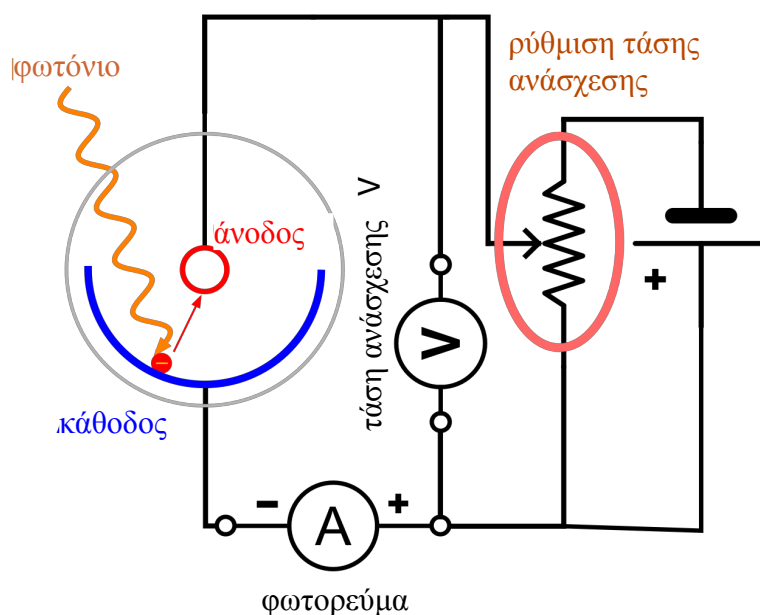


## Τα “μυστήρια” του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

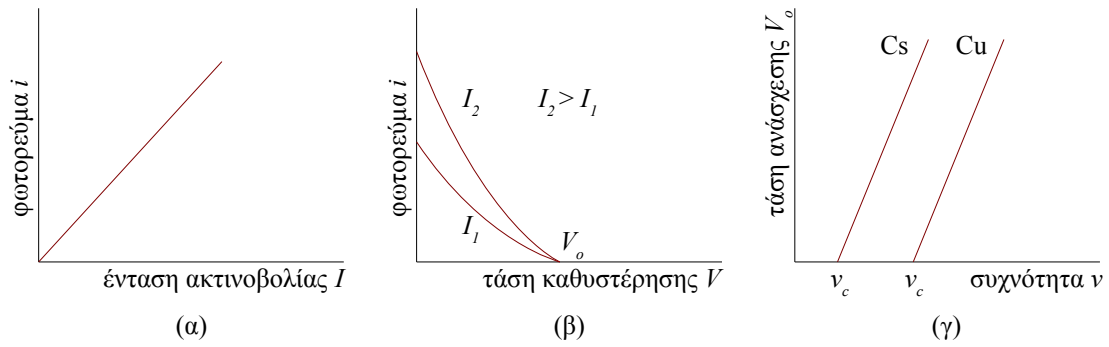


Εικόνα 1. Η διάταξη που χρησιμοποιείται για την μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η κάθοδος φωτίζεται με μονοχρωματικό φως (μίας μοναδικής συχνότητας) και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (το φως) μεταφέρει ενέργεια στα ηλεκτρόνια του υλικού της καθόδου. Αν η ενέργεια που μεταφέρεται είναι μεγαλύτερη από αυτήν με την οποία τα ηλεκτρόνια είναι δεσμευμένα στα άτομα, τότε αυτά αποσπώνται από την κάθοδο – αν είναι ακόμη μεγαλύτερη, αποκτούν αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να ταξιδέψουν στην άνοδο και να προκαλέσουν την ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα (φωτορεύμα) που το μετράμε στο αμπερόμετρο (A). Σε αυτή την κίνηση αντιστέκεται η τάση της πηγής (V). Η τάση ρυθμίζεται με ροοστάτη (αντίσταση).

### Πειραματικά δεδομένα

Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται στην κάθοδο από το προσπίπτον φως συναντούν μια τάση καθυστέρησης από το δυναμικό της ανόδου ως προς την κάθοδο,  $V$ . Για να φτάσουν στην άνοδο, τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να εκπεμφθούν με κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από την διαφορά στην δυναμική ενέργεια,  $E_k \geq |e|V$ . Σε αυτήν την περίπτωση θα συνεισφέρουν στο ρεύμα που μετρείται στο αμπερόμετρο (A). Η διάταξη της καθόδου – ανόδου βρίσκεται εν κενώ ώστε να ελαχιστοποιούνται αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων με αέρια μόρια. Μεταβάλλοντας την τάση καθυστέρησης μπορούμε να υπολογίσουμε τις ενέργειες με τις οποίες εκπέμπονται τα ηλεκτρόνια. Άλλες παράμετροι του πειράματος είναι η ένταση,  $I$  και η συχνότητα,  $\nu$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αλλά και το υλικό της ανόδου.

