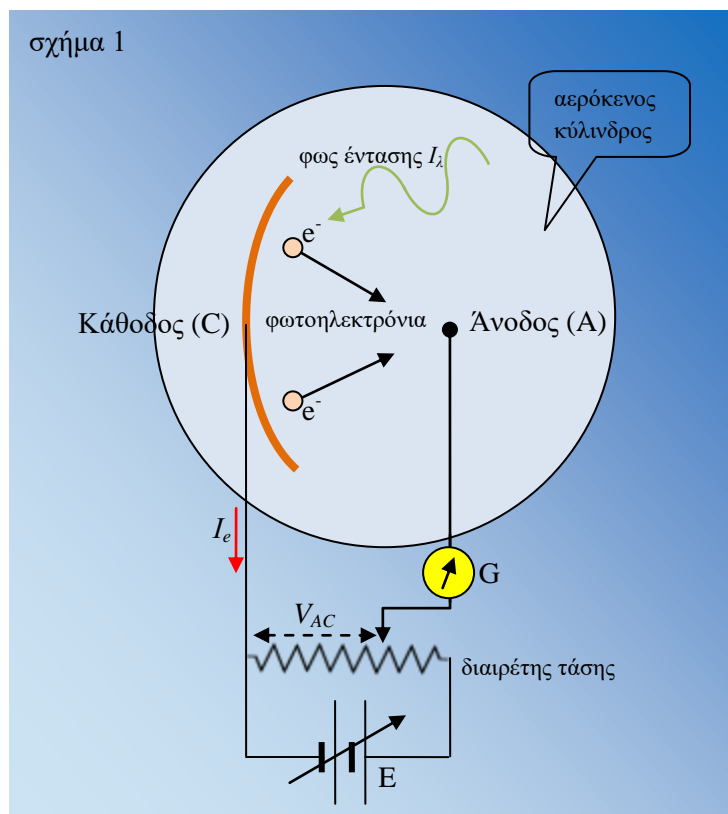


Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

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

Α. Πειραματική Διάταξη



Μονοχρωματικό φως εισέρχεται στον αερόκενο κύλινδρο (σχήμα 1), προσπίπτει στην κάθοδο C (π.χ. μεταλλική από K, Na ή Cs) και το γαλβανόμετρο 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} . Η πηγή με ΗΕΔ E, μπορεί να αλλάζει και πολικότητα.

Β. Πειραματικά δεδομένα

1. Αύξηση της έντασης του φωτός I_l προκαλεί αύξηση της έντασης του ρεύματος I_e των φωτοηλεκτρονίων.
2. Υπάρχει μια διαφορά δυναμικού $-V_0$ (τάση αποκοπής - αντίθετης πολικότητας από αυτή που φαίνεται στο σχήμα 1), με την οποία μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ανασχετικό ηλεκτρικό πεδίο και να μηδενίσουμε το ρεύμα I_e των φωτοηλεκτρονίων. 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

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

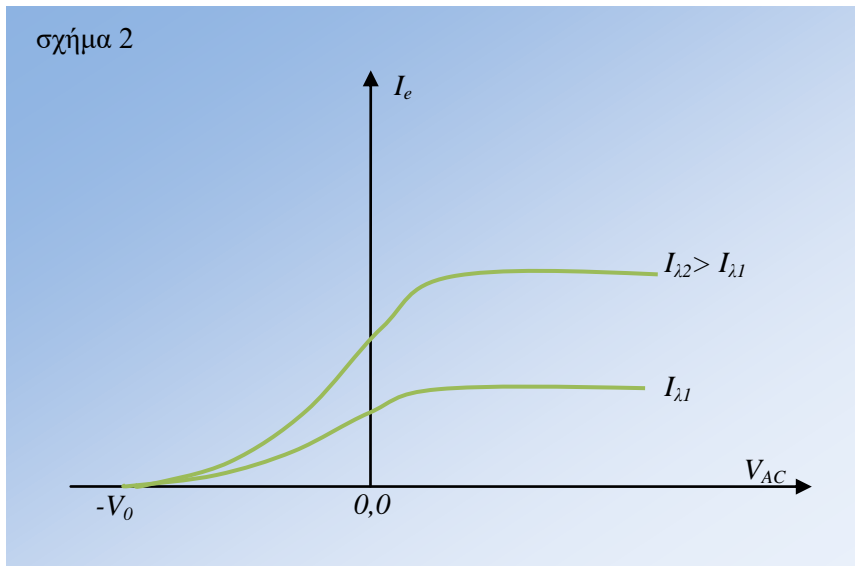
Η τάση αποκοπής δεν εξαρτάται από την ένταση I_λ της ακτινοβολίας, αλλά εξαρτάται από τη συχνότητα f της ακτινοβολίας.

3. Η ένταση του ρεύματος των φωτοηλεκτρονίων εξαρτάται από τη συχνότητα f της ακτινοβολίας. Ανάλογα με το υλικό της καθόδου, υπάρχει μια ελάχιστη τιμή f_0 (**συχνότητα κατωφλίου**) κάτω από την οποία δεν εξέρχονται φωτοηλεκτρόνια.

