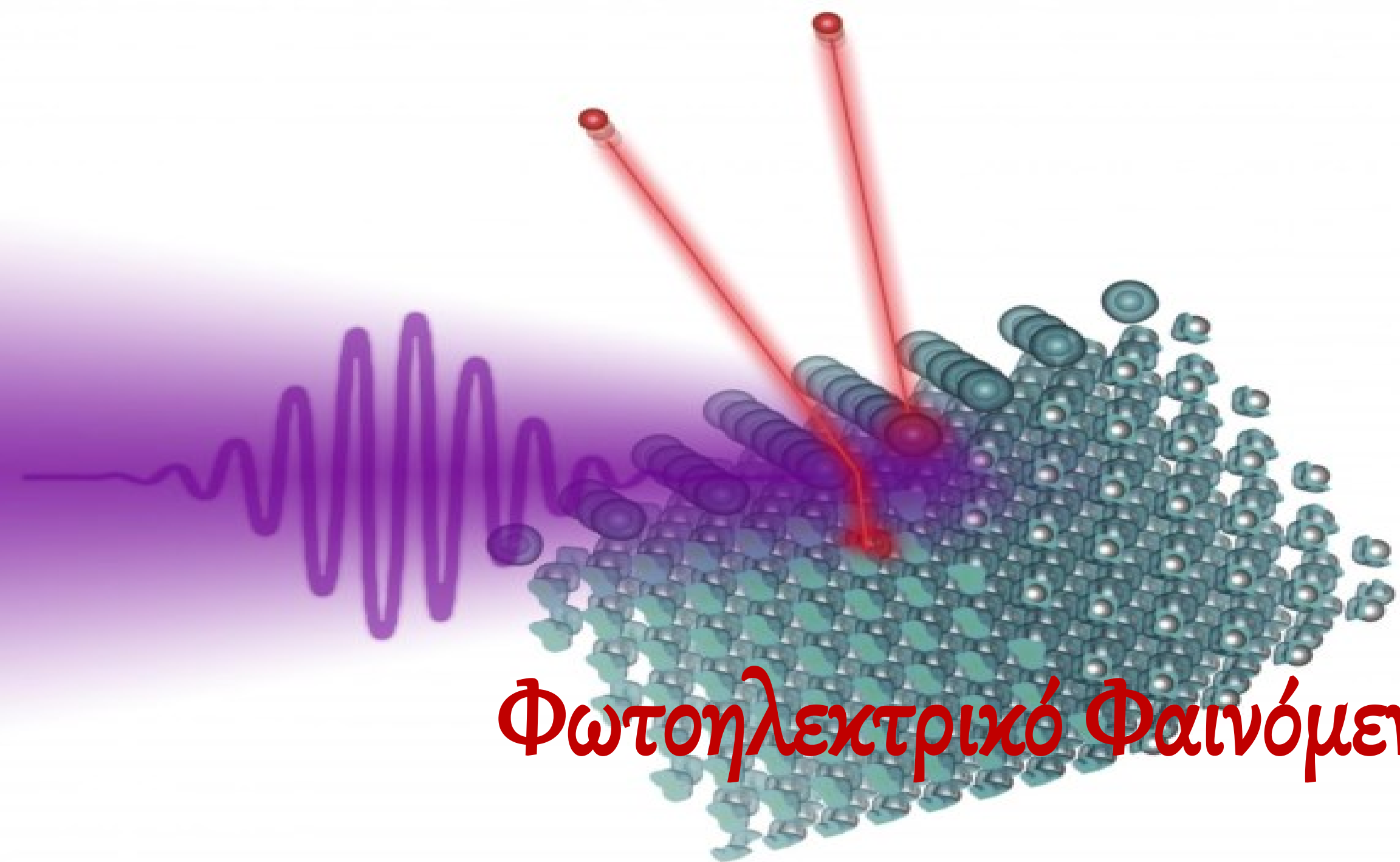




Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

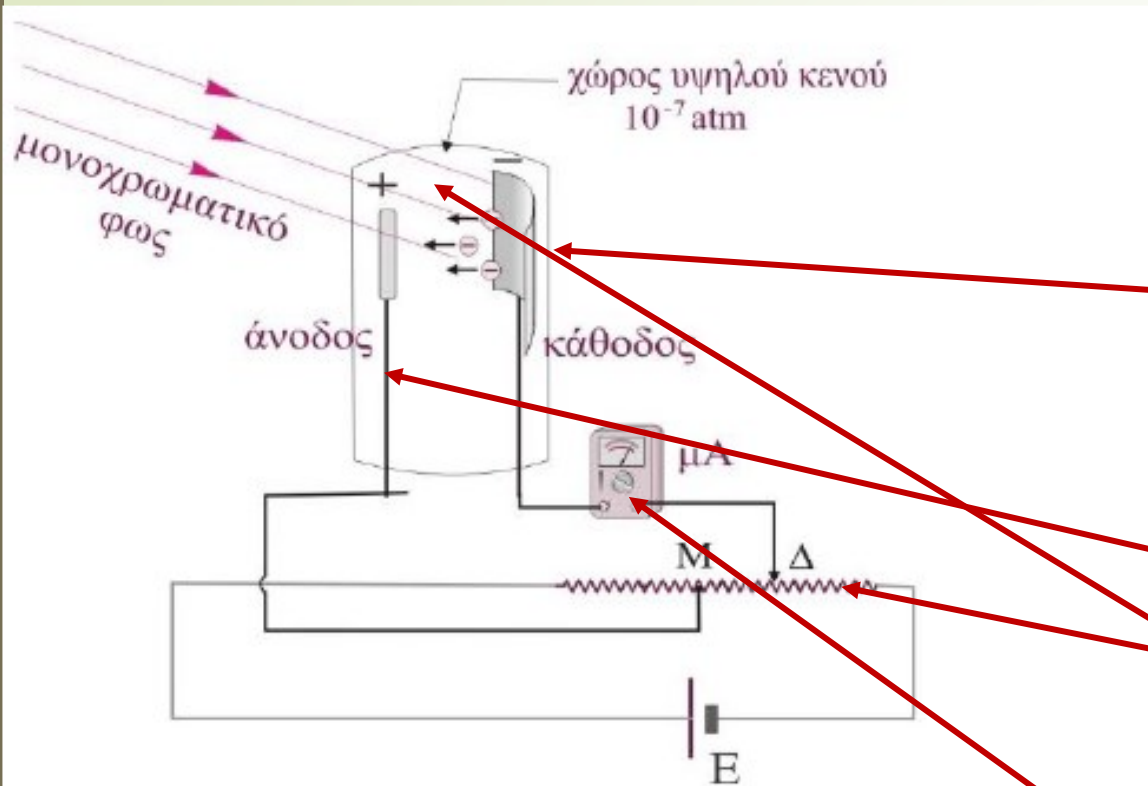
7.3 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο – Ορισμός:

- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων, κινούμενα με τυχαίες ταχύτητες, περιορίζονται στο εσωτερικό των αγωγών λόγω ελκτικών δυνάμεων και δεν μπορούν να διαχυθούν στο περιβάλλον.
- Όμως οι μεταλλικές επιφάνειες όταν δεχθούν **κατάλληλη φωτεινή ακτινοβολία**, ελευθερώνουν ηλεκτρόνια τα οποία ονομάστηκαν **φωτοηλεκτρόνια** και το φαινόμενο **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**.
- Την ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να προσλάβει ένα ηλεκτρόνιο για να υπερνικήσει τις ελκτικές δυνάμεις του μετάλλου που το συγκρατούν την ονομάζουμε **έργο εξαγωγής**, συμβολίζεται διεθνώς) με ϕ και εξαρτάται μόνο από το μέταλλο.

ΔΙΕΥΚΡΙΝΗΣΗ:

- Το **έργο εξαγωγής** αναφέρεται στην **ελάχιστη ενέργεια** που χρειάζονται εκείνα τα ηλεκτρόνια που κινούνται με τις μεγαλύτερες ταχύτητες. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται με μικρότερες ταχύτητες, χρειάζονται περισσότερη ενέργεια.

