

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Εργαστηριακή άσκηση

ΣΤΟΧΟΙ

Οι στόχοι αυτής της εργαστηριακής άσκησης είναι:

- Η πειραματική επιβεβαίωση ότι η μορφή της φωτοηλεκτρικής εξίσωσης του Einstein $K_{\max}(f)$, είναι της μορφής $y=ax-b$
- Ο πειραματικός υπολογισμός της τάσης αποκοπής V_a και ο υπολογισμός μέσω αυτής του έργου εξαγωγής $W_{εξ}$,
- Ο προσδιορισμός, από την κλίση της γραφικής παράστασης, της κινητικής ενέργειας των φωτοηλεκτρονίων σε συνάρτηση με τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας $K_{\max}(f)$, της **σταθεράς δράσεως του Planck (h)**,
- Ο υπολογισμός της οριακής συχνότητας f_{op} για την οποία μπορεί να παρατηρηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για το συγκεκριμένο μέταλλο στην περίπτωση μας του Cs.

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΟΡΓΑΝΑ, ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

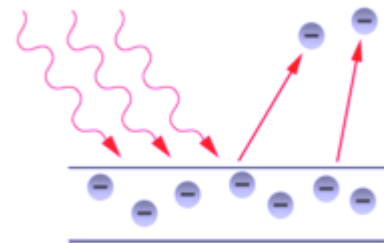
- ✓ Συσκευή φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, από μια μεταλλική επιφάνεια, ελευθερώνονται ηλεκτρόνια στο περιβάλλον όταν πάνω της προσπίπτει φως.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρεται **στη σωματιδιακή φύση του φωτός**.

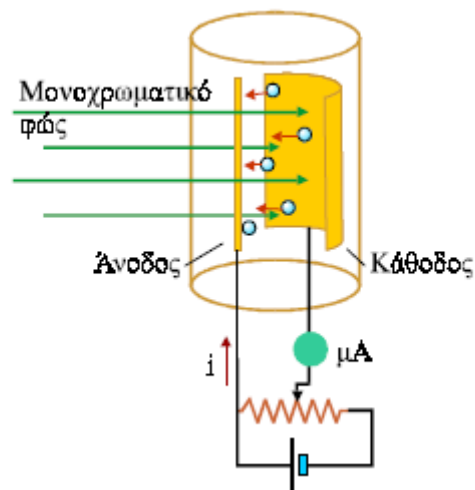
Το φως, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μεταφέρει ενέργεια. Η κλασική θεωρία όμως αδυνατούσε να ερμηνεύσει το γεγονός, ότι η εξαγωγή των ηλεκτρονίων από το μέταλλο καθώς και η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται αυτά από την κάθοδο, εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι από την συνολική ενέργεια (άρα από την ένταση της ακτινοβολίας), που μεταφέρει η φωτεινή δέσμη που προσπίπτει στο μέταλλο.



Για τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου χρησιμοποιούμε τη διάταξη του σχήματος.

Μέσα σε ένα σωλήνα υψηλού κενού ($\approx 10^{-7}$ atm) τοποθετούμε δύο ηλεκτρόδια. Το πρώτο, που χρησιμεύει ως κάθοδος, έχει μεγάλη επιφάνεια, φέρει επίστρωση από ένα αλκαλιμέταλλο (K ή Cs) και όταν φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια.

Τα ηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται από το δεύτερο ηλεκτρόδιο την άνοδο. Με τη βοήθεια μιας ποτενσιομετρικής διάταξης μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια. Τέλος, με ένα μικροαμπερόμετρο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα μπορούμε να



μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος που οφείλεται στα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η φωτιζόμενη κάθοδος. Όταν η κάθοδος φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) τα οποία επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων και καταλήγουν στην άνοδο.

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού η μεταφορά ενέργειας γίνεται με τη δράση του ηλεκτρικού πεδίου στο χρόνο. Έτσι ακόμη και μικρή να είναι η ενέργεια άρα και η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (άρα για οποιαδήποτε συχνότητα), μετά από ικανό χρόνο (συνήθως της τάξης του 1s) τα e^- θα αποκτήσουν ικανή κινητική ενέργεια ώστε να αποσπαστούν από το μέταλλο. Άρα για την κλασική θεωρία η συχνότητα f της ακτινοβολίας δε φαίνεται να παίζει κάποιο ουσιώδη ρόλο.

Όμως δε γίνεται έτσι!

Σύμφωνα με τον Einstein, κάθε φωτόνιο της δέσμης που προσπίπτει και φωτίζει την κάθοδο μεταδίδει **όλη του** την ενέργεια hf σε **ένα μόνο** από τα ηλεκτρόνια του μετάλλου. Αν η ενέργεια hf του φωτονίου είναι μικρότερη από το έργο εξαγωγής W , το ηλεκτρόνιο δε μπορεί να εγκαταλείψει το μέταλλο. Κάτι τέτοιο γίνεται μόνο αν η ενέργεια hf είναι μεγαλύτερη ή ίση με το έργο εξαγωγής $W_{εξ}$. Έτσι στην πραγματικότητα μπορεί η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων να μην εξαρτάται από την συνολική ενέργεια της ακτινοβολίας αλλά εξαρτάται από το κβάντο ενέργειας $E = hf$.

✓ Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρείται όταν πάνω σε μεταλλική κάθοδο, (π.χ με επίστρωση από ένα αλκαλιμέταλλο όπως K ή Cs) προσπέσει μονοχρωματικό φως του οποίου η συχνότητα είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή που ονομάζεται **συχνότητα κατωφλίου** (f_{op}) ή κατώφλι συχνοτήτων για εξαγωγή e^- και δημιουργία φωτοηλεκτρικού ρεύματος ανεξάρτητη της έντασης της ακτινοβολίας. Η ύπαρξη κατωφλίου συχνότητας ήταν κάτι το **ανεξήγητο** στην κλασική φυσική.

Άρα ισχύει ο εμπειρικός Νόμος: $f \geq f_{op}$

Για να παρατηρήσουμε λοιπόν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δε μας ενδιαφέρει η ένταση I της ακτινοβολίας αλλά **μόνο η συχνότητά της**.

✓ Για να συμβεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο το e^- του ατόμου θα πρέπει **να είναι συνδεδεμένο και όχι ελεύθερο** έτσι ώστε να διατηρείται και η Α.Δ.Ε και η Α.Δ.Ο.

