

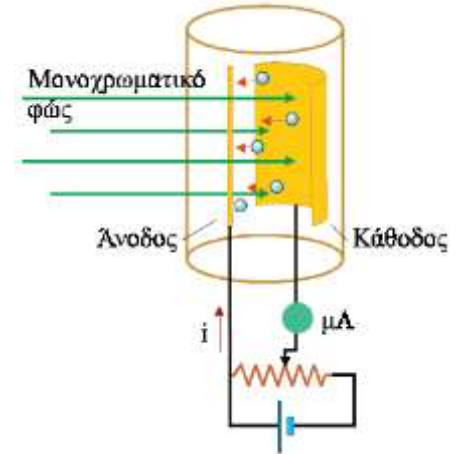
7.3 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται η εκπομπή ηλεκτρονίων από μια μεταλλική επιφάνεια, όταν πάνω της προσπέσει φως.

Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται ονομάζονται **φωτοηλεκτρόνια**.

Πειραματική Διάταξη

- Φωτοκύτταρο υψηλού κενού ($\sim 10^{-7}$ atm)
- **Κάθοδος:** Επικαλυμμένη με αλκαλιμέταλλο (K, Cs) \rightarrow εκπέμπει ηλεκτρόνια όταν φωτίζεται
- **Άνοδος:** Συλλέγει τα φωτοηλεκτρόνια
- Ποτενσιόμετρο \rightarrow μεταβολή τάσης
- Μικροαμπερόμετρο \rightarrow μέτρηση ρεύματος



Πειραματικά Συμπεράσματα

1. **Υπαρξη συχνότητας κατωφλίου (f_0)**
 - Εκπομπή συμβαίνει **μόνο** αν η συχνότητα είναι $f \geq f_0$
 - Η f_0 είναι χαρακτηριστική για κάθε μέταλλο
2. **Η ένταση του φωτός επηρεάζει τον αριθμό ηλεκτρονίων**
 - Ο αριθμός φωτοηλεκτρονίων είναι ανάλογος της έντασης
3. **Η ταχύτητα (κινητική ενέργεια) εξαρτάται από τη συχνότητα**
 - Ανεξάρτητη από την ένταση
 - Αυξάνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα

Αδυναμία Κλασικής Ερμηνείας

Η κλασική θεωρία (κυματική φύση φωτός) δεν μπορούσε να εξηγήσει:

- Γιατί η κινητική ενέργεια εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα
- Γιατί υπάρχει συχνότητα κατωφλίου
- Γιατί η ένταση επηρεάζει μόνο τον αριθμό ηλεκτρονίων

Η Ερμηνεία του Einstein (1905)

Ο Einstein επέκτεινε την ιδέα του Planck:

Το φως αποτελείται από διακριτά «πακέτα» ενέργειας, τα φωτόνια

Ενέργεια φωτονίου: $E = h \cdot f$

- **h**: σταθερά Planck
- **f**: συχνότητα

Φωτοηλεκτρική Εξίσωση του Einstein $K = hf - \phi$

- **K**: Κινητική ενέργεια φωτοηλεκτρονίου
- **hf**: Ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου
- **φ**: Έργο εξαγωγής (ελάχιστη ενέργεια για να εξέλθει ηλεκτρόνιο)

Ερμηνεία Πειραματικών Δεδομένων

Συχνότητα κατωφλίου (f_0)

Για να εξέλθει ηλεκτρόνιο: $hf \geq \phi \Rightarrow f \geq \phi/h$ Άρα: $f_0 = \phi/h$

Ρόλος έντασης

- Η ένταση καθορίζει τον **αριθμό φωτονίων**
- Περισσότερα φωτόνια → περισσότερα ηλεκτρόνια

Ρόλος συχνότητας

- Η συχνότητα καθορίζει την **ενέργεια κάθε φωτονίου**
- Μεγαλύτερη f → μεγαλύτερη κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων

Τάση Αποκοπής (V_0)

- Είναι η αρνητική τάση όπου μηδενίζεται το φωτορεύμα
- Αντιστοιχεί στη μέγιστη κινητική ενέργεια: $K_{\max} = e \cdot V_0$

Ορμή Φωτονίου

Το φωτόνιο έχει μηδενική μάζα ηρεμίας αλλά μεταφέρει ορμή: $p=h/\lambda$

Σημασία: Η σχέση συνδέει:

- Σωματιδιακή ιδιότητα: **ορμή (p)**
- Κυματική ιδιότητα: **μήκος κύματος (λ)**
- Σύνδεσμος: **σταθερά Planck (h)**

Δυαδική Φύση του Φωτός

- **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:** Το φως συμπεριφέρεται ως **σωματίδιο** (φωτόνιο)
- **Συμβολή - Περίθλαση:** Το φως συμπεριφέρεται ως **κύμα**

Το φως έχει **διπλή φύση**: κυματική και σωματιδιακή

Σύνοψη - Βασικές Σχέσεις

Μέγεθος

Σχέση

Ενέργεια φωτονίου

$$E=hf=hc/\lambda$$

Φωτοηλεκτρική εξίσωση

$$K=hf-\phi$$

Συχνότητα κατωφλίου

$$f_0=\phi/h$$

Ορμή φωτονίου

$$p=h/\lambda$$

Τάση αποκοπής

$$eV_0=K_{\max}$$

Παρατήρηση

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο **απέδειξε πειραματικά** την ύπαρξη των φωτονίων και επιβεβαίωσε την κβαντική φύση του φωτός.