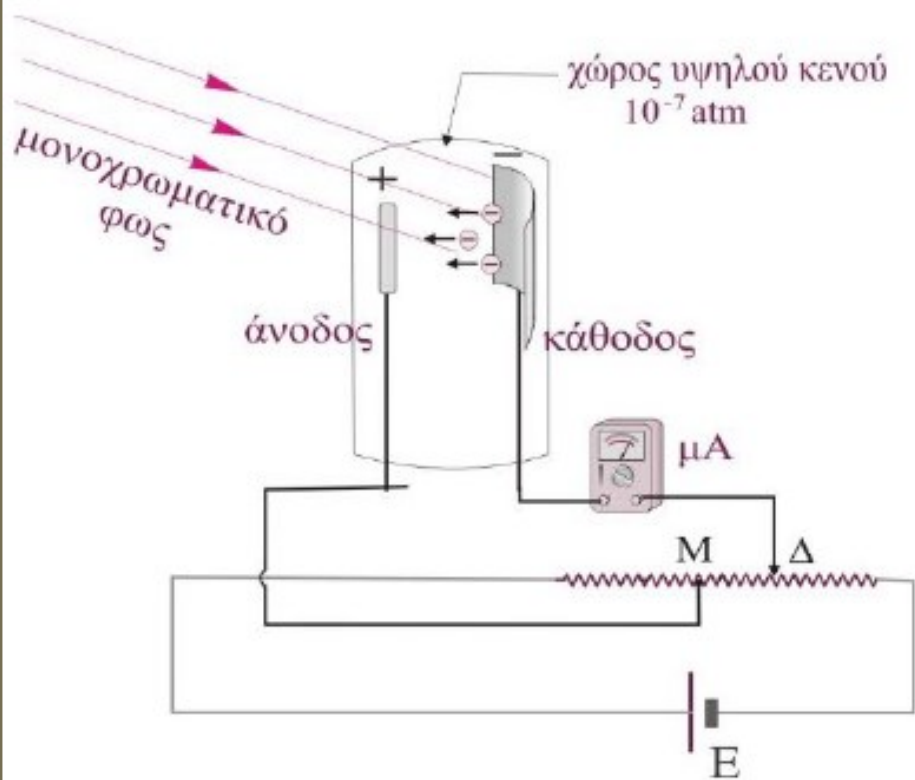
Μελέτη του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου- πειραματική διάταξη :



Με την μετακίνηση του δρομέα Δ, μπορούμε να ρυθμίζουμε την τάση μεταξύ των ανόδου-καθόδου. Όταν ο δρομέας Δ είναι αριστερά του Μ, το πεδίο δυσκολεύει την κίνηση των φωτοηλεκτρονίων

Η πειραματική διάταξη με την οποία μελετάμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελείται:

- Από μια μεταλλική καμπύλη επιφάνεια, την **κάθοδο** που φέρει επίστρωση αλκαλιμέταλλου, από την οποία ελευθερώνονται τα φωτοηλεκτρόνια.
- Την **άνοδο**, ένα μεταλλικό σύρμα απέναντι από την κάθοδο.
- Τα δύο ηλεκτρόδια βρίσκονται μέσα σε **σωλήνα υψηλού κενού** και συνδέονται με μια **ποτενσιομετρική διάταξη**, η οποία μας επιτρέπει να μεταβάλλουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.
- Ένα **μικροαμπερόμετρο** που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα, και μας επιτρέπει να μετράμε την ένταση του ρεύματος που δημιουργείται.



Με την μετακίνηση του δρομέα Δ , μπορούμε να ρυθμίζουμε την τάση μεταξύ των ανόδου-καθόδου. Όταν ο δρομέας Δ είναι αριστερά του M, το πεδίο δυσκολεύει την κίνηση των φωτοηλεκτρονίων

Όταν η κάθοδος φωτίζεται(;), ελευθερώνονται ηλεκτρόνια, **φωτοηλεκτρόνια**, τα οποία επιταχυνόμενα από το ηλεκτρικό πεδίο φθάνουν στην άνοδο, δημιουργώντας ένα μικρό ηλεκτρικό ρεύμα, το **φωτοηλεκτρικό ρεύμα**.

Μελέτη του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου- πειραματικές διαπιστώσεις :

