

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

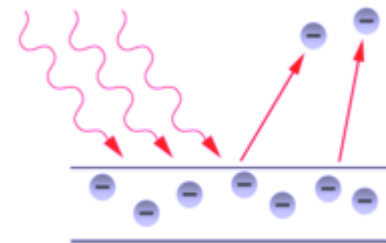
- ✓ Συσκευή φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

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**.

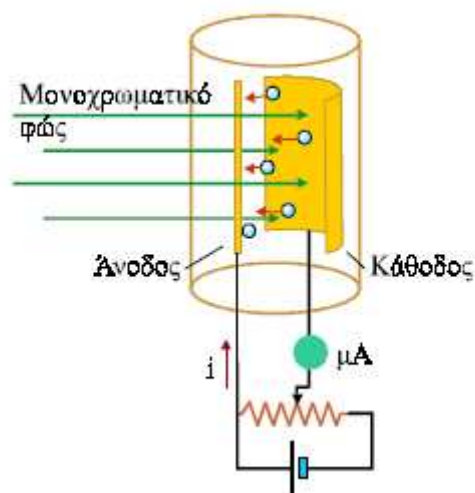
Το φως, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μεταφέρει ενέργεια. Η κλασική θεωρία όμως αδυνατούσε να ερμηνεύσει το γεγονός, ότι η εξαγωγή των ηλεκτρονίων από το μέταλλο καθώς και η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται αυτά από την κάθοδο, εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι 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 όμως με τον Einstein, κάθε φωτόνιο της δέσμης που προσπίπτει και φωτίζει την κάθοδο μεταδίδει όλη του την ενέργεια $h \cdot f$ σε ένα μόνο από τα ηλεκτρόνια του μετάλλου. Αν η ενέργεια $h \cdot f$ του φωτονίου είναι μικρότερη από το έργο εξαγωγής W , το ηλεκτρόνιο δε μπορεί να εγκαταλείψει το μέταλλο. Κάτι τέτοιο γίνεται μόνο αν η ενέργεια $h \cdot f$ είναι μεγαλύτερη ή ίση με το έργο εξαγωγής W . Έτσι στην πραγματικότητα μπορεί η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων να μην εξαρτάται από την συνολική ενέργεια της ακτινοβολίας αλλά εξαρτάται από το κβάντουμ ενέργειας $E = h \cdot f$.

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 ($f = f_{op}$).

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.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφεται με την Φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein.

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

Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται η κινητική ενέργεια με την οποία ένα ηλεκτρόνιο της καθόδου εγκαταλείπει το μέταλλο.

Ακόμη από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein προκύπτει για

$$K_{max} = 0 \text{ (ή φωτοηλεκτρικό ρεύμα} = 0), \text{ ότι } h \cdot f = W_{εξ} \Rightarrow f = \frac{W_{εξ}}{h} \text{ άρα } f_{op} = \frac{W_{εξ}}{h}.$$

Παρατηρούμε ότι :

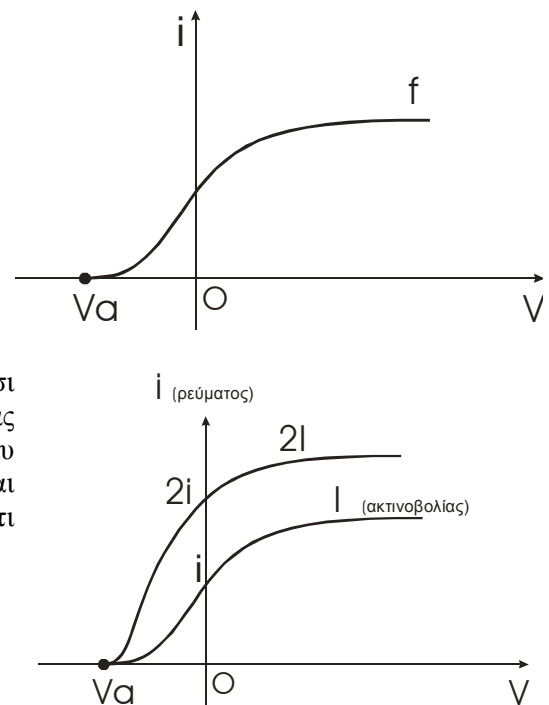
α) Η συχνότητα κατωφλίου εξαρτάται μόνο από το υλικό της ανόδου, ($W_{εξ}$), ενώ είναι ανεξάρτητη από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