Ο Einstein βραβεύτηκε με Νόμπελ το 1921 γι' αυτή του την εργασία.

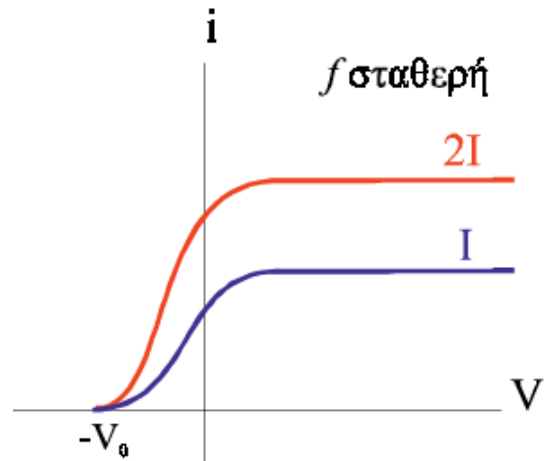
Γραφικές Παραστάσεις στο Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

1. Ρεύμα – Τάση (I - V)

Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοκύτταρου

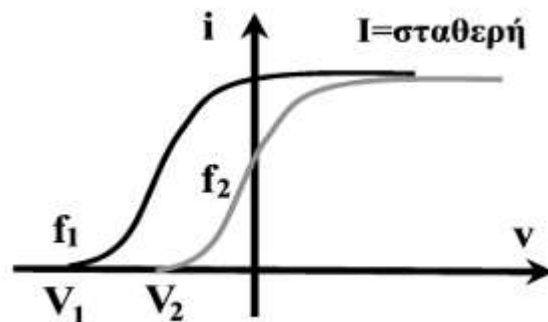
Παρατηρήσεις:

- V_0 (τάση αποκοπής): Η τάση όπου μηδενίζεται το ρεύμα
- Για $V = 0$ → έχουμε ρεύμα (τα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο με αρχική κινητική ενέργεια)
- Για αρνητικές τάσεις ($V < 0$) → το πεδίο είναι ανασχετικό
- Κόρος (κορεσμός) → όταν όλα τα φωτοηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο
- Η τάση αποκοπής V_0 **δεν αλλάζει** με την ένταση



Επίδραση συχνότητας

Η τάση αποκοπής **αυξάνεται** με τη συχνότητα.



2. Κινητική Ενέργεια – Συχνότητα (K - f)

Γραφική παράσταση της φωτοηλεκτρικής εξίσωσης

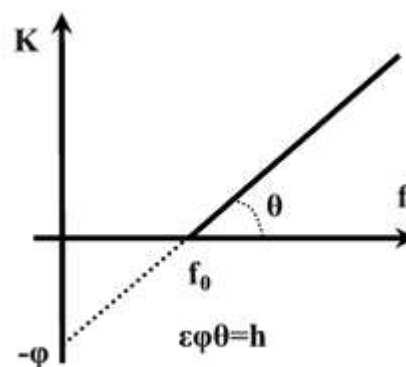
$$K = hf - \phi$$

Χαρακτηριστικά:

- **Κλίση ευθείας:** κλίση=h (σταθερά Planck)
- Η ευθεία **δεν περνά από το (0,0)**. Για $f < f_0$, $K = 0$ (δεν εκπέμπονται ηλεκτρόνια)

Από τη γραφική παράσταση K - f μπορούμε να υπολογίσουμε:

1. **Τη σταθερά Planck (h)** → από την κλίση
2. **Το έργο εξαγωγής (φ)** → από την τομή με τον άξονα f (f_0) ή από την προέκταση προς τα πίσω



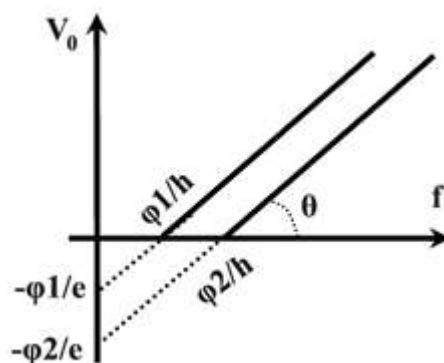
3. Τάση Αποκοπής – Συχνότητα (V₀ - f)

Από $K_{\max} = eV_0$ και $K_{\max} = hf - \phi$:

$$eV_0 = hf - \phi \Rightarrow V_0 = hf/e - \phi/e$$

Χαρακτηριστικά:

- **Κλίση ευθείας:** h/e



Βασικές Παρατηρήσεις

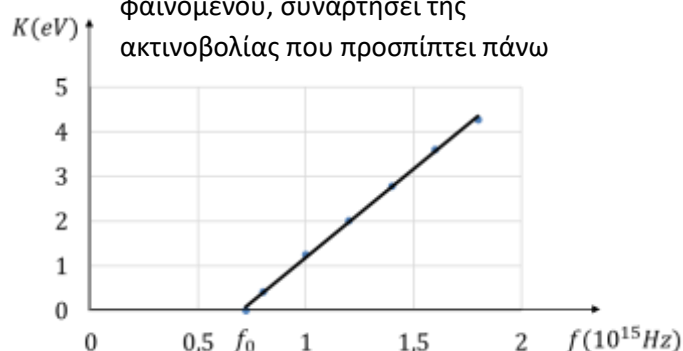
1. Όλες οι ευθείες K-f για διαφορετικά μέταλλα είναι παράλληλες (ίδια κλίση = h)
2. Η σταθερά Planck (h) υπολογίζεται από την κλίση οποιασδήποτε από αυτές τις γραφικές παραστάσεις
3. Το έργο εξαγωγής (φ) είναι χαρακτηριστικό του μετάλλου και καθορίζει τη συχνότητα κατωφλίου
4. Η τάση αποκοπής V₀ είναι μέτρο της μέγιστης κινητικής ενέργειας των φωτοηλεκτρονίων

ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

1. Μια πηγή φωτός μήκους κύματος λ φωτίζει ένα μέταλλο από το οποίο εξέρχονται φωτοηλεκτρόνια με μέγιστη κινητική ενέργεια 1 eV . Μια δεύτερη πηγή φωτός με μήκος κύματος $\frac{\lambda}{2}$, όταν φωτίζει το ίδιο μέταλλο προκαλεί την εκπομπή φωτοηλεκτρονίων μέγιστης κινητικής ενέργειας 4 eV . Το έργο εξαγωγής φ του μετάλλου είναι:

- (α) 3 eV , (β) 2 eV , (γ) 4 eV

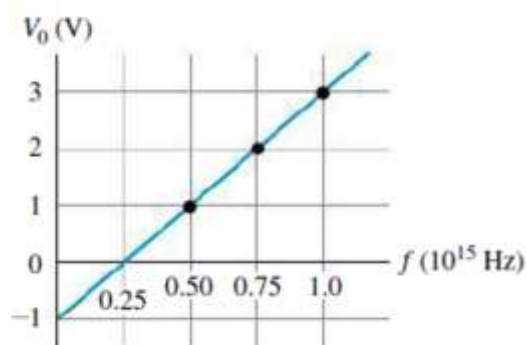
2. Με τη χρήση πειραματικών δεδομένων έχει βρεθεί ότι η σχέση της (μέγιστης) κινητικής ενέργειας K των φωτοηλεκτρονίων που βγαίνουν από το μέταλλο της καθόδου, κατά τη διάρκεια του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, συναρτήσει της συχνότητας f της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στο μέταλλο της καθόδου, είναι γραμμική για $f \geq f_0$, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η συχνότητα f_0 είναι η συχνότητα κατωφλίου για το συγκεκριμένο μέταλλο.



Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, η κλίση της γραφικής παράστασης κινητικής ενέργειας-συχνότητας ($K - f$) για $f \geq f_0$, είναι ίση με:

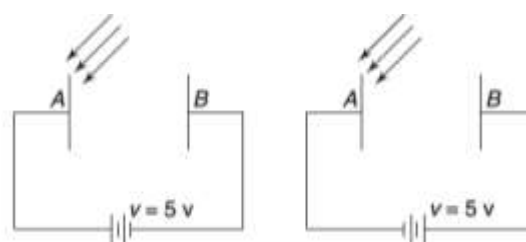
- (α) τη σταθερά του Planck, h (β) το έργο εξαγωγής, φ (γ) την τάση αποκοπής, V_0

3. Η φωτοηλεκτρική εξίσωση $eV_0 = hf - \varphi$ δείχνει ότι το δυναμικό αποκοπής V_0 αυξάνεται όταν αυξάνει η συχνότητα των φωτονίων f . Ένας τρόπος υπολογισμού της σταθεράς h του Planck είναι μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η παρακάτω γραφική παράσταση απεικονίζει τα πειραματικά δεδομένα (μαύρες τελείες) από ένα πείραμα μέτρησης του δυναμικού αποκοπής για διάφορες τιμές της συχνότητας f και την καλύτερα προσαρμοσμένη ευθεία στα σημεία αυτά. Το υλικό της καθόδου ήταν διαρκώς το ίδιο. Έχοντας ως δεδομένο ότι το 1909 ο Robert Millikan με ένα ευρηματικό πείραμα βρήκε ότι το φορτίο του ηλεκτρονίου έχει απόλυτη τιμή $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, η τιμή της σταθεράς του Planck που προκύπτει από αυτά τα πειραματικά δεδομένα είναι:



