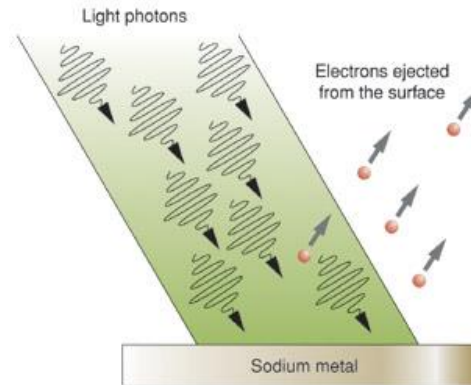


Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο και μέτρηση της σταθεράς h (σταθερά του Planck)



Αναστάσιος Λιόλιος
Εργαστήρια Ατομικής Φυσικής ΑΠΘ

lioliosa@auth.gr

ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΓΙΑ ΧΡΗΣΙΜΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ

Ο χώρος των φοιτητικών εργαστηρίων Ατομικής Φυσικής βρίσκεται στο υπόγειο της Σχολής Θετικών Επιστημών, κατεβαίνοντας τη μικρή σκάλα στη δυτική είσοδο του κτηρίου της ΣΘΕ.



Οι φοιτήτριες/φοιτητές πρέπει να έρχονται προετοιμασμένοι για την άσκηση που θα κάνουν σύμφωνα με το πρόγραμμα που έχει ανακοινωθεί.

Στην **ιστοσελίδα** του μαθήματος: <http://atomiclab.physics.auth.gr/>

θα βρείτε σημειώσεις των εργαστηριακών ασκήσεων, βιντεοσκοπήσεις για την πειραματική εργασία, τις διαφάνειες της θεωρητικής εισαγωγής καθώς και φυλλάδια με τη σειρά εργασίας τα οποία καλό είναι να έχετε μαζί σας.

Εισαγωγή
1^ο μέρος

Το ΦΩΣ

ως κύμα και ως σωματίδια

Αναστάσιος Λιόλιος
Εργαστήρια Ατομικής Φυσικής ΑΠΘ

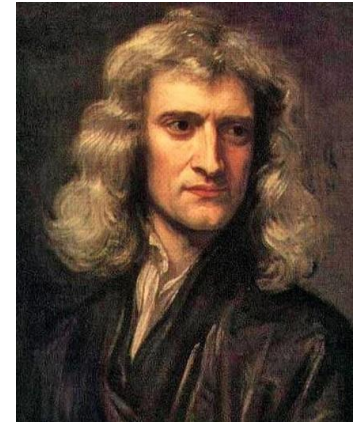
Για την Ιστορία

Στα τέλη του 17ου αιώνα, υπήρχε σοβαρή επιστημονική αντιπαράθεση σχετικά με τη **φύση του φωτός** – δηλαδή αν πρόκειται για **κύμα** ή για **σωματίδια**.

Ο **Isaac Newton** ήταν υποστηρικτής της σωματιδιακής φύσης του φωτός. Όμως, ο Ολλανδός φυσικός, **Christiaan Huygens** πίστευε ότι το φως αποτελούνταν από κύματα που ταλαντώνονται κάθετα προς την κατεύθυνση της διάδοσης των κυμάτων. Το 1678, ο Huygens πρότεινε ότι κάθε σημείο που συναντά μια φωτεινή διαταραχή μετατρέπεται σε πηγή ενός ίδιου σφαιρικού κύματος και ότι το άθροισμα των δευτερευόντων κυμάτων, τα οποία είναι αποτέλεσμα της διαταραχής, καθορίζει τι μορφή θα λάβει το νέο κύμα καθώς διαδίδεται. Αυτή είναι γνωστή ως «**Αρχή του Huygens**».

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω αρχή ο Huygens κατάφερε να εξηγήσει τη γραμμική και σφαιρική διάδοση του φωτός και να παράξει τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης του φωτός.

Αργότερα, το 1803, ένα πείραμα που διεξήχθη από τον **Thomas Young** σχετικά με την συμβολή του φωτός (πείραμα των δύο σχισμών) απέδειξε ότι η κυματική θεωρία του Huygens για το φως ήταν σωστή.



