

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Είναι το φαινόμενο της εκπομπής ηλεκτρονίων από την επιφάνεια (συνήθως μεταλλική ή ημιαγώγιμη) ενός υλικού, όταν προσπέσει σε αυτήν φως (συνήθως υπεριώδης ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Το 1887 ο Γερμανός Heinrich Hertz παρατήρησε ότι η υπεριώδης ακτινοβολία διευκολύνει την εκκένωση μεταξύ ηλεκτροδίων, αποκαλύπτοντας μια άγνωστη τότε σχέση φωτός και ηλεκτρισμού. Το ηλεκτρόνιο ανακαλύφθηκε το 1897 από τον Βρετανό Joseph John Thomson, ο οποίος το 1899 ταύτισε τα εκπεμπόμενα σωματίδια στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με ηλεκτρόνια, χρησιμοποιώντας τις ήδη γνωστές ιδιότητες των καθοδικών ακτίνων. Αυτή ήταν η πρώτη σαφής αναγνώριση ότι το φως «βγάζει» ηλεκτρόνια από την ύλη. Το 1902 ο Ουγγρογερμανός Philipp Lenard σκέφτηκε την πειραματική διάταξη, που περιγράφεται πιο κάτω, για την ποσοτική μελέτη του.

Και στο σπίτι μας μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ένα πείραμα εξαγωγής φωτοηλεκτρονίων.

[1ο Video](#)

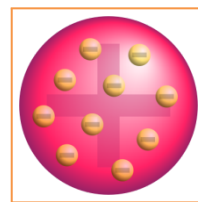
[2ο Video](#)

Και στα δυο video βλέπουμε ότι η αποφόρτιση των ηλεκτροσκοπίων γίνεται μόνο με υπεριώδες φως, χωρίς να έχει σημασία η ένταση του φωτός!

A. Η αποτυχία της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας Maxwell

Το ατομικό μοντέλο της εποχής ήταν του Thomson (σταφιδόψωμο - βλέπε σχήμα).

Το φως ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, θα έπρεπε να θέτει σε κίνηση (εξαναγκασμένη ταλάντωση) τα ηλεκτρόνια, μέχρι να ξεκολλήσουν από το άτομο. Τι προέβλεπε η Κλασσική Φυσική;



1. Η ένταση I της ακτινοβολίας εξαρτάται από το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, δηλαδή την μεταφερόμενη ενέργεια και όχι από τη συχνότητα, άρα για μια επαρκή ένταση θα έπρεπε να συμβαίνει το φαινόμενο με οποιαδήποτε συχνότητα f .
2. Το πλήθος των φωτοηλεκτρονίων θα έπρεπε να αυξάνεται με την ένταση της ακτινοβολίας.
3. Η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων θα πρέπει να αυξάνεται με την ένταση της ακτινοβολίας.
4. Θα χρειαζόταν χρόνος για να μεταφερθεί από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα το απαιτούμενο ποσό ενέργειας ώστε η εξαναγκασμένη ταλάντωση να πάρει μεγάλο πλάτος και να εκδιωχθούν τα ηλεκτρόνια, άρα καθυστέρηση στην έναρξη του φαινομένου.

✓ Οι προβλέψεις 1, 3 και 4 δεν επαληθεύονται!

Αν η Κλασσική Φυσική είχε δίκιο, μόλις βγαίναμε στον Ήλιο, που μας βομβαρδίζει με υπεριώδη ακτινοβολία θα διαλυόμασταν! Ευτυχώς η Κλασσική Φυσική έκανε ΛΑΘΟΣ.

B. Πειραματική Διάταξη

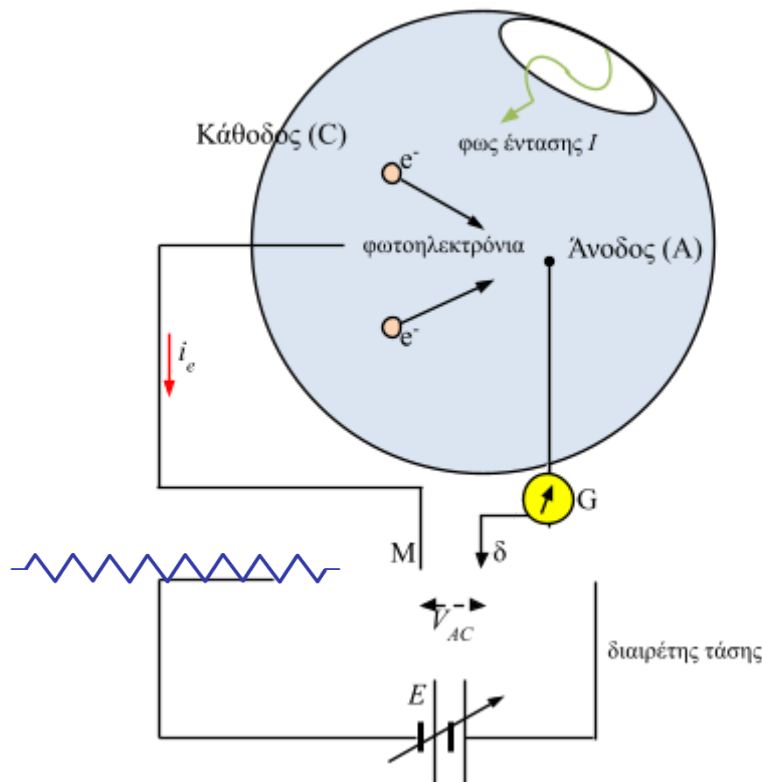
Στο σχήμα 1 βλέπουμε την πειραματική διάταξη του Lenard.

