

1. Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι αφ' ενός η κατανόηση βασικών μεγεθών και νόμων της φωτομετρίας και αφ' ετέρου η μέτρηση της πολικής κατανομής της φωτοβολίας ενός φωτιστικού σώματος.

2. Θεωρία

2.1 Εισαγωγή

Η φωτομετρία είναι ένας κλάδος της οπτικής τεχνολογίας που ασχολείται με μετρήσεις αναφορικά με το φως το οποίο ορίζεται ως η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί ν' ανιχνεύσει ο ανθρώπινος οφθαλμός. Επομένως περιορίζεται στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (μήκη κύματος από 360 – 830 nm) και τα μεγέθη που μετρά σταθμίζονται από τη φασματική απόκριση του οφθαλμού. Υπό αυτή την έννοια η φωτομετρία χρησιμοποιεί ανιχνευτές οπτικής ακτινοβολίας δομημένους κατά τρόπο που η φασματική τους απόκριση μιμείται την απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού. Τυπικές φωτομετρικές μονάδες είναι η candela, το lumen και το lux.

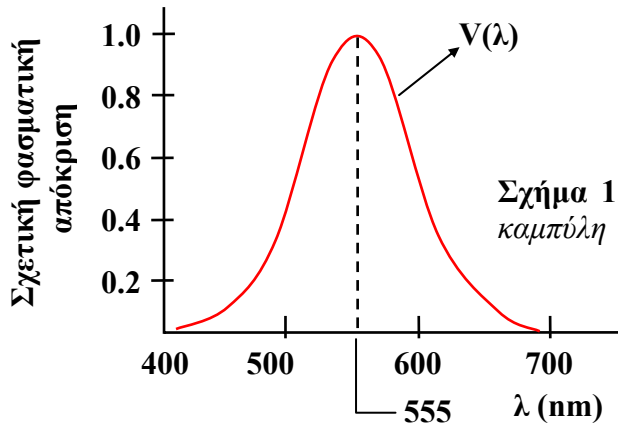
2.2 Φυσική φωτομετρία

Όπως προαναφέραμε, βασικός στόχος της φωτομετρίας είναι η μέτρηση της ορατής οπτικής ακτινοβολίας κατά τρόπο όπου το αποτέλεσμα της μέτρησης να συσχετίζεται με την αίσθηση που έχει ένας παρατηρητής όταν εκτίθεται στην ίδια ακτινοβολία.

Στη σημερινή φωτομετρική πρακτική οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με φωτοανιχνευτές. Αυτό αναφέρεται ως φυσική φωτομετρία. Σ' αυτή τη διαδικασία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης όρασης, πράγμα όχι και τόσο απλό, δεδομένου ότι το ανθρώπινο οπτικό σύστημα αποτελεί έναν αρκετά περίπλοκο, μη γραμμικό ανιχνευτή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για μήκη κύματος που διαμορφώνονται σε μια περιοχή του φάσματος από 360 – 830 nm. Η ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού στο φως μεταβάλλεται με το μήκος κύματος. Για παράδειγμα, μια πηγή που εκπέμπει ακτινοβολία στο πράσινο εμφανίζεται πιο λαμπρή από μια πηγή που εκπέμπει το ίδιο ποσό ακτινοβολίας στο κόκκινο ή στο μπλε. Εκτός όμως του μήκους κύματος και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την ευαισθησία του οφθαλμού, όπως αν το φως είναι σταθερό ή τρεμοπαίζει, η σύνθεση του περιβάλλοντα χώρου, η προσαρμογή της ίριδας και του αμφιβληστροειδούς, η ψυχολογική και φυσιολογική κατάσταση του παρατηρητή και

πλήθος άλλων μεταβλητών. Παρ' όλα αυτά, η υποκειμενική αίσθηση του πως «βλέπουμε» το φως μπορεί να ποσοτικοποιηθεί για «κανονικές» συνθήκες παρατήρησης.

