

Διονύσης Μάργαρης

Φυσική

Γ' Λυκείου



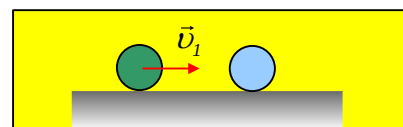
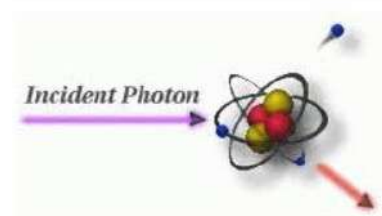
Κβαντομηχανική

Ασκήσεις Κβαντομηχανικής 2025-26

1) Φαινόμενο Compton – Ελαστική κρούση.

Ένα φωτόνιο μήκους κύματος $\lambda=1,2 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$, προσπίπτει σε ακίνητο ηλεκτρόνιο.

- i) Να υπολογιστεί η ενέργεια του φωτονίου (σε eV).
- ii) Να βρεθεί το μέγιστο δυνατό μήκος κύματος του σκεδαζόμενου φωτονίου.
- iii) Να υπολογισθεί η μέγιστη κινητική ενέργεια και η αντίστοιχη ορμή του ηλεκτρονίου, μετά την αλληλεπίδραση.



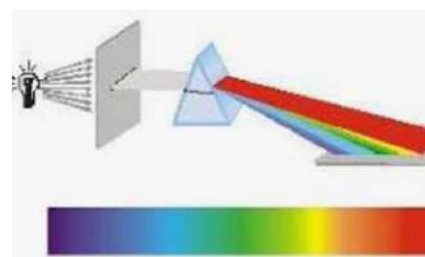
Μια σφαίρα Α μάζας $m_1=0,1 \text{ kg}$ κινείται σε λείο οριζόντιο επίπεδο, με ταχύτητα $v_1=6 \text{ m/s}$ και συγκρούεται κεντρικά και ελαστικά με δεύτερη σφαίρα Β μάζας $m_2=0,2 \text{ kg}$ η οποία είναι ακίνητη.

- iv) Να υπολογιστεί η κινητική ενέργεια της σφαίρας Β, μετά την κρούση. Η απάντηση να δοθεί σε J και σε eV. Ποιο είναι πιο βολικό αποτέλεσμα;
- v) Αν το αρχικό φωτόνιο αλληλεπιδράσει όχι με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αλλά με ένα ακίνητο ελεύθερο πρωτόνιο, τι πρόβλεψη κάνετε για την κινητική ενέργεια και την ορμή που θα αποκτήσει, συγκρίνοντας τις τιμές με αυτές του ερωτήματος iii) για το ηλεκτρόνιο; Η απάντηση να δοθεί χωρίς να προβείτε σε ακριβείς υπολογισμούς.

Δίνεται $hc=1200 \text{ eV} \cdot \text{ nm}$, $\lambda_e=h/m_e c=2,4 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ και $q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

2) Από το γραμμικό στο συνεχές φάσμα

Τα αέρια εκπέμπουν γραμμικό φάσμα, χαρακτηριστικό του στοιχείου που το εκπέμπει. Ένα απλό μοντέλο που ερμηνεύει την εκπομπή αυτή είναι το μοντέλο του Bohr.



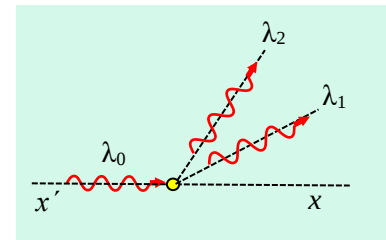
- i) Γιατί δεν ισχύει αυτό το μοντέλο για το φάσμα εκπομπής των στερεών; Γιατί αυτά εκπέμπουν συνεχή φάσματα, όταν θερμανθούν;
- ii) Στο συνεχές φάσμα των στερεών, μήπως οι συχνότητες που θα εξέπεμπε το άτομο σε αέρια φάση, τώρα θα είναι πιο έντονες; Με άλλα λόγια αν το συνεχές φάσμα μπορούσε να ερμηνευθεί με βάση το μοντέλο των επιταχυνόμενων φορτίων, τότε σε μια ορισμένη συχνότητα, έστω f_1 , θα είχαμε x φωτόνια λόγω αποδιέγερσης των ατόμων του υλικού και y φωτόνια εξαιτίας άλλων λόγων. Άρα στη συχνότητα αυτή θα είχαμε περισσότερα φωτόνια, από όσα σε μια διπλανή συχνότητα. Συνεπώς ενώ το φάσμα είναι συνεχές θα πρέπει να έχουμε πιο έντονο χρώμα στις συχνότητες της αποδιέγερσης των ατόμων

του υλικού. Είναι έτσι;

Ασκήσεις Κβαντομηχανικής 2024-25

3) Ερώτηση στο φαινόμενο Compton

Στη διεύθυνση $x'x$ διαδίδεται ένα φωτόνιο με μήκος κύματος λ_0 , το οποίο σκεδάζεται πάνω σε ένα ακίνητο και ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με αποτέλεσμα να παίρνουμε είτε το φωτόνιο (1) με μήκος κύματος λ_1 , είτε το φωτόνιο (2) με μήκος κύματος λ_2 , όπως φαίνεται στο σχήμα, ενώ το ηλεκτρόνιο αποκτά κινητική ενέργεια K_1 ή K_2 αντίστοιχα.



i) Για τα μήκη κύματος αυτά ισχύει:

$$\alpha) \lambda_1 < \lambda_2, \quad \beta) \lambda_1 = \lambda_2, \quad \gamma) \lambda_1 > \lambda_2.$$

ii) Για την κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου μετά την αλληλεπίδραση ισχύει:

$$\alpha) K_1 < K_2, \quad \beta) K_1 = K_2, \quad \gamma) K_1 > K_2.$$

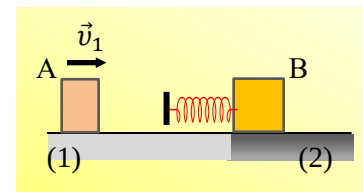
Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

4) Βρίσκοντας αναλογίες...

Ας δούμε κάποιες εφαρμογές, από διαφορετικά κεφάλαια της ύλης και ας κρατήσουμε κάποια συμπεράσματα...

Εφαρμογή 1':

Ένα σώμα Α κινείται σε λείο οριζόντιο επίπεδο (1) με ταχύτητα $v_1 = 0,5 \text{ m/s}$ κατευθυνόμενο προς ένα σώμα Β το οποίο ηρεμεί σε μη λεία περιοχή (2) του ίδιου οριζόντιου επιπέδου, με την οποία παρουσιάζει συντελεστή οριακής τριβής $\mu_s = 0,6$. Το σώμα Β έχει μάζα 2 kg ενώ ένα οριζόντιο ιδανικό ελατήριο σταθεράς $k = 400 \text{ N/m}$ έχει προσκολληθεί σε αυτό, όπως φαίνεται στο σχήμα. Το Α σώμα κινούμενο κατά μήκος του άξονα του ελατηρίου, φτάνει σε αυτό αρχίζοντας να το συμπιέζει. Δίνεται $g = 10 \text{ m/s}^2$.