Μονοχρωματικό φως εισέρχεται στον αερόκενο κύλινδρο από παράθυρο χαλαζία, προσπίπτει στην κάθοδο C (π.χ. μεταλλική από K, Na ή Cs) και το μικροαμπερόμετρο G, μπορεί να μετρήσει κάποιο ηλεκτρικό ρεύμα έντασης i_e , αν από την κάθοδο εξέλθουν ηλεκτρόνια και φτάσουν στην άνοδο A.

Μεταξύ ανόδου – καθόδου δημιουργούμε ηλεκτρικό πεδίο, την ένταση του οποίου μπορούμε να μεταβάλλουμε με τη βοήθεια του διαιρέτη τάσης, αλλάζοντας την τάση V_{AC} . Ο διαιρέτης τάσης τροφοδοτείται από πηγή με ΗΕΔ E και διαθέτει μεσαία λήψη M , οπότε έχουμε τη δυνατότητα να αλλάζουμε πολικότητα στην τάση V_{AC} .

Στην ουσία με αυτή τη διάταξη μετράμε το φωτορεύμα i_e μεταβάλλοντας την τάση V_{AC} , την ένταση I και τη συχνότητα f της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και το υλικό της καθόδου.

σχήμα 1



αερόκενος κύλινδρος

παράθυρο

B. Πειραματικά δεδομένα

1. Η ένταση i_e του ρεύματος των φωτοηλεκτρονίων εξαρτάται από τη συχνότητα f της ακτινοβολίας. Π.χ. για υπέρυθη ακτινοβολία δεν υπάρχει ρεύμα.

Ανάλογα με το υλικό της καθόδου, υπάρχει μια ελάχιστη τιμή συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας f_0 (**συχνότητα κατωφλίου**) κάτω από την οποία δεν εξέρχονται φωτοηλεκτρόνια.

2. Υπάρχει μια διαφορά δυναμικού $-V_0$, με την οποία μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ανασχετικό ηλεκτρικό πεδίο και να μηδενίσουμε το ρεύμα i_e των φωτοηλεκτρονίων. Η τάση V_0 λέγεται **τάση αποκοπής**. Στο σχήμα 1 πρέπει να μεταφέρουμε το δρομέα δ αριστερά του M . Για τάσεις μεγαλύτερες από αυτή την τιμή δεν υπάρχει ρεύμα. Γιατί συμβαίνει αυτό; Τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από την κάθοδο με διάφορες κινητικές ενέργειες. Είναι προφανές πως αν επιτύχουμε να αποκόψουμε τα πιο κινητικά, δηλαδή αυτά με τη **μέγιστη κινητική ενέργεια** K_{max} , θα μηδενίσουμε το ρεύμα.

Το ΘΜΚΕ μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο δίνει

$$0 - K_{max} = W_{F\eta\lambda} \Leftrightarrow -K_{max} = -e \cdot V_0 \Leftrightarrow K_{max} = e \cdot V_0 \quad (1)$$

Η (1) μας δίνει ένα σπουδαίο πειραματικό στοιχείο: Μετρώντας την τάση αποκοπής βρίσκω τη μέγιστη κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται τα φωτοηλεκτρόνια.

Παράδειγμα: Αν η τάση αποκοπής είναι $V_0 = 1,2V$ η μέγιστη κινητική ενέργεια των εξερχόμενων φωτοηλεκτρονίων είναι $K_{max} = 1,2eV$

3. Αν αυξήσουμε τη συχνότητα f της ακτινοβολίας η V_0 αυξάνεται. Και από τη σχέση (1) καταλαβαίνουμε ότι η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από την κάθοδο αυξάνεται. Το πείραμα μάλιστα δείχνει ότι η σχέση της κινητικής ενέργειας με τη συχνότητα είναι γραμμική της μορφής

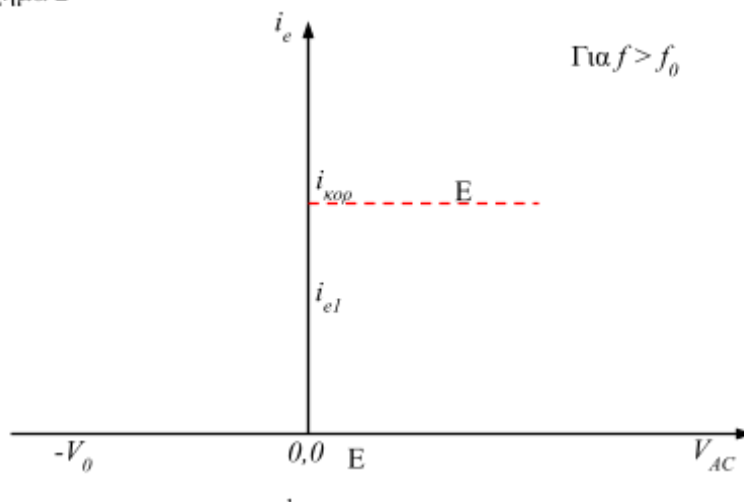
$$K = \alpha f - b$$

Αυτό ήταν ανεξήγητο για την Κλασική Φυσική, αφού δεν υπήρχε σχέση μεταξύ της κινητικής ενέργειας και της συχνότητας.

4. Η ταχύτητα εξόδου των φωτοηλεκτρονίων από την κάθοδο, δεν εξαρτάται από την ένταση I του φωτός. Όσο και να αυξήσουμε την ένταση δεν αυξάνεται η κινητική ενέργεια, πάλι ανεξήγητο με την Κλασική Φυσική.