Το 1924 ορίστηκε από την διεθνή επιτροπή CIE (Commission Internationale d'Eclairage ή International Commission on Illumination) η σχετική φασματική απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού που καλείται και καμπύλη φωτεινής αποδοτικότητας φωτοπτικής όρασης ή συνάρτηση $V(\lambda)$, ορισμένης στο διάστημα από 360 – 830 nm με μέγιστο στα 555 nm (Σχήμα 1). Στις περισσότερες περιπτώσεις η περιοχή από 380 – 780 nm είναι αρκετή



Σχήμα 1. CIE συνάρτηση $V(\lambda)$ ή φωτομετρική καμπύλη

για υπολογισμούς με μηδαμινό σφάλμα, δεδομένου ότι η τιμή της $V(\lambda)$, έξω από τα όρια αυτής της περιοχής, πέφτει κάτω από 10^{-4} . Επομένως, ένας φωτοανιχνευτής με φασματική απόκριση που ταιριάζει με τη $V(\lambda)$, μπορεί να αντικαταστήσει, στη φωτομετρία, τον ανθρώπινο οφθαλμό.

2.3 Βασικές φωτομετρικές μονάδες

- **Candela (Cd).** Είναι θεμελιακή μονάδα στη φωτομετρία και ορίζεται ως το 1/60 της φωτοβολίας που εκπέμπεται κάθετα από επιφάνεια λευκόχρυσου εμβαδού 1 cm^2 στη θερμοκρασία τήξης του ($1769 \text{ }^\circ\text{C}$). Ένας νεότερος ορισμός της candela (1979) την προσδιορίζει ως τη φωτοβολία ισότροπης πηγής, η οποία εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος 555 nm με φωτοβόλο ροή ίση με $(1/683) \text{ watt/στερεακτίνο}$.

- **Lumen (Lm).** Είναι η μονάδα της φωτεινής ροής και ορίζεται ως η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από ισότροπη πηγή φωτοβολίας 1 Cd, μέσα σε στερεά γωνία 1 Sterad. Ισχύει δηλαδή:

$$1 \text{ Lumen} = 1 \text{ Cd} \times 1 \text{ Sterad}$$

- **Lux (Lx).** Είναι μονάδα φωτισμού και ορίζεται ως ο ομοιόμορφος φωτισμός επιφάνειας 1 m^2 από φωτεινή ροή 1 Lumen. Ισχύει:

$$1 \text{ Lux} = 1 \text{ Lumen/m}^2$$

2.4 Φωτομετρικά μεγέθη

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί παραθέτουμε συνοπτικά μερικά φωτομετρικά μεγέθη με τις αντίστοιχες μονάδες τους και στη συνέχεια θ' αναφερθούμε αναλυτικά σε καθένα από αυτά.

Πίνακας 1. Φωτομετρικά μεγέθη

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Ορισμός	Μονάδα SI
Φ_v	Φωτεινή ροή	Luminous flux	$\Phi_v = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$	Lm
I	Φωτεινή ένταση ή Φωτοβολία	Luminous Intensity	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Cd = Lm Sr ⁻¹
B	Φωτισμός	Illuminance	$B = \frac{d\Phi}{dA}$	Lx = Lm m ⁻²
L	Φωτεινότητα	Luminance	$L_v = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta}$	Cd m ⁻² = Lm Sr ⁻¹ m ⁻²
M	Φωτεινή σχετική ικανότητα	Luminous exitance	$B = \frac{d\Phi}{dA}$	Lm m ⁻²
Q	Φωτεινή ενέργεια	Luminous energy	$Q = \int_{\Delta t} \Phi(t) dt$	Lm sec
$\Phi_{ολ}$	Ολική φωτεινή ροή	Total luminous Flux	$\Phi_{ολ} = \int_{\Omega} I d\Omega$	Lm

Ενώ η candela είναι η θεμελιώδης μονάδα στο σύστημα SI, η φωτεινή ροή (Lumen) είναι η πλέον βασική φωτομετρική ποσότητα, καθώς τα υπόλοιπα φωτομετρικά μεγέθη ορίζονται σε σχέση με το Lumen (με τον αντίστοιχο συντελεστή). Στα παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα μεγέθη που εμφανίζονται στον Πίνακα 1.