Η **ελάχιστη ενέργεια** που πρέπει να προσφέρουμε σε ένα συνδεδεμένο e^- , ώστε να αποσπαστεί από το μέταλλο ονομάζεται **έργο εξαγωγής** $W_{εξ}$. (Για τα αέρια είναι η ενέργεια ιοντισμού τους E_{ion}).

Δεδομένου ότι η ενέργεια ενός φωτονίου είναι hf θα πρέπει τελικά για να πραγματοποιηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο να ισχύει η σχέση:

$$hf > W_{εξ}$$

Μάλιστα για $hf = W_{εξ}$ η συχνότητα f είναι ίση με την οριακή συχνότητα f_{op} , άρα ισχύει:

$$f_{op} = \frac{W_{εξ}}{h}$$

Η ποικιλία τιμών στις συχνότητες κατωφλίου οφείλεται στις διαφορετικές τιμές του έργου εξαγωγής στα διαφορετικά μέταλλα.

Σχόλιο:

Αν το ηλεκτρόνιο είναι ελεύθερο τότε από την Α.Δ.Ε για το προσπίπτον φωτόνιο και το ελεύθερο e^- έχουμε

$$E_{\pi\rho} = E_{\mu\epsilon\tau} \Leftrightarrow$$

$$hf_1 + mc^2 = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow h\frac{c}{\lambda_1} = \frac{1}{2}mv^2$$

Ακόμη από την Α.Δ.Ο προκύπτει:

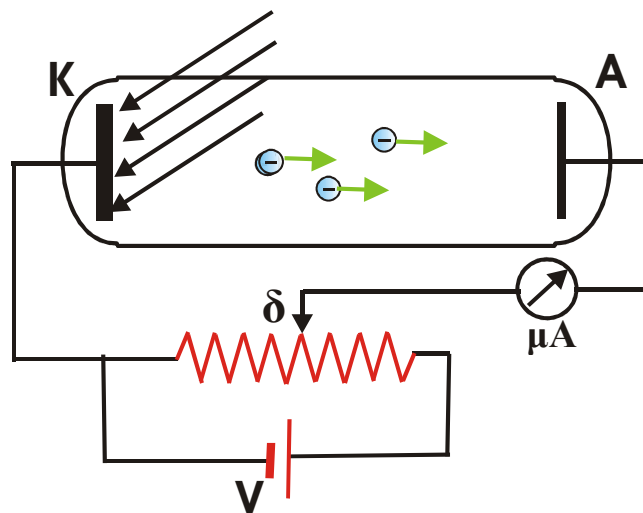
$$\vec{p}_{\pi\rho} = \vec{p}_{\mu\epsilon\tau} \Leftrightarrow p_{\phi} = p_{\eta\lambda} \Leftrightarrow \frac{h}{\lambda_1} = mv$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι για ελεύθερο e^- τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση.

Το λάθος έγινε, στο ότι θεωρήσαμε ελεύθερο το ηλεκτρόνιο και όχι δεσμευμένο, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να εφαρμόσουμε την διατήρηση της ορμής, αφού ορμή θα αποκτήσει και το άτομο, με το οποίο συνδεόταν.

Επίσης και η ταχύτητα εξόδου, που υπολογίσαμε με εφαρμογή της ΑΔΕ, δεν είναι η πραγματική, αφού δεν λάβαμε υπόψη το έργο εξαγωγής.

Αν πραγματοποιήσουμε την πειραματική διάταξη του σχήματος:



Τότε για $f < f_0$ το **φωτορεύμα** των ηλεκτρονίων μεταξύ της καθόδου K και της ανόδου A είναι **ίσο με το μηδέν**. Ακόμη για $f = f_0$ ίσα- ίσα που εξέρχονται από το μέταλλο φωτοηλεκτρόνια με ταχύτητα μηδέν, που επιταχύνονται από την τάση V και έχουμε φωτορεύμα.

- ✓ Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφεται με την φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein.

$$K_{\max} = \frac{1}{2} \cdot m v_{\max}^2 = h \cdot f - W_{\text{εξ}}$$

Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται η κινητική ενέργεια K_{\max} με την οποία ένα ηλεκτρόνιο της καθόδου εγκαταλείπει το μέταλλο. Δηλαδή η K_{\max} είναι η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων **τη στιγμή** που εξέρχονται από το μέταλλο.

Ακόμη από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein προκύπτει για $K_{\max} = 0$, ότι $h \cdot f = W_{\text{εξ}}$
 $\Rightarrow f = \frac{W_{\text{εξ}}}{h}$ άρα $f_{\text{op}} = \frac{W_{\text{εξ}}}{h}$, όπως είπαμε.

Έτσι παρατηρούμε ότι η K_{\max} δεν εξαρτάται από την ένταση I της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επίσης αν $K_{\max} = 0$ και η εφαρμοζόμενη τάση είναι μηδέν $V = 0$, τότε και το φωτοηλεκτρικό ρεύμα i είναι μηδέν ($i = 0$). Όμως αν $K_{\max} = 0$ και η εφαρμοζόμενη τάση είναι διάφορη του μηδενός $V \neq 0$, τότε όπως προκύπτει από το Θ.Μ.Κ.Ε:

$K - K_{\max} = e \cdot V \Leftrightarrow K = e \cdot V$, άρα τα e^- φτάνουν στην άνοδο με μια ταχύτητα $v \neq 0$, άρα έχουμε φωτορεύμα ($i \neq 0$).

Παρατηρούμε ότι :

α) Η συχνότητα κατωφλίου εξαρτάται **μόνο** από το υλικό της ανόδου, ($W_{\text{εξ}}$), ενώ είναι ανεξάρτητη από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Για τα περισσότερα μέταλλα βρίσκεται στην περιοχή του υπεριώδους και μάλιστα για λ μεταξύ 200 και 300 nm ενώ για το Na και τα οξείδια του Cs βρίσκεται στο ορατό φάσμα 400–700 nm.

