη βοήθεια του βέλους στο πεδίο «Definition», όπου έχουν συμπληρωθεί όλες οι απαραίτητες σταθερές.



Σχήμα 35.8. Το αρχείο Blackbody.ds στο πρόγραμμα DataStudio.

Από το παράθυρο κάτω αριστερά (Displays) μπορούν να δημιουργηθούν οι απαραίτητες γραφικές παραστάσεις, καθώς και να εμφανιστούν πίνακες με όλα τα παραπάνω δεδομένα. Στη γραφική παράσταση «Black Body», δηλαδή της έντασης της ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος, θα καταγραφούν απευθείας σε πραγματικό χρόνο οι ζητούμενες πειραματικές καμπύλες. Τέλος, μέσω του παραθύρου «Signal Generator» ενεργοποιείται ο λαμπτήρας πυρακτώσεως και ρυθμίζεται η τάση τροφοδοσίας του.

Όλα τα δεδομένα του πειράματος μπορούν να εξαχθούν υπό μορφή αρχείων τύπου txt και να αποθηκευτούν σε κάποιο μέσο αποθήκευσης USB. Έτσι, μπορούν να αναπαραχθούν οι πειραματικές καμπύλες με οποιοδήποτε πρόγραμμα απεικόνισης δεδομένων.

## Βιβλιογραφία

1. E. H. Wichmann, *Κβαντική Φυσική (Μαθήματα Φυσικής Berkeley, Τόμος 4)* (Αθήνα, 1985), 1.35-1.40.
2. R. A. Serway, C. J. Moses, C. A. Moyer, *Σύγχρονη Φυσική* (Ηράκλειο, 2000), 2.2-2.4.
3. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική, Τόμος Α': Μηχανική – Κόμματα – Θερμοδυναμική* (Αθήνα, <sup>4</sup>2022), 17.7 (σ. 626-628)· Τόμος Β': *Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική* (Αθήνα, <sup>4</sup>2022), 39.5.
4. E. Hecht, *Οπτική: Βασικές αρχές και εφαρμογές* (Αθήνα, 2018), 3.5, 3.6, 13.1.1.
5. Max Planck, *The Theory of Heat Radiation* (Philadelphia, 1914).
6. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος ΙΙ* (Αθήνα, 2011), σ. 223-243.

### 35.5. Εκτέλεση

1. Θέστε σε λειτουργία τη μονάδα συλλογής δεδομένων και τον ενισχυτή ισχύος και **μετά** 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. Περιστρέψτε τον βραχίονα στήριξης του αισθητήρα ακτινοβολίας (επομένως και τη βαθμονομημένη τράπεζα) με φορά αντίθετη της κίνησης των δεικτών του ρολογιού, μέχρι την τερματική του θέση (STOP).
4. 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.
5. Απομακρύνετε το χέρι από την πορεία του φωτός και ξεκινήστε την καταγραφή των μετρήσεων στο DataStudio (πάτημα του πράσινου κουμπιού Start).
6. Περιστρέψτε τον βραχίονα αργά και σταθερά, έτσι ώστε να σαρώσει όλο το φάσμα της ακτινοβολίας που διαθλάται μέσω του πρίσματος.
7. Μόλις η ένδειξη του μήκους κύματος φτάσει περίπου στα 2.500 nm, οι υπολογισμοί σταματούν αυτόματα, οπότε σταματήστε την περιστροφή και την καταγραφή, πατώντας το κόκκινο κουμπί Stop στο DataStudio.
8. Επαναλάβετε τα βήματα 3 έως 7 για άλλες τρεις τιμές της τάσης τροφοδοσίας του λαμπτήρα πυρακτώσεως, για να λάβετε τέσσερις συνολικά καμπύλες της έντασης της ακτινοβολίας ως συνάρτηση του μήκους κύματος για τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες  $T_1, T_2, T_3, T_4$ . Έτσι, έχετε τώρα στην οθόνη τέσσερις καμπύλες  $I(\lambda) = f(\lambda)$  για τις τέσσερις αυτές θερμοκρασίες.