2.4.1 Φωτεινή ροή

Πριν ορίσουμε τη φωτεινή ροή που είναι φωτομετρικό μέγεθος, θα πρέπει πρώτα να κάνουμε μια αναφορά στη φωτοβόλο ροή Φ_e που είναι ακτινομετρικό μέγεθος.

Φωτοβόλος ροή (ή οπτική ισχύς) είναι η ενέργεια E (σε Joules) που εκπέμπεται από πηγή ανά μονάδα χρόνου και εκφράζεται ως:

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt}. \text{ Η } \Phi_e \text{ έχει διαστάσεις ισχύος. Μονάδα μέτρησης είναι το watt (w = J/s)}$$

Φωτεινή ροή Φ_v είναι η φωτομετρικά σταθμισμένη μέση τιμή της φωτοβόλου ακτινοβολίας. Είναι δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που εκπέμπεται από πηγή σε ορατά

μήκη κύματος. Ειδικότερα, η φωτεινή ροή υπολογίζεται αφού σταθμιστεί η φωτοβόλος ακτινοβολία (ισχύς) σε κάθε μήκος κύματος με τη συνάρτηση $V(\lambda)$ που προσδιορίζει την απόκριση του οφθαλμού σε διαφορετικά μήκη κύματος και επομένως αποτελεί ένα σταθμισμένο άθροισμα της ισχύος σε όλο το ορατό φάσμα.

Μονάδα της φωτεινής ροής είναι το Lumen

Αν η πηγή εκπέμπει μονοχρωματικό φως ισχύος Φ_e σε watts, η φωτεινή ροή Φ_v σε Lumen υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi_v = 683 \Phi_e V_\lambda \quad (\text{ισχύει για αυστηρά μονοχρωματικό φως}) \quad (1)$$

Σημείωση: η τιμή της V_λ λαμβάνεται από σχετικούς πίνακες

Όταν το φως δεν είναι μονοχρωματικό, δηλαδή η πηγή εκπέμπει περισσότερα από ένα μήκη κύματος, η τελευταία σχέση δεν ισχύει. Στην περίπτωση αυτή η σχέση μεταξύ φωτεινής ροής και ροής ακτινοβολίας διαμορφώνεται από τη σχέση:

$$\Phi_v = K_m \int_\lambda \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

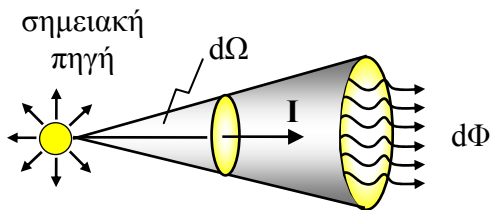
όπου $\Phi_{e,\lambda}$ είναι η φασματική κατανομή ισχύος, δηλαδή ακτινοβόλος ροή ανά μονάδα μήκους κύματος και K_m συντελεστής αναλογίας.

2.4.2 Φωτεινή ένταση ή φωτοβολία

Φωτεινή ένταση ή φωτοβολία μιας σημειακής πηγής προς συγκεκριμένη διεύθυνση, είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής $d\Phi$ ανά μονάδα στερεάς γωνίας $d\Omega$ με άξονα αυτή τη διεύθυνση (Σχήμα 2).