β) Όταν η συχνότητα της ΗΛΜ ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα κατωφλίου ($f > f_{\text{op}}$), τότε εκπέμπονται ηλεκτρόνια από την κάθοδο με αρκετά μεγάλες ταχύτητες ($K_{\max} \neq 0$) και οπότε ακόμη και χωρίς τάση V στο εξωτερικό κύκλωμα ($V = 0$), έχουμε φωτορεύμα ($i \neq 0$). Επίσης ακόμη και όταν η πολικότητα V αντιστραφεί, υπάρχει ρεύμα e^- μέχρι που η αντίστροφη τάση V να γίνει ίση με την τάση (δυναμικό) αποκοπής $V = V_a$. Τότε σταματά εντελώς η ροή ηλεκτρονίων άρα και τα πιο ενεργητικά e^- ακινητοποιούνται και το φωτορεύμα γίνεται μηδέν ($i = 0$). Δηλαδή η ροή e^- σταματά όταν $e \cdot V_a \geq K_{\max}$ δηλαδή για $e \cdot V_a \geq K_{\max}$, δεν παρατηρείται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Όπως προκύπτει από το Θ.Μ.Κ.Ε:

$K - K_{\max} = -e \cdot V$ και για $K = 0$ έχουμε $K_{\max} = e \cdot V_a$, άρα τα e^- δε φτάνουν στην άνοδο οπότε δεν έχουμε φωτορεύμα ($i = 0$). (K) είναι η κινητική ενέργεια των e^- , όταν φτάνουν στην άνοδο.

Η K_{\max} μετριέται εύκολα αν εφαρμοστεί μια ανασχετική τάση ή δυναμικό V_a , που ονομάζεται **τάση αποκοπής**.

Για, $V = V_a$ μόλις που δεν παρατηρείται φωτορεύμα και

$$\text{για } V = V_a \text{ έχουμε } e \cdot V_a = K_{\max} = \frac{1}{2} \cdot m v_{\max}^2$$

Για αντίθετη δηλαδή τάση, δηλαδή αν βάλουμε στην άνοδο αρνητική τάση, τα e^- επιβραδύνονται και για $V = V_a$ τα e^- φρενάρουν και φτάνουν στην άνοδο με ταχύτητα $v = 0$. Οπότε για τάση V ίση με την τάση αποκοπής V_a το **φωτορεύμα είναι και αυτό ίσο με μηδέν**.

Ισχύει $K_{\max} = h \cdot f - W_{\varepsilon\xi}$. Έτσι η αντίστοιχη γραφική παράσταση της K_{\max} σε συνάρτηση με την f της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι αυτή του σχήματος:

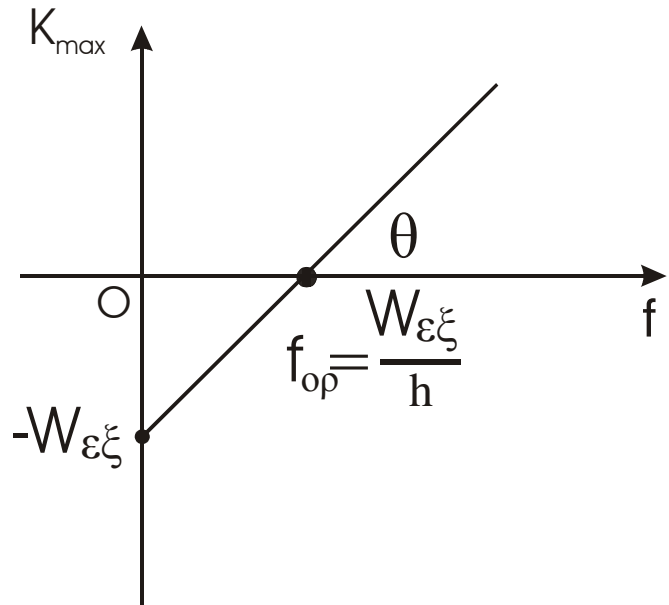
Παρατηρούμε τότε πως για $f=f_{\text{op}} = \frac{W_{\varepsilon\xi}}{h}$ είναι $K_{\max} = 0$, οπότε αυτή είναι και η συχνότητα για την οποία εμφανίζεται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Ακόμη για $f = 0$, $K_{\max} = -W_{\varepsilon\xi}$.

Παρατηρούμε πως η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων και άρα και η ταχύτητά τους τη στιγμή που εξέρχονται από την κάθοδο δεν

εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας **αλλά μόνο από τη συχνότητά της** και μάλιστα εξαρτάται **γραμμικά** και αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

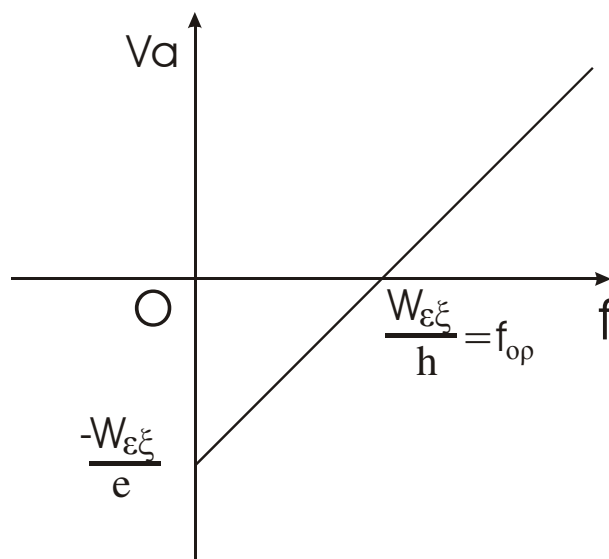
Ακόμη η κλίση της ευθείας είναι ίση με τη σταθερά δράσεως h του Planck. Δηλαδή ισχύει $e\phi\theta=h$.