α) Να εξετάσετε αν θα κινηθεί το σώμα Β.

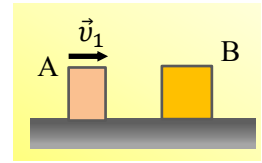
β) Ποια η τελική ταχύτητα του σώματος Α;

γ) Θα μπορούσαμε να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα με άμεση κρούση μεταξύ των δύο σωμάτων, αφαιρώντας το ελατήριο;

δ) Αν η αρχική ταχύτητα του σώματος Α ήταν 12 m/s , να εξετασθεί αν το Β σώμα θα παρέμενε ακίνητο κατά την συσπίρωση του ελατηρίου.

Εφαρμογή 2^η:

Ένα σώμα Α κινείται σε λείο οριζόντιο επίπεδο με ταχύτητα $v_1=12\text{m/s}$ κατευθυνόμενο προς ένα σώμα Β, μάζας 2kg , οπότε ακολουθεί μια κεντρική ελαστική κρούση.



- Να βρεθούν οι ταχύτητες των δύο σωμάτων μετά την κρούση.
- Ποιες οι ταχύτητες αμέσως μετά την κρούση αν τα σώματα παρουσίαζαν με το επίπεδο συντελεστή τριβή $\mu=0,6$, ενώ ελάχιστα πριν την κρούση το σώμα Α είχε ταχύτητα v_1 .

Εφαρμογή 3^η:

Μια μεταλλική επιφάνεια φωτίζεται με μονοχρωματικό φως (στο ορατό) με ενέργεια φωτονίου $E_1=3\text{eV}$. Αν το έργο εξαγωγής του υλικού της επιφάνειας είναι $\phi = 2\text{eV}$:

- Πόση είναι η ορμή του φωτονίου και πόση ορμή θα αποκτήσει ένα ακίνητο ηλεκτρόνιο της επιφάνειας μετά την απορρόφηση ενός φωτονίου;
- Πόση είναι η μέγιστη κινητική ενέργεια και η αντίστοιχη ορμή ενός ηλεκτρονίου μετά την έξοδό του από την μεταλλική επιφάνεια;

Εφαρμογή 4^η:

Στην παραπάνω επιφάνεια (εφαρμογή 3^η) προσπίπτουν ακτίνες Χ με ενέργεια φωτονίου $E_2=60\text{keV}$.

- Ποιο το μήκος κύματος των ακτίνων Χ και πόση είναι η ορμή ενός φωτονίου;
- Να υπολογιστεί το μέγιστο μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας και ποια η αντίστοιχη ορμή του φωτονίου μετά την σκέδαση;
- Ποια η μέγιστη ορμή που αποκτά το ηλεκτρόνιο και πόση είναι η κινητική του ενέργεια μετά την έξοδό του από την επιφάνεια.

5) Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο

Να χαρακτηρίσετε τις παρακάτω προτάσεις ως σωστές ή λανθασμένες, δίνοντας σύντομες δικαιολογήσεις.

Δίνονται $hc=1.200\text{eV}\cdot\text{nm}$, ενώ $h/mc\approx 10^{-3}\text{ nm}$, όπου m η μάζα του ηλεκτρονίου.

Ερώτηση 1^η:

Φωτίζουμε με μονοχρωματικό φως μήκους κύματος $\lambda_1=600\text{nm}$ μια μεταλλική επιφάνεια, οπότε εξάγονται ηλεκτρόνια. Το έργο εξαγωγής του υλικού της επιφάνειας είναι $1,5\text{eV}$.

- Αν ένα ακίνητο ηλεκτρόνιο του υλικού, απορροφήσει ένα φωτόνιο, αμέσως μετά (πριν την εξαγωγή του από το μέταλλο) θα αποκτήσει κινητική ενέργεια 2eV .
- Ένα ηλεκτρόνιο του μετάλλου απορροφά ένα φωτόνιο και εξέρχεται από την επιφάνεια με κινητική ενέργεια η οποία μπορεί να πάρει τιμή έως και $0,5\text{eV}$.
- Αν ένα ακίνητο ηλεκτρόνιο του υλικού, απορροφήσει ένα φωτόνιο, αμέσως μετά θα αποκτήσει ορμή ίση με $p=2\text{eV}/c$, όπου c η ταχύτητα του φωτός.

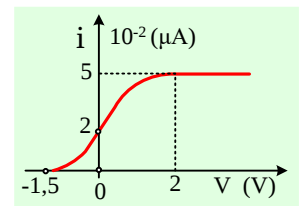
Ερώτηση 2^η:

Αν στην παραπάνω επιφάνεια πέσει ακτινοβολία ακτίνων X με μήκος κύματος $\lambda_2=0,01\text{nm}$, τότε πειραματικά διαπιστώνουμε τη σκέδαση της ακτινοβολίας σύμφωνα με το φαινόμενο Compton.

- Η κινητική ενέργεια που κερδίζει το ηλεκτρόνιο μπορεί να φτάσει τα 60.000eV .
- Το ηλεκτρόνιο που σκεδάζει ένα φωτόνιο, θεωρείται ελεύθερο.
- Αν ένα σκεδαζόμενο φωτόνιο έχει ενέργεια 110keV , τότε το ηλεκτρόνιο με το οποίο αλληλεπιδράσε, θα εξέλθει από την επιφάνεια έχοντας κινητική ενέργεια $K \approx 10\text{keV}$.

6) Ερωτήσεις στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στο διπλανό διάγραμμα δίνεται το διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση μεταξύ ανόδου-καθόδου σε ένα φωτοκύτταρο, όταν φωτίζεται από μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας f_1 , ορισμένης έντασης.

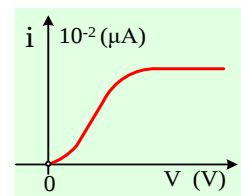
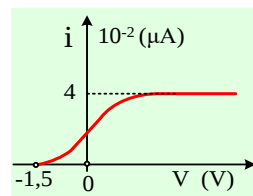
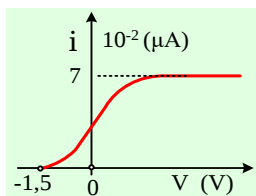
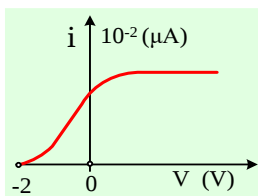


- A) Τι ποσοστό των εξερχομένων ηλεκτρονίων φτάνουν στην άνοδο, όταν δεν συνδέσουμε πηγή μεταξύ ανόδου και καθόδου;
- B) Η συχνότητα ενός φωτονίου της ακτινοβολίας που χρησιμοποιούμε μεταφέρει ενέργεια:

$$\text{i) } E_0 < 1,5\text{eV}, \quad \text{ii) } E_0 = 1,5\text{eV}, \quad \text{iii) } E_0 > 1,5\text{eV}$$

Γ) Ποια από τις παρακάτω καμπύλες θα πάρουμε αν:

- Αυξήσουμε την ένταση της ακτινοβολίας, διατηρώντας σταθερή την συχνότητά της.
- Αυξήσουμε την συχνότητα της ακτινοβολίας στην τιμή $f_2 > f_1$.
- Ελαττώσουμε την συχνότητα της ακτινοβολίας στην τιμή $f_3 < f_1$.
- Ελαττώσουμε την συχνότητα της ακτινοβολίας στην τιμή $f_4 < f_3$.