Sir Isaac Newton
1643 – 1727



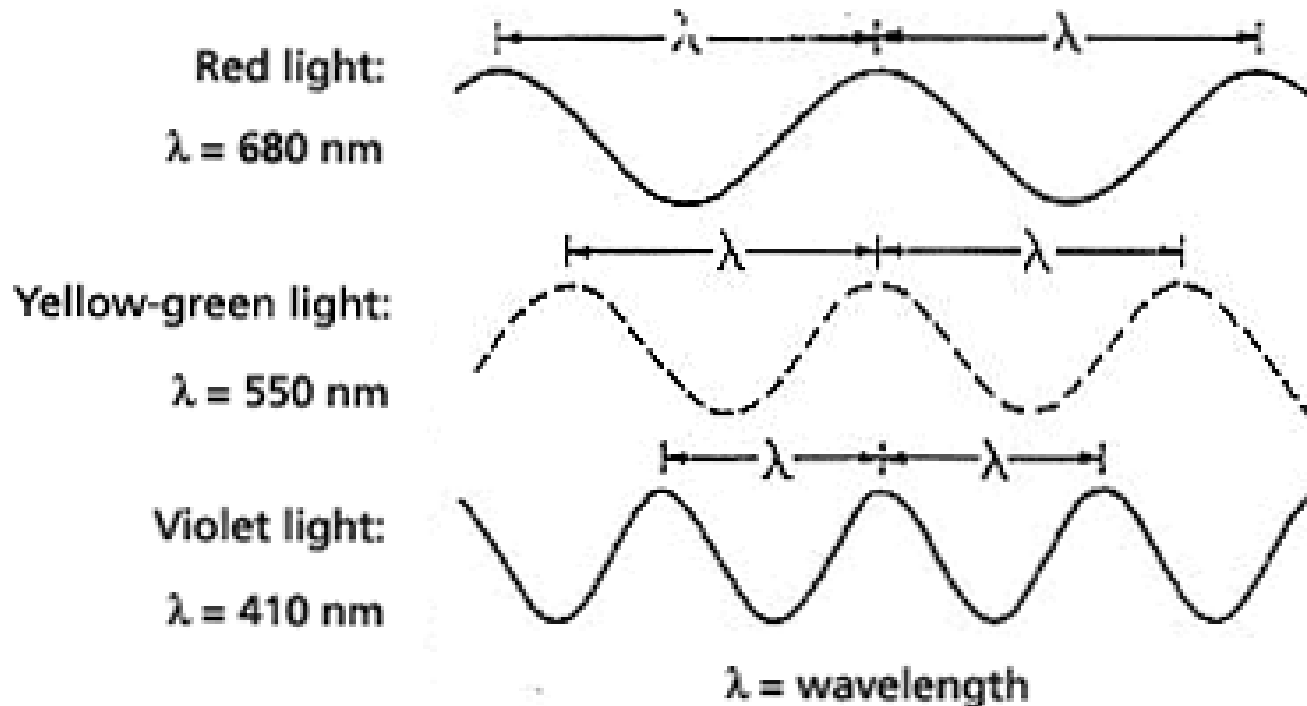
Christiaan Huygens
1629 – 1695

ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΦΩΣ;

Το φως είναι κύμα! Ηλεκτρομαγνητικό κύμα!

(Έτσι λέει ο Huygens)

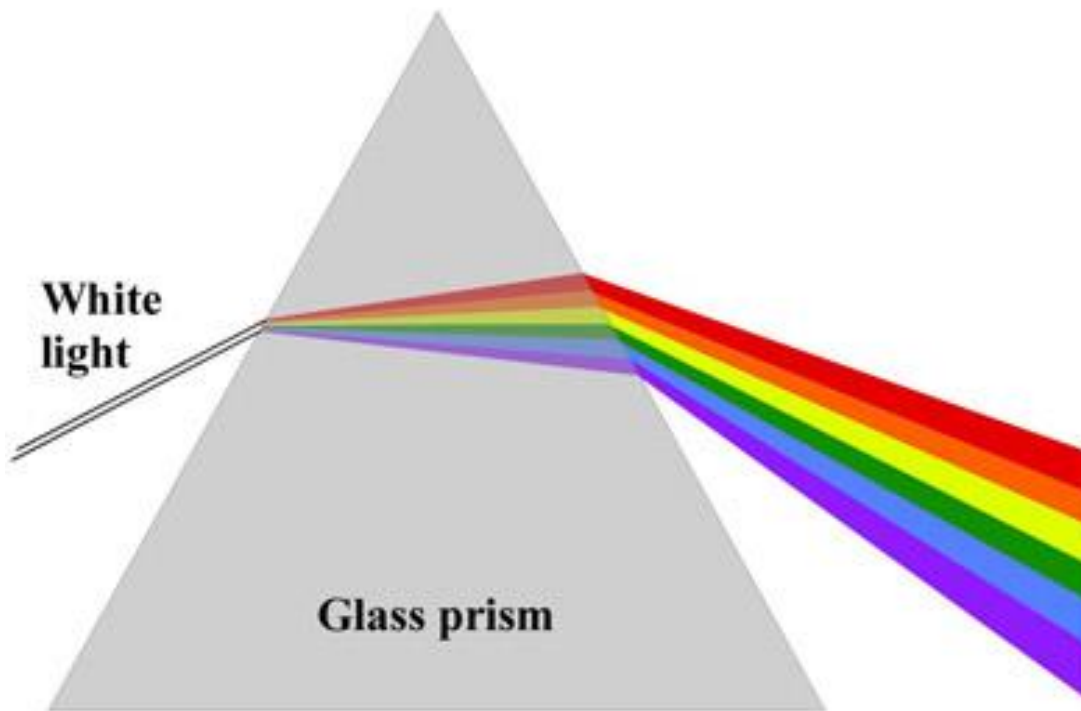
(Έτσι λέει ο Maxwell)



