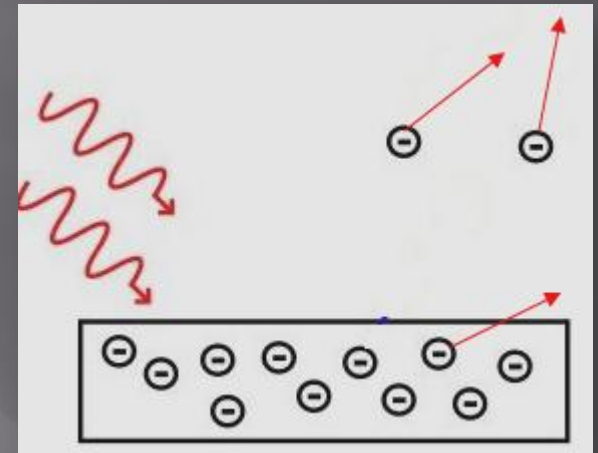


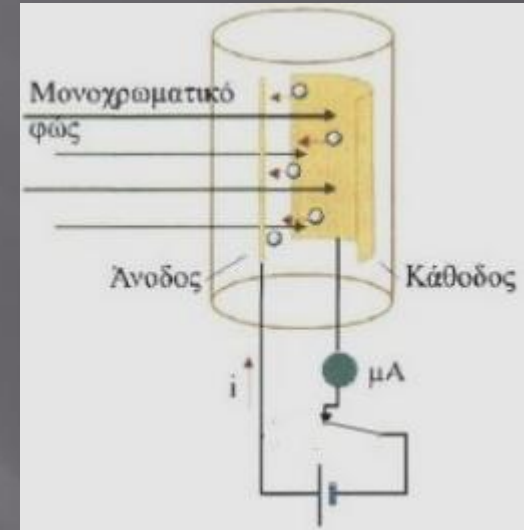
ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ



Το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια μεταλλική επιφάνεια απελευθερώνει ηλεκτρόνια στο περιβάλλον όταν πάνω της προσπίπτει φως.

Το φως είναι υπεριώδες και σε κάποιες περιπτώσεις μετάλλων, ορατό σε περιοχή κοντά στο υπεριώδες.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ



Στη πειραματική διάταξη το φως πέφτει στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια της καθόδου (με επίστρωση K , Cs) και τα αποσπώμενα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο. Έτσι δημιουργείται στο κύκλωμα το λεγόμενο **φωτοηλεκτρικό ρεύμα**. Άνοδος και κάθοδος βρίσκονται σε σωλήνα κενού

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

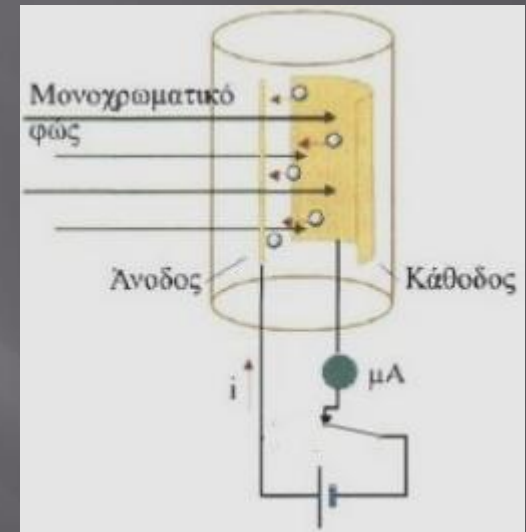
Το πείραμα λέει ...

1. Η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος αυξάνεται *ανάλογα* με την ένταση της φωτεινής δέσμης...