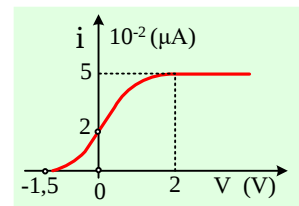
Υπόδειξη: Δεν σημαίνει ότι έχουμε αντιστοιχία 1:1 στις καμπύλες, αφού μπορεί η μορφή της καμπύλης σε κάποια περίπτωση, να μην δίνεται.

Να δικαιολογήσετε τις απαντήσεις σας.

Προηγούμενες Ασκήσεις Κβαντομηχανικής

7) Ερωτήσεις στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στο διπλανό διάγραμμα δίνεται το διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση μεταξύ ανόδου-καθόδου σε ένα φωτοκύτταρο, όταν φωτίζεται από μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας f_1 , ορισμένης έντασης.

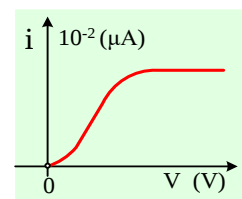
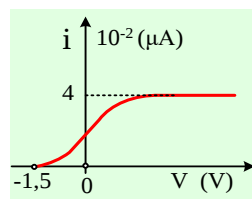
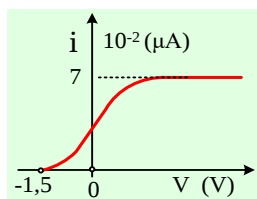
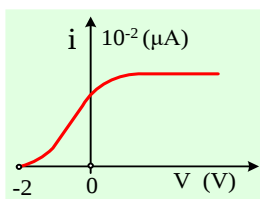


- A) Τι ποσοστό των εξερχομένων ηλεκτρονίων φτάνουν στην άνοδο, όταν δεν συνδέσουμε πηγή μεταξύ ανόδου και καθόδου;
- B) Η συχνότητα ενός φωτονίου της ακτινοβολίας που χρησιμοποιούμε μεταφέρει ενέργεια:

i) $E_0 < 1,5\text{eV}$, ii) $E_0 = 1,5\text{eV}$, iii) $E_0 > 1,5\text{eV}$

Γ) Ποια από τις παρακάτω καμπύλες θα πάρουμε αν:

- i) Αυξήσουμε την ένταση της ακτινοβολίας, διατηρώντας σταθερή την συχνότητά της.
- ii) Αυξήσουμε την συχνότητα της ακτινοβολίας στην τιμή $f_2 > f_1$.
- iii) Ελαττώσουμε την συχνότητα της ακτινοβολίας στην τιμή $f_3 < f_1$.
- iv) Ελαττώσουμε την συχνότητα της ακτινοβολίας στην τιμή $f_4 < f_3$.



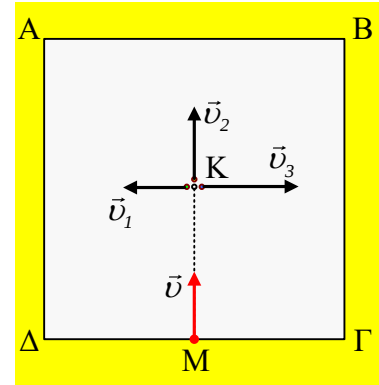
Υπόδειξη: Δεν σημαίνει ότι έχουμε αντιστοιχία 1:1 στις καμπύλες, αφού μπορεί η μορφή της καμπύλης σε κάποια περίπτωση, να μην δίνεται.

Να δικαιολογήσετε τις απαντήσεις σας.

8) Μια διάσπαση σωματιδίου σε μαγνητικό πεδίο

Στο σχήμα φαίνεται η τομή ΑΒΓΔ ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, η ένταση του οποίου είναι κάθετη στο επίπεδο της σελίδας με μέτρο $B=0,01\text{T}$, σχήματος τετραγώνου πλευράς $a=10\text{cm}$. Σε μια στιγμή ένα σωματίδιο Θ εισέρχεται με ορισμένη ταχύτητα u , κάθετα στην πλευρά ΓΔ, στο μαγνητικό πεδίο, στο μέσον της Μ. Το σωματίδιο κινείται ευθύγραμμα και μετά από λίγο φτάνει στο κέντρο Κ του τετραγώνου, όπου και διασπάται σε τρία «σωματίδια- θραύσματα» X^- , Y^+ και Z , τα οποία αποκτούν ταχύτητες u_1 , u_2 και u_3 αντίστοιχα, όπου η

v_1 και v_3 έχουν διεύθυνση παράλληλη στην πλευρά AB, ενώ η v_2 είναι κάθετη στην AB.



- i) Αν το σωματίδιο (X^-) βγαίνει από το πεδίο από την κορυφή A, κάθετα στην πλευρά AB, να βρείτε την κατεύθυνση της έντασης του πεδίου, δικαιολογώντας την απάντησή σας. Ποιο το μέτρο της ορμής του X^- κατά την κίνησή του στο πεδίο;
 - ii) Να εξηγήσετε γιατί το σωματίδιο Θ είναι αφόρτιστο.
 - iii) Αν και το σωματίδιο Y^+ εξέρχεται από ένα σημείο της πλευράς AB, να σχεδιάσετε κατ' εκτίμηση την τροχιά του. Με βάση την σχεδίαση που κάνατε, να συγκρίνετε τις ορμές των σωματιδίων X^- και Y^+ .
 - iv) Να βρείτε το σημείο εξόδου από το πεδίο για το σωματίδιο Z.
 - v) Αν το σωματίδιο Z είναι ένα φωτόνιο, να υπολογιστεί η ενέργειά του.
- Δίνεται το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο $|e|=1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{m/s}$, ενώ οι ταχύτητες όλων των σωματιδίων (εκτός των φωτονίων...) είναι πολύ μικρότερες της ταχύτητας του φωτός.

9) Η ορμή και το μήκος κύματος ηλεκτρονίου-φωτονίου

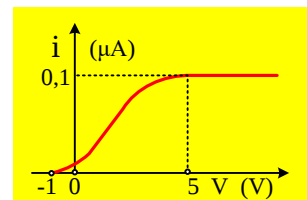
Ένα αρχικά ακίνητο ηλεκτρόνιο επιταχύνεται από τάση $V=20\text{V}$, αποκτώντας κινητική ενέργεια K_1 .