Το χρώμα καθορίζεται από το μήκος κύματος του φωτός.

Το λευκό φως είναι σύνθετο (Newton)

Το λευκό φως αποτελείται από διάφορα χρώματα, που το καθένα αντιστοιχεί σε άλλο μήκος κύματος (ή συχνότητα, ή ενέργεια).



Color	λ (nm)
-------	----------------

Red	760-647
-----	---------

Orange	647-585
--------	---------

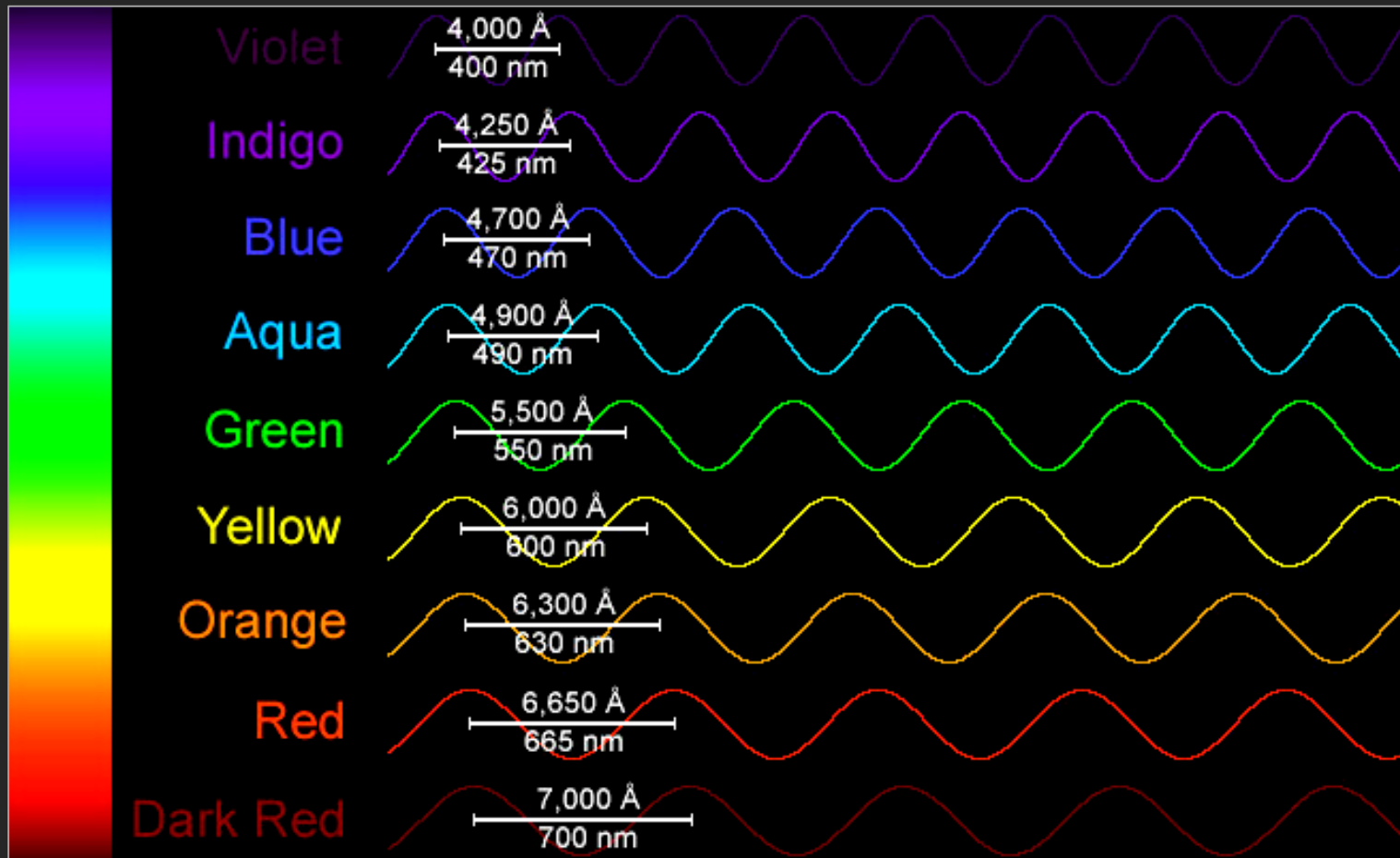
Yellow	585-575
--------	---------

Green	575-491
-------	---------

Blue	491-424
------	---------

Violet	424-380
--------	---------

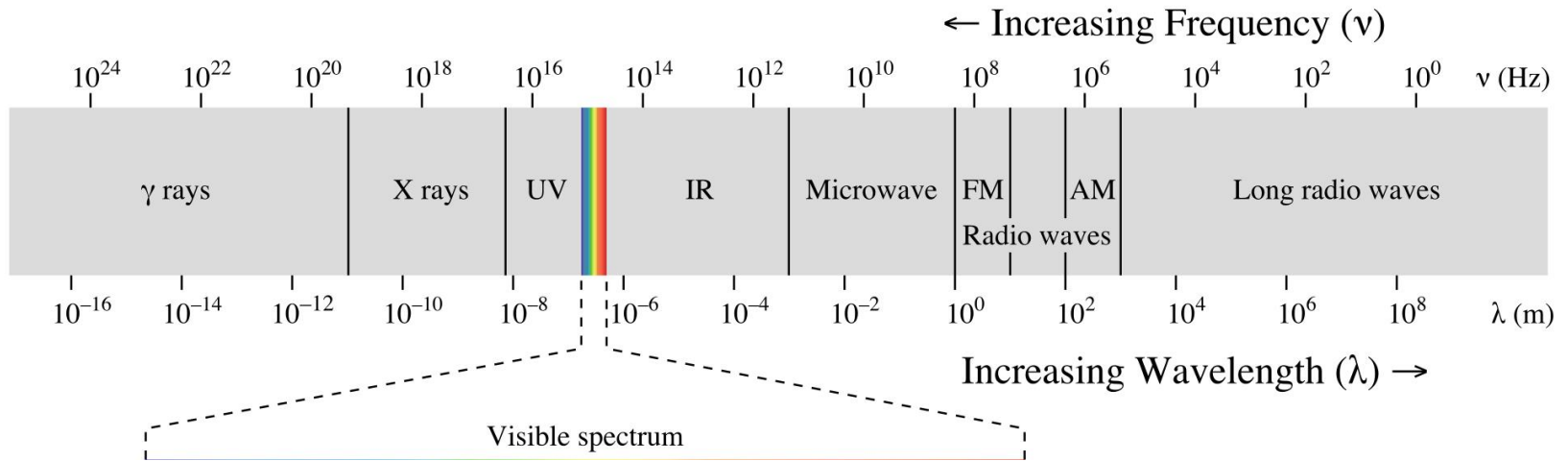
Το χρώμα του φωτός εξαρτάται από το μήκος κύματος