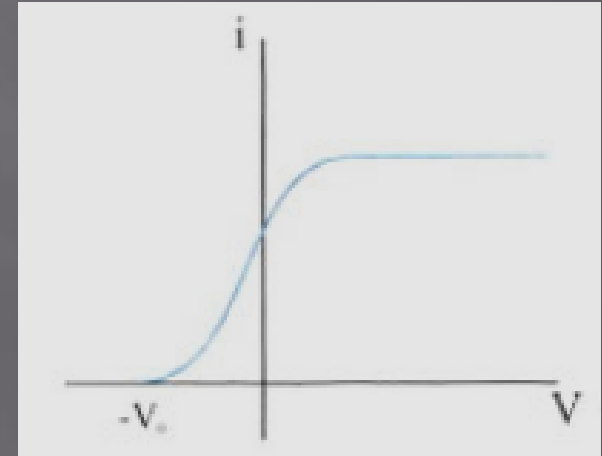
2. Το φαινόμενο συμβαίνει όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη f_0 , η τιμή της οποίας εξαρτάται από το ποιο είναι το μέταλλο (f_0 *συχνότητα κατωφλίου*).

3. Η κινητική ενέργεια των εξερχόμενων ηλεκτρονίων *εξαρτάται* από την συχνότητα της φωτεινής δέσμης.

4. Το φαινόμενο εμφανίζεται *σχεδόν ταυτόχρονα* με την πρόσπτωση της φωτεινής δέσμης στη κάθοδο.



ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

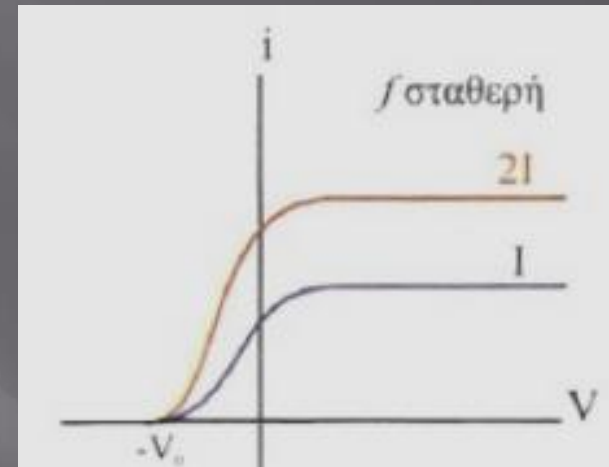


Πειραματική καμπύλη $v - i$

- α. Έχουμε ρεύμα όταν η τάση είναι μηδέν, δηλαδή όταν δεν υπάρχει μπαταρία!
- β. Έχουμε ρεύμα ακόμη και στην περίπτωση που η τάση είναι αρνητική, μέχρι ενός ορίου V_0 (**τάση αποκοπής**). Δηλαδή ηλεκτρόνια εξέρχονται από το μέταλλο και φτάνουν στην άνοδο ακόμη και αν αντιστρέψουμε την πολικότητα της πηγής, με την προϋπόθεση ότι $V_{πηγής} < V_0$.
- γ. Το ρεύμα μένει σταθερό, έστω και αν η τάση ανόδου-καθόδου αυξάνεται.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

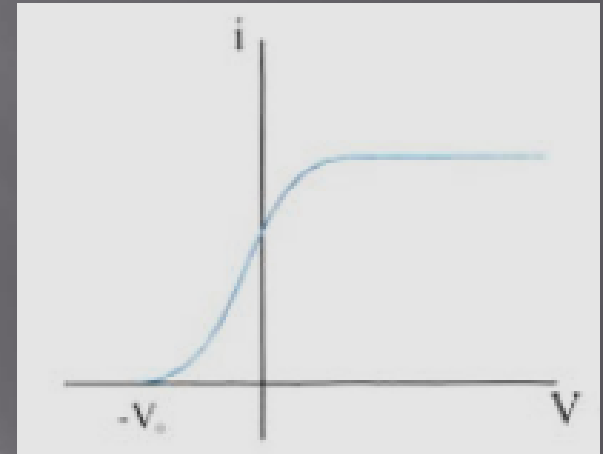
Πειραματική καμπύλη $v - i$, όταν μεταβάλλεται η ένταση φωτεινής ακτινοβολίας, αλλά η συχνότητά της μένει σταθερή.