Από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein για την τάση αποκοπής ισχύει:

$$V_a = \frac{h}{e} f - \frac{W_{\varepsilon\xi}}{e}.$$

Η γραφική παράσταση της τάσης της αποκοπής V_a σε συνάρτηση με τη συχνότητα του φωτός είναι:

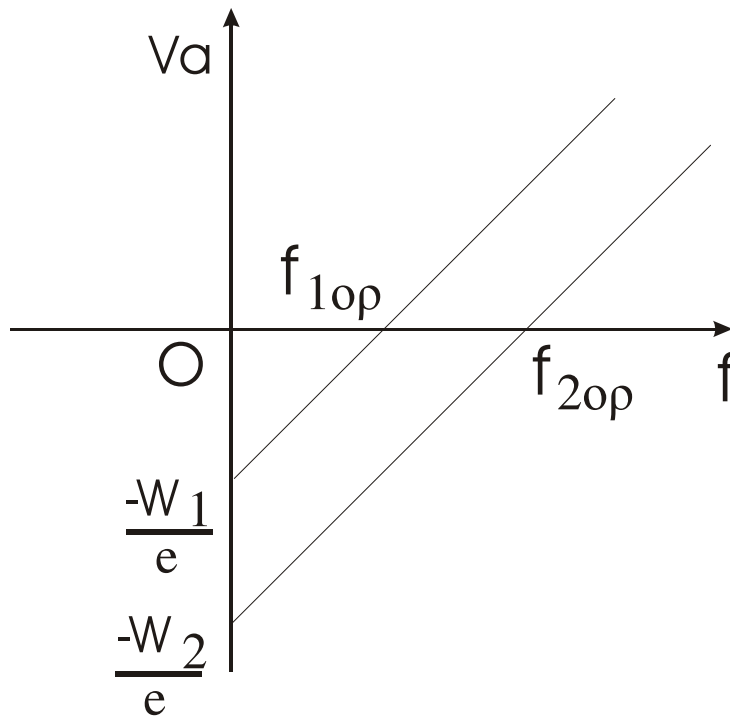


$$\text{Για } f = 0 \Rightarrow V_a = - \frac{W_{εξ}}{e}$$

$$\text{Για } V_a = 0 \Rightarrow f = f_{op} = \frac{W_{εξ}}{h} \text{ και } (e \cdot V_a = K_{max} = 0).$$

- Παρατηρήστε πως η κλίση της ευθείας είναι ίση με $\frac{h}{e}$, άρα είναι σταθερή.

Έτσι ένα διαφορετικό υλικό καθόδου με διαφορετικό έργο εξαγωγής η ευθεία θα μετακινηθεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω αλλά με την ίδια κλίση ($\frac{h}{e}$).



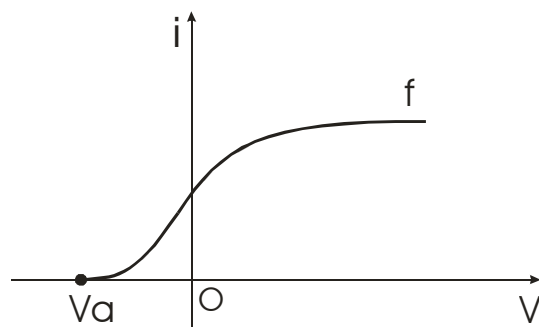
Ισχύει $f_{01} = \frac{W_1}{h}$ και $f_{02} = \frac{W_2}{h}$ τότε για $W_2 > W_1$ είναι και $f_{02} > f_{01}$, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Ένταση (i) φωτορεύματος και τάση (V) ανόδου – καθόδου

1. Η γραφική παράσταση της έντασης (i) του φωτοηλεκτρικού ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση V για μια σταθερή συχνότητα f είναι αυτή του σχήματος:

Τα φωτοηλεκτρόνια δεν βγαίνουν από το μέταλλο όλα με ταχύτητες κάθετες σε αυτό, με αποτέλεσμα να μην φτάνουν όλα στην κάθοδο. Με την αύξηση όμως της τάσης

όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια αναγκάζονται να κινηθούν προς το συλλέκτη (το πεδίο τα ρουφάει προς το συλλέκτη), μέχρι που για κάποια τάση όλα τα ηλεκτρόνια που φεύγουν από το μέταλλο φτάνουν στο συλλέκτη, οπότε από εκεί και πέρα φτάνουμε στο ρεύμα κόρου.



Άρα όσο μεγαλύτερη είναι η τάση τόσο περισσότερο αυξάνεται ο αριθμός των e^- που προσπίπτουν στην άνοδο, οπότε αυξάνεται και ο ρυθμός των e^- που προσπίπτουν στην άνοδο δηλαδή αυξάνεται το $i = \frac{q}{t} = \frac{Ne^-}{t}$ και άρα έχουμε μεγαλύτερη ένταση φωτορεύματος i . Αυτό γίνεται μέχρι το σημείο που όλα τα e^- που παράγονται στην κάθοδο, φτάνουν στην άνοδο, οπότε από εκεί και μετά το φωτορεύμα αποκτά μια σταθερή μέγιστη τιμή.

Παρατηρούμε ακόμη πως και για μηδενική τάση ($V=0$) ή αρνητική τάση V έχουμε ρεύμα ηλεκτρονίων. Μόλις όμως η ανάστροφη τάση ($-V$) γίνει ίση με την τάση αποκοπής V_a , όπως είπαμε το φωτορεύμα μηδενίζεται.

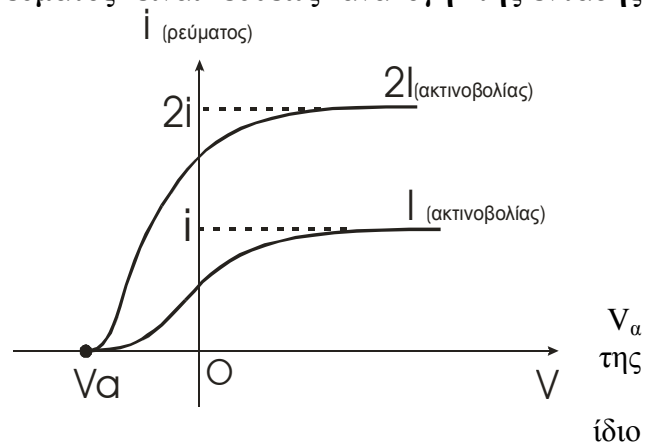
Αν η τάση είναι μηδενική δεν υπάρχει κανένας λόγος όλα τα φωτοηλεκτρόνια να φτάσουν στην άνοδο.

Κάποια έχουν ταχύτητες τυχαίες και προσκρούουν στα τοιχώματα, κάποια παραμένουν στο χώρο δημιουργώντας και ένα νέφος αρνητικού φορτίου χώρου, το οποίο υποχρεώνει κάποια αλλά ηλεκτρόνια να επιστρέψουν στην κάθοδο. Αυτό εξηγεί γιατί το φωτορεύμα τότε δεν έχει τη μέγιστή του τιμή.