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Η διατήρηση της τάσης στο άνω όριο των 10 V για μεγάλο χρονικό διάστημα θα περιορίσει τον χρόνο ζωής του λαμπτήρα.

9. Για καθεμία από τις εφαρμοζόμενες τάσεις, καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας του νήματος  $T_1, T_2, T_3, T_4$  στον Πίνακα III.

10. Σε καθεμία από τις καμπύλες έντασης ακτινοβολίας – μήκους κύματος, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, προσδιορίστε την τιμή του μήκους κύματος  $\lambda_{\max}$  που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή της έντασης, με τη βοήθεια του εργαλείου «Smart Cursor» και μετακινώντας τον δρομέα πάνω στην καμπύλη. Καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές  $\lambda_{\max1}, \lambda_{\max2}, \lambda_{\max3}, \lambda_{\max4}$  στον Πίνακα III.

11. Για καθεμία από τις καμπύλες έντασης ακτινοβολίας – μήκους κύματος υπολογίστε το εμβαδόν μεταξύ της καμπύλης και του άξονα του μήκους κύματος, ενεργοποιώντας την εντολή «Area» που βρίσκεται στο βέλος δεξιά από το κουμπί «Σ». Καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές στον Πίνακα III. Παρότι οι τιμές αυτές δεν ταυτίζονται με την ολική ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας [Εξ. (35.1)], είναι ανάλογες αυτής, επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη του νόμου των Stefan–Boltzmann.

12. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο μέσο αποθήκευσης για να ληφθούν τα δεδομένα, τότε πρέπει να προσδιοριστούν, με τη βοήθεια του «Smart Cursor», 12 κατάλληλα επιλεγμένα ζεύγη τιμών μήκους κύματος  $\lambda$  και αντίστοιχης ένδειξης του αισθητήρα (που αντιστοιχεί στην ένταση  $I$  της ακτινοβολίας) και να καταγραφούν στον Πίνακα III. Φροντίστε στα ζεύγη των τιμών αυτών να συμπεριλαμβάνεται και η τιμή της μέγιστης έντασης που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος  $\lambda_{\max}$ .

**Πίνακας III**

$T_1 = \dots\dots\dots$ K		$T_2 = \dots\dots\dots$ K		$T_3 = \dots\dots\dots$ K		$T_4 = \dots\dots\dots$ K	
$\lambda_{\max1} = \dots\dots\dots$ nm		$\lambda_{\max2} = \dots\dots\dots$ nm		$\lambda_{\max3} = \dots\dots\dots$ nm		$\lambda_{\max4} = \dots\dots\dots$ nm	
Εμβαδόν = .....		Εμβαδόν = .....		Εμβαδόν = .....		Εμβαδόν = .....	
$\lambda$ (nm)	$I$ (V)	$\lambda$ (nm)	$I$ (V)	$\lambda$ (nm)	$I$ (V)	$\lambda$ (nm)	$I$ (V)

13. 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.

14. Για διάφορες τιμές της τάσης τροφοδοσίας του λαμπτήρα παρατηρήστε το χρώμα του φωτός που προέρχεται από αυτόν, καθώς και τη σύνθεση του ορατού φάσματος πάνω στον δίσκο με τις σχισμές.

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. Με βάση τα δεδομένα, συμπληρώστε τον Πίνακα IV.

Πίνακας IV

$T$ (K)	$\lambda_{\max}$ (nm)	$1/T$ (K <sup>-1</sup> )	$\lambda_{\max} \cdot T$ (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 του γινομένου  $\lambda_{\max} \cdot T$ , καθώς και την τυπική απόκλιση αυτής.
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 των Stefan–Boltzmann.
8. Πώς αλλάζει το χρώμα του φωτός του λαμπτήρα με τη θερμοκρασία και πώς η σύνθεση του ορατού φάσματος; Ερμηνεύστε τις παρατηρήσεις σας.
9. Για τη μεγαλύτερη θερμοκρασία που μελετήσατε, σε ποια περιοχή του φάσματος βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος της ολικής έντασης της ακτινοβολίας;