4. Όσο αμυδρό και να είναι το προσπίπτον φως, δηλαδή η ένταση της ακτινοβολίας, δεν παρατηρείται καμιά καθυστέρηση χρόνου έναρξης του φαινομένου.

5. Η ταχύτητα εξόδου των φωτοηλεκτρονίων από την κάθοδο, δεν εξαρτάται από την ένταση I_λ του φωτός, παρά μόνο από τη συχνότητα f και αυξάνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα.

6. Ας δούμε το σχήμα 2, 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 $I_{\lambda 1}, I_{\lambda 2} > I_{\lambda 1}$ έντασης της ακτινοβολίας.



Φαίνεται η τάση αποκοπής να μην επηρεάζεται από την ένταση I_λ , αλλά η ένταση του ρεύματος των φωτοηλεκτρονίων αυξάνεται όταν αυξάνεται η ένταση του φωτός.

Γ. Η αποτυχία της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας Maxwell

1. Η ένταση I_λ της ακτινοβολίας εξαρτάται από το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, δηλαδή την μεταφερόμενη ενέργεια και όχι από τη συχνότητα, άρα θα έπρεπε να συμβαίνει το φαινόμενο για οποιαδήποτε συχνότητα f .

2. Χρειάζεται ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο ώστε να εξέλθει από το μέταλλο, που λέγεται **έργο εξαγωγής ϕ** (πίνακας Η στο τέλος του άρθρου). Αν το φως είναι αμυδρό, θα χρειαζόταν χρόνος για να μεταφερθεί από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αυτό το ποσό, άρα καθυστέρηση στην έναρξη του φαινομένου.

3. Επειδή η ένταση I_λ της ακτινοβολίας εξαρτάται από την μεταφερόμενη ενέργεια από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, θα έπρεπε η τάση αποκοπής να αυξάνεται με την αύξηση της έντασης I_λ . Καθώς η ένταση I_λ δεν εξαρτάται από τη συχνότητα f , θα έπρεπε η τάση αποκοπής να μην επηρεάζεται από τη συχνότητα.

Α. Η εξήγηση του Einstein

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. 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:

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

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

3. Με δεδομένη συχνότητα, αύξηση στην ένταση I_λ 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.

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

5. Η τάση αποκοπής $-V_0$ εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα f του φωτός, διότι εφαρμόζοντας την ΑΔΕ σε μια απορρόφηση φωτονίου ενέργειας E από ηλεκτρόνιο που εξέρχεται με τη μέγιστη κινητική ενέργεια K_{max} της εξίσωσης (1), προκύπτει:

$$E = K_{max} + \varphi \Leftrightarrow h \cdot f = e \cdot V_0 + \varphi \Leftrightarrow$$

$$V_0 = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{\varphi}{e} \quad (2)$$

Η σχέση (2) δηλώνει ότι η V_0 είναι γραμμική συνάρτηση της συχνότητας f .

Έστω ως παράδειγμα της σχέσης (2), η γραφική παράσταση:



Από την παραπάνω γραφική παράσταση μπορούμε να βρούμε

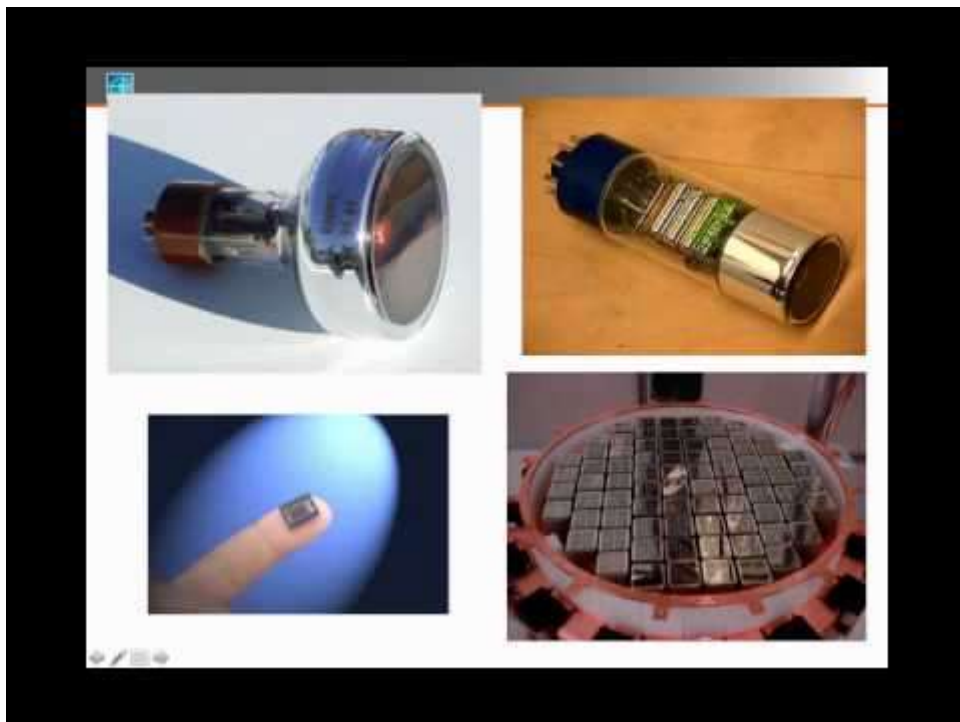
α) Τη συχνότητα κατωφλίου.