- (α) $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (β) $h = 6,8 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (γ) $h = 6,4 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

4. Σε ένα πείραμα με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, μία μονοχρωματική ακτίνα φωτός προσπίπτει σε μία μεταλλική πλάκα A όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρήθηκε ότι όταν η τάση ήταν $V = 5 \text{ V}$, με την πολικότητα που φαίνεται στο σχήμα αριστερά, η μέγιστη κινητική ενέργεια των



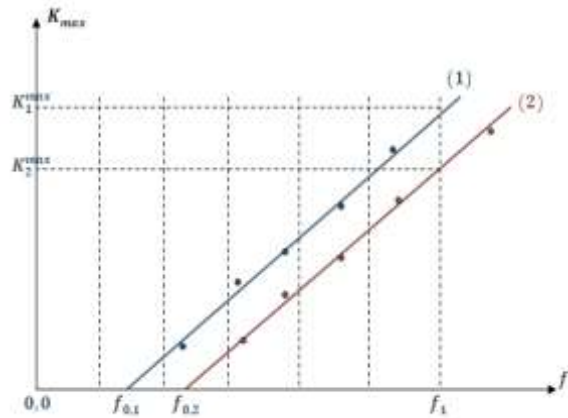
φωτοηλεκτρονίων που χτυπούσαν στην πλάκα Β ήταν 1eV. Όταν αντιστράφηκε η πολικότητα της πηγής και διπλασιάστηκε η συχνότητα των φωτονίων που προσπίπτουν στην μεταλλική πλάκα Α, παρατηρήθηκε ότι η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που χτυπούσαν την πλάκα Β ήταν μεταξύ 5eV και 20eV. Με βάση αυτά τα δεδομένα, το έργο εξαγωγής του μετάλλου στην πλάκα Α είναι:

- (α) $\phi = 3\text{eV}$ (β) $\phi = 1\text{eV}$ (γ) $\phi = 5\text{eV}$

5. Όταν φωτεινή ακτινοβολία προσπίπτει σε μεταλλική επιφάνεια, εκπέμπονται από αυτή φωτοηλεκτρόνια με κινητική ενέργεια K . Εάν η ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην ίδια μεταλλική επιφάνεια αυξηθεί κατά 25%, τότε η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται από αυτή αυξάνεται κατά 50%. Το έργο εξαγωγής ϕ , του μετάλλου αυτού είναι:

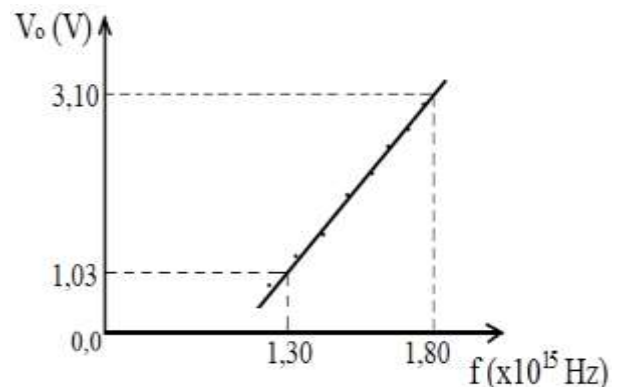
- (α) $\phi = K$, (β) $\phi = 2K$, (γ) $\phi = K/2$

6. Στο διπλανό σχήμα, απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα, οι γραφικές παραστάσεις μέγιστης κινητικής ενέργειας εξερχόμενων ηλεκτρονίων, σε συνάρτηση με τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, για δύο διαφορετικά πειράματα φωτοηλεκτρικού φαινομένου που πραγματοποιήθηκαν με δύο λυχνίες οι οποίες έχουν διαφορετικό μέταλλο καθόδου. Πειραματικά προσδιορίσαμε ότι για τις συχνότητες κατωφλίου των δύο λυχνιών ισχύει η σχέση $f_{0,2} = 1,5 \cdot f_{0,1}$. Για μια συχνότητα f_1 μεγαλύτερη και από τις δύο συχνότητες κατωφλίου, ίδια και στα δύο πειράματα, οι μέγιστες κινητικές ενέργειες ηλεκτρονίων είναι K_1^{max} , K_2^{max} αντίστοιχα. Αν δίνεται ότι $f_1 = 4 \cdot f_{0,1}$, τότε ισχύει:



- (α) $\frac{K_1^{max}}{K_2^{max}} = 1,2$, (β) $\frac{K_1^{max}}{K_2^{max}} = 4$, (γ) $\frac{K_1^{max}}{K_2^{max}} = 1,5$

7. Κατά τη διάρκεια ενός πειράματος μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, πήραμε τη γραφική παράσταση της τάσης αποκοπής V_0 σε συνάρτηση με τη συχνότητα της ακτινοβολίας f που προσπίπτει στην κάθοδο, όπως φαίνεται στο διάγραμμα.