Τα αποτελέσματα του πειράματος δίνονται στην παρακάτω εικόνα. Παρατηρούμε (α) ότι το φωτορεύμα αυξάνεται με την ένταση της ακτινοβολίας καθώς τα ηλεκτρόνια με  $E_k \geq |e|V$  αυξάνονται. Όμως ενώ το φωτορεύμα μειώνεται με την αύξηση της τάσης καθυστέρησης (β), παρατηρούμε ότι αυτό μηδενίζεται για τάση μεγαλύτερη από  $V_o$ , την τάση ανάσχεσης. Επομένως η τάση ανάσχεσης αποτελεί ένα μέτρο της μέγιστης κινητικής ενέργειας που μπορούν να αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια,  $|e|V_o = (E_k)_{\max}$ . Η τάση ανάσχεσης είναι ανεξάρτητη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τέλος, στο (γ) φαίνεται ότι η τάση ανάσχεσης αυξάνεται γραμμικά με την συχνότητα,  $V_o = a\nu$  όπου το  $a$  υπολογίζεται σε  $4.1 \times 10^{-15}$  J·s/C. Η παραπάνω γραμμική σχέση παραμένει αμετάβλητη αν στην κάθοδο χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο μέταλλο. Επίσης, για συχνότητες μικρότερες από μια κρίσιμη,  $\nu_c$  η τάση ανάσχεσης μηδενίζεται. Αυτό σημαίνει ότι δεν εκπέμπονται ηλεκτρόνια για ακτινοβολία με συχνότητα μικρότερη από  $\nu_c$ , η τιμή της οποίας εξαρτάται από το υλικό.



Εικόνα 2. (α) Το φωτορεύμα (ο αριθμός των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων) αυξάνεται με την ένταση της ακτινοβολίας. (β) Ο αριθμός των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων που φτάνει στην άνοδο μειώνεται καθώς αυξάνεται η τάση καθυστέρησης. Η τάση ανασχεσης  $V_0$  είναι ανεξάρτητη από την ένταση της ακτινοβολίας. (γ) Η τάση ανασχεσης αυξάνεται γραμμικά με την συχνότητα της ακτινοβολίας. Για συχνότητες κάτω από την  $\nu_c$  η τάση ανασχεσης μηδενίζεται γιατί δεν εκπέμπονται ηλεκτρόνια. Η τιμή της  $\nu_c$  εξαρτάται από το υλικό της καθόδου (εδώ καίσιο, Cs και χαλκός, Cu).

Άλλη μια παράμετρος του πειράματος που είναι κρίσιμη για την συζήτηση είναι ο χρόνος αντίδρασης της διάταξης στην ακτινοβολία. Όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές (αρκετά υψηλή  $\nu$ , αρκετά χαμηλή  $I$ ) η εκπομπή ηλεκτρονίων είναι σχεδόν ακαριαία: παρατηρούμε φωτορεύμα σε διάστημα  $10^{-9}$  s (στα όρια της πειραματικής ακρίβειας) από την ενεργοποίηση της φωτεινής πηγής. Αυτή η σχεδόν ακαριαία αντίδραση παρατηρείται ακόμη και σε εξαιρετικά χαμηλές εντάσεις φωτός,  $10^{-10}$  W/m<sup>2</sup>.

#### Αποτυχία της κλασσικής φυσικής να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα

Σύμφωνα με την κλασσική φυσική το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία μεταδίδεται με μορφή κύματος. Για τα κύματα μπορούμε να ανακαλέσουμε τις εξής ιδιότητες:

1. Η ενέργεια ενός κύματος κατανέμεται με συνεχή τρόπο σε όλο τον χώρο που διαδίδεται το κύμα.
2. Η ένταση ενός κύματος (η ενέργεια του κύματος ανά μονάδα επιφάνειας κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης στην μονάδα του χρόνου) είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτους του κύματος. Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συγκεκριμένα

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 ,$$

όπου  $\epsilon_0$  η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού,  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $E_0$  το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος.

Ας υποθέσουμε ότι ένα ηλεκτρόνιο συνδέεται με τα άτομα (ιόντα) στο μέταλλο της καθόδου με ενέργεια  $E_b$ . Ένα ηλεκτρικό πεδίο  $E = E_0 \sin(kx - \omega t)$  προσπίπτει στα ηλεκτρόνια. Το πεδίο θα ασκήσει μια δύναμη στα ηλεκτρόνια  $F = |e|E$ . Αυτή η δύναμη θα κάνει έργο στα ηλεκτρόνια ανάλογο με την δύναμη. Επομένως, το ηλεκτρικό πεδίο θα αυξήσει την ενέργεια των ηλεκτρονίων κι αν αυτή ξεπεράσει το  $E_b$  τα ηλεκτρόνια θα αποσπαστούν από το μέταλλο με κινητική ενέργεια  $E_k$  την διαφορά μεταξύ της ενέργειας που απορρόφησαν από το κύμα και την ενέργεια σύνδεσης  $E_b$ . Καθώς αυξάνεται το πλάτος του κύματος αυξάνεται και η δύναμη κι επομένως και το έργο που κάνει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε κάποιο ηλεκτρόνιο. Επομένως, από την θέση της κλασσικής φυσικής είναι αναμενόμενο ότι η ενέργεια που δίνεται στο ηλεκτρόνιο θα αυξάνεται με την ένταση του κύματος.