Δηλαδή:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3)$$



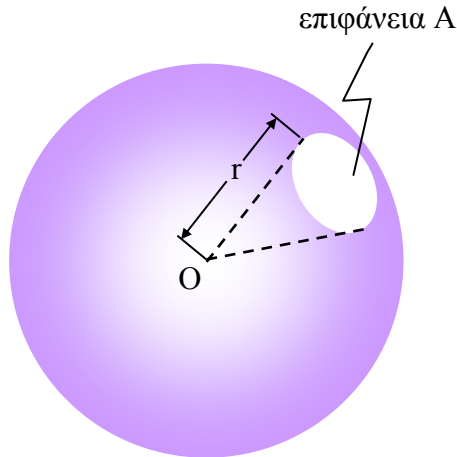
Σχήμα 2. Φωτοβολία σημειακής πηγής

Μονάδα μέτρησης της φωτοβολίας είναι η Candela ($Cd = Lm Sr^{-1}$)

Στερεά γωνία

Ορίζεται ως στερεά γωνία Ω (Σχήμα 3) το πηλίκο τμήματος επιφάνειας σφαίρας, που αποκόπτεται από κώνο ο οποίος έχει κορυφή το κέντρο της σφαίρας, δια του τετραγώνου της ακτίνας, δηλαδή:

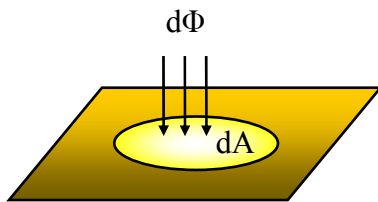
$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (4)$$



Σχήμα 3. Στερεά γωνία

Ως μονάδα στερεάς γωνίας ορίζεται το στερακτίνο (sterad ή Sr) που είναι αδιάστατο μέγεθος

2.4.3 Φωτισμός



Σχήμα 4. Φωτισμός

Ο φωτισμός είναι η πυκνότητα της φωτεινής ροής που δέχεται σημείο μιας επιφάνειας, κάθετα τοποθετημένης στη διεύθυνση διάδοσης του φωτός (Σχήμα 4) και ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής ανά μονάδα επιφάνειας:

$$B = \frac{d\Phi}{dA} \quad (5)$$

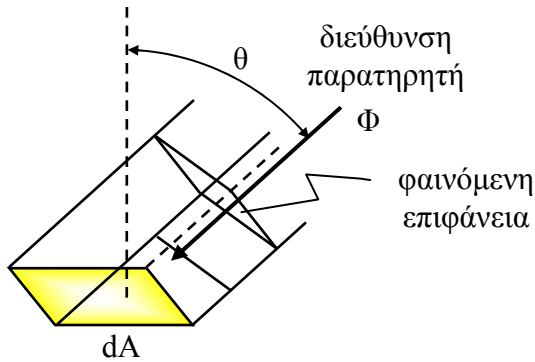
όπου $d\Phi$ η προσπίπτουσα φωτεινή ροή και dA στοιχειώδες τμήμα της επιφάνειας που περιέχει το σημείο.

Μονάδα φωτισμού είναι το Lux (1 Lux = Lm m^{-2})

2.4.4 Φωτεινότητα

Για να γίνει κατανοητή η έννοια της φωτεινότητας, σκεφτείτε μια ακτίνα φωτός ως ένα απειροελάχιστο κώνο με την κορυφή του σ' ένα σημείο μιας επιφάνειας. Θεωρήστε επί-

σης ότι ο κώνος σχηματίζει στοιχειώδη στερεά γωνία $d\Omega$. Αν το σημείο τομής της ακτίνας με την επιφάνεια βρίσκεται σε ένα στοιχειώδες τμήμα dA της επιφάνειας, τότε η εγκάρσια τομή της ακτίνας θα είναι $dA \cos \theta$, όπου θ είναι η γωνία μεταξύ της ακτίνας και της καθέτου στην επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Η εγκάρσια τομή της ακτίνας είναι η προβολή της dA και το φως φαίνεται ως να προέρχεται πρακτικά απ' αυτήν (είναι