Στο διάγραμμα διπλασιάστηκε η ένταση της φωτεινής δέσμης, με αποτέλεσμα το φωτοηλεκτρικό ρεύμα να εμφανίσει διπλάσια τιμή.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το *έργο εξαγωγής* W



Η ΑΔΕ λέει ότι η ενέργεια που προσφέρει η φωτεινή δέσμη στο ηλεκτρόνιο ισούται με την απαιτούμενη για να γίνει η έξοδος από το μέταλλο, συν την κινητική που θα έχει το ηλεκτρόνιο αμέσως μετά την έξοδο του.

$$\text{Δηλαδή : } E_{\text{προσφερόμενη}} = W_{\text{έργο εξαγωγής}} + K_{\text{κινητική εξόδου}} \quad (1)$$

Το *έργο εξαγωγής* εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να δοθεί σε ένα ηλεκτρόνιο του μετάλλου, ώστε αυτό μόλις να εξέλθει από το μέταλλο, λέει η (1)

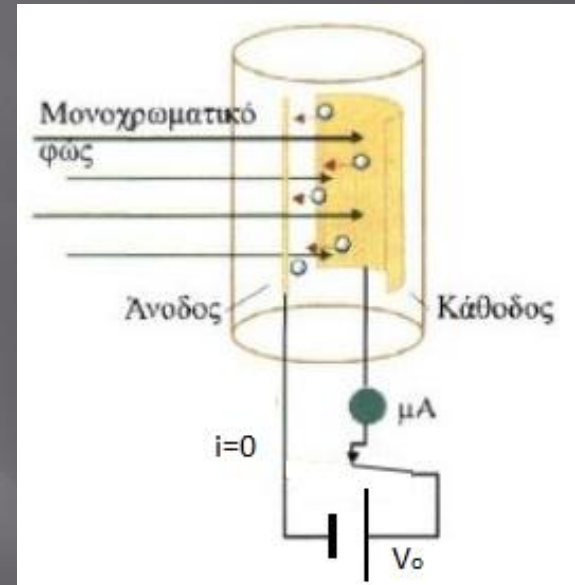
ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Μελέτη όταν $V_{\text{πηγής}} = -V_o$

Το ηλεκτρόνιο εξέρχεται από την κάθοδο με κινητική ενέργεια K_o . Όμως η αντίστροφη πολικότητα στη διάταξη εμποδίζει να φτάσει αυτό στην άνοδο ή αν θέλετε μόλις δεν φτάνει στην άνοδο, αφού η ταχύτητα μηδενίζεται λίγο πριν φτάσει.

Το Θ.Μ.Κ.Ε. λέει :

$$K_{\text{τελική}} - K_o = W_{\text{κάθοδο} \rightarrow \text{άνοδο}}^e \rightarrow 0 - K_o = -|e| \cdot V_o \rightarrow K_o = |e| \cdot V_o$$



ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το πείραμα λέει : Η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος αυξάνεται *ανάλογα* με την ένταση της φωτεινής δέσμης...

Η κλασική θεωρία λέει ...

Αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας σημαίνει αύξηση έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.



Αυτό σημαίνει μεγαλύτερη δύναμη δρα στο ηλεκτρόνιο $F = |e| \cdot E$



Περισσότερα ηλεκτρόνια οφείλουν να αποσπαστούν από το μέταλλο



Η τελευταία πρόταση έχει πειραματική επαλήθευση!

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το πείραμα λέει : Το φαινόμενο συμβαίνει όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη f_0 , η τιμή της οποίας εξαρτάται από το ποιο είναι το μέταλλο (f_0 συχνότητα κατωφλίου).

Η κλασσική θεωρία λέει ...