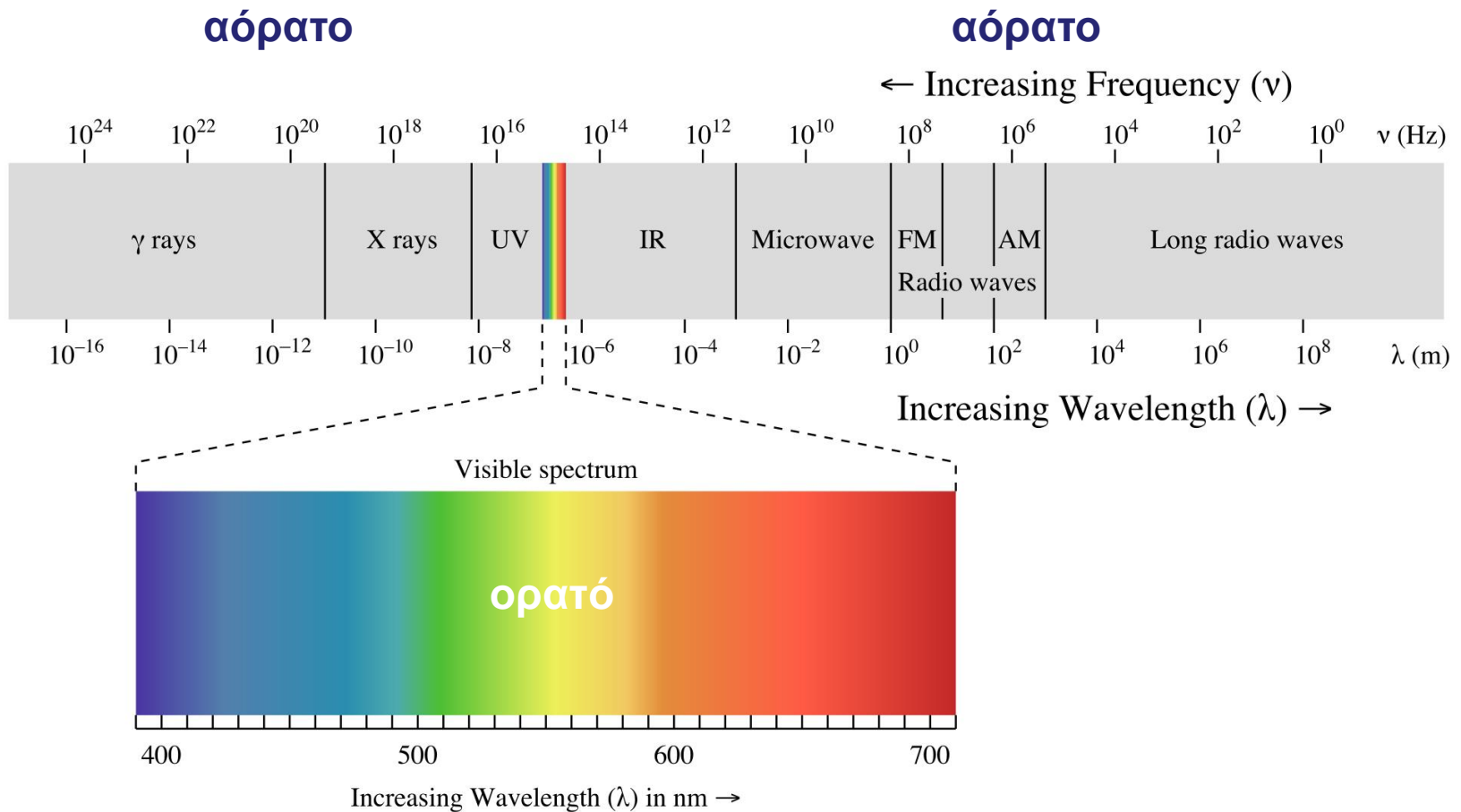
Διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη κύματος (ή συχνότητας ή ενέργειας φωτονίων).

Το φάσμα του ορατού φωτός περιλαμβάνει μήκη κύματος από 400 nm έως 700 nm.

Η ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) ακτινοβολία περιλαμβάνει τις ακτίνες γ , X, UV, ορατό φως, IR, μικροκύματα, ραδιοσυχνότητες