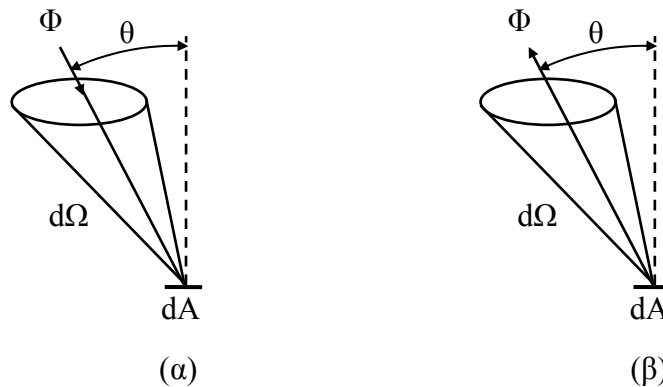
Σχήμα 5. Ακτίνα φωτός τέμνει την επιφάνεια σε στοιχειώδες τμήμα της dA

η φαινόμενη επιφάνεια από τον παρατηρητή).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ορίζεται ως φωτεινότητα (L_v) η φωτεινή ροή που αναδύεται ανά μονάδα στερεάς γωνίας από στοιχειώδη επιφάνεια dA προς συγκεκριμένη διεύθυνση και ανά μονάδα φαινόμενης επιφάνειας κάθετης προς αυτή τη διεύθυνση:

$$L_v = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (6)$$

όπου $d\Phi$ είναι η φωτεινή ροή που εκπέμπεται (ή ανακλάται) από στοιχειώδες τμήμα επιφάνειας dA μέσα από στερεά γωνία $d\Omega$ (Σχήμα 6)



Σχήμα 6. Φωτεινή ροή (α) προσπίπτουσα (β) αναδύομενη

φάνειας dA μέσα από στερεά γωνία $d\Omega$ (Σχήμα 6)

Μετρείται σε $\text{Lm Sr}^{-1} \text{m}^{-2}$ ή Cd m^{-2}

2.4.5 Φωτεινή σχετική ικανότητα

Ορίζεται ως η πυκνότητα της φωτεινής ροής που εκπέμπεται από σημείο μιας επιφάνειας.

$$B = \frac{d\Phi}{dA} \quad (7)$$

Μετρείται σε Lm m^{-2}

2.4.6 Φωτεινή ενέργεια

Ορίζεται ως:

$$Q = \int_{\Delta t} \Phi(t) dt \quad (8)$$

Μετρείται σε Lm sec

2.4.7 Ολική φωτεινή ροή

Η ολική φωτεινή ροή είναι η γεωμετρικά συνολική φωτεινή ροή μιας πηγής και ορίζεται ως:

$$\Phi_{ολ} = \int_{\Omega} I d\Omega \quad (9)$$

όπου I είναι η κατανομή της φωτοβολίας της πηγής σε κλειστή επιφάνεια γύρω από την πηγή.

3. Φωτομετρικός νόμος των αποστάσεων

Αν θεωρήσουμε μια σημειακή φωτεινή πηγή από την οποία αναδύεται φωτεινή ροή Φ_v , τότε το ποσό της φωτεινής ροής που εκπέμπεται ανά μονάδα στερεάς γωνίας προς δεδομένη διεύθυνση ορίζει τη φωτοβολία (φωτεινή ένταση) της πηγής, δηλαδή

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{Lm Sr}^{-1}) \quad (10)$$

Για παράδειγμα, η φωτοβολία από μια σφαίρα που εκπέμπει συνολική φωτεινή ροή προς όλες τις διευθύνσεις θα είναι