4.1. Από τη μελέτη του διαγράμματος να γράψετε την εξίσωση της τάσης αποκοπής V_0 σε συνάρτηση με τη συχνότητα της ακτινοβολίας f . Ακολουθώντας, να αποδείξετε ότι η τιμή της σταθεράς του Planck είναι $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

4.2. Να υπολογίσετε το έργο εξαγωγής του μετάλλου της επίστρωσης της επιφάνειας της καθόδου και τη συχνότητα κατωφλίου.

Δέσμη φωτονίων μονοχρωματικής ακτινοβολίας μήκους κύματος λ , προσπίπτει σε στόχο από γραφίτη και σκεδάζεται. Ανιχνεύοντας τα φωτόνια που σκεδάζονται υπό γωνία $\varphi = 120^\circ$ σε σχέση με την αρχική κατεύθυνση κίνησης της δέσμης, διαπιστώνουμε ότι το μήκος κύματός τους έχει μεταβληθεί κατά 20%. Να υπολογίσετε:

4.3. το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας δέσμης φωτονίων.

4.4. την κινητική ενέργεια του ανακρουόμενου ηλεκτρονίου.

Δίνονται: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$, $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. $\sin 120^\circ = -\frac{1}{2}$.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της άσκησης να υπολογιστούν με προσέγγιση δύο δεκαδικών ψηφίων.

8. Μια μεταλλική επιφάνεια φωτίζεται με φως μήκους κύματος $\lambda_1 = 331,5 \text{ nm}$ και εκπέμπει φωτοηλεκτρόνια για τα οποία η τάση αποκοπής είναι $V_1 = 0,75 \text{ eV}$.

Δίνονται: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$ και $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

4.1. Να υπολογίσετε την κινητική ενέργεια με την οποία εγκαταλείπουν το μέταλλο τα φωτοηλεκτρόνια και το έργο εξαγωγής του μετάλλου.

4.2. Να υπολογίσετε τη συχνότητα κατωφλίου f_0 . Αν πέσει στη μεταλλική επιφάνεια φως μήκους κύματος

$\lambda_2 = 600 \text{ nm}$ θα εξέλθουν φωτοηλεκτρόνια από το μέταλλο;

9. Σε μια πειραματική διάταξη για την μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, χρησιμοποιείται πηγή μονοχρωματικής ακτινοβολίας που εκπέμπει φωτόνια συχνότητας $f = 10^{16} \text{ Hz}$. Τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την κάθοδο κινούνται προς την άνοδο και φθάνουν σε αυτή με κινητική ενέργεια $K_2 = 101K_1$ ως προς αυτήν που είχαν κατά την έξοδό τους από την κάθοδο. Το έργο εξόδου είναι $\varphi = 1,4 \text{ eV}$. Να υπολογίσετε:

4.1. Την τάση αποκοπής του φωτορεύματος στο κύκλωμα.

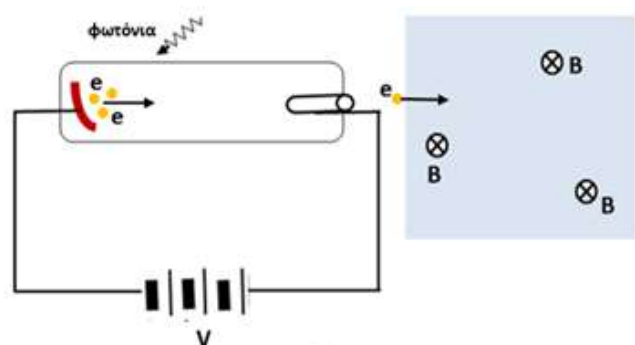
4.2. Την διαφορά δυναμικού ανόδου-καθόδου που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια.

Τα ηλεκτρόνια που φθάνουν στην άνοδο διέρχονται από σπή και με την βοήθεια πετάσματος επιλέγονται μόνο εκείνα που κινούνται ευθύγραμμα και οριζόντια. Από εκεί οδηγούνται σε μαγνητικό πεδίο στις δυναμικές γραμμές του οποίου εισέρχονται κάθετα και εκτελούν κυκλική κίνηση με περίοδο $T = 10^{-7} \text{ s}$.