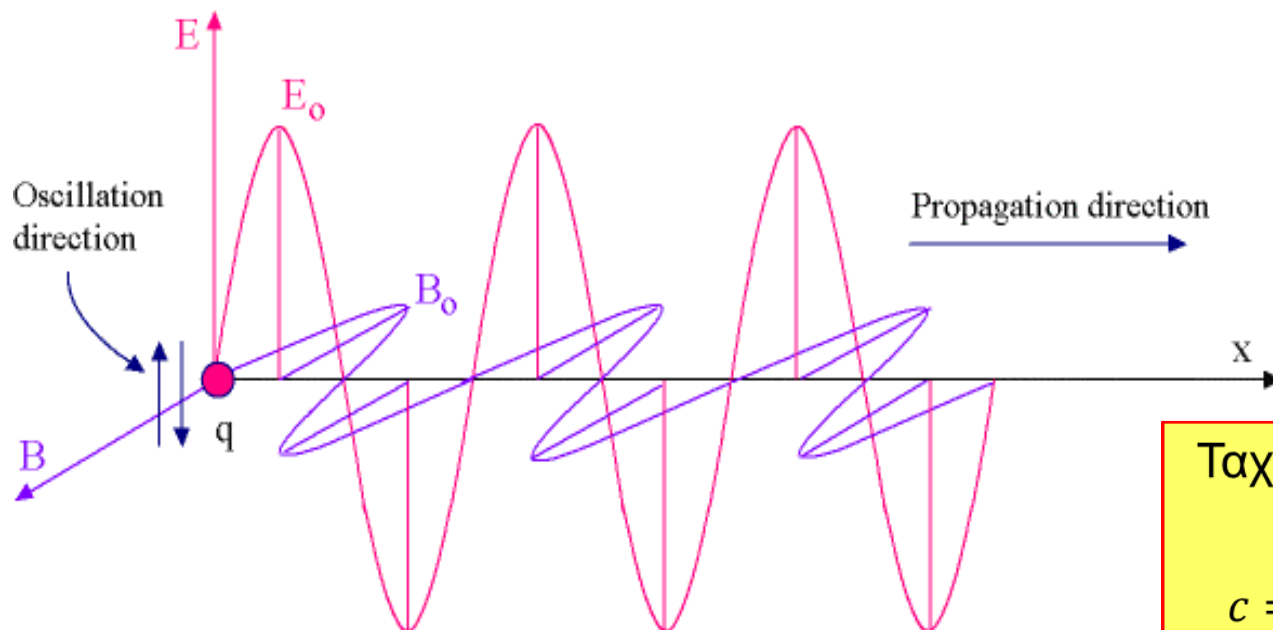


Το φάσμα του ορατού φωτός είναι ένα μικρό τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



Μήκη κύματος της ΗΜ ακτινοβολίας εκτός της περιοχής 400-700 nm είναι **αόρατα**, μπορούν όμως να είναι **αντιληπτά με άλλα αισθητήρια ή με ανιχνευτικές συσκευές και διατάξεις.**

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από ταλαντούμενα ηλεκτρικά φορτία.

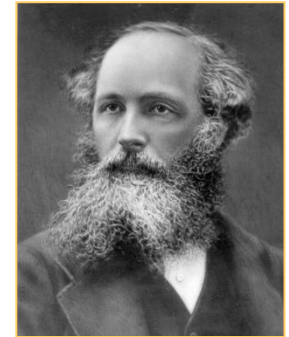


Ταχύτητα των ΗΜ-κυμάτων
στο κενό:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα επίπεδα ταλάντωσης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους.

Ηλεκτρομαγνητική θεωρία και εξισώσεις του Maxwell



Η κατανόηση των ιδιοτήτων των ΗΜ-κυμάτων βασίζεται στην **θεωρία ηλεκτρομαγνητισμού του Maxwell** (*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, **1865**).

Μέσα στις **4 εξισώσεις** του ο Maxwell κατόρθωσε να συμπεριλάβει **ενοποιημένα** όλους τους νόμους των φαινομένων του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού, **εισάγοντας την έννοια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου**.

Οι 4 εξισώσεις του Maxwell

μπορούν να διατυπωθούν και σε ολοκληρωματική, και σε διαφορική μορφή.

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{B} = \mu_0 \bar{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}$$

Ο ηλεκτρομαγνητισμός του κενού

Οι εξισώσεις του Maxwell στο κενό ($\rho = 0$, $\mathbf{J} = 0$) οδηγούν στην ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Στο κενό, οι 4 εξισώσεις ανάγονται σε δύο όμοιες μεταξύ τους εξισώσεις κύματος: μία για τις ταλαντώσεις του διανύσματος της έντασης \mathbf{E} του ηλεκτρικού πεδίου και μια της έντασης \mathbf{B} του μαγνητικού πεδίου:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{E}} = 0$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{B}} = 0$$

$$\nabla \times \bar{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \bar{\mathbf{B}}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \bar{\mathbf{B}} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t}$$