Δεν μπορεί να ερμηνεύσει την εξάρτηση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος από τη συχνότητα. Από κλασσική σκοπιά θα έπρεπε το φωτοηλεκτρικό ρεύμα να εξαρτάται μόνο από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η συχνότητα δεν έχει θέση στον καθορισμό της ενέργειας μιας φωτεινής δέσμης.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το πείραμα λέει : Η κινητική ενέργεια των εξερχόμενων ηλεκτρονίων (για $f > f_0$) εξαρτάται από την συχνότητα της φωτεινής δέσμης.

Η κλασική θεωρία λέει ...

Από κλασική σκοπιά θα έπρεπε η κινητική ενέργεια εξόδου των ηλεκτρονίων να εξαρτάται μόνο από την ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου της δέσμης. Η ανεξαρτησία της κινητικής ενέργειας από την ένταση είναι τελείως ανεξήγητη.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το πείραμα λέει : Το φαινόμενο εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με την πρόσπτωση της φωτεινής δέσμης στη κάθοδο.

Η κλασσική θεωρία λέει ...

Η μεταβίβαση της απαιτούμενης για την εξαγωγή ενέργειας γίνεται αναγκαστικά βαθμιαία. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται ένα ιδιαίτερα –αλλά μετρούμενο- χρονικό διάστημα, μέχρι την εμφάνιση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος.

Επομένως η κλασσική θεωρία δεν μπορεί να ερμηνεύσει το παραπάνω πειραματικό δεδομένο

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Συμπερασματικά

Το πείραμα λέει ότι το φωτοηλεκτρικό ρεύμα έχει εξάρτηση από την συχνότητα και την ένταση της δέσμης, ενώ η κλασική θεωρία υποστηρίζει ότι θα έπρεπε να έχει εξάρτηση **μόνο** από την ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου της δέσμης.

Επιπλέον υπάρχει ασυμφωνία σχετική με τον χρόνο εμφάνισης του ρεύματος στη πειραματική συσκευή, αφού η κάθοδος δέχτηκε ακτινοβολία.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Ο Einstein στα 1905 έκανε την εξής υπόθεση :

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αποτελούνται από φωτόνια (πακέτα ή κβάντα ενέργειας), των οποίων η ενέργεια είναι $E = h \cdot f$ όπου h είναι η σταθερά του Planck και f η συχνότητα της κυματικής διαταραχής.

- Η ηλεκτρομαγνητική κύμανση μοιάζει με σμήνος/βροχή οντοτήτων –τα φωτόνια- που όλα μαζί συνθέτουν το κύμα.
- Τα φωτόνια είναι αδιαίρετες οντότητες και όλη η ενέργειά τους απορροφάται στο Φ.Φ. από τα ηλεκτρόνια εφάπαξ.
- Ο Einstein απέδωσε κβαντικές ιδιότητες στο φως καθ' αυτό, ενώ ο Planck είχε υποθέσει ότι η ενέργεια είναι κβαντωμένη στην ύλη και πιο συγκεκριμένα όταν αυτή παράγει ή απορροφά φως...

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Ο Einstein εξηγεί το Φ.Φ.

- ▶ Αύξηση έντασης ακτινοβολίας σημαίνει περισσότερα φωτόνια και μετά την απορρόφησή τους από τα ηλεκτρόνια, θα εξάγουν περισσότερα και επομένως θα αυξηθεί το ρεύμα.
- ▶ Προφανές είναι ότι εδώ υπονοείται μια σχέση αναλογίας μεταξύ έντασης ακτινοβολίας (πλήθος φωτονίων) και έντασης φωτοηλεκτρικού ρεύματος...

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Ο Einstein εξηγεί το Φ.Φ.