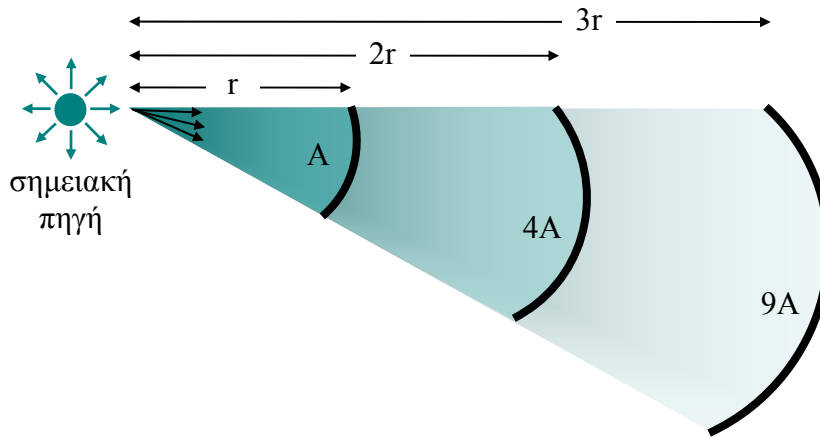
$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (\text{Lm Sr}^{-1}) \quad (11)$$

λόγω του ότι η συνολική στερεά γωνία $\Omega = 4\pi \text{ Sr}$ (αποδεικνύεται από τη Σχέση 4, αν θέσουμε όπου $A = 4\pi r^2$ που είναι η επιφάνεια της σφαίρας)

Αν υπολογίσουμε επομένως το φωτισμό B σημειακής πηγής σε σφαιρική επιφάνεια γύρω από την πηγή, θα έχουμε:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{4\pi I}{4\pi r^2} \Rightarrow B = \frac{I}{r^2} \quad (12)$$

Η τελευταία σχέση περιγράφει το φωτομετρικό νόμο των αποστάσεων: ο φωτισμός B που δέχεται μια επιφάνεια κάθετα τοποθετημένη προς τη διεύθυνση της φωτεινής ροής μιας σημειακής πηγής σταθερής φωτοβολίας I , μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης.



Σχήμα 7. Σχηματική παράσταση του φωτομετρικού νόμου των αποστάσεων. Η φωτεινή ροή που αναδύεται από σημειακή πηγή μέσα σε στερεά γωνία, κατανέμεται σε όλο και μεγαλύτερες επιφάνειες, με αποτέλεσμα ο φωτισμός να μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης.

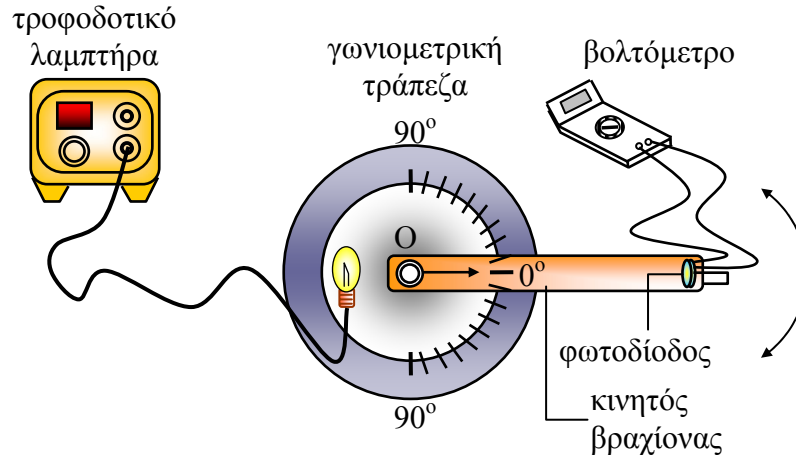
Πειραματικά ο νόμος αποδεικνύεται με τη διάταξη του Σχήματος 7. Παρατηρούμε ότι η φωτιζόμενη κάθε φορά επιφάνεια αυξάνεται (ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή) και ο φωτισμός μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης.

4. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 8 και αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Λαμπτήρα πυράκτωσης με το τροφοδοτικό του
- Γωνιομετρική τράπεζα
- Φωτοδίοδο
- Ψηφιακό πολύμετρο
- Λουξόμετρο

Στην άσκηση αυτή θα μετρήσουμε τη γωνιακή κατανομή του φωτισμού B ενός λαμπτήρα πυράκτωσης σε δεδομένη απόσταση r και εμμέσως από τη σχέση $I = Br^2$ τη φωτοβολία (φωτεινή ένταση) $I(\theta)$ την οποία και θα αποδώσουμε σε διάγραμμα πολικών συντεταγμέ-



Σχήμα 8. Πειραματική διάταξη

νων. Προς τούτο χρησιμοποιούμε μια γωνιομετρική τράπεζα που ενσωματώνει βραχίονα ο οποίος περιστρέφεται περί το κέντρο συμμετρίας O (Σχήμα 8). Στο άκρο του βραχίονα τοποθετούμε, κάθετα προς τη φωτεινή ροή του φωτιστικού σώματος, το φωτοστοιχείο (φωτοδίοδος) και σε συγκεκριμένη απόσταση r από αυτό. Δεδομένου ότι το φωτοστοιχείο είναι ένας φωτοηλεκτρικός μετατροπέας, μετατρέπει δηλαδή το φως που ανιχνεύει σε ηλεκτρική τάση (mV), θα πρέπει να βαθμονομηθεί κατάλληλα έτσι ώστε οι τιμές της τάσης v' αντιστοιχούν σε τιμές φωτισμού (Lux). Αυτό γίνεται ως εξής:

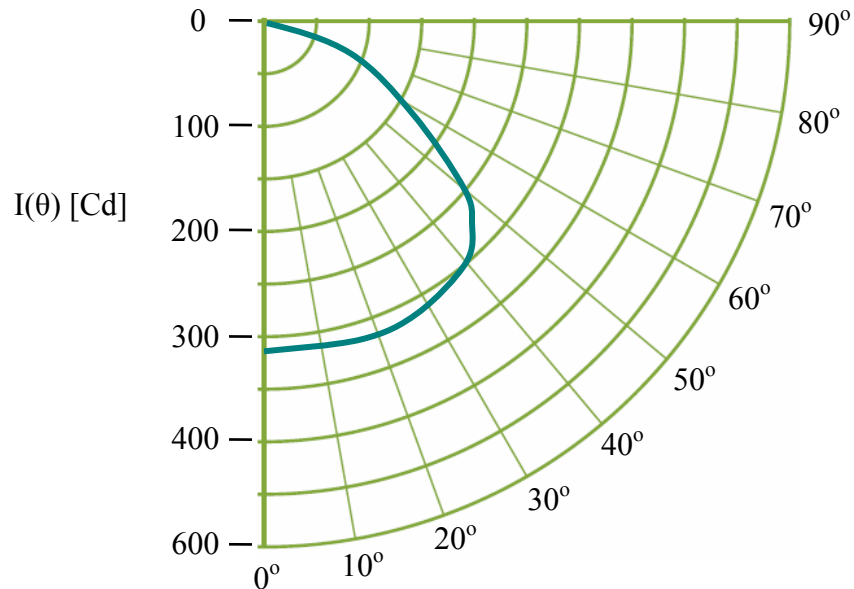
Σε διάφορες αποστάσεις από το λαμπτήρα, τοποθετούμε διαδοχικά το φωτοστοιχείο και το λουξόμετρο και παίρνουμε αντίστοιχες τιμές τάσης σε mV και φωτισμού σε Lux και κατόπιν προσδιορίζουμε από τις μέσες τιμές τους το συντελεστή αναλογίας.

Στη συνέχεια περιστρέφουμε το φωτοστοιχείο από -90° 0° $+90^\circ$ με βήμα 10° και λαμβάνουμε τις τιμές του φωτισμού. Υπολογίζουμε βάσει της Σχέσης 12 τις αντίστοιχες τιμές της φωτεινής έντασης $I(\theta)$ σε Cd.