5



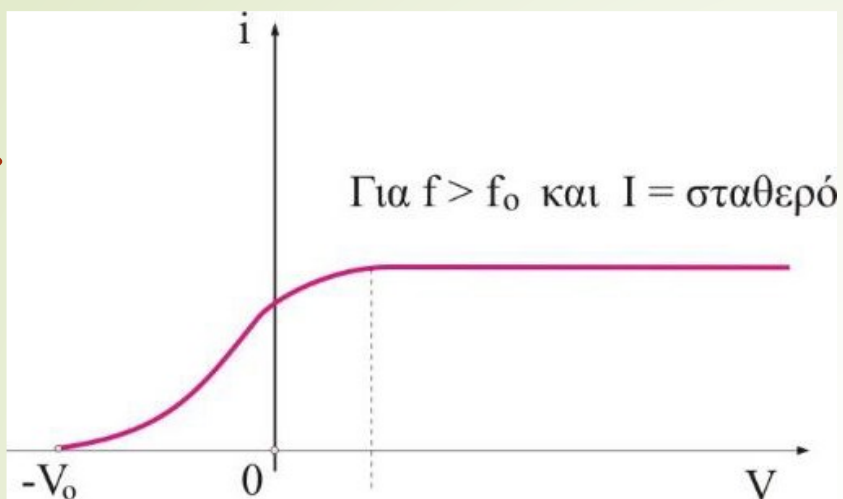
Οι **Hallwachs** και **Lenard** οι οποίοι μελέτησαν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο διαπίστωσαν ότι η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος i μεταβάλλεται σε συνάρτηση:

- με τη συχνότητα, f , του προσπίπτοντος φωτός,
- με την ένταση ακτινοβολίας, I , του προσπίπτοντος φωτός,
- με την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού, V , μεταξύ ανόδου και καθόδου.

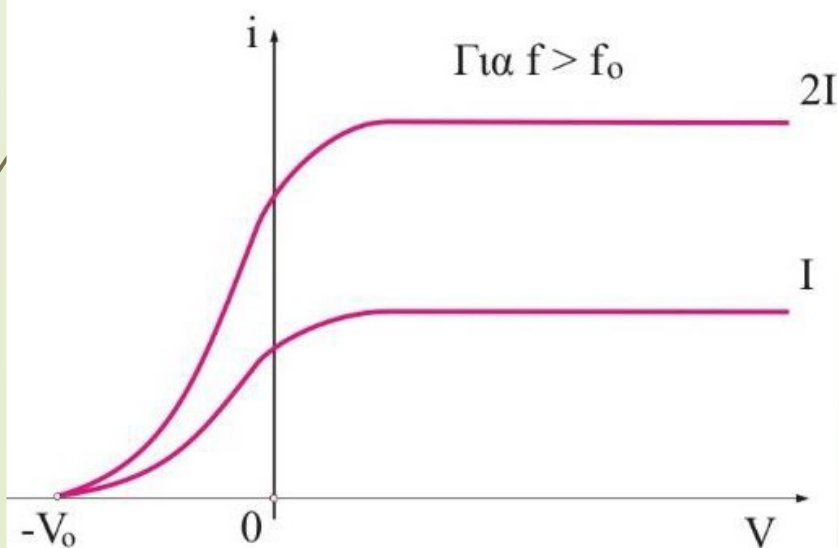
Οι **Hallwachs** και **Lenard** διαπίστωσαν επίσης ότι:

- Για να ελευθερωθούν φωτοηλεκτρόνια πρέπει η προσπίπτουσα ακτινοβολία να έχει συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση από μια ελάχιστη τιμή, την οποία ονόμασαν **συχνότητα κατωφλίου**, f_0 , και η οποία εξαρτάται μόνο από το υλικό της καθόδου.
- Για ακτινοβολία με **συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας κατωφλίου**, η αύξηση της έντασης ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος.
- Για ακτινοβολία με **συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας κατωφλίου**, τα **εξερχόμενα ηλεκτρόνια** έχουν ταχύτητα, της οποίας το μέτρο δεν εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας, αλλά από τη **συχνότητά της**.





Σχήμα 2 (α)



Σχήμα 2 (β)