- ▶ Η εξαγωγή του ηλεκτρονίου γίνεται αμέσως μόλις αυτό απορροφήσει εφάπαξ ένα φωτόνιο.
- ▶ Προφανής είναι η εξίσωση $h f = w + m u^2 / 2$, όπου u είναι η ταχύτητα εξόδου του e^- από το μέταλλο της καθόδου. (Φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein). Η εξίσωση λέει κάτι απλό : Για να εξέλθει το ηλεκτρόνιο από το μέταλλο, πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστο ίση με το έργο εξαγωγής του, w .

$$\text{Δηλαδή : } h f \geq w \rightarrow h f_0 = w$$

Να η συχνότητα κατωφλίου f_0

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Γράφει ο καθηγητής κος **Στέφανος Τραχανάς** στο βιβλίο του «Κβαντομηχανική Ι»

«Χωρίς την κβάντωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τα ηλεκτρόνια των ατόμων και των μορίων θα απορροφούσαν συνεχώς ενέργεια από το φως οποιασδήποτε συχνότητας, με αναπόφευκτο τέλος την πλήρη διάλυση της ύλης. Η κβάντωση του φωτός δεν είναι ένα καπρίτσιο της φύσης, αλλά μια αναγκαιότητα συνυφασμένη με την ίδια την ύπαρξή μας».

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Ερωτήματα...

1. Το φως από ένα πυρακτωμένο υλικό είναι ακέραιο πολλαπλάσιο ενός μοναδικού κβάντου ;

Η απάντηση είναι όχι. Το πυρακτωμένο υλικό εκπέμπει φως, όπου τα φωτόνια έχουν διαφορετικές συχνότητες. Έχουμε δηλαδή ένα τεράστιο πλήθος διαφορετικών φωτονίων που κυρίως ανήκουν στην περιοχή συχνοτήτων του υπέρυθρου και του ορατού.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Ερωτήματα...

2. Η συχνότητα του ιώδους φωτός είναι περίπου διπλάσια εκείνης του ερυθρού. Ποια σχέση έχουν οι ενέργειες ενός ιώδους φωτονίου με εκείνη ενός ερυθρού;

Η σχέση $E = h f$ μας λέει ότι και η ενέργεια ενός ιώδους φωτονίου είναι διπλάσια εκείνης ενός ερυθρού...

Να η ενέργεια ενός φωτονίου της ιώδους ακτινοβολίας με $\lambda=400\text{nm}$

$$E_{\text{φωτ}} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6,6 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} \text{ joule} = \frac{6,6 \cdot 3}{4} 10^{-19} \text{ joule} \\ \approx 3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule} = 3 \text{ eV}$$

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Ερωτήματα...

3. Μια δέσμη ιώδους φωτός και μια δέσμη ερυθρού φωτός έχουν την ίδια ενέργεια, ποια από τις δυο έχει μεγαλύτερο αριθμό φωτονίων;

Χωρίς λόγια...

$$N_i h f_i = N_e h f_e \rightarrow \frac{N_i}{N_e} = \frac{f_e}{f_i} \rightarrow \frac{N_i}{N_e} < 1 \quad \text{o. ε. δ.}$$

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Ερωτήματα...

3. Η υπεριώδης ακτινοβολία μαυρίζει το δέρμα (προκαλεί βιολογικές αντιδράσεις στα κύτταρα της επιδερμίδας μας). Αυτό γιατί δεν μπορεί να το κάνει το ορατό φως;

Η υπεριώδης ακτινοβολία, καλύπτει τα μήκη κύματος από $3 \times 10^{-7} \text{m}$ έως $6 \times 10^{-8} \text{m}$ περίπου. Αυτό σημαίνει ότι τα φωτόνια της έχουν ενέργεια έως 6,5 φορές μεγαλύτερη από την μέγιστη ενός ιώδους φωτονίου. Τα φωτόνια της ορατής ακτινοβολίας δεν έχουν την απαιτούμενη ενέργεια (ενέργεια ενεργοποίησης) για να προκαλέσουν χημικές αντιδράσεις...