- i) Να βρεθεί η κινητική ενέργεια που αποκτά το ηλεκτρόνιο, καθώς και η τελική ταχύτητα και ορμή του.
- ii) Ποιο το μήκος κύματος de Broglie του κινούμενου ηλεκτρονίου;
- iii) Ένα φωτόνιο έχει ενέργεια ίση με την κινητική ενέργεια K_1 του ηλεκτρονίου.
 - α) Ποιο το μήκος κύματος του φωτονίου;
 - β) Να βρεθεί η ορμή του φωτονίου.
- iv) Μια σφαίρα μάζας 10g κινείται με ταχύτητα 300m/s . Να συγκριθεί η ορμή και το μήκος κύματος de Broglie της σφαίρας, με τις αντίστοιχες τιμές για το ηλεκτρόνιο και το φωτόνιο, που υπολογίσαμε προηγούμενα.

Δίνεται $q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, $m_e=9 \cdot 10^{-31} \text{kg}$, $h=6,6 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ και $c=3 \cdot 10^8 \text{m/s}$.

10) Φωτόνια και ηλεκτρόνια στο φωτοηλεκτρικό

Στο διπλανό διάγραμμα δίνεται το διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση μεταξύ ανόδου-καθόδου σε ένα φωτοκύτταρο, όπου το έργο εξαγωγής του υλικού της καθόδου είναι $\phi=2\text{eV}$, όταν φωτίζεται από μονοχρωματική ακτινοβολία.



- i) Ποια η συχνότητα της ακτινοβολίας και ποια η ενέργεια κάθε φωτονίου που πέφτει στην κάθοδο;
- ii) Να βρεθεί ο αριθμός N των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από την κάθοδο, ανά δευτερόλεπτο.
- iii) Πόση είναι η μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να έχει ένα ηλεκτρόνιο που φτάνει στην άνοδο σε

eV, όταν η τάση ανόδου καθόδου έχει την τιμή $V_1=5\text{V}$;

iv) Να υπολογιστεί ο λόγος $\frac{p_e}{p_\phi}$ όπου p_e το μέτρο της ορμής ενός ηλεκτρονίου, που φτάνει στην άνοδο όταν

η τάση ανόδου καθόδου έχει την τιμή $V_1=5\text{V}$, με την ελάχιστη ταχύτητα και p_ϕ το μέτρο της ορμής ενός φωτονίου της ακτινοβολίας που χρησιμοποιούμε.

Δίνεται το φορτίο και η μάζα του ηλεκτρονίου $q=-e=-1,6\cdot 10^{-19}\text{C}$, $m_e\approx 9\cdot 10^{-31}\text{kg}$ ενώ $h=6,6\cdot 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ και η ταχύτητα του φωτός στο κενό $c=3\cdot 10^8\text{m/s}$. Θεωρείστε επίσης ότι όλα τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την κάθοδο φτάνουν στην άνοδο, όταν η τάση ανόδου καθόδου πάρει την τιμή V_1 .

11) Φωτοηλεκτρικό και φαινόμενο Compton

Τι συμβαίνει όταν πάνω σε ένα ηλεκτρόνιο, προσπίπτει ένα φωτόνιο; Θα έχουμε απορρόφηση ή σκέδαση;

Ας δούμε το τι συμβαίνει, μέσω κάποιων εφαρμογών.

Δίνονται οι σταθερές $h=6,63\cdot 10^{-34}\text{Js}$, $c=3\cdot 10^8\text{m/s}$, $m_e=m=9,1\cdot 10^{-31}\text{kg}$, $1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{J}$.

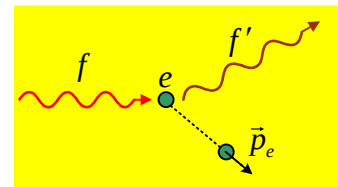
Εφαρμογή 1':

Σε ένα ελεύθερο ακίνητο ηλεκτρόνιο προσπίπτει φως με μήκος κύματος $\lambda_1=600\text{nm}$. Να εξετάσετε αν μπορεί το ηλεκτρόνιο να απορροφήσει ένα προσπίπτον φωτόνιο της ακτινοβολίας.

Εφαρμογή 2':

Ένα φωτόνιο της παραπάνω ακτινοβολίας, το οποίο δεν μπορεί να απορροφηθεί από ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, μήπως μπορεί να σκεδασθεί, σύμφωνα με το φαινόμενο Compton;

Στην περίπτωση καταφατικής απάντησης, να υπολογισθεί το μέγιστο % ποσοστό αύξησης του μήκους κύματος, μετά την σκέδαση.



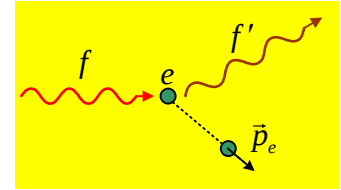
Εφαρμογή 3':

Αν αντί της παραπάνω ακτινοβολίας είχαμε ακτίνες X με ενέργεια 120keV :

- Ποιο το μήκος κύματος της ακτινοβολίας αυτής;
- Θα μπορούσαμε να είχαμε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, με την χρήση των παραπάνω ακτίνων, όπου ένα φωτόνιο απορροφάται από ένα δέσμιο ηλεκτρόνιο εντός κάποιου υλικού;
- Θα μπορούσε η απορρόφηση να γίνει από ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο του υλικού; Το ερώτημα αυτό δεν απευθύνεται σε μαθητές.

Εφαρμογή 4':

Οι παραπάνω ακτίνες X με ενέργεια 120keV, προσπίπτουν σε μια πλάκα:



α) Για να παρατηρήσουμε φαινόμενο Compton, θα πρέπει το φωτόνιο να συγκρουσθεί:

- i) Με ελεύθερα ηλεκτρόνια,
- ii) Με δεσμευμένα ηλεκτρόνια,
- iii) Δεν έχει σημασία.

β) Το ηλεκτρόνιο πριν την σκέδαση πρέπει υποχρεωτικά να είναι ακίνητο ή όχι;

β) Να υπολογισθεί το μέγιστο % ποσοστό αύξησης του μήκους κύματος, μετά την σκέδαση, πάνω σε ακίνητο ηλεκτρόνιο.

12) Κλασική θεωρία και φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

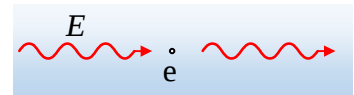
Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως ισχύος 100W, εκπέμπει μόνο το 8% σε φωτεινή (ορατή) ακτινοβολία. Δεχόμαστε ότι η εκπεμπόμενη φωτεινή ενέργεια αντιστοιχεί σε φως με μήκος κύματος $\lambda=600\text{nm}$. Ο λαμπτήρας συγκατατίθεται σε απόσταση $R=2\text{m}$, από μια μεταλλική επιφάνεια, εμβαδού $A=3,14\text{ cm}^2$, με την επιφάνεια αυτή, κάθετη στην απόσταση R .