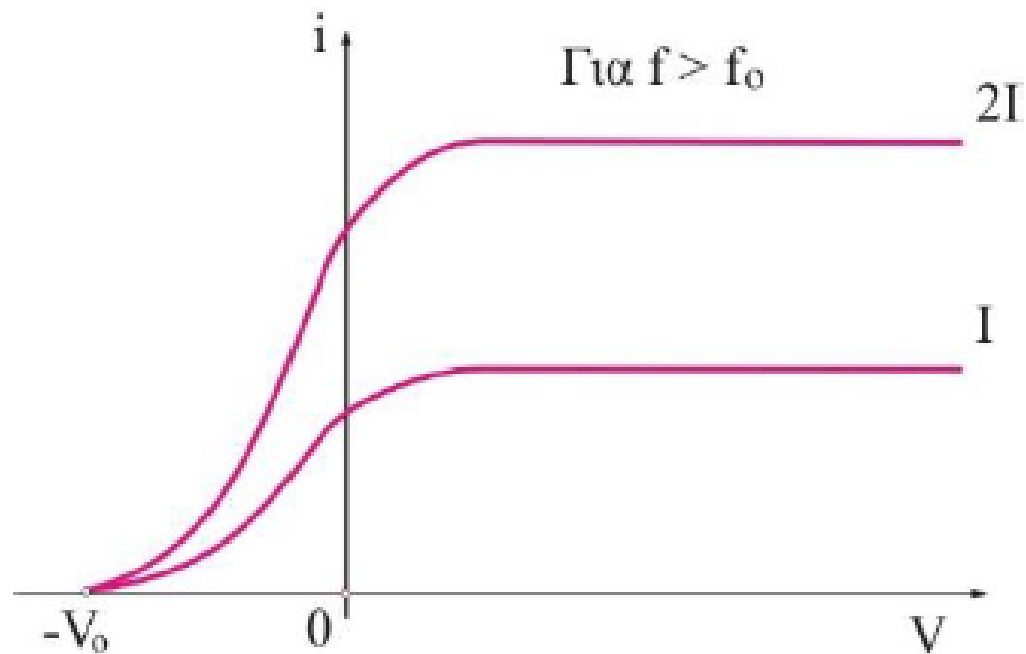
Η 2^η διαπίστωση των **Hallwachs και Lenard** προκύπτει από τη μελέτη των της γραφικής παράστασης **$i=f(V)$** , για συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας κατωφλίου και για σταθερή ένταση ακτινοβολίας, που δείχνεται στο σχήμα **2(α)**, αλλά και από τη μελέτη της γραφικής παράστασης **$i=f(V)$** , για διαφορετικές εντάσεις φωτεινής ακτινοβολίας, σχήμα **2(β)**.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα του σχήματος **2(α)**, όταν η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού είναι μηδέν, κάποια φωτοηλεκτρόνια έχουν αρκετή κινητική ενέργεια για να φθάσουν στην άνοδο και να δημιουργήσουν ένα μικρό φωτοηλεκτρικό ρεύμα.

Ακόμη και όταν η εφαρμοζόμενη **διαφορά δυναμικού αντιστραφεί** και τα ηλεκτρόνια εμποδίζονται από το πεδίο, κάποια καταφέρνουν να φθάσουν στην άνοδο.

Η **ροή των ηλεκτρονίων μηδενίζεται μόνο** όταν η αντίστροφη διαφορά δυναμικού **V** είναι αρκετά μεγάλη, ώστε η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια που αποκτούν τα ηλεκτρόνια στην κάθοδο (**eV**), να είναι ίση ή και μεγαλύτερη από τη μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων.

$$e \cdot V_0 \geq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\max}^2$$



Σχήμα 2 (β)

Η τάση στην οποία διακόπτεται το φωτοηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται **τάση αποκοπής, V_0** .

Άρα, η μέτρηση της τάσης αποκοπής μας δίνει απευθείας τη μέγιστη κινητική ενέργεια που έχουν κάποια φωτοηλεκτρόνια καθώς εγκαταλείπουν την κάθοδο.

$$e \cdot V_0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{max}^2$$

Η επανάληψη της προηγούμενης πειραματικής διαδικασίας για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας οδήγησε στα διαγράμματα του σχήματος, όπου διαπιστώνεται ότι:

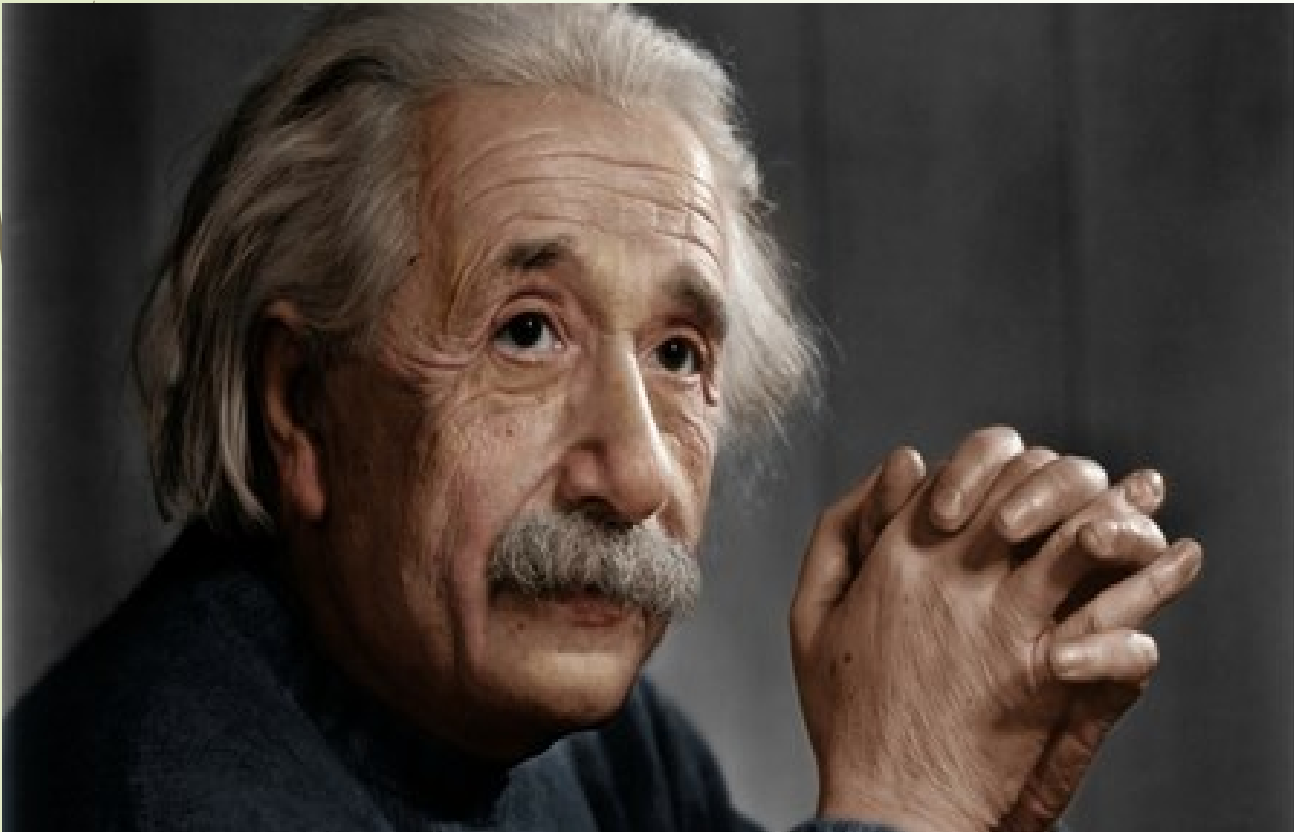
- Η τάση αποκοπής, V_0 , δεν εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας.
- Η αύξηση της έντασης ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση στον αριθμό των εξερχόμενων ηλεκτρονίων και κατά συνέπεια και του ηλεκτρικού ρεύματος που προκαλούν.

Η Κλασική θεωρία μπορούσε να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;



- Για την κλασική θεωρία το φως, που είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μεταφέρει ενέργεια η οποία απορροφάται από τα ηλεκτρόνια, τα οποία στη συνέχεια εξέρχονται του μετάλλου.
- Η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας θα έπρεπε να προκαλέσει μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας, επομένως τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια θα έπρεπε να είχαν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, άρα και **το δυναμικό αποκοπής θα έπρεπε να αυξηθεί**. Όμως το δυναμικό αποκοπής δεν εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας, αλλά μόνον από τη συχνότητά της.
- Επίσης, η κλασική θεωρία δεν είχε κάποια πρόταση - εξήγηση για τη συχνότητα κατωφλίου. Σύμφωνα με την κλασική θεωρία, όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μικρή, θα έπρεπε τα ηλεκτρόνια του μετάλλου, αθροίζοντας σταδιακά την προσπίπτουσα ενέργεια, κάποια στιγμή να συγκεντρώσουν αρκετή ενέργεια για να υπερνικήσουν τις ελκτικές δυνάμεις και να εξέλθουν.
- Αυτό πειραματικά δεν συνέβαινε, απεναντίας οι πειραματικοί φυσικοί της εποχής παρατηρούσαν το αντίθετο. Στην περίπτωση που η προσπίπτουσα ακτινοβολία είχε πολύ μικρή ένταση, αλλά η συχνότητά της ήταν μεγαλύτερη της συχνότητας κατωφλίου, το φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανιζόταν ακαριαία.