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (Π35)

**ΔΙΕΥΚΡΙΝΙΣΗ:** Διευκρινίζεται ότι όλες οι εργασίες του Παραρτήματος 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

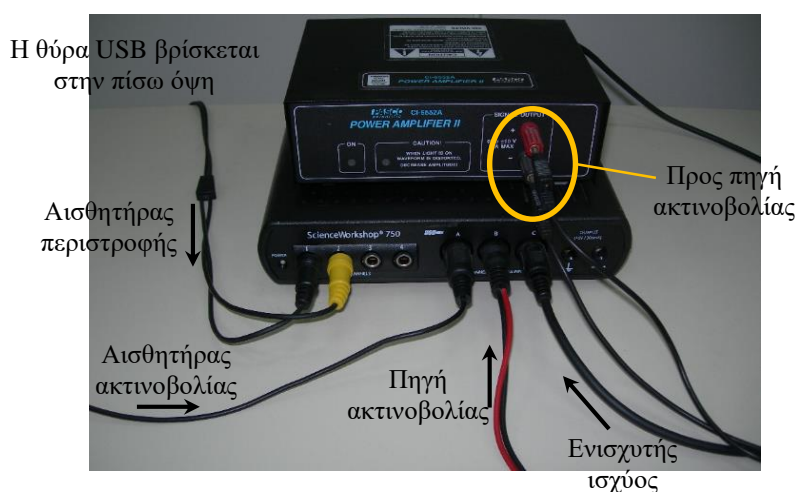
Ο φακός ευθυγράμμισης πρέπει να βρίσκεται περίπου 10 cm από τις σχισμές ευθυγράμμισης της δέσμης. Η ακριβής θέση του φακού βρίσκεται με τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της δέσμης, η οποία θα πρέπει να έχει σταθερό πλάτος σε όλη τη διαδρομή της μέχρι το πρίσμα. Συνήθως επιλέγεται η σχισμή Νο 4. Η ίδια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

Η θέση του φασματοφωτομέτρου δεν απαιτείται να είναι ακριβώς καθορισμένη, αλλά 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 στον δίσκο με τις σχισμές και κατ' επέκταση στον αισθητήρα ακτινοβολίας.

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 πρέπει να γίνουν μεταξύ της πειραματικής διάταξης, της μονάδας συλλογής δεδομένων, του ενισχυτή ισχύος και του Η/Υ φαίνονται στο Σχ. Π35.1 και περιλαμβάνουν:



Σχήμα Π35.1. Η σύνδεση της πειραματικής διάταξης.

1. Σύνδεση του αισθητήρα περιστροφής στα ψηφιακά κανάλια 1 και 2 της μονάδας συλλογής δεδομένων.
2. Σύνδεση του αισθητήρα ακτινοβολίας 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 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 νήματος του λαμπτήρα πυρακτώσεως.
6. Σύνδεση της μονάδας συλλογής δεδομένων με τον H/Y μέσω της θύρας USB.

### Π35.3. Βαθμονόμηση

Όπως αναφέρθηκε, 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 με τις σχισμές και ο αισθητήρας ακτινοβολίας.
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 καταγράφηκε με 360 (όταν το αποτέλεσμα έχει εκφραστεί σε μοίρες) ή  $2\pi$  (όταν το αποτέλεσμα έχει εκφραστεί σε ακτίνια).
7. Το αποτέλεσμα της διαίρεσης είναι ο λόγος (*Ratio*) που ζητείται.

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 μια φωτεινή δέσμη που εμφανίζεται πίσω από το πρίσμα, η οποία οφείλεται σε μικρό τμήμα του φωτός που περνάει χωρίς να διέρχεται από το πρίσμα. Έτσι, θα εμφανιστεί μια δεύτερη, μικρή κορυφή στην ένταση της μετρούμενης ακτινοβολίας.
3. Στη γραφική παράσταση **ένταση ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας περιστροφής (Angle Graph)** 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.