- i) Πόση ενέργεια προσπίπτει ανά δευτερόλεπτο στην μεταλλική επιφάνεια και πόση ενέργεια μπορεί να απορροφήσει ανά δευτερόλεπτο ένα άτομο του μετάλλου, στην επιφάνεια της πλάκας, δεχόμενοι ομοιόμορφη σφαιρική εκπομπή φωτός από τον λαμπτήρα;
- ii) Με δεδομένο ότι η ενέργεια που θα απορροφήσει το άτομο, θα χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του, με αποτέλεσμα να έχουμε εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων από την μεταλλική επιφάνεια, να υπολογιστεί το χρονικό διάστημα φωτισμού του ατόμου, για να έχουμε εξαγωγή ενός ηλεκτρονίου, σύμφωνα με την κλασική θεωρία. Θεωρούμε ότι το άτομο απορροφά όλη την ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω του.
- iii) Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία το φως αποτελείται από φωτόνια. Πόσα φωτόνια προσπίπτουν στην επιφάνεια της πλάκας ανά δευτερόλεπτο; Να συγκριθεί το πλήθος των φωτονίων αυτών, με τον πληθυσμό της Γης, ο οποίος υπολογίζεται στα 8 δισεκατομμύρια.
- iv) Αφού αποδείξετε ότι το φως της παραπάνω λάμπας, μπορεί να προκαλέσει εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων από την μεταλλική πλάκα, να υπολογισθούν:
 - α) η μέγιστη κινητική ενέργεια σε eV, την οποία μπορεί να έχουν τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια.
 - β) ο χρόνος που απαιτείται να φωτισθεί η μεταλλική πλάκα, ώστε να αρχίσει η εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων.

Δίνεται το έργο εξαγωγής του μετάλλου $\phi=1,86\text{eV}$, η ατομική ακτίνα του υλικού της μεταλλικής πλάκας $r=2,6\cdot 10^{-10}\text{m}$, $h=6,63\cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$, $c=3\cdot 10^8\text{m/s}$ και $1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{J}$.

13) Ενέργειες και ορμές στο φαινόμενο Compton

- 1) Ένα φωτόνιο με ενέργεια $E=6.000\text{eV}$ προσπίπτει σε ακίνητο ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Μετά την αλληλεπίδραση φωτονίου – ηλεκτρονίου, το φωτόνιο συνεχίζει διαδιδόμενο στην ίδια διεύθυνση.

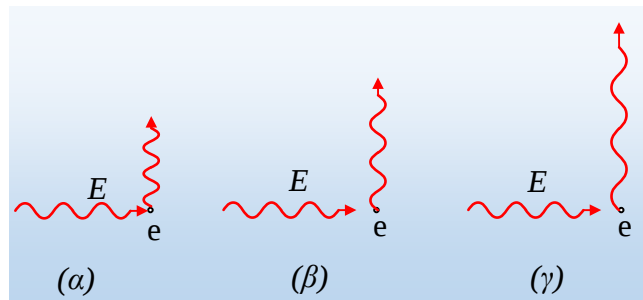


Να υπολογιστούν η ενέργεια και η ορμή φωτονίου και ηλεκτρονίου, μετά την αλληλεπίδραση.

Δίνεται $c=3\cdot 10^8\text{m/s}$.

- 2) Φωτόνια με ενέργεια $E=6.000\text{eV}$ προσπίπτουν σε ακίνητα και ελεύθερα ηλεκτρόνια.

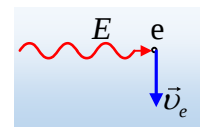
- i) Για την περίπτωση σκέδασης κατά 90° , ποιο από τα παρακάτω σχήματα, παριστάνει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, για τα σκεδαζόμενα φωτόνια;



- ii) Να υπολογιστεί η ορμή που αποκτά το ηλεκτρόνιο, πάνω στο οποίο σκεδάστηκε το παραπάνω φωτόνιο, στην αρχική διεύθυνση διάδοσης του φωτονίου.

Δίνεται $c=3\cdot 10^8\text{m/s}$.

- 3) Ένας συμμαθητής σας, στην παραπάνω αλληλεπίδραση μελέτησε, όχι την πορεία του σκεδαζόμενου φωτονίου, αλλά την διεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου και σχεδίασε το διπλανό σχήμα, όπου η ταχύτητα $\vec{v}_e$ που αποκτά το ηλεκτρόνιο είναι κάθετη στην



διεύθυνση διάδοσης του φωτονίου. Να εξετάσετε την ορθότητα ή μη του αποτελέσματος της μελέτης του.

14) Μέγιστη ενέργεια και ορμή στο φαινόμενο Compton

Μια δέσμη φωτονίων με ενέργεια 12keV σκεδάζεται από ελεύθερα ηλεκτρόνια ενός στόχου.

- Ποιο είναι το μήκος κύματος των φωτονίων της δέσμης, πριν την σκέδαση;
- Ποιο είναι το μήκος κύματος των φωτονίων που σκεδάζονται κατά γωνία 90° , σε σχέση με την αρχική τους διεύθυνση;
- Να υπολογισθεί η τελική κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου πάνω στο οποίο σκεδάστηκε ένα από τα παραπάνω φωτόνια.
- Να βρεθεί η μέγιστη ενέργεια και η αντίστοιχη ορμή που μπορεί να αποκτήσει ένα ηλεκτρόνιο, μετά από την σκέδαση της παραπάνω δέσμης φωτονίων.

Δίνονται $c=3\cdot 10^8\text{m/s}$, $h=6,6\cdot 10^{-34}\text{Js}$, $m_e=9\cdot 10^{-31}\text{kg}$ και $1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{J}$.

15) Η σκέδαση Compton και μια εφαρμογή

Ένα ηλεκτρόνιο βρίσκεται ακίνητο στην αρχή Ο ενός συστήματος ορθογωνίων αξόνων. Ένα φωτόνιο με μήκος κύματος $\lambda=0,2\text{nm}$ διαδίδεται κατά μήκος του άξονα x' και μετά την αλληλεπίδρασή του με το ηλεκτρόνιο, διαπιστώνουμε ότι το φωτόνιο αποκτά μήκος κύματος λ' και διαδίδεται όπως στο σχήμα, σχηματίζοντας γωνία φ με τον x άξονα, όπου $\eta\mu\varphi=0,8$ και $\sigma\upsilon\nu\varphi=0,6$

Ζητούνται:

- i) Η ενέργεια και η ορμή του φωτονίου που προσπίπτει στο ηλεκτρόνιο.
- ii) Η ενέργεια και η ορμή του σκεδαζόμενου φωτονίου.
- iii) Η κινητική ενέργεια που αποκτά το ηλεκτρόνιο.
- iv) Οι συνιστώσες της ορμής του ηλεκτρονίου στους δυο άξονες x και y .
- v) Η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου με τον άξονα x .

Δίνονται $c=3\cdot 10^8\text{m/s}$, $h=6,6\cdot 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$, $q_e=-1,6\cdot 10^{-19}\text{C}$, $m_e=9\cdot 10^{-31}\text{kg}$, ενώ οι ενέργειες να υπολογιστούν σε eV.