5. Στο διάγραμμα του σχήματος 2 βλέπουμε ότι καθώς αυξάνουμε την τάση V_{AC} , από μια θετική τιμή τάσης και μετά, η ένταση του ρεύματος σταθεροποιείται σε μια τιμή $i_{κορ}$, που λέγεται **ρεύμα κόρου**.

σχήμα 2



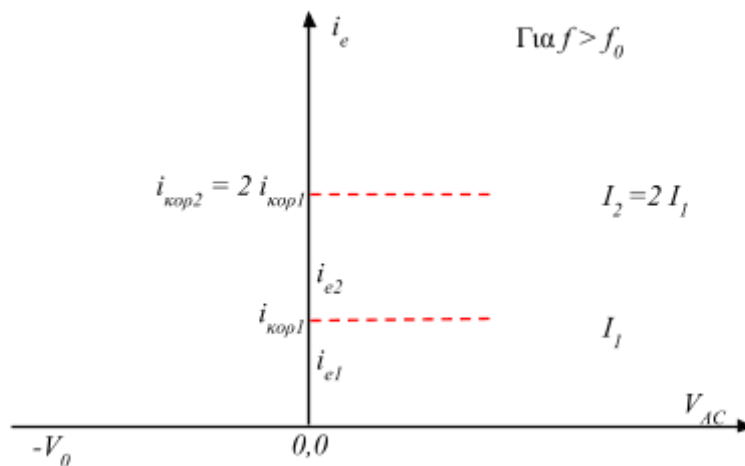
Πλέον όσα ηλεκτρόνια βγαίνουν από την κάθοδο φτάνουν στην άνοδο, οπότε όσο και να αυξάνουμε την τάση ο αριθμός των ηλεκτρονίων του φωτορεύματος ανά μονάδα χρόνου, δεν θα αλλάζει, άρα το ρεύμα θα παραμένει σταθερό.

Επίσης στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι ακόμα και **μηδέν** να είναι η τάση V_{AC} , υπάρχει ρεύμα φωτοηλεκτρονίων i_{e1} , που σημαίνει ότι εξέρχονται κάποια ηλεκτρόνια από την κάθοδο και φτάνουν στην άνοδο.

6. Με δεδομένη τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η ένταση του ρεύματος i_e των φωτοηλεκτρονίων είναι ανάλογη της έντασης του φωτός I .

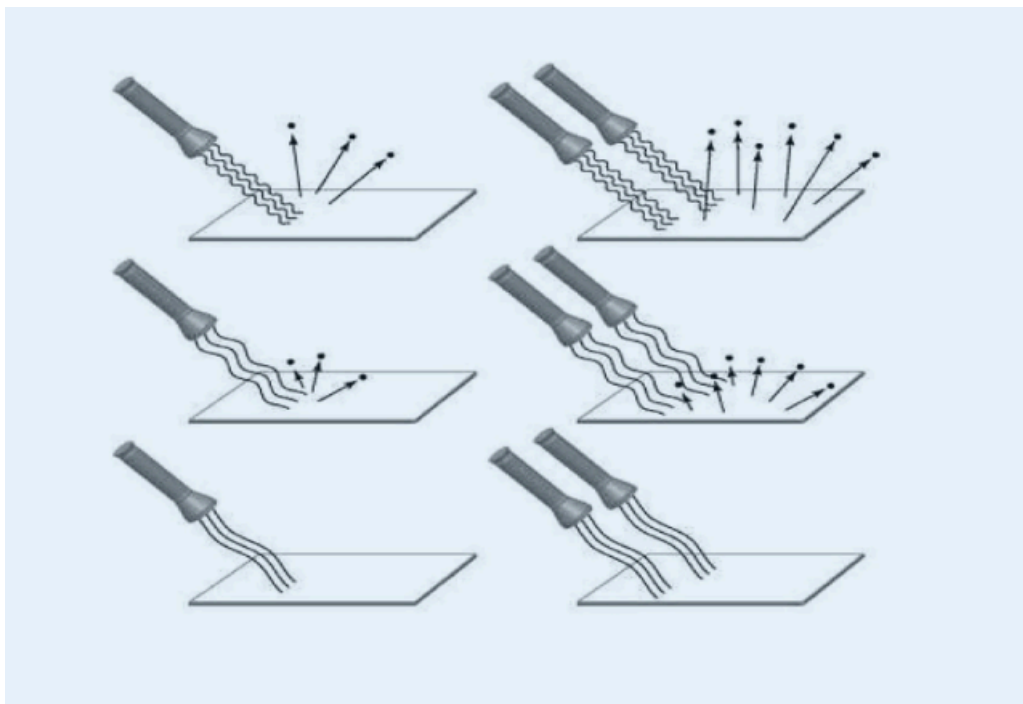
Ας δούμε το σχήμα 3, όπου έχει παρασταθεί γραφικά η ένταση i_e του ρεύματος των φωτοηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την τάση ανόδου - καθόδου V_{AC} , για δύο διαφορετικές τιμές έντασης της ακτινοβολίας I_1, I_2 με $I_2 > I_1$.

σχήμα 3



7. Όσο αμυδρό και να είναι το προσπίπτον φως, δηλαδή η ένταση της ακτινοβολίας, δεν παρατηρείται καμιά καθυστέρηση χρόνου έναρξης του φαινομένου. Η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων είναι ακαριαία.