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, τότε εκπέμπονται ηλεκτρόνια από την κάθοδο με αρκετά μεγάλες ταχύτητες και ακόμη και χωρίς τάση V στο εξωτερικό κύκλωμα. Ακόμη και όταν η πολικότητα V αντιστραφεί υπάρχει ρεύμα e μέχρι που η αντίστροφη τάση V να γίνει ίση με την τάση (δυναμικό) αποκοπής $V = V_a$ οπότε σταματά εντελώς η ροή ηλεκτρονίων. Δηλαδή η ροή e^- σταματά όταν $e \cdot V \geq K_{max}$ δηλαδή για $e \cdot V \geq K_{max}$, δεν παρατηρείται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Για $V = V_a$

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

- Έτσι η ένταση (i) του φωτοηλεκτρικού ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση για μια σταθερή συχνότητα f είναι :
- Η ένταση (i) του φωτοηλεκτρικού ρεύματος είναι ευθέως ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (του φωτός). Έτσι όταν διπλασιάζεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διπλασιάζεται και η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος δηλαδή εκπέμπονται περισσότερα ηλεκτρόνια. Παρατηρούμε όμως ότι



η τάση αποκοπής V_a είναι ανεξάρτητη της I του προσπίπτοντος φωτός .

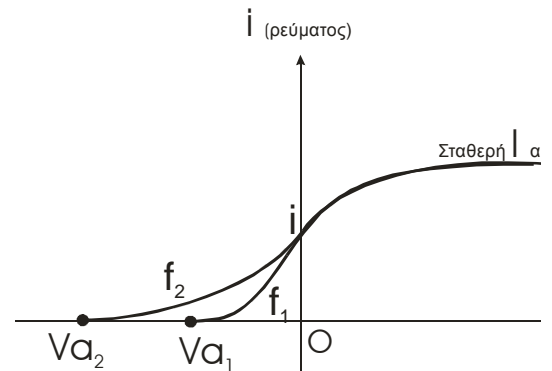
✓ Είπαμε για την τάση αποκοπής V_a ότι:

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

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

Άρα η τάση αποκοπής κατά απόλυτη τιμή εξαρτάται (αυξάνεται γραμμικά) από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (f) και άρα από το κβάντομ ενέργειας ($E = h \cdot f$) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθώς και από το υλικό της ανόδου ($W_{\varepsilon\xi}$).

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



Έτσι για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και για δυο 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 $V_{a2} = -12 \text{ V}$

Δηλαδή καθώς η συχνότητα f αυξάνεται γραμμικά και η τάση αποκοπής και άρα και η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρικών αφού

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

Παρατηρήστε ακόμη από τη γραφική παράσταση ότι για σταθερή έντασης I φωτός παρόλο που έχουμε διαφορετική f και άρα διαφορετική τάση αποκοπής (V_a) η μέγιστη ένταση του ρεύματος των ηλεκτρονίων (i) παραμένει σταθερή.

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

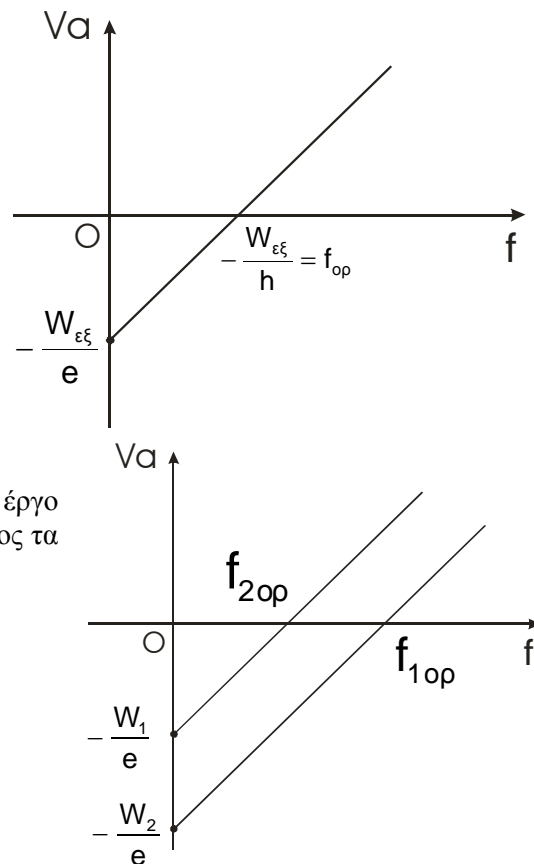
$$V_a = \frac{h}{e} f - \frac{W_{\varepsilon\xi}}{e}$$

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

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

- 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 ($\frac{h}{e}$).