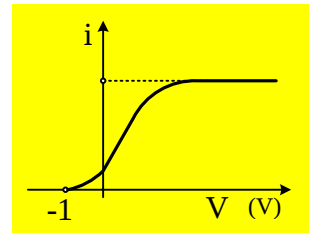
Δίνεται επίσης η εξίσωση για τα μήκη κύματος προσπίπτοντος και σκεδαζόμενου φωτονίου:

16) Αλλάζοντας το υλικό της καθόδου

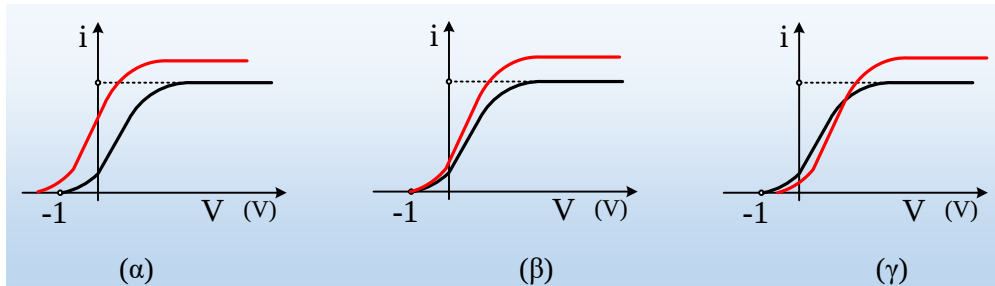
Κατά τη διάρκεια ενός πειράματος μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, κατασκευάσαμε το διάγραμμα της μέγιστης κινητικής ενέργειας των εκπεμπόμενων φωτοηλεκτρονίων σε συνάρτηση με τη συχνότητα της ακτινοβολίας που πέφτει στην κάθοδο, παίρνοντας το διπλανό διάγραμμα. Αντλώντας πληροφορίες από το διάγραμμα αυτό και γνωρίζοντας το φορτίο του ηλεκτρονίου $q_e=-1,6\cdot 10^{-19}\text{C}$, να απαντήσετε στις παρακάτω ερωτήσεις:

- i) Ποια η τάση ανακοπής για τις συχνότητες $f_1=0,5\cdot 10^{15}\text{Hz}$ και $f_2=1,2\cdot 10^{15}\text{Hz}$;
- ii) Να υπολογιστεί η σταθερά h του Planck.
- iii) Ποιο το έργο εξαγωγής του υλικού της καθόδου;
- iv) Αν αλλάξουμε την λυχνία, χρησιμοποιώντας μια άλλη όπου το υλικό της καθόδου έχει έργο εξαγωγής $\varphi_1=3,25\text{eV}$:
 - α) Να βρεθεί η πειραματική τιμή της συχνότητας κατωφλίου.
 - β) Να χαράξω

Στο διπλανό σχήμα δίνεται το διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση μεταξύ ανόδου-κάθόδου σε ένα φωτοκύτταρο, όπου φωτίζουμε την κάθοδο με την βοήθεια μιας λάμπας Α, η οποία τοποθετείται σε απόσταση d .



- i) Ποιο από τα παρακάτω διαγράμματα δίνει την μορφή της καμπύλης (κόκκινη γραμμή), στην περίπτωση που πλησιάσουμε την λάμπα σε απόσταση $d_1 < d$;

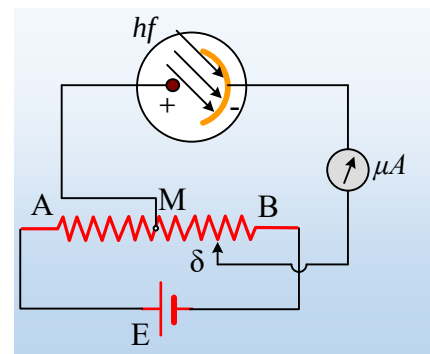


- ii) Απομακρύνουμε την λάμπα φωτισμού σε απόσταση $d_2 > d$. Να χαράξετε πάνω στο αρχικό διάγραμμα, την νέα καμπύλη $i=f(V)$.
- iii) Αλλάζουμε λάμπα φωτισμού πλησιάζοντας σε απόσταση d , μια άλλη Β η οποία εκπέμπει σε μικρότερα μήκη κύματος, στέλνοντας στην κάθοδο, τον ίδιο αριθμό φωτονίων, με την Α. Ποια θα είναι τώρα η μορφή της καμπύλης $i=f(V)$. Η νέα καμπύλη να χαραχθεί πάνω στο αρχικό διάγραμμα.
- iv) Ποια η αντίστοιχη καμπύλη αν η λάμπα Β εξέπεμπε ακτινοβολία της ίδιας έντασης με την αρχική λάμπα Α;

Θεωρούμε ότι ο αριθμός των εξερχομένων φωτοηλεκτρονίων είναι ίσος με ένα σταθερό ποσοστό του αριθμού των φωτονίων, τα οποία προσπίπτουν στην κάθοδο.

18) Ένα κύκλωμα για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στο σχήμα δίνεται μια πειραματική διάταξη για την μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, όπου $E=8V$, ενώ το ποτενσιόμετρο μήκους $(AB)=20cm$ παρουσιάζει αντίσταση $R=4\Omega$. Η φωτιζόμενη κάθοδος του αερόκενου σωλήνα συνδέεται με τον δρομέα δ , ενώ η άνοδος με το μέσον Μ του ποτενσιομέτρου. Ρίχνουμε στην κάθοδο μονοχρωματική ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda=375nm$ (στην περιοχή του υπεριώδους), με αποτέλεσμα από την κάθοδο να εξέρχονται φωτοηλεκτρόνια, ενώ ο δρομέας απέχει από το Μ απόσταση $(M\delta)=5cm$.



Δίνονται το έργο εξαγωγής του υλικού της καθόδου $\phi=2,1eV$, η ταχύτητα του φωτός στο κενό $c=3\cdot 10^8 m/s$, το φορτίο του ηλεκτρονίου $q_e=-e=-1,6\cdot 10^{-19}C$ και η σταθερά του Planck $h=6,6\cdot 10^{-34}J\cdot s$.

- i) Να υπολογίσετε την ενέργεια ενός φωτονίου της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε J και σε eV.
- ii) Ποια η μέγιστη κινητική ενέργεια, την οποία μπορεί να έχει ένα ηλεκτρόνιο, την στιγμή της εξόδου του από την κάθοδο;
- iii) Θεωρώντας αμελητέα την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το μικροαμπερόμετρο (αμελητέα σε σχέση

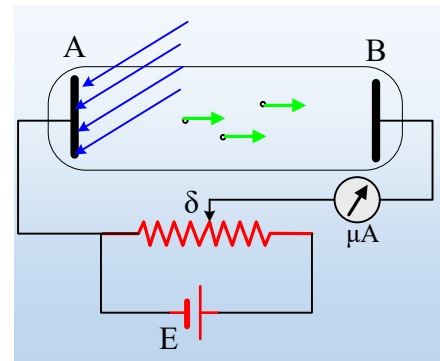
με την ένταση του ρεύματος που διαρρέει την πηγή), να βρεθεί η τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου.