Σχηματική αναπαράσταση



Α. Η εξήγηση του Einstein

Τι μπορεί να σκέφτηκε ο Einstein; Προφανώς κανείς δεν ξέρει... Αλλά ίσως να σκέφτηκε:

α. Η ενέργεια σχετίζεται με τη συχνότητα. Τα ηλεκτρόνια εξάγονται από την κάθοδο μόνο για μεγάλες συχνότητες.

β. Η κινητική ενέργεια συνδέεται με τη συχνότητα με γραμμική σχέση:

$$K = hf - \phi$$

γ. Η εκπομπή των ηλεκτρονίων γίνεται ακαριαία. Άρα πρέπει να παίρνουν την ενέργεια μονομιάς, σε πακέτο και όχι σταδιακά όπως τη φέρνει ένα κύμα.

Έτσι λοιπόν διατύπωσε την περίφημη υπόθεση:

1. Στο Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο, το φως συμπεριφέρεται σαν ένα σύνολο «σωματιδίων». Κάθε ένα από αυτά, ονομάζεται **φωτόνιο** και κουβαλάει ενέργεια και ορμή, παρόλο που έχει μηδενική μάζα ηρεμίας.

- Ενέργεια φωτονίου:

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

όπου $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ η σταθερά του Planck, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

- Ορμή φωτονίου:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

2. Χρειάζεται ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο, ώστε να εξέλθει από το μέταλλο, που λέγεται **έργο εξαγωγής ϕ** . Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να εξέλθει από την επιφάνεια της καθόδου μόνο αν απορροφήσει ένα φωτόνιο ενέργειας E μεγαλύτερης από το έργο εξαγωγής ϕ .

- Συνθήκη εξόδου φωτοηλεκτρονίου:

$$E > \phi \Leftrightarrow h \cdot f > \phi \Leftrightarrow f > \frac{\phi}{h}$$

Δηλαδή μόνο πάνω από μια τιμή **συχνότητας κατωφλίου** $f_0 = \frac{\phi}{h}$ θα υπάρξει εξαγωγή.

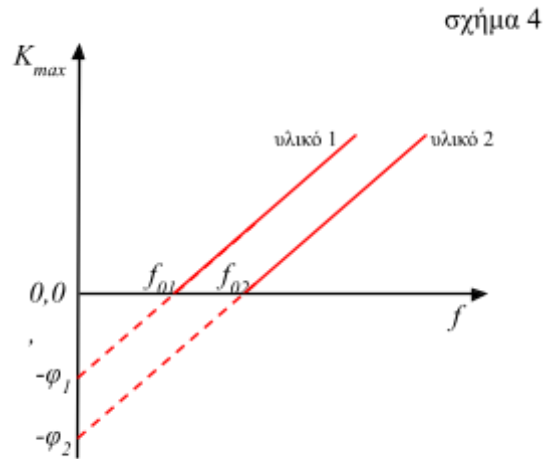
3. Το έργο εξαγωγής ϕ είναι το ελάχιστο δυνατό έργο που χρειάζεται για την δημιουργία φωτοηλεκτρονίων, που σημαίνει ότι με αυτό εξάγονται τα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια, τα οποία βγαίνοντας θα διαθέτουν τη μέγιστη δυνατή κινητική ενέργεια K_{max} . Αν τότε πάρουμε την ΑΔΕ για μια απορρόφηση φωτονίου ενέργειας E , από ηλεκτρόνιο που εξέρχεται με τη μέγιστη κινητική ενέργεια K_{max} προκύπτει:

$$E = K_{max} + \phi \Leftrightarrow K_{max} = h \cdot f - \phi \quad (2)$$

Η σχέση (2) δηλώνει ότι η K_{max} είναι γραμμική συνάρτηση της συχνότητας f , που ικανοποιεί τα πειραματικά αποτελέσματα.

Αν χαράξουμε στο ίδιο σύστημα αξόνων τις γραφικές παραστάσεις της (2) για δυο διαφορετικά υλικά καθόδου, παίρνουμε τα διαγράμματα του σχήματος 4. Οι ευθείες βγαίνουν παράλληλες αφού η κλίση τους είναι

$$e\phi\theta = h$$



4. Για θετικές τιμές τάσης V_{AC} το ρεύμα σταθεροποιείται στην μέγιστη τιμή $i_{κορ}$, η οποία είναι ανάλογη της έντασης I του φωτός.

Με δεδομένη συχνότητα, αύξηση στην ένταση I της ακτινοβολίας, προκαλεί αύξηση στον αριθμό των απορροφούμενων φωτονίων ανά sec. Άρα αύξηση στον αριθμό των εκπεμπόμενων φωτοηλεκτρονίων και στην ένταση i_e του ρεύματος.

Πράγματι:

$$I = \frac{E_{ολ,φ}}{\Delta t \cdot A} \Leftrightarrow I = \frac{N \cdot h \cdot f}{\Delta t \cdot A} \Leftrightarrow I = n_{\phi} \cdot \frac{h \cdot f}{A} \Leftrightarrow n_{\phi} = \frac{I \cdot A}{h \cdot f}$$

όπου $n_{\phi} = \frac{N}{\Delta t}$ η **φωτονική ροή**.

Παρατηρούμε ότι η φωτονική ροή είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας.

5. Δεν υπάρχει καμία καθυστέρηση έναρξης του φαινομένου, από τη στιγμή που διαθέτουμε φωτόνια επαρκούς ενέργειας, εφόσον αυτά απορροφηθούν ακέραια.