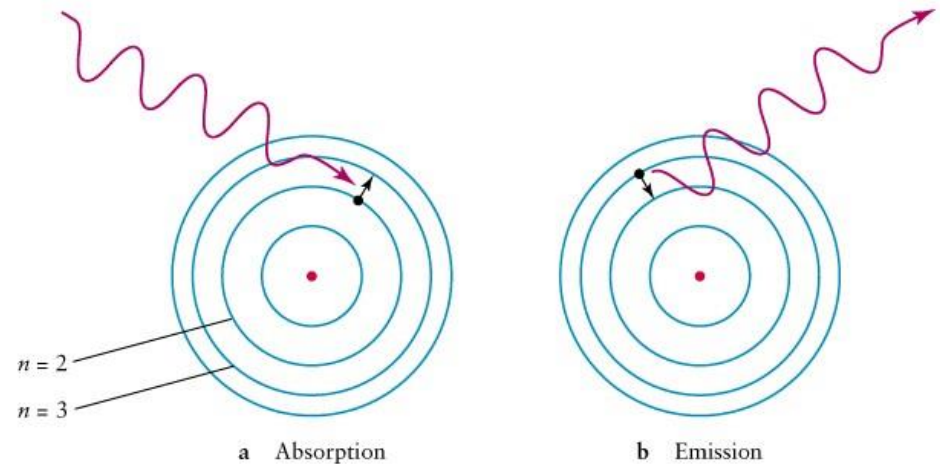
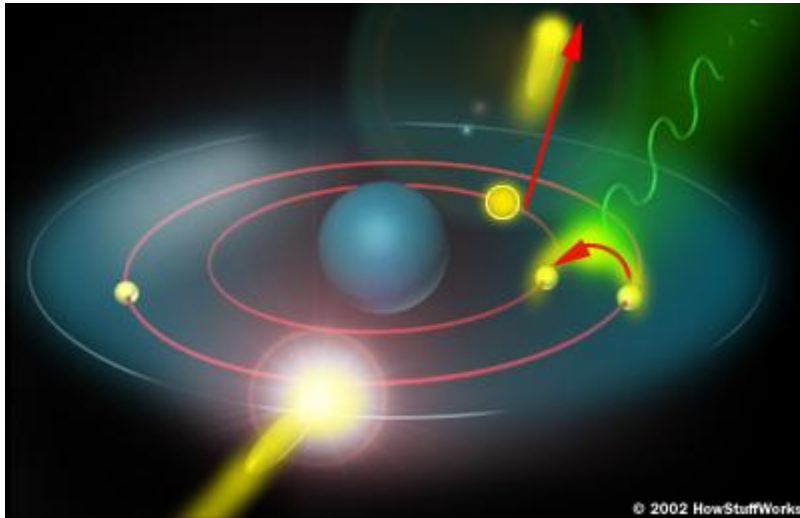
$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{B}} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{B}}}{\partial t^2}$$

$$\text{όπου } \varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

Οι δύο αυτές εξισώσεις είναι **εξισώσεις κύματος που διαδίδεται με ταχύτητα c .**

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από ταλαντούμενα ηλεκτρικά φορτία, όπως π.χ. τα ηλεκτρόνια των ατόμων.



Απορρόφηση και εκπομπή φωτός από άτομα

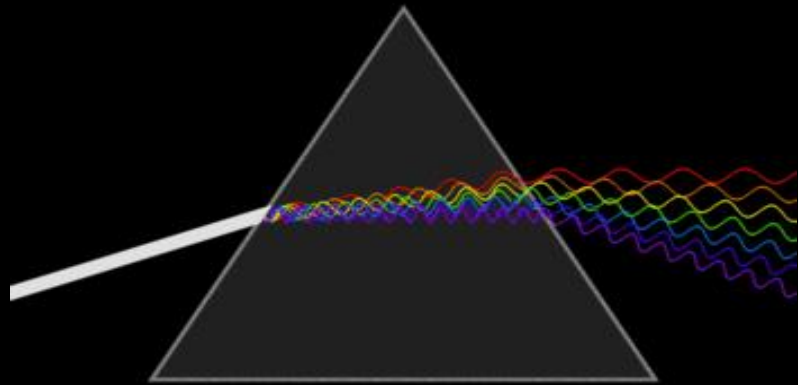
Θερμική ακτινοβολία: το φως των θερμών σωμάτων

(αόρατο ως επί το πλείστον)

παράγεται από ταλαντούμενα ηλεκτρικά φορτία,
π.χ. από τα ηλεκτρόνια και ιόντα των υλικών.