- iv) Ποια η μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να έχει ένα ηλεκτρόνιο τη στιγμή που φτάνει στην άνοδο;
- v) Να βρεθεί η ελάχιστη μετακίνηση του δρομέα δ , από την προηγούμενη θέση του, ώστε το μικροαμπερόμετρο να πάψει να διαρρέεται από ρεύμα;

19) Το Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Μερικές ερωτήσεις

Μέσα σε αερόκενο σωλήνα έχουμε δύο ηλεκτρόδια, όπως στο σχήμα. Φωτίζοντας το ηλεκτρόδιο A, μπορούμε να έχουμε ρεύμα στο κύκλωμα.



- i) Πώς ονομάζονται τα δύο ηλεκτρόδια A και B;
- ii) Ρίχνοντας στο ηλεκτρόδιο A μονοχρωματικό φως έντασης I_1 με μήκος κύματος λ_1 , δεν παρατηρούμε εκπομπή φωτοηλεκτρονίων και δεν έχουμε ένδειξη ρεύματος στο μικροαμπερόμετρο. Για να έχουμε εκπομπή ηλεκτρονίων θα πρέπει:
 - α) Να αυξήσουμε την ένταση της ακτινοβολίας στην τιμή $I_2 > I_1$.
 - β) Να αυξήσουμε το μήκος κύματος του φωτός.
 - γ) Να μειώσουμε το μήκος κύματος του φωτός.
- iii) Ρίχνοντας στο ηλεκτρόδιο A μονοχρωματικό φως με μήκος κύματος λ_2 , το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα έντασης i_2 , με το δρομέα στο αριστερό άκρο του ποτενσιόμετρου.
 - α) Αν αυξήσουμε την ένταση της ακτινοβολίας, η ένταση του ρεύματος θα αυξηθεί, θα μειωθεί ή θα παραμείνει σταθερή;
 - β) Όλα τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στην άνοδο έχουν την ίδια κινητική ενέργεια ή όχι;
 - γ) Αν μετακινήσουμε τον δρομέα δ προς τα δεξιά, η ένδειξη του μικροαμπερομέτρου:
 - γ_1) Θα αυξηθεί, γ_2) θα μειωθεί, γ_3) θα παραμείνει σταθερή.
 - δ) Μπορούμε να αποκόψουμε το ρεύμα με μετακίνηση του δρομέα δ του ποτενσιόμετρου;
- iv) Φωτίζουμε την κάθοδο με φως που η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση με $2,7\text{eV}$:
 - A) Αν το έργο εξαγωγής του μετάλλου της καθόδου είναι $1,9\text{eV}$, τότε:
 - α) όλα τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την κάθοδο έχουν κινητική ενέργεια $0,8\text{eV}$.
 - β) Η μέγιστη κινητική ενέργεια των εξερχομένων ηλεκτρονίων είναι $0,8\text{eV}$.
 - γ) Η ελάχιστη κινητική ενέργεια των εξερχομένων ηλεκτρονίων είναι $0,8\text{eV}$.
 - δ) Όλα τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από την κάθοδο με κινητική ενέργεια $1,9\text{eV}$
 - B) Μετακινώντας τον δρομέα του ποτενσιόμετρου προς τα δεξιά, η μέγιστη κινητική ενέργεια με την οποία φτάνει στην άνοδο ένα ηλεκτρόνιο είναι:

α) μικρότερη από 0,8eV, β) ίση με 0,8eV, γ) μεγαλύτερη από 0,8eV.

Γ) Αλλάζουμε το υλικό της καθόδου, οπότε η τάση αποκοπής γίνεται ίση με 0,6V:

α) Τι αλλαγή πρέπει να κάνουμε στο κύκλωμα για να αποκόψουμε το ρεύμα;

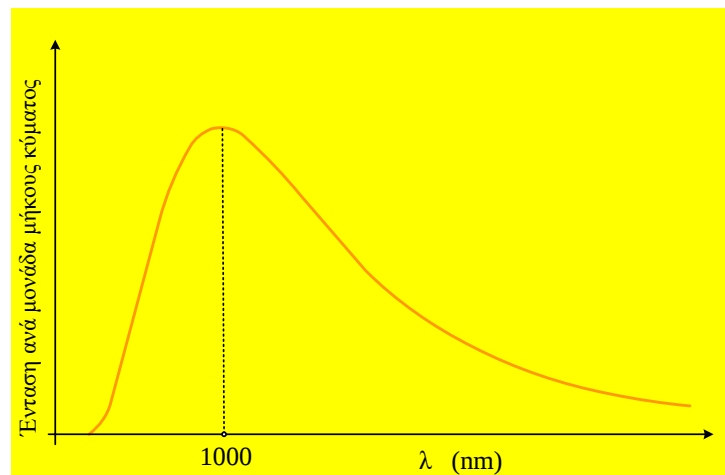
β) Πόσο είναι το έργο εξαγωγής του υλικού της καθόδου;

γ) Ποιο το μέγιστο μήκος κύματος της ακτινοβολίας για να έχουμε ένδειξη στο μικροαμπερόμετρο;

Να δικαιολογήσετε τις απαντήσεις σας.

20) Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως και ο Ήλιος μας

Διαθέτουμε ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως των 100W, (περιλαμβάνει ένα λεπτό σύρμα Βολφραμίου), ο οποίος λειτουργεί κανονικά, με θερμοκρασία σύρματος $T=3.200\text{K}$. Στο διάγραμμα φαίνεται η ένταση της ακτινοβολίας του λαμπτήρα, ανά μονάδα μήκους κύματος, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, από όπου προκύπτει ότι η μέγιστη ισχύς εκπέμπεται σε μήκος κύματος $\lambda_{\text{max}}=1.000\text{nm}$. Δεδομένου ότι το ορατό φως έχει μήκη κύματος περίπου από τα 400nm έως τα 700nm:



i) Να δικαιολογήσετε γιατί ο λαμπτήρας αυτός εκπέμπει **και** ορατό φως.

ii) Το φως του λαμπτήρα αυτού, δεν είναι «καθαρό λευκό χρώμα», αλλά έχει μια απόχρωση προς το κίτρινο.