6. Η τάση αποκοπής $-V_0$ εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα f του φωτός, διότι από τις εξισώσεις (1) και (2), προκύπτει:

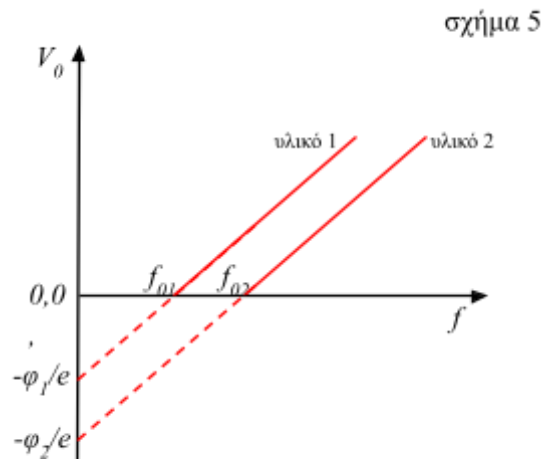
$$e \cdot V_0 = h \cdot f - \phi \Leftrightarrow$$

$$V_0 = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{\phi}{e} \quad (3)$$

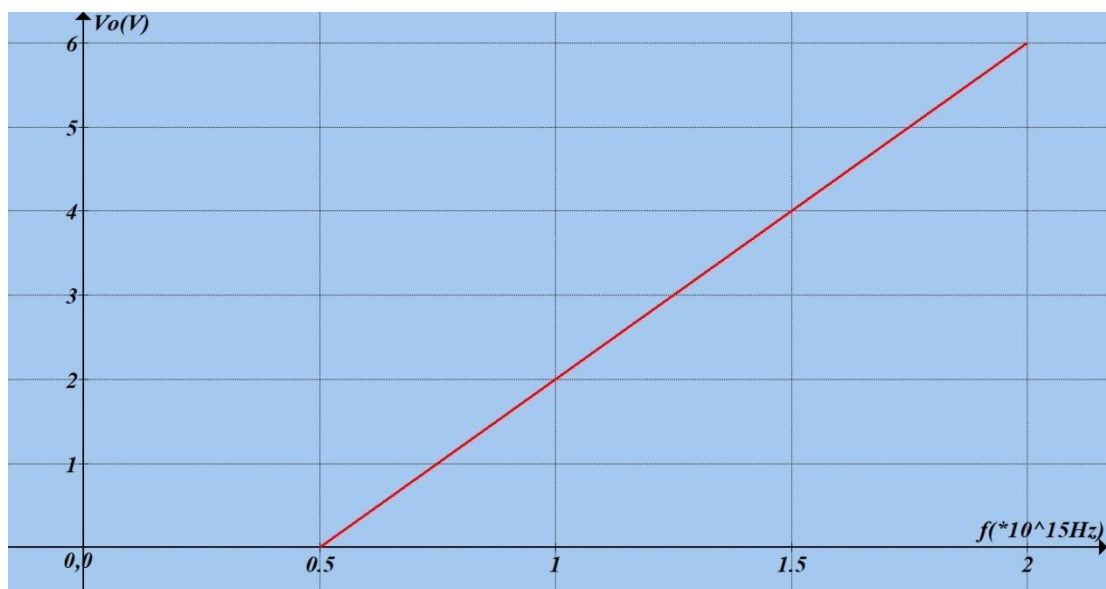
Η σχέση (3) δηλώνει ότι η V_0 είναι γραμμική συνάρτηση της συχνότητας f .

Αν μάλιστα χαράξουμε στο ίδιο σύστημα αξόνων τις γραφικές παραστάσεις της (3) για δυο διαφορετικά υλικά καθόδου, παίρνουμε τα διαγράμματα του σχήματος 5. Οι ευθείες βγαίνουν παράλληλες αφού η κλίση τους είναι

$$\epsilon\phi\theta = \frac{h}{e}$$



Έστω ως παράδειγμα της σχέσης (3), η γραφική παράσταση:



Από την παραπάνω γραφική παράσταση μπορούμε να βρούμε

α) Τη συχνότητα κατωφλίου.

$$f_0 = 0,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz.}$$

β) Το έργο εξαγωγής.

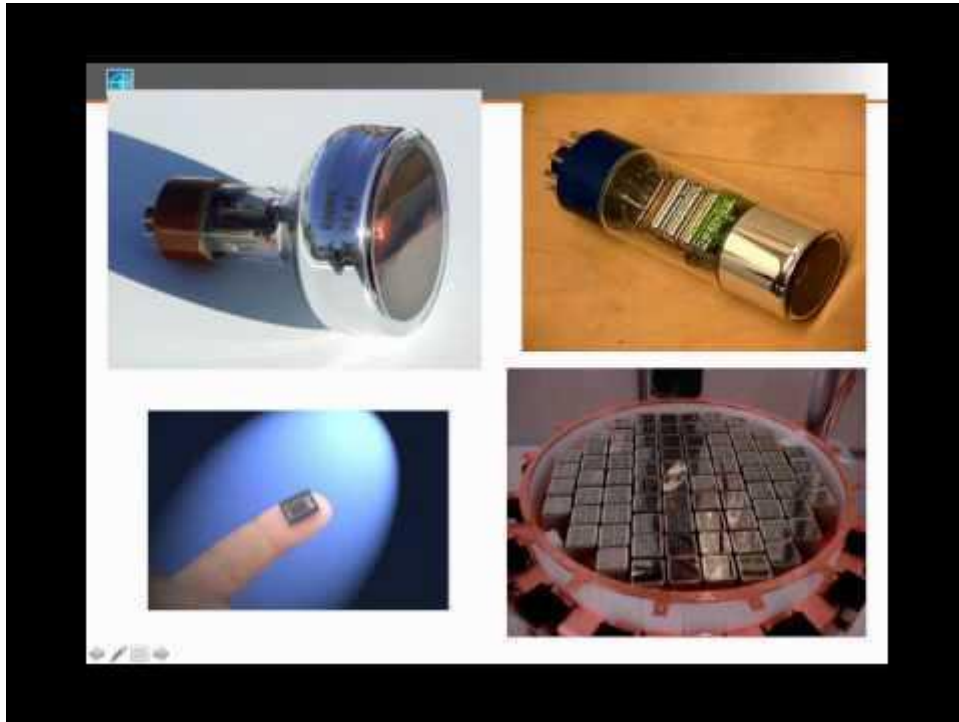
$$\begin{aligned} \varphi &= h \cdot f_0 \Leftrightarrow \varphi = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 0,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \Leftrightarrow \varphi = 3,315 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ &\xrightarrow{1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \varphi = 2,072 \text{ eV} \end{aligned}$$