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

β) Το έργο εξαγωγής.

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

Ε. Χρήσεις του φωτοηλεκτρικού φαινομένου



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

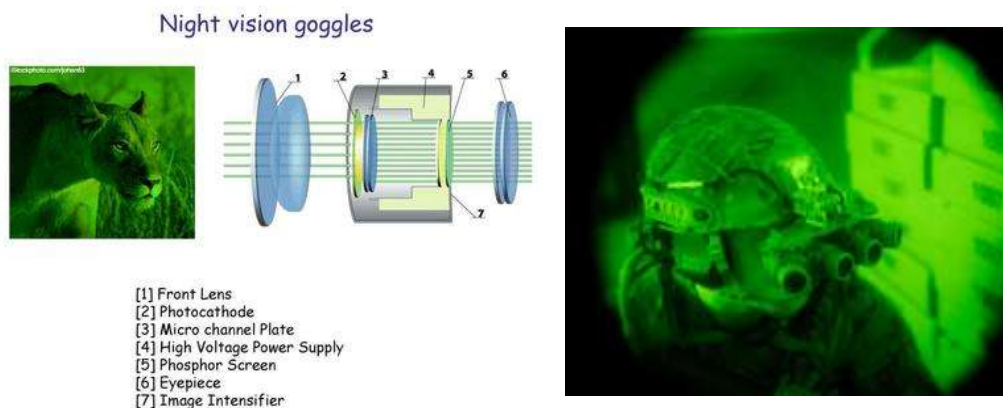
Τα φωτοηλεκτρικά κύτταρα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την ανίχνευση φωτός, χρησιμοποιώντας ένα σωλήνα κενού που περιέχει μια κάθοδο, για να εκπέμψει ηλεκτρόνια και μια άνοδο, για να συγκεντρώσει το προκύπτον ρεύμα. Σήμερα, αυτοί οι «φωτοσωλήνες» έχουν προχωρήσει σε φωτοδιόδους με βάση ημιαγωγούς, που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

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



Άλλες εφαρμογές των φωτοδίοδων και των φωτοπολλαπλασιαστών περιλαμβάνουν:

- τεχνολογία απεικόνισης, συμπεριλαμβανομένων των (παιλιότερων) 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 $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, φορτίου 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

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

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

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

$$\text{Το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι } \lambda = \frac{c}{f_0} \Leftrightarrow \lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{0,65 \cdot 10^{15}} \Leftrightarrow \lambda = 4,62 \cdot 10^{-7} \text{ ή } 462 \text{ nm}$$

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 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:

$$\text{ΑΔΟ: } p_{\varphi} + p_e = p_{\varphi}' + p_e' \Leftrightarrow \frac{hf}{c} + 0 = 0 + \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \cdot v \Leftrightarrow \frac{hf}{c} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \cdot v \quad (1)$$

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

ΑΔΕ:

$$E_{\varphi} + E_e = E_{\varphi}' + E_e' \Leftrightarrow hf + m_0c^2 = 0 + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \xrightarrow{/c} \frac{hf}{c} = \frac{m_0c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0c \Leftrightarrow$$

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

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 $\frac{v}{c} = 0 \xrightarrow{(1)} f = 0$, δηλαδή φωτόνιο μηδενικής ενέργειας, **άτοπο**.

Η δεύτερη λύση είναι $\frac{v}{c} = 1$, **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 υπεριώδες (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 ηλεκτρονιακή **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).

Η. Έργο εξαγωγής για Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Στοιχείο	Έργο εξαγωγής (eV)
Aluminum-Al	4.08
Beryllium-Be	5.0
Cadmium-Cd	4.07
Calcium-Ca	2.9
Carbon-C	4.81
Cesium-Cs	2.1
Cobalt-Co	5.0
Copper-Cu	4.7
Germanium-Ge	5
Gold-Au	5.1
Iron-Fe	4.5
Lead-Pb	4.14
Magnesium-Mg	3.68
Mercury-Hg	4.5
Nickel-Ni	5.01
Potassium-K	2.3, 2.29
Platinum-Pt	6.35
Selenium-Se	5.11
Silicon-Si	4.58
Silver-Ag	4.26-4.73
Sodium-Na	2.28, 2.36
Uranium-U	3.6
Zinc-Zn	4.3

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

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/DWki9M5HI_M

<https://youtu.be/Y-rW8HLIJgY>

Ανδρέας Ριζόπουλος