Μπορείτε να το εξηγήσετε;

iii) Αν οι απώλειες ισχύος στον λαμπτήρα φτάνουν τα 12W, τότε η ισχύς της ορατής ακτινοβολίας που εκπέμπει ο λαμπτήρας μπορεί να είναι:

α) 5W, β) 44W, γ) 88W

iv) Χρησιμοποιώντας την παραπάνω απάντησή σας, πόσα φωτόνια φτάνουν στην ίριδα του ματιού μας, όταν στεκόμαστε σε απόσταση 2m από τον λαμπτήρα, ανά δευτερόλεπτο; Θεωρείστε ότι η επιφάνεια της ίριδας είναι 12mm^2 και ότι όλα τα φωτόνια του φωτός έχουν το ίδιο μήκος κύματος $\lambda=600\text{nm}$.

v) Αν μια μέρα έχουμε πτώση τάσεως δικτύου από τα 230V στα 160V, τι πρόκειται να παρατηρήσουμε στην λειτουργία του λαμπτήρα;

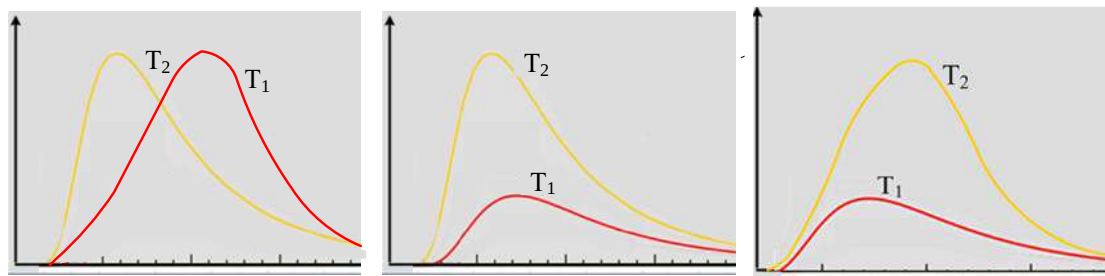
vi) Λαμβάνοντας την αντίστοιχη καμπύλη της ($I/\Delta\lambda=f(\lambda)$) για το ηλιακό φως, βρίσκουμε ότι το μέγιστο της ακτινοβολούμενης έντασης εμφανίζεται περίπου στα 550nm (η μέση τιμή των μηκών κύματος του ορατού φωτός). Θεωρώντας ότι το φως αυτό προέρχεται από την επιφάνεια του Ήλιου, μπορείτε να υπολογίσετε την επιφανειακή του θερμοκρασία;

Δίνονται η σταθερά του Planck $h=6,6 \cdot 10^{-34}$ J·s και η ταχύτητα του φωτός $c=3 \cdot 10^8$ m/s.

21) Μέλαν σώμα. Κάποιες ερωτήσεις

- 1) Χαρακτηρίσετε τις παρακάτω προτάσεις ως σωστές (Σ) ή λανθασμένες (Λ).
 - i) Μέλαν σώμα ονομάζεται ένα ιδανικό σώμα το οποίο απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του ανεξάρτητα από την συχνότητά της.
 - ii) Το μέλαν σώμα ανακλά και διαχέει την προσπίπτουσα σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
 - iii) Το μέλαν σώμα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
 - iv) Το μέλαν σώμα αποτελεί μια εξιδανίκευση αφού δεν υπάρχει σώμα, στη φύση, που να απορροφά κατά 100% την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό.
 - v) Το φάσμα εκπομπής του μέλανος σώματος είναι γραμμικό.
 - vi) Το φάσμα ενός μέλανος σώματος εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και όχι από τη χημική σύσταση ή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μέλανος σώματος.
- 2) Μια μεταλλική σφαίρα κίτρινου χρώματος, βρίσκεται πάνω στο τραπέζι, σε δωμάτιο με θερμοκρασία 20°C.
 - i) Η θερμοκρασία της σφαίρας είναι μικρότερη από την θερμοκρασία του ξύλινου τραπεζιού, αφού με επαφή με το χέρι μας, διαπιστώνουμε ότι είναι πιο κρύα.
 - ii) Αν είναι νύχτα με σβηστό το φως, δεν μπορούμε να δούμε την σφαίρα, αφού αυτή δεν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
 - iii) Την ημέρα η σφαίρα φαίνεται κίτρινη, αφού πέφτει πάνω της λευκό φως και αυτή απορροφά όλες τις ακτινοβολίες, εκτός της κίτρινης που αντανακλά.
- 3) Ποιες προτάσεις είναι σωστές για την παραπάνω σφαίρα:
 - i) Αν η σφαίρα φωτίζεται με λευκό φως, θα απορροφά ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία της, ενώ η θερμοκρασία του δωματίου παραμένει σταθερή στους 20°C.
 - ii) Η σφαίρα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μεγάλα μήκη κύματος, τα οποία δεν γίνονται αντιληπτά από το μάτι μας, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να την δούμε την νύχτα, αλλά έτσι χάνει ενέργεια και η θερμοκρασία της μειώνεται.
 - iii) Αν αυξήσουμε την θερμοκρασία της σφαίρας (την βάλουμε για λίγη ώρα στο τζάκι του διπλανού δωματίου και την επιστρέψουμε στο σκοτεινό μας δωμάτιο), τότε μπορούμε να την δούμε και ας είναι σκοτάδι.
 - iv) Αυξάνοντας την θερμοκρασία της σφαίρας, πρώτα φαίνεται λευκή και στη συνέχεια κοκκινίζει.
 - v) Αν την παραπάνω σφαίρα την «βάψουμε» μαύρη, βάζοντάς την στο τζάκι που καπνίζει, τότε συμπεριφέρεται σαν μέλαν σώμα και απορροφά όλες τις ακτινοβολίες.
 - vi) Στην παραπάνω περίπτωση εκπέμπει φως στην περιοχή του μαύρου και γι' αυτό αποκτά και μαύρο χρώμα.

4) Δίνονται τρία διαγράμματα της έντασης της ακτινοβολίας ανά μονάδα μήκους κύματος, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος, για δύο θερμοκρασίες $T_2 > T_1$ για ένα μέλαν σώμα.



- i) Ποιο διάγραμμα είναι το σωστό; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας, εξηγώντας και γιατί απορρίπτετε τα άλλα δυο.
- ii) Αν το σώμα στην θερμοκρασία T_1 παρουσιάζει κόκκινο χρώμα, τι απόχρωση μπορεί να έχει στην θερμοκρασία T_2 ;

22) Το κύμα, το κυματοπακέτο και το σωματίο

Στο παρελθόν είχε συζητηθεί στο δίκτυο το θέμα του «μονοχρωματικού κύματος» και αν αυτό διαδίδεται ή καλύπτει το χώρο από το $-\infty$ έως το $+\infty$. Μια σχετικά πρόσφατη τοποθέτησή μου, στο γιατί πρέπει να διδάσκουμε την διάδοση ενός τέτοιου κύματος, μπορείτε να διαβάσετε [εδώ](#). Οπότε ας αφήσουμε την διδασκαλία των κυμάτων... τα οποία επιστρέφουν στην ύλη (αλήθεια γιατί φύγανε και γιατί επιστρέφουν;) και ας πάμε παρακάτω...

Η ένδειξη ότι η ύλη συμπεριφέρεται σαν κύμα είναι πολύ ισχυρή, αλλά και η ένδειξη ότι συμπεριφέρεται και σαν σωματίο, είναι επίσης πολύ ισχυρή. Αλλά τότε πώς μπορούμε να προσεγγίσουμε τις δύο αυτές «πραγματικότητες»;

.....

dmargaris@gmail.com