Παρατήρηση:

Αν χαράξουμε πειραματικά την παραπάνω γραφική παράσταση, μπορούμε να βρούμε τη σταθερά του Planck, αφού η κλίση της ευθείας είναι πάντα

$$\varepsilon\varphi\theta = \frac{h}{e}$$

Ε. Χρήσεις του φωτοηλεκτρικού φαινομένου



Ενώ η εξήγηση Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου ακούγεται εξαιρετικά θεωρητική, υπάρχουν πολλές πρακτικές εφαρμογές.

Τα φωτοηλεκτρικά κύτταρα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την ανίχνευση φωτός, χρησιμοποιώντας ένα σωλήνα κενού που περιέχει μια κάθοδο, για να εκπέμψει ηλεκτρόνια και μια άνοδο, για να συγκεντρώσει το προκύπτον ρεύμα. Σήμερα, αυτοί οι «φωτοσωλήνες» έχουν προχωρήσει σε φωτοδιόδους με βάση ημιαγωγούς, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως τα ηλιακά (φωτοβολταϊκά) κύτταρα και οι τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών.

Οι σωλήνες φωτοπολλαπλασιαστή είναι μια παραλλαγή του φωτοσωλήνα, αρκετές μεταλλικές πλάκες που ονομάζονται dynodes. Τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται αφού το φως χτυπήσει τις καθόδους. Τα ηλεκτρόνια στη πέφτουν στον πρώτο dynode, ο οποίος απελευθερώνει περισσότερα που πέφτουν στον δεύτερο dynode, στη συνέχεια στον τρίτο, τέταρτο και καθεξής. Κάθε dynode ενισχύει το ρεύμα και μετά από περίπου 10 dynodes, αρκετά ισχυρό ώστε οι φωτοπολλαπλασιαστές να ανιχνεύσουν ακόμη και φωτόνια. Παραδείγματα αυτού χρησιμοποιούνται στη φασματοσκοπία (για περισσότερα σχετικά με τις χημικές συνθέσεις των αστερών, για και στις αξονικές τομογραφίες (CAT) που εξετάζουν το σώμα.

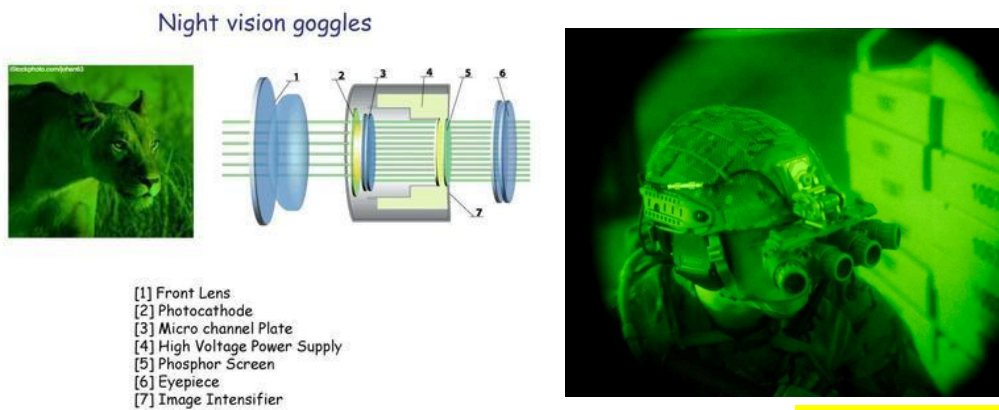


αλλά έχουν
συνέχεια
ηλεκτρόνια
ούτω
το ρεύμα είναι
μεμονωμένα
να μάθουμε
παράδειγμα)

Άλλες εφαρμογές των φωτοδίοδων και των φωτοπολλαπλασιαστών περιλαμβάνουν:

- τεχνολογία απεικόνισης, συμπεριλαμβανομένων των (παλαιότερων) σωλήνων κάμερας τηλεόρασης.
- μελέτη πυρηνικών διεργασιών ·
- χημικές αναλύσεις υλικών με βάση τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια τους.

- θεωρητικές πληροφορίες για το πώς τα ηλεκτρόνια στα άτομα μεταβαίνουν μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών καταστάσεων.
- Night Vision, που φαίνεται και στην εικόνα



ΣΤ. Μια άσκηση

Σε μια διάταξη επίδειξης του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου, η μέγιστη ταχύτητα εξόδου των ηλεκτρονίων από την κάθοδο είναι $v_{max} = 6,63 \cdot 10^5 \text{ m/s}$. Δίνονται: μάζα ηλεκτρονίου $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, φορτίο ηλεκτρονίου $q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, ταχύτητα φωτός στο κενό $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, σταθερά Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

α) Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου τον τύπο της Κλασσικής Μηχανικής; Δικαιολογείστε την απάντησή σας.