Σημείωση: η απόσταση r μεταξύ φωτιστικού σώματος και φωτοστοιχείου θα πρέπει να δίνεται σε m.

Η γραφική απεικόνιση της φωτεινής έντασης I με το διάνυσμά της προς κάθε κατεύθυνση του χώρου διαμορφώνει μια φωτομετρική επιφάνεια η οποία περιγράφει την κατανομή της φωτεινής έντασης στο χώρο. Η τομή αυτής της επιφάνειας με ένα επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας της πηγής θα μας δώσει τη φωτομετρική καμπύλη. Η καμπύλη αυτή καλείται **διάγραμμα πολικής κατανομής της έντασης** (Σχήμα 9), επειδή δίνεται σε πολικές συντεταγμένες. Στην απεικόνιση του Σχήματος 9, παρουσιάζουμε, λόγω συμμετρίας, το πολικό διάγραμμα μόνο για ένα ημιεπίπεδο της τομής της

φωτομετρικής επιφάνειας με το επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας της πηγής. Να σημειώσουμε εδώ ότι οι κατασκευαστές φωτιστικών σωμάτων δίνουν στα πολικά διαγράμματα τη φωτεινή ένταση ανά 1000 Lumen (Cd/1000 Lm).



Σχήμα 9. Διάγραμμα πολικής κατανομής της φωτεινής έντασης (φωτοβολίας) φωτιστικού σώματος

4.1 Εργασίες

1. Αναγνωρίζουμε τα στοιχεία της διάταξης.
2. Τοποθετούμε το λαμπτήρα σε απόσταση r από τη φωτοδίοδο και τον θέτουμε σε λειτουργία. Συνδέουμε στην έξοδο της φωτοδίοδου το πολύμετρο και το ρυθμίζουμε σε λειτουργία βολτομέτρου. Βαθμονομούμε την φωτοδίοδο σύμφωνα με τις οδηγίες της προηγούμενης παραγράφου.
3. Τοποθετούμε το λαμπτήρα επάνω από τη γωνιομετρική τράπεζα και στρέφουμε το βραχίονα ο οποίος φέρει τη φωτοδίοδο, έτσι που να ευθυγραμμιστεί στις 0° . Σημειώνουμε την απόσταση r (σε m) μεταξύ φωτοδίοδου και νήματος λαμπτήρα και καταχωρούμε την τιμή στον Πίνακα 2 (Σημείωση: αν το περίβλημα του λαμπτήρα είναι ματ, τότε μετράμε την απόσταση από το περίβλημα μέχρι τη φωτοδίοδο).
4. Περιστρέφουμε το φωτοστοιχείο από -90° 0° $+90^\circ$ με βήμα 10° και λαμβάνουμε τις αντίστοιχες τιμές της τάσης V από το βολτόμετρο. Καταχωρούμε τις μετρήσεις στον Πίνακα 2 και τις μετατρέπουμε σε Lux, πολλαπλασιάζοντας επί το συντελεστή αναλογίας.
5. Από τη σχέση $I = Br^2$ υπολογίζουμε τις τιμές της φωτεινής έντασης I . Καταχωρούμε στον Πίνακα 2.

6. Χαράσσουμε την καμπύλη $I = I(\theta)$ σε χαρτί πολικών συντεταγμένων και σχολιάζουμε.

Πίνακας 2

1 mV = (Lux)		r = (m)		
A/A	θ°	V (mV)	B (Lux)	$I = Br^2$ (Cd)
1	-90			
2	-80			
3	-70			
4	-60			
5	-50			
6	-40			
7	-30			
8	-20			
9	-10			
10	0			
11	10			
12	20			
13	30			
14	40			
15	50			
16	60			
17	70			
18	80			
19	90			