Τα αποτελέσματα του σχήματος (α) στην εικόνα 2 συμβαδίζουν με αυτά που περιγράφονται παραπάνω. Τα ηλεκτρόνια του μετάλλου συνδέονται με τα άτομα με διαφορετικές ενέργειες: κάποια πιο χαλαρά από άλλα. Για συγκεκριμένη ένταση του κύματος κι επομένως συγκεκριμένη διαθέσιμη ενέργεια κάποια ηλεκτρόνια θα απορροφήσουν ένα ποσό για να απελευθερωθούν από το μέταλλο και το υπόλοιπο θα είναι διαθέσιμο σε μορφή κινητικής ενέργειας. Για χαμηλές εντάσεις μόνο τα πολύ χαλαρά δεσμευμένα ηλεκτρόνια θα εξέλθουν με αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να ξεπεράσουν την τάση καθυστέρησης και να συνεισφέρουν στο ρεύμα. Καθώς αυξάνεται η ένταση η διαθέσιμη ενέργεια αυξάνεται επίσης, και περισσότερα ηλεκτρόνια θα εξέλθουν με αρκετή ενέργεια ώστε να φτάσουν στην άνοδο. Το φωτορεύμα άρα θα έπρεπε να αυξάνεται με την ένταση της ακτινοβολίας – κι αυτό πράγματι συμβαίνει.

Το γεγονός ότι η μέγιστη κινητική ενέργεια είναι ανεξάρτητη από την ένταση είναι δύσκολο να ερμηνευτεί από την κλασική θεωρία. Αν αυξηθεί το  $I$ , αυξάνεται κι η διαθέσιμη ενέργεια για τα ηλεκτρόνια, συμπεριλαμβανομένων κι αυτών που έχουν την χαλαρότερη σύνδεση κι επομένως και την μέγιστη κινητική ενέργεια. Επομένως, η ανεξαρτησία του  $V_0$  από το  $I$  (σχήμα (β) εικόνα 2) δεν εξηγείται βάσει κλασικών εννοιών.

Το γεγονός ότι η μέγιστη κινητική ενέργεια αυξάνεται με το  $\nu$  (σχήμα (γ) εικόνα 2) δεν μπορεί να ερμηνευθεί από την κλασική φυσική. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ενέργεια ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος εξαρτάται από την ένταση, όχι την συχνότητα. Γιατί εξαρτάται το  $V_0$  από το  $\nu$ ; Γιατί υπάρχει ένα κατώφλι  $\nu_0$  κάτω από το οποίο δεν λαμβάνει χώρα εκπομπή ηλεκτρονίων, ανεξάρτητα από την ένταση της ακτινοβολίας; Η κλασική φυσική δεν έχει απάντηση.

Τέλος, η σχεδόν ακαριαία εκπομπή είναι κρίσιμη για την απόρριψη των κλασικών ερμηνειών γύρω από την φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αν θεωρήσουμε ακτινοβολία έντασης  $10^{-10}$  W/m<sup>2</sup> δεν υπάρχει περίπτωση να εκπεμφθούν ηλεκτρόνια σε χρόνο  $10^{-9}$  s. Ας υποθέσουμε ότι η κάθοδος είναι ένα λεπτό φύλλο εμβαδού 1 m<sup>2</sup> κι ότι αυτή η χαμηλής έντασης ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια. Η ενέργεια απλώνεται με συνεχή τρόπο σε ολόκληρη την επιφάνεια. Αν είμαστε αισιόδοξοι θεωρούμε ότι η ενέργεια που φτάνει σε μια ατομική θέση απορροφάται από το πιο χαλαρά συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο. Η διατομική απόσταση είναι περίπου  $2 \times 10^{-10}$  m. Άρα σε ένα τετραγωνικό μέτρο βρίσκονται  $2.5 \times 10^{19}$  άτομα κι ενέργεια ανά δευτερόλεπτο ανά ηλεκτρόνιο είναι  $4 \times 10^{-30}$  J/s/ηλεκτρόνιο. Η ενέργεια με την οποία δεσμεύεται ένα ηλεκτρόνιο σε ένα μέταλλο είναι τυπικά μερικά eV – ας υποθέσουμε 1 eV ( $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$  J). Επομένως, για να αποκτήσει την ενέργεια να αποδεσμευτεί ένα ηλεκτρόνιο απαιτείται χρόνος  $4 \times 10^{10}$  s ή περίπου  $10^5$  ημέρες.

*Η κλασική θεωρία αποτυγχάνει να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο – δείτε το εμβληματικό άρθρο του Αϊνστάϊν του 1905 για μια εναλλακτική ερμηνεία.*