2. Η ένταση (i) του φωτοηλεκτρικού ρεύματος είναι ευθέως ανάλογη της έντασης (I) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (του φωτός). Έτσι:

i) όταν διπλασιάζεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας I διπλασιάζεται και η ένταση i ρεύματος κόρου, του φωτοηλεκτρικού ρεύματος. Δηλαδή εκπέμπονται περισσότερα (διπλάσια) ηλεκτρόνια. Ακόμη,

ii) Παρατηρούμε ότι η τάση αποκοπής για την ίδια συχνότητα f είναι ανεξάρτητη I του προσπίπτοντος φωτός και εξαρτάται μόνο από το υλικό της ανόδου. Άρα για το υλικό και για διαφορετικές εντάσεις I έχουμε την ίδια τάση αποκοπής V_a , όπως φαίνεται στο σχήμα.



Αύξηση της φωτεινής έντασης I (άρα περισσότερα φωτόνια) για μια συγκεκριμένη συχνότητα f σημαίνει και αύξηση της έντασης \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου της ακτινοβολίας. Όμως ισχυρότερο ηλεκτρικό πεδίο σημαίνει και μεγαλύτερη ηλεκτρική δύναμη $\vec{F} = q\vec{E}$ στα e^- του μετάλλου της καθόδου άρα αυτά αποσπώνται ευκολότερα και άρα αυξάνεται και ο ρυθμός εξαγωγής τους.

Σε κάθε περίπτωση έχουμε περισσότερα φωτοηλεκτρόνια/s και άρα έχουμε αύξηση του φωτορεύματος. Αν ορίσουμε την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας ως τον **αριθμό φωτονίων ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας**, τότε για διπλάσια ένταση ακτινοβολίας έχουμε διπλάσιο πλήθος φωτονίων άρα και διπλάσιο αριθμό εξερχόμενων από την κάθοδο e^- . Όταν τελικά, όλα αυτά τα e^- φτάσουν στην άνοδο (ρεύμα κόρου), θα έχουμε και διπλάσια μέγιστη ένταση φωτορεύματος.

Προσοχή όμως η μέγιστη κινητική ενέργεια των εξερχόμενων από το μέταλλο φωτοηλεκτρονίων εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα ($K_{\max} = hf - W_{\epsilon\xi}$).

Σχόλιο:

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία η μεταβίβαση της ενέργειας από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα στα e^- του μετάλλου γίνεται αναγκαστικά σε κάποιο χρονικό διάστημα δηλαδή γίνεται βαθμιαία. Έτσι θα έπρεπε να μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα από την πρόσπτωση της ακτινοβολίας μέχρι την εμφάνιση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος. Με μια απλή εκτίμηση η χρονοκαθυστέρηση θα έπρεπε να είναι της τάξης του 1s. Όμως η πειραματική τιμή αυτού του χρόνου αν δεν είναι μηδέν είναι της τάξης του $1ns=10^{-9}s$ και μικρότερη. Δηλαδή το φωτορεύμα εμφανίζεται σχεδόν **ταυτόχρονα** με την πρόσπτωση της φωτεινής δέσμης στην κάθοδο.

3.Είπαμε για την τάση αποκοπής

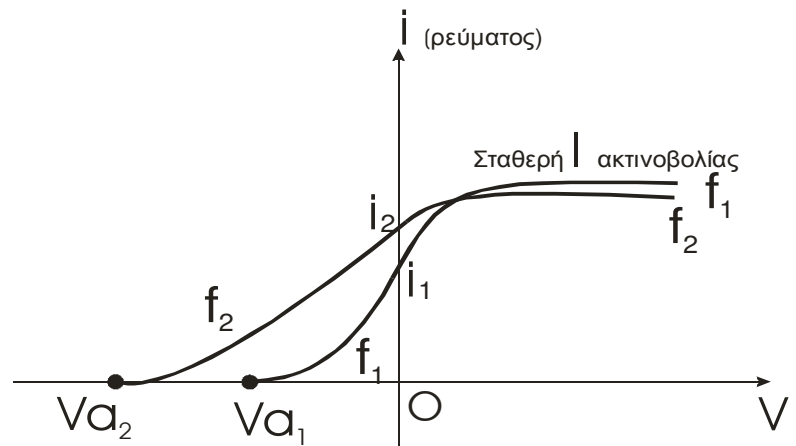
V_a ότι:

$$e \cdot V_a = K_{\max} = h \cdot f - W_{\varepsilon\xi} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow V_a = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{W_{\varepsilon\xi}}{e} \quad (V_a = |V_a|).$$

Άρα η τάση αποκοπής κατά απόλυτη τιμή εξαρτάται (αυξάνεται γραμμικά) από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (f) και άρα από το κβάντο ενέργειας ($E = h \cdot f$) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

καθώς και από το υλικό της ανόδου ($W_{\varepsilon\xi}$). Έτσι για **σταθερή ένταση ακτινοβολίας** για το **ίδιο υλικό** και για **δύο συχνότητες f_1 και f_2** με $f_2 > f_1$ έχουμε $|V_{a2}| > |V_{a1}|$. π.χ αν $V_{a1} = -10\text{ V}$ τότε $V_{a2} = -12\text{ V}$, η γραφική παράσταση $i(V)$ είναι αυτή του σχήματος.



Δηλαδή καθώς η συχνότητα f αυξάνεται, αυξάνεται γραμμικά και το μέτρο της τάσης αποκοπής και άρα και η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρικών αφού $e \cdot V_a =$

$$K_{\max} = \frac{1}{2} m \cdot v_{\max}^2.$$

Ακόμα για σταθερή ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας (I) ισχύει:

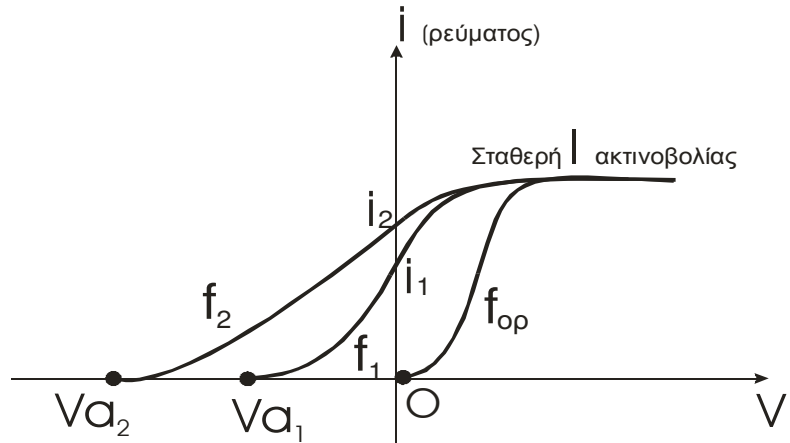
$$I = \frac{E}{dS \cdot dt} = \frac{Nhf}{dS \cdot dt} \Leftrightarrow \frac{N}{dt} = \frac{I \cdot dS}{hf}.$$

Δηλαδή παρατηρούμε πως καθώς η συχνότητα f της ακτινοβολίας αυξάνεται ο αριθμός των φωτονίων ανά μονάδα χρόνου $\frac{N}{dt}$, που πέφτουν στην

κάθοδο ελαττώνεται. Οπότε για συχνότητα $f_2 > f_1$ ($I = \text{σταθ.}$) και για την ίδια απορρόφηση ακτινοβολίας, λιγότερα φωτόνια πέφτουν στην κάθοδο άρα και λιγότερα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από αυτή, αν δεχτούμε ότι το κάθε φωτόνιο έχει συχνότητα μεγαλύτερη από την οριακή και ότι κάθε φωτόνιο δίνει όλη του την ενέργεια αμέσως σε ένα ηλεκτρόνιο. Γνωρίζουμε όμως από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση πως καθώς αυξάνεται η συχνότητα f της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αυξάνεται γραμμικά και η μέγιστη κινητική ενέργεια K_{\max} των εξερχόμενων ηλεκτρονίων. Όμως για μεγαλύτερη K_{\max} τα εκπεμπόμενα από την κάθοδο ηλεκτρόνια είναι πιο ενεργητικά και έτσι περισσότερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο. Έτσι για $V=0$, έχουμε μεγαλύτερο φωτορεύμα i για τη μεγαλύτερη συχνότητα f_2 δηλαδή $i_2 > i_1$. Αυξάνοντας στη συνέχεια την τάση καθόδου – ανόδου V , τότε από μια τάση V και μετά όλα τα ηλεκτρόνια φτάνουν με την ίδια ταχύτητα v στην άνοδο (το όριο είναι η ταχύτητα του φωτός c). Όμως επειδή για τις μικρότερες συχνότητες έχουμε περισσότερα φωτόνια άρα και ηλεκτρόνια τελικά για τη μικρότερη συχνότητα f_1 θα έχουμε μεγαλύτερο

φωτορεύμα δηλαδή τελικά $i_1 > i_2$. Επίσης παρατηρούμε πως υπάρχει μια τάση επιτάχυνσης για την οποία τα δυο φωτορεύματα (i_1 και i_2 για τις δυο συχνότητες γίνονται ίσα).

Βέβαια αν θεωρήσουμε πως όταν αναφερόμαστε σε σταθερή ένταση μιλάμε για σταθερό αριθμό φωτονίων ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας, τότε επειδή η διαδικασία στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι διαδικασία ενός βήματος έχουμε ή όλα ή τίποτα. Αν λοιπόν τα φωτόνια της δέσμης έχουν $f > f_{op}$ τότε το καθένα από αυτά δίνει όλη του την ενέργεια σε ένα e . Για σταθερή ένταση I ακτινοβολίας, το πλήθος των φωτονίων ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου είναι το ίδιο. Τότε και το μέγιστο πλήθος των



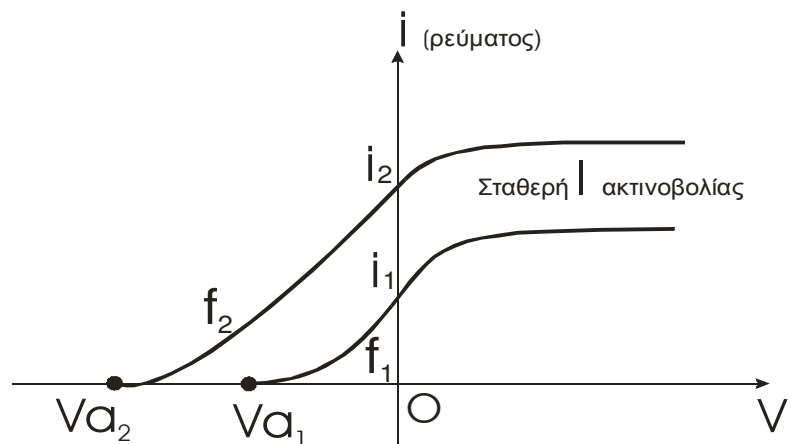
φωτοηλεκτρονίων είναι το ίδιο ανεξάρτητα από τη συχνότητα της ακτινοβολίας. Αυξάνοντας την f , το έργο εξαγωγής $W_{ex} = \phi$ δεν αλλάζει αλλά αυξάνεται η K_{max} . Όμως για μεγαλύτερη K_{max} περισσότερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο για μηδενική τάση V , οπότε για $V=0$ έχουμε μεγαλύτερο φωτορεύμα στη συχνότητα f_2 ($f_2 > f_1$ άρα και $i_2 > i_1$). Τελικά αυξάνοντας την τάση V για το ίδιο πλήθος e^- το ρεύμα αποκτά την ίδια σταθερή μέγιστη τιμή (ρεύμα κόρου) και στις δυο συχνότητες f_1 και f_2 , όπως φαίνεται στο σχήμα.

Ακόμη παρατηρείστε πως επειδή για $f = f_{op}$, είναι $K_{max} = 0$ είναι και $V_a = 0$. Δηλαδή σε αυτή την περίπτωση τα φωτοηλεκτρόνια ίσα - ίσα που εξέρχονται από το μέταλλο οπότε δεν έχουμε φωτορεύμα και άρα ακόμη και για τάση $0V$ αυτό είναι μηδέν. Δηλαδή δε χρειαζόμαστε κάποια τάση αποκοπής. Στη συνέχεια και καθώς αυξάνουμε την ορθή τάση V , αυτά επιταχύνονται, το φωτορεύμα αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή, οπότε τότε όλα τα φωτοηλεκτρόνια φτάνουν «ψαρεύονται» από την άνοδο.