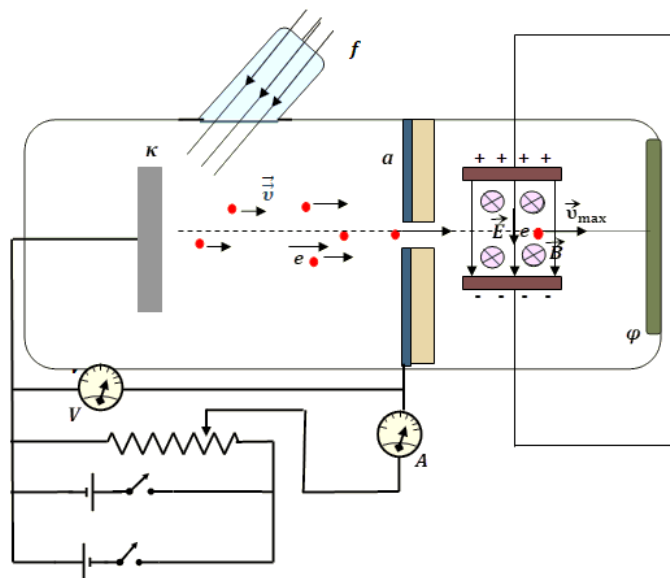
4.3. Να υπολογίσετε την ακτίνα της κυκλικής τους τροχιάς.

4.4. Να υπολογίσετε την ένταση ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου που πρέπει να εφαρμόσουμε κατάλληλα ώστε τα ηλεκτρόνια να κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά.

Δίνεται $\sqrt{1,42 \cdot 10^{15}} \approx 37,7 \cdot 10^6$ Για τις τιμές των φυσικών σταθερών να συμβουλευτείτε το τυπολόγιο που σας δίνεται κατά την εξέταση.



10. Στο σωλήνα υψηλού κενού, μιας συσκευής μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, το μέταλλο της καθόδου (κ) φωτίζεται με ακτινοβολία από κατάλληλο παράθυρο. Η άνοδος (α), είναι μια επίπεδη μεταλλική επιφάνεια με κατάλληλη οπή στο κέντρο της από την οποία διέρχεται η δέσμη των ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια που περνούν στο χώρο πίσω από την άνοδο δεν επηρεάζονται καθόλου από το ηλεκτρικό πεδίο που επικρατεί μεταξύ άνοδος και καθόδου της συσκευής.

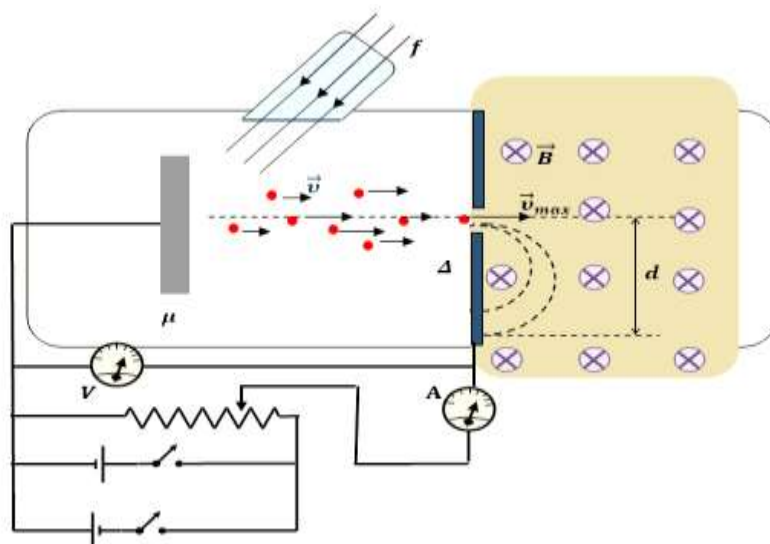


Η δέσμη των ηλεκτρονίων μετά την άνοδο, περνάει από την περιοχή μεταξύ δύο οριζόντιων φορτισμένων μεταλλικών πλακών (σχήμα) που παράγουν ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E} , παράλληλο στην επιφάνεια της άνοδος και κάθετο στην διεύθυνση κίνησης της δέσμης των ηλεκτρονίων. Στην ίδια περιοχή έχουμε δημιουργήσει ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} , το μέτρο της οποίας μπορούμε να μεταβάλλουμε. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετη στην δέσμη των ηλεκτρονίων αλλά και στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου, έτσι ώστε η δύναμη Lorentz (\vec{F}_L) που δέχονται τα ηλεκτρόνια από αυτό, να είναι αντίθετης κατεύθυνσης από την δύναμη ($\vec{F}_{\eta\lambda}$) που δέχονται από το ηλεκτρικό πεδίο. Τα δύο πεδία ισοδυναμούν με ένα «φίλτρο ταχυτήτων», αφού επιτρέπουν την ευθύγραμμη διάδοση μόνο εκείνων των ηλεκτρονίων που έχουν ορισμένη ταχύτητα. Στο δεξιό άκρο του αερόκενου σωλήνα, έχουμε στρώσει φωτογραφικό φιλμ (φ), στο οποίο τα ηλεκτρόνια αφήνουν ίχнос.