β) Ποια είναι η τάση αποκοπής;

γ) Αν η κάθοδος είναι από Νάτριο, για το οποίο το έργο εξαγωγής είναι $2,7 \text{ eV}$, ποια είναι η συχνότητα κατωφλίου του προσπίπτοντος φωτός και το αντίστοιχο μήκος κύματος; Σε ποια περιοχή του φάσματος ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών ανήκει αυτό το μήκος κύματος;

Απάντηση

α) Η δοσμένη ταχύτητα είναι το $\frac{v}{c} \cdot 100 = \frac{6,63 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^8} \cdot 10^2 = 0,2\%$ της ταχύτητας του φωτός. Άρα δε χρειάζεται να πάρουμε τύπους Σχετικιστικής Μηχανικής.

Επιπλέον, η ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου είναι

$$E_{e,0} = m_0 \cdot c^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 8 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

Αν υπολογίσουμε κλασσικά την κινητική ενέργεια βρίσκουμε

$$K_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = \frac{1}{2} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (6,63 \cdot 10^5)^2 = 2 \cdot 10^{-19} \text{ J} \ll E_{e,0}$$

$$\beta) \text{ Αφού } K_{\max} = e \cdot V_0 \Leftrightarrow V_0 = \frac{K_{\max}}{e} \Leftrightarrow V_0 = \frac{2 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \Leftrightarrow V_0 = 1,25V$$

$$\gamma) \varphi = h \cdot f_0 \Leftrightarrow f_0 = \frac{\varphi}{h} \Leftrightarrow f_0 = \frac{2,7eV \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} J / eV}{6,63 \cdot 10^{-34} Js} \Leftrightarrow f_0 = 0,65 \cdot 10^{15} Hz$$

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \Leftrightarrow \lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{0,65 \cdot 10^{15}} \Leftrightarrow \lambda = 4,6210^{-7}$$

Το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι

Το φως αυτό είναι ορατό, στην περιοχή του ιώδους.

Z. Κάποια ερωτήματα...

1. Η απορρόφηση του φωτονίου στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, μπορεί να γίνει από ελεύθερο ακίνητο ηλεκτρόνιο;

Απάντηση

Υποθέτοντας ότι το ελεύθερο ηλεκτρόνιο είναι αρχικά ακίνητο και το φωτόνιο μεταβιβάζει όλη την ενέργειά του στο ηλεκτρόνιο, εφαρμόζουμε τις δυο βασικές αρχές:

$$\dot{p}_\varphi + \dot{p}_e = p_\varphi + 0_e \Leftrightarrow \frac{hf}{c} + \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \cdot v \Leftrightarrow \frac{hf}{c} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \cdot v \quad (1)$$

ΑΔΟ:

αφού το ηλεκτρόνιο κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με το φωτόνιο.

ΑΔΕ:

$$E_\varphi + E_e = E_\varphi + hf_e + 0_e = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \Leftrightarrow \frac{hf}{c} + \frac{m_0 c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \Leftrightarrow$$

$$\frac{hf}{c} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} c \left(1 - \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \right) \quad (2)$$

Από τις (1) και (2) παίρνουμε

$$v = c \left(1 - \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \right) \Leftrightarrow \frac{v}{c} = 1 - \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \Leftrightarrow \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 1 - \frac{v}{c} \Leftrightarrow$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \left(1 - \frac{v}{c} \right)^2 \Leftrightarrow 1 - \frac{v^2}{c^2} = 1 + \frac{v^2}{c^2} - \frac{2v}{c} \Leftrightarrow \frac{2v^2}{c^2} = \frac{2v}{c} \Leftrightarrow \frac{2v}{c} \left(\frac{v}{c} - 1 \right) = 0$$

Η πρώτη λύση είναι $\frac{\nu}{c} = 0 \xrightarrow{(1)} f = 0$, δηλαδή φωτόνιο μηδενικής ενέργειας, **άτοπο**.

Η δεύτερη λύση είναι $\frac{\nu}{c} = 1$, **αδύνατο** σύμφωνα με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας.

2. Ποια ηλεκτρόνια ενός στερεού μετάλλου εξάγονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;

Εξαρτάται από την ενέργεια του φωτός που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση του πειράματος.

Εάν η ενέργεια του φωτός είναι μικρή, για παράδειγμα, χρησιμοποιήσουμε υπεριώδεις (UV) φως για τα πειράματά μας, τότε ένα φωτόνιο UV μπορεί να εξάγει μόνο τα ηλεκτρόνια χαμηλότερης ενέργειας. Σε ένα τυπικό στερεό μέταλλο, τα ηλεκτρόνια χαμηλότερης ενέργειας δεν περιορίζονται πραγματικά σε ένα μεμονωμένο άτομο, αλλά είναι «ελεύθερα» να κινούνται. Αυτή η ελευθερία κινήσεων οδηγεί σε αυτό που είναι γνωστό ως ηλεκτρονική ζώνη αγωγιμότητας, που περιλαμβάνει μια περιοχή τιμών ενέργειας μερικών eV. Επομένως, το ηλεκτρόνιο προέρχεται από μια ζώνη ηλεκτρονίων και όχι από ένα άτομο.