Σχόλιο: Τα διαγράμματα που σχεδιάσαμε παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση που όλα τα φωτόνια της δέσμης ελευθερώνουν ηλεκτρόνια.

Στην πραγματικότητα όμως μόνο ένα ποσοστό αυτών των φωτονίων ελευθερώνουν ηλεκτρόνια από το μέταλλο.

Έτσι για μεγαλύτερη συχνότητα φωτονίων επειδή η ενέργεια των φωτονίων είναι μεγαλύτερη τότε μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των φωτονίων ελευθερώνουν ηλεκτρόνια, γιατί ελευθερώνονται και ηλεκτρόνια από εσωτερικότερες στάθμες των ατόμων του μετάλλου. Έτσι αυξάνεται και το πλήθος των φωτοηλεκτρονίων άρα τελικά αυξάνεται και το ρεύμα κόρου (μέγιστο φωτορεύμα).



Δηλαδή στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ο μέγιστος αριθμός ηλεκτρονίων που μπορούν να εκτοξευθούν από ένα μεταλλικό υλικό εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας.

Όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας αυξάνει, τα φωτόνια που φέρουν αυτήν τη συχνότητα έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και μπορούν να ελευθερώσουν περισσότερα ηλεκτρόνια από το μέταλλο. Επομένως, όταν η συχνότητα αυξάνει ($f_2 > f_1$), έχουμε μεγαλύτερο ρεύμα κόρου, δηλαδή μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρονίων που εκτοξεύονται από το μέταλλο, για την ίδια ένταση ακτινοβολίας.

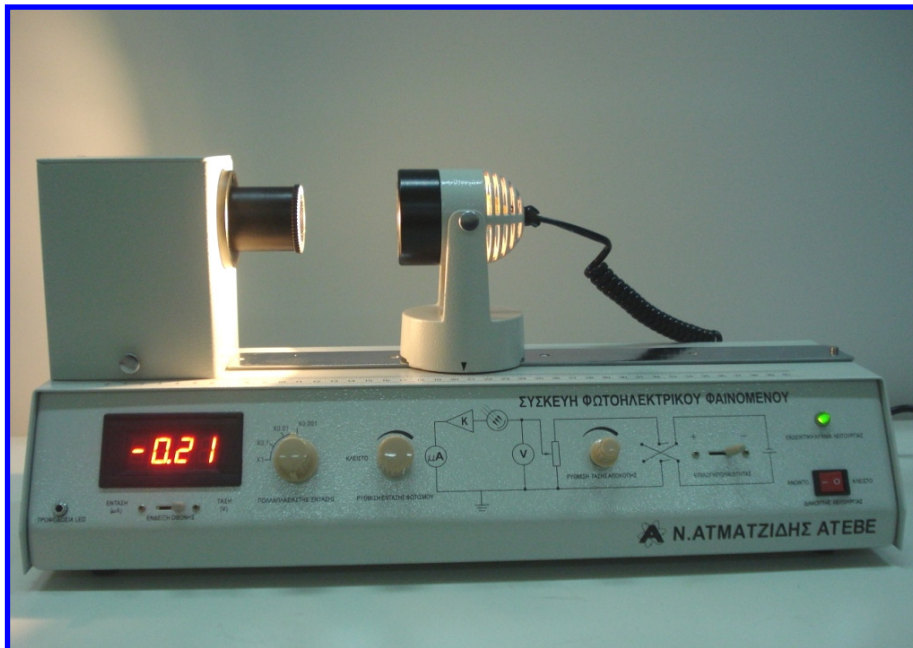
Αυτό συμβαίνει επειδή, με την αύξηση της συχνότητας της ακτινοβολίας, τα φωτόνια φέρουν περισσότερη ενέργεια και μπορούν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια που απαιτούν περισσότερη ενέργεια για να απελευθερωθούν από το υλικό του μετάλλου.

Επομένως, μεγαλύτερη συχνότητα ακτινοβολίας οδηγεί σε μεγαλύτερο ρεύμα κόρου για την ίδια ένταση. Οπότε τότε θα είχαμε το παραπάνω διάγραμμα.

Η πιθανότητα να λάβει χώρα το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ανάλογη της πέμπτης δύναμης του Z του υλικού ($\propto Z^5$).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. Πραγματοποιήστε την πειραματική διάταξη της εικόνας:



Παρατήρηση: Για καλύτερα αποτελέσματα οι πρώτες μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται τουλάχιστον 10min μετά το άνοιγμα της συσκευής.

2. Τοποθετείστε τη φωτεινή πηγή στη θέση 250mm και ανοίξτε το διακόπτη ON/OFF, μετά από 2 min προθέρμανσης, μετρήστε το φωτορεύμα.

3. Παρεμβάλλετε το φίλτρο στον υποδοχέα και επιλέξτε χαμηλή ένταση της τάσης πηγής από τον διακόπτη: **ΡΥΘΜΙΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ**.

4. Περνώντας αργά το χέρι μας ανάμεσα από τη φωτεινή πηγή και την υποδοχή των φίλτρων, παρατηρούμε πτώση μέχρι και μηδενισμό του φωτορεύματος. Κατόπιν απομακρύνουμε το χέρι μας και το φωτορεύμα εμφανίζεται αμέσως (χρόνος απόκρισης 10^{-9} sec).

5. Αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτοκύτταρου, μεταβάλλεται η ένταση (I) της φωτεινής ακτινοβολίας και άρα μεταβάλλεται ευθέως ανάλογα η ένταση (i) του φωτορεύματος. Η ένταση I της φωτεινής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου

της απόστασης μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτοκύτταρου: $I \sim \frac{1}{R^2}$

6. Ρυθμίστε τον επιλογέα :**ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ** , με βαθμιαία αύξηση έως ότου φτάσει στο μηδενισμό του ρεύματος. Ο διακόπτης **ΕΝΔΕΙΞΗ ΟΘΟΝΗΣ** μπορεί να μετράει ανάλογα με τη θέση που βρίσκεται φωτορεύμα ή τάση αποκοπής.