Φωτίσαμε το μέταλλο της καθόδου με ακτινοβολία συχνότητας $f = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο φίλτρο ταχυτήτων έχει μέτρο $E = 3,2 \cdot 10^3 \frac{N}{C}$, βρήκαμε ότι το ελάχιστο μέτρο της έντασης μαγνητικού πεδίου στην ίδια περιοχή, για την οποία ηλεκτρόνια περνούν ανεπηρέαστα προς τη φωτογραφική επιφάνεια φ , είναι $B_{min} = 3$ mT. ($m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

- 4.1** Να υπολογίσετε σε eV, τη μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από το μέταλλο της καθόδου, για τη συγκεκριμένη συχνότητα ακτινοβολίας.
- 4.2.** Αν δίνεται ότι η συχνότητα κατωφλίου για το μέταλλο της καθόδου είναι $f_0 = 7 \cdot 10^{14}$ Hz, να υπολογίσετε τη σταθερά δράσης του Planck, όπως αυτή προσδιορίζεται από τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος.
- 4.3.** Χρησιμοποιώντας για τη σταθερά Planck, την τιμή που προσδιορίσατε στο προηγούμενο ερώτημα, να υπολογίσετε σε eV το έργο εξαγωγής φ του μετάλλου της καθόδου.
- 4.4.** Για τη συχνότητα ακτινοβολίας $f = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz, που χρησιμοποιήσαμε στο παραπάνω πείραμα, να υπολογίσετε την τάση αποκοπής.

11. Με τη βοήθεια μιας συσκευής παρατήρησης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, δημιουργήσαμε μια πειραματική διάταξη μέτρησης της σταθεράς δράσης του Planck (h), η οποία φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η κάθοδος αποτελείται από μέταλλο (μ), με άγνωστο έργο εξαγωγής (φ) και φωτίζεται κατάλληλα μέσω παραθύρου εισόδου του φωτός. Η άνοδος είναι μια μεταλλική επίπεδη επιφάνεια με οπή σε κατάλληλη θέση, ώστε να περνά μια δέσμη ηλεκτρονίων που κατευθύνονται προς αυτή από την κάθοδο, όταν συμβαίνει φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στο χώρο πίσω από την κάθοδο μπορεί να ενεργοποιείται ομογενές μαγνητικό πεδίο, κάθετο στη δέσμη των ηλεκτρονίων, παράλληλο με την επιφάνεια



της ανόδου, το οποίο δεν επηρεάζει την κίνηση των ηλεκτρονίων στο χώρο μεταξύ καθόδου και ανόδου, όταν ενεργοποιείται, όπως στο σχήμα. Επίσης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κίνηση των ηλεκτρονίων, μέσα στο μαγνητικό πεδίο πίσω από την επιφάνεια της ανόδου, δεν επηρεάζεται καθόλου από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ανόδου-καθόδου. Με τη βοήθεια της διάταξης, βρήκαμε ότι η συχνότητα κατωφλίου είναι $f_0 = 7 \cdot 10^{14}$ Hz. Όταν η κάθοδος φωτίζεται με μονοχρωματικό υπεριώδες φως, συχνότητας $f = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz, δημιουργείται δέσμη ηλεκτρονίων και αν ενεργοποιήσουμε το μαγνητικό πεδίο, χωρίς να εφαρμόσουμε εξωτερική τάση μεταξύ ανόδου-καθόδου, τα ηλεκτρόνια εκτελούν ημικυκλικές τροχιές στο χώρο του μαγνητικού πεδίου και αφήνουν στίγματα σε κατάλληλο υλικό το οποίο αποτελεί την πίσω επιφάνεια της ανόδου. Η μέγιστη διάμετρος που καταγράψαμε στη διάρκεια του πειράματος για τις τροχιές αυτές, είναι $d = 4$ mm, όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου ήταν $B = 3$ mT. ($q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg).

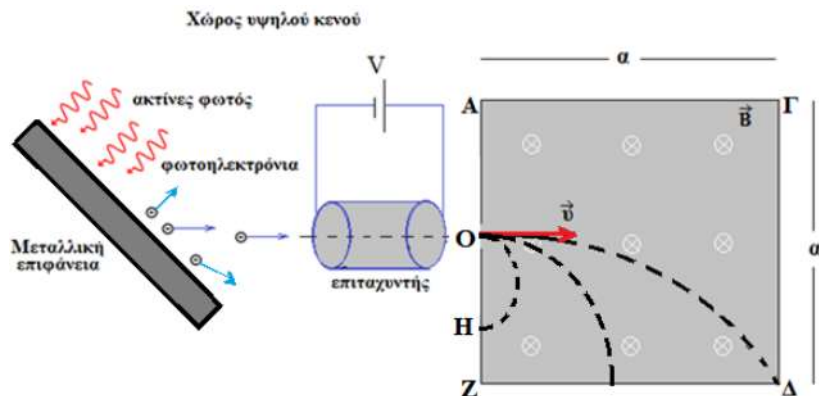
4.1. Να υπολογίσετε σε eV τη μέγιστη κινητική ενέργεια των εξερχόμενων ηλεκτρονίων για τη συχνότητα f του φωτός με το οποίο φωτίζεται το μέταλλο της καθόδου.

4.2. Από τα δεδομένα του πειράματος να υπολογίσετε τη σταθερά του Planck σε μονάδες eV · s, αλλά και J · s.