- Από την άλλη, αν η ενέργεια του φωτός είναι μεγάλη, για παράδειγμα, χρησιμοποιήσουμε ακτίνες X, τότε τα πολύ ενεργητικά φωτόνια μπορούν να χτυπήσουν τα ηλεκτρόνια που κινούνται πιο κοντά στον πυρήνα και επομένως είναι πιο στενά συνδεδεμένα. Αυτά τα ηλεκτρόνια ανήκουν πράγματι σε ένα συγκεκριμένο άτομο και δεν τα μοιράζονται άλλα άτομα του μετάλλου. Σε αυτή την περίπτωση, το ηλεκτρόνιο βγαίνει από ένα συγκεκριμένο άτομο (ιονισμός του ατόμου).

Αυτό όμως δεν χαρακτηρίζεται ως Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αλλά Φωτοϊονισμός

Φαινόμενο	Ποια ηλεκτρόνια επηρεάζονται;	Τύποι φωτονίων που το προκαλούν
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	Αγώγιμα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας	Υπέρυθρη, ορατή, υπεριώδης ακτινοβολία
Φωτοϊονισμός	Εσωτερικά ηλεκτρόνια από τις στοιβάδες K, L, M	Ακτίνες X, ακτίνες γ

Η. Έργο εξαγωγής για Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Το έργο εξαγωγής ϕ δεν είναι απόλυτα σταθερό για κανένα μέταλλο, αλλά μπορεί να κυμαίνεται λόγω φυσικών, χημικών και δομικών παραγόντων.

Παραδείγματα μετάλλων με εύρος τιμών για το έργο εξαγωγής

Μέταλλο	Εύρος έργου εξαγωγής $\phi(eV)$
Νάτριο (Na)	2.28 - 2.75
Αλουμίνιο (Al)	4.06 - 4.26
Χαλκός (Cu)	4.48 - 4.94
Χρυσός (Au)	4.7 - 5.47
Πλατίνα (Pt)	5.32 - 6.35

Γιατί συμβαίνει αυτό;

1. Διαφορετικός προσανατολισμός του κρυστάλλου
 - ο Τα άτομα σε μια επιφάνεια μετάλλου δεν είναι πάντα διατεταγμένα με τον ίδιο τρόπο.
 - ο Διαφορετικές κρυσταλλικές επιφάνειες (π.χ. (100), (110), (111)) έχουν διαφορετική ηλεκτρονική δομή, άρα και ελαφρώς διαφορετικό έργο εξαγωγής.
2. Προσμίξεις και οξείδωση
 - ο Αν στην επιφάνεια υπάρχουν οξείδια, υδρογονάνθρακες ή άλλες ακαθαρσίες, το έργο εξαγωγής μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί.
 - ο Για παράδειγμα, ένα καθαρό φύλλο αλουμινίου έχει χαμηλότερο έργο εξαγωγής από ένα που έχει αναπτυχθεί λεπτό στρώμα οξειδίου του αργιλίου (Al_2O_3).
3. Προσρόφιση αερίων από τον αέρα
 - ο Αέρια όπως το οξυγόνο ή το νερό μπορούν να προσροφηθούν στην επιφάνεια, μεταβάλλοντας το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο και αλλάζοντας ελαφρώς το ϕ .

4. Εσωτερικές τάσεις και μικροδομή του μετάλλου

- ο Σε μεταλλικές επιφάνειες που έχουν υποστεί μηχανική επεξεργασία (π.χ. λείανση, χάραξη, εναπόθεση λεπτού φιλμ), το έργο εξαγωγής μπορεί να αλλάξει λόγω εσωτερικών μηχανικών τάσεων.

- **Ερώτηση:** Ποιο στοιχείο έχει το ελάχιστο και ποιο το μέγιστο έργο εξαγωγής;

Απάντηση

Το στοιχείο με το **ελάχιστο** έργο εξαγωγής είναι το **καίσιο (Cs)**, ενώ το στοιχείο με το **μέγιστο** έργο εξαγωγής είναι συνήθως ο **άνθρακας (C)** σε μορφή **διαμαντιού**.

Ελάχιστο έργο εξαγωγής: Καίσιο (Cs)

- $\phi \approx 1.9 \text{ eV}$
- Το καίσιο έχει πολύ χαλαρά δεσμευμένα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, γεγονός που το κάνει ιδιαίτερα κατάλληλο για φωτοκαθόδους και φωτοευαίσθητες εφαρμογές.
- Άλλα αλκάλια όπως το ρουβίδιο (Rb) και το νάτριο (Na) έχουν επίσης χαμηλό έργο εξαγωγής, αλλά το καίσιο έχει το χαμηλότερο από όλα.

Μέγιστο έργο εξαγωγής: Διαμάντι (C)

- $\phi \approx 7.0 \text{ eV}$
- Ο άνθρακας σε μορφή διαμαντιού έχει πολύ ισχυρούς δεσμούς και μια ευρεία ενεργειακή ζώνη, γεγονός που κάνει εξαιρετικά δύσκολη την εξαγωγή ηλεκτρονίων από την επιφάνειά του.
- Αυτό το υψηλό έργο εξαγωγής κάνει το διαμάντι μονωτικό, εκτός αν τροποποιηθεί (π.χ. με προσθήκη προσμείξεων όπως το βόριο).

Πηγές

University Physics Young-Freedman
Fundamentals of Physics [10th Edition]

Serway, Jewett - Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, 9th Edition

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/photoelec.html>

A. Θεοδοσίου: Ηλεκτρισμός

[Photocell: Circuit Diagram, Working, Types and Its Applications \(elprocus.com\)](#)

https://youtu.be/DWki9M5Hl_M

<https://youtu.be/Y-rW8HLLJgY>

Ανδρέας Ριζόπουλος