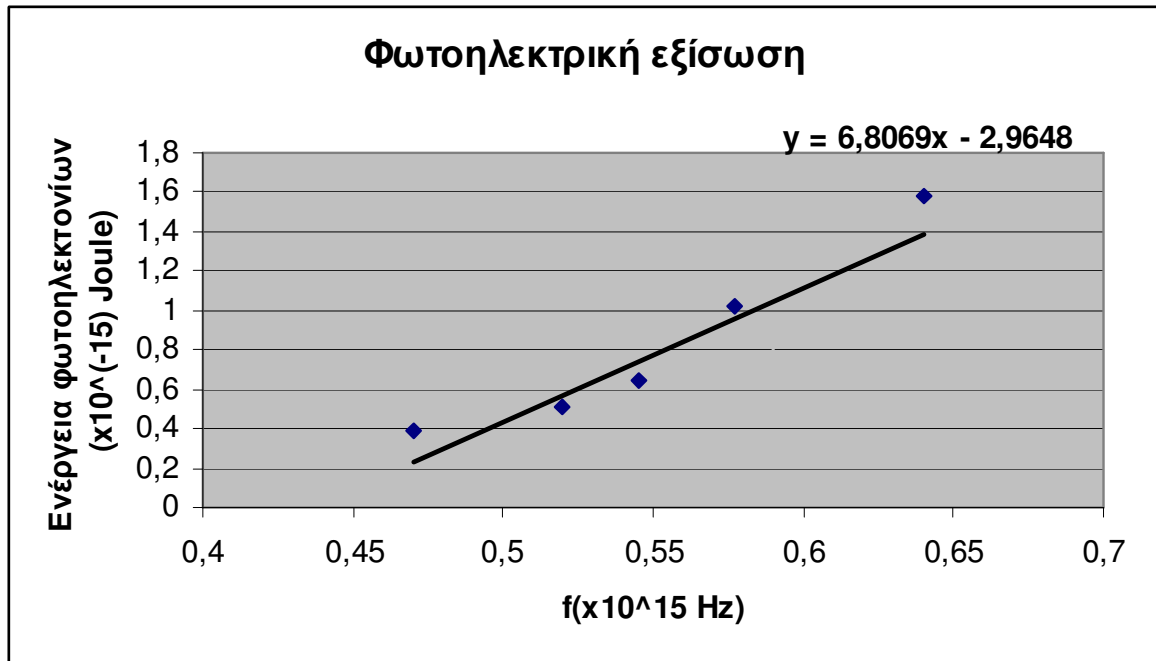
7. Όταν έχουμε την τάση αποκοπής για το συγκεκριμένο φίλτρο ή LED άρα έχουμε μηδενίσει το φωτορεύμα τότε είτε περνώντας το χέρι μας ανάμεσα από τη φωτεινή πηγή και την υποδοχή των φίλτρων είτε αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτοκύτταρου δεν παρατηρούμε καμία αλλαγή στις ενδείξεις του φωτορεύματος και της τάσης αποκοπής.

8. Τοποθετήστε την φωτεινή πηγή LED στην υποδοχή και συνδέστε την στην έξοδο:
ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ LED.

9. Συμπληρώστε τον **πίνακα Α** με τις μετρήσεις που πήρατε:

ΠΙΝΑΚΑΣ Α				
ΦΙΛΤΡΑ ΓΥΑΛΙΝΑ	λ(nm)	f(10¹⁵Hz)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ V_a (Volt)	Ενέργεια φωτοηλεκτρονίου K_{max}=e·V_a x(10⁻¹⁹ Joule)
ΚΟΚΚΙΝΟ	630	0,47	0,24	0,384
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	580	0,52	0,32	0,512
ΚΙΤΡΙΝΟ ΣΚΟΥΡΟ	550	0,545	0,4	0,64
ΚΙΤΡΙΝΟ	510	0,59	0,51	0,816
ΠΡΑΣΙΝΟ	520	0,577	0,64	1,024
ΜΠΛΕ	470	0,64	0,99	1,584
ΠΗΓΕΣ LED				
ΚΟΚΚΙΝΗ	620	0,48	0,24	0,384
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	586	0,51	0,34	0,544
ΠΡΑΣΙΝΗ	530	0,6	0,59	0,944
ΜΠΛΕ	485	0,62	0,74	1,184

10. Με βάση τις παραπάνω τιμές που πήραμε για τα γυάλινα φίλτρα σχεδιάστε τη γραφική παράσταση K_{max}(f).



11. Από τη γραφική παράσταση προκύπτει ότι η μορφή της φωτοηλεκτρικής εξίσωσης του Einstein $K_{\max}(f)$, είναι της μορφής $y=ax-b$.

12. Από την εφαπτομένη της γωνίας υπολογίζουμε τη σταθερά δράσης του Planck.

Άρα $\epsilon\text{φ}\phi = h = \frac{\Delta E}{\Delta f} \Rightarrow h = 6,8 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$. Από τη διεθνή βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Έχουμε ένα πειραματικό σφάλμα της τάξης του 2,5%.

13. Ακόμη επειδή ισχύει $K_{\max} = e \cdot V_a = h \cdot f - W_{\epsilon\xi} \Rightarrow W_{\epsilon\xi} = h \cdot f - e \cdot V_a$, άρα από οποιοδήποτε ζευγάρι τιμών συχνότητας f και ενέργειας φωτοηλεκτρονίου μπορούμε να υπολογίσουμε ο έργο εξαγωγής, το οποίο κατά μέσο όρο είναι $W_{\epsilon\xi} = 2,9648 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή και τη διεθνή βιβλιογραφία το έργο εξαγωγής του Cs είναι ίσο με $2,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Έχουμε ένα πειραματικό σφάλμα της τάξης του 3,5%.

14. Ακόμη για $K_{\max} = e \cdot V_a = 0$ έχουμε $h \cdot f_{\text{op}} = W_{\epsilon\xi} \Rightarrow f_{\text{op}} = W_{\epsilon\xi} / h$ ή $f_{\text{op}} = \frac{2,9648 \cdot 10^{-19}}{6,8 \cdot 10^{-34}} = 0,435 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$.

Τότε από τη σχέση $c = \lambda \cdot f$ βρίσκουμε ότι $\lambda_{\text{op}} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,435 \cdot 10^{15}} = 6,89 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ή $\lambda_{\text{op}} = 689 \text{ nm}$.

Έτσι μόνο για μήκη κύματος μικρότερα από 689 nm παρατηρούμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για το συγκεκριμένο μέταλλο.