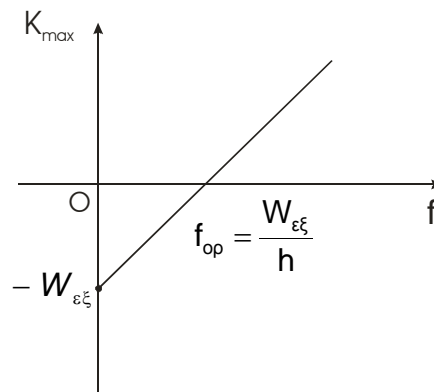
Η αντίστοιχη γραφική παράσταση της K_{\max} σε συνάρτηση με την f της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι:

Ισχύει $K_{\max} = h \cdot f - W_{\varepsilon\xi}$. Παρατηρούμε τότε πως

Για $f = 0$, $K_{\max} = -W_{\varepsilon\xi}$

Για $K_{\max} = 0$, $f_{\text{op}} = \frac{W_{\varepsilon\xi}}{h}$.

Παρατηρούμε ακόμη πως η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων και άρα και η ταχύτητά τους δεν εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας αλλά μόνο από τη συχνότητά της και μάλιστα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



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 μα 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.

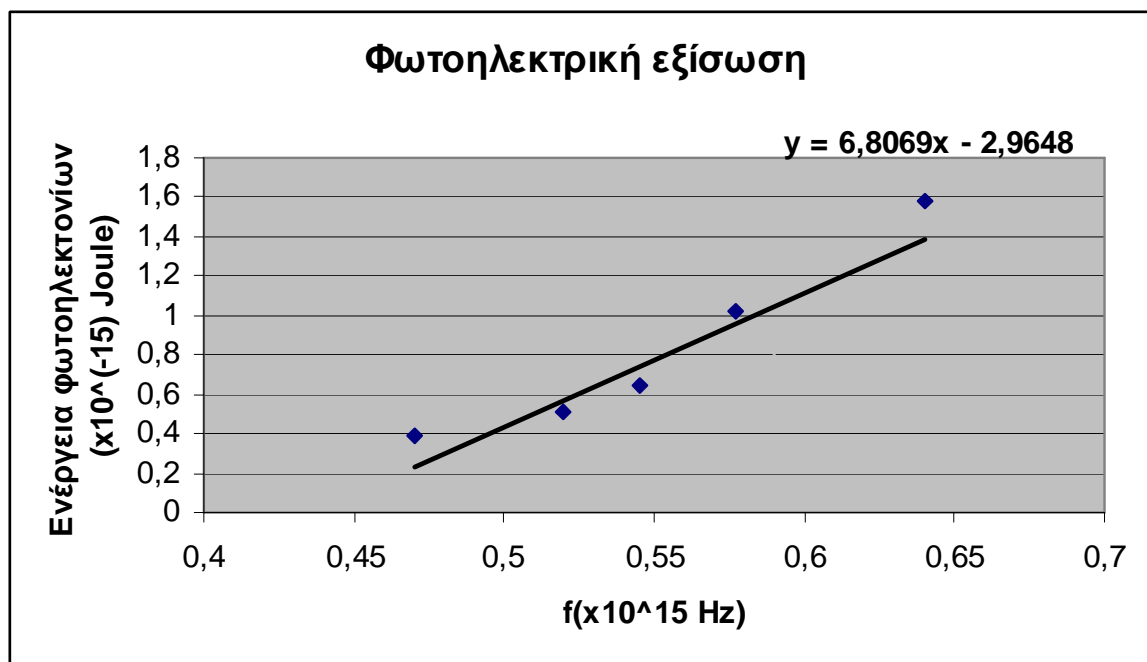
7. Όταν έχουμε την τάση αποκοπής για το συγκεκριμένο φίλτρο ή LED άρα έχουμε μηδενίσει το φωτορεύμα τότε είτε περνώντας το χέρι μας ανάμεσα από τη φωτεινή πηγή και την υποδοχή των φίλτρων είτε αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτοκύτταρου δεν παρατηρούμε καμία αλλαγή στις ενδείξεις 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)	$f(10^{15} \text{ Hz})$	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ V_a (Volt)	Ενέργεια φωτοηλεκτρονίου $K_{\max} = e \cdot V_a$ $\times (10^{-19} \text{ Joule})$
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 $\text{εφφ} = h = \frac{\Delta E}{\Delta f} \Rightarrow h = 6,8 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$. 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 $K_{\max} = e \cdot V_{\alpha} = h \cdot f - W_{\text{εξ}} \Rightarrow W_{\text{εξ}} = h \cdot f - e \cdot V_{\alpha}$, άρα από οποιοδήποτε ζευγάρι τιμών συχνότητας f και ενέργειας φωτοηλεκτρονίου μπορούμε να υπολογίσουμε ο έργο εξαγωγής, το οποίο κατά μέσο όρο είναι $W_{\text{εξ}} = 2,9648 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$. 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 $K_{\max} = e \cdot V_{\alpha} = 0$ έχουμε $h \cdot f_{\text{op}} = W_{\text{εξ}} \Rightarrow f_{\text{op}} = W_{\text{εξ}} / h$ 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.