4.3. Να υπολογίσετε το έργο εξαγωγής φ σε eV, από την επιφάνεια του μετάλλου της καθόδου, χρησιμοποιώντας για τη σταθερά του Planck, την τιμή που υπολογίσατε στο προηγούμενο ερώτημα.

4.4. Να υπολογίσετε την τάση αποκοπής για την συχνότητα f με την οποία φωτίζεται το μέταλλο της καθόδου.

12. Στο σχήμα απεικονίζεται μια μεταλλική επιφάνεια που βρίσκεται σε χώρο όπου έχουμε υψηλό κενό. Πάνω σε αυτή προσπίπτει μονοχρωματική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθορισμένης συχνότητας. Τα φωτοηλεκτρόνια που εκπέμπονται διέρχονται από έναν επιταχυντή, τάσης $V = 160 \text{ V}$ και στην συνέχεια περνούν σε περιοχή όπου επικρατεί ομογενές μαγνητικό πεδίο τετραγωνικής διατομής με πλευρά $a = 8 \text{ cm}$, με δυναμικές γραμμές κάθετες στην ταχύτητα των φωτοηλεκτρονίων και ένταση μέτρου $B = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ T}$. Το έργο εξαγωγής της μεταλλικής επιφάνειας είναι $\varphi = 12 \text{ eV}$. Τα φωτοηλεκτρόνια που εξάγονται από τη μεταλλική επιφάνεια μπορούν να κινούνται σε διάφορες διευθύνσεις. Με κατάλληλο πέτασμα εξασφαλίζουμε ότι θα εισέλθουν στο μαγνητικό πεδίο μόνο όσα ακολουθήσουν



ευθύγραμμη και οριζόντια πορεία. Η είσοδος στο μαγνητικό πεδίο γίνεται από το μέσο O της πλευράς AZ . Στη συνέχεια τα φωτοηλεκτρόνια διαγράφουν τμήμα κυκλικών τροχιών και εξέρχονται από σημεία των (OZ) και $(Z\Delta)$. Να υπολογίσετε:

4.1. το μέγιστο μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ώστε να έχουμε εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων. Σε ποια περιοχή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βρίσκεται αυτό;

4.2. την ελάχιστη απόσταση (OH) .

4.3. Για ποια τιμή του μήκους κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τα φωτοηλεκτρόνια βγαίνουν από την κορυφή Δ ; Σε ποια περιοχή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βρίσκεται αυτό;

Να θεωρήσετε ότι δεν έχουμε σχετικιστικά φαινόμενα.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της άσκησης να υπολογιστούν με προσέγγιση δύο δεκαδικών ψηφίων.

13. Πριν την εισαγωγή της κβαντικής θεωρίας, ένα από τα χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου που ήταν αδύνατο να εξηγηθεί ήταν το ελάχιστο χρονικό διάστημα ανάμεσα στην έναρξη φωτισμού του μετάλλου και στην εκπομπή των πρώτων φωτοηλεκτρονίων.

Έστω μεταλλική επιφάνεια που έχει εμβαδόν $40,0 \text{ cm}^2$, είναι φτιαγμένη από χαλκό, και φωτίζεται από λάμπα, ώστε στην επιφάνεια να προσπίπτει φως έντασης $0,280 \text{ W/m}^2$. Ο χαλκός έχει έργο εξαγωγής $7,52 \times 10^{-19} \text{ J}$, ενώ στην επιφάνειά του υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια κατά μέσο όρο σε απόσταση $2,30 \times 10^{-10} \text{ m}$ το ένα από το άλλο.

Θα εκτιμήσουμε πρώτα τον χρόνο που θα χρειαζόταν για να ξεκινήσει η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από την επιφάνεια του μετάλλου, αν ίσχυε η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία.

4.1. Να υπολογίσετε τη συνολική ισχύ που πέφτει στη μεταλλική επιφάνεια.

4.2. Να υπολογίσετε την ισχύ του προσπίπτοντος φωτός που αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο της επιφάνειας.

4.3. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των προηγούμενων ερωτημάτων, να υπολογίσετε τον μέσο χρόνο που θα χρειαζόταν ένα ηλεκτρόνιο για να εκπεμφθεί από τη μεταλλική επιφάνεια, αν ίσχυε η κυματική θεωρία.

Στην πραγματικότητα, η εκπομπή των φωτοηλεκτρονίων αρχίζει σχεδόν ακαριαία με την πρόσπτωση του φωτός στη χάλκινη επιφάνεια, αρκεί η συχνότητα του φωτός να είναι πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή. Αυτό σημαίνει πως η πρόβλεψη του προηγούμενου ερωτήματος δεν ισχύει.

4.4. Εξηγήστε με ποιον τρόπο η σωματιδιακή θεωρία αιτιολογεί τη σχεδόν ακαριαία εκπομπή φωτοηλεκτρονίων.