Υποθέσεις του Einstein για την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου :



Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ερμηνεύτηκε πλήρως από τον **Einstein** το **1905**, ο οποίος εφάρμοσε τις απόψεις του Planck για το άτομο, επεκτείνοντας την ιδέα των κβάντα και στο φως.

Σύμφωνα με τον Einstein:

- Το φως αποτελείται από μικρά ποσά (κβάντα) ενέργειας που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια.

Η ενέργεια κάθε φωτονίου είναι ίση με $E = h \cdot f$ όπου f η συχνότητά του και h η σταθερά του Planck.

- Κάθε φωτόνιο της δέσμης που προσπίπτει στη μεταλλική επιφάνεια μεταφέρει την ενέργειά του σε ένα μόνο ηλεκτρόνιο, δηλαδή έχουμε σύγκρουση ενός φωτονίου με ένα ηλεκτρόνιο.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:

Δεδομένου ότι τα φωτόνια είναι αδιαίρετα, ένα ηλεκτρόνιο υποχρεούται να απορροφήσει δια μιας ολόκληρη την ενέργεια ενός τέτοιου φωτονίου.

- Αν η ενέργεια του φωτονίου, hf , είναι μικρότερη από το έργο εξαγωγής, ϕ , το ηλεκτρόνιο δεν φεύγει από το μέταλλο.
- Αν η ενέργεια του φωτονίου, hf , είναι μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής, ϕ , τότε το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το μέταλλο με κινητική ενέργεια που είναι ίση με:

$$K_{max} = hf - \phi$$

Φωτοηλεκτρική εξίσωση Einstein

Ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων με βάση τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein

Η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein ερμηνεύει πλήρως τα πειραματικά δεδομένα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου:

- Για να εξέλθει ένα ηλεκτρόνιο από το μέταλλο θα πρέπει το φωτόνιο να του μεταφέρει ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το έργο εξαγωγής

$$h \cdot f \geq \phi$$

- Άρα, υπάρχει μια ελάχιστη τιμή της συχνότητας για να εμφανιστεί το φαινόμενο, η οποία είναι ίση με f_0 και ονομάζεται **συχνότητα κατωφλίου**.

$$f_0 = \frac{\phi}{h}$$

- Για ακτινοβολία με συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας κατωφλίου, η αύξηση της έντασης ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στο μέταλλο, με αποτέλεσμα να **ελευθερώνονται περισσότερα φωτοηλεκτρόνια στη μονάδα του χρόνου και να προκαλείται αύξηση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος**.
- Από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση, $K_{max} = hf - \phi$, προκύπτει άμεσα, ότι η K_{max} , άρα και η v_{max} των εξερχομένων φωτοηλεκτρονίων εξαρτάται από τη συχνότητα και όχι από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας.

Η ορμή των φωτονίων

12

Η 2η υπόθεση του Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή, ότι **κάθε φωτόνιο της δέσμης που προσπίπτει στη μεταλλική επιφάνεια μεταφέρει την ενέργειά του σε ένα μόνο ηλεκτρόνιο**, άφηνε να εννοηθεί ότι το φως στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμπεριφέρεται ως ένα ρεύμα σωματιδίων (φωτονίων) και η **αλληλεπίδραση φωτονίων - ηλεκτρονίων είναι σύγκρουση δύο σωματιδίων**.

Από τη στιγμή που στο φως αποδόθηκε και σωματιδιακή φύση αυτό **έπρεπε να έχει και ορμή p** , όπως έχουν όλα τα κινούμενα σωματίδια.

Η **ορμή** που αποδόθηκε σε ένα φωτόνιο είναι ίση με **$p = \frac{h}{\lambda}$** και προκύπτει ως εξής:

- Από τη θεωρία της σχετικότητας προκύπτει πως η ενέργεια του φωτονίου και η ορμή του συνδέονται με τη σχέση:

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

- Η τελευταία σχέση είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί συνδέει την **κυματική φύση του φωτός (λ)** με τη **σωματιδιακή του φύση (p)** και τονίζει τη **δυαδική φύση του φωτός**.