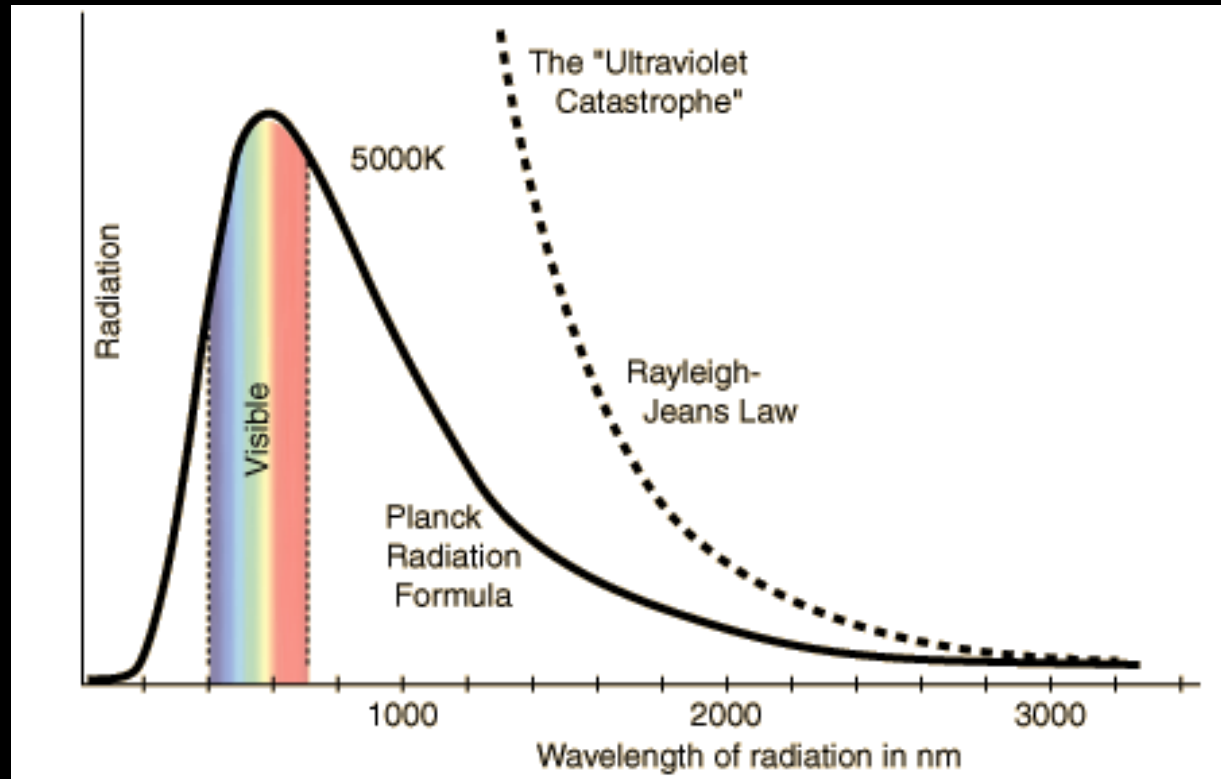
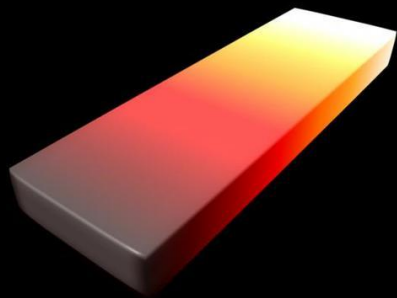
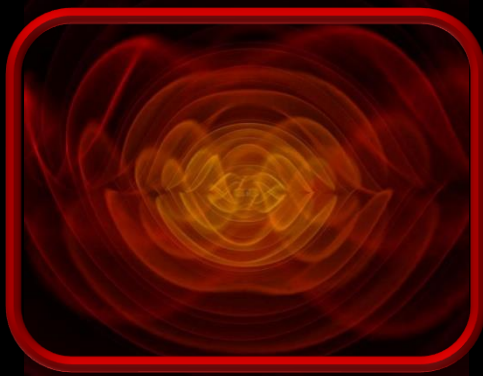
Οι πειραματικές παρατηρήσεις δείχνουν ότι το φως, αν και έχει κυματικές ιδιότητες, ...



Το πειραματικό δεδομένο που μας υποχρέωσε να εισάγουμε την κβαντική φύση του φωτός

το φάσμα της θερμικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος!

Στάσιμα ΗΜ κύματα σε κοιλότητα



Η κβαντική θεωρία για το φως

Η κλασική θεωρία προέβλεπε (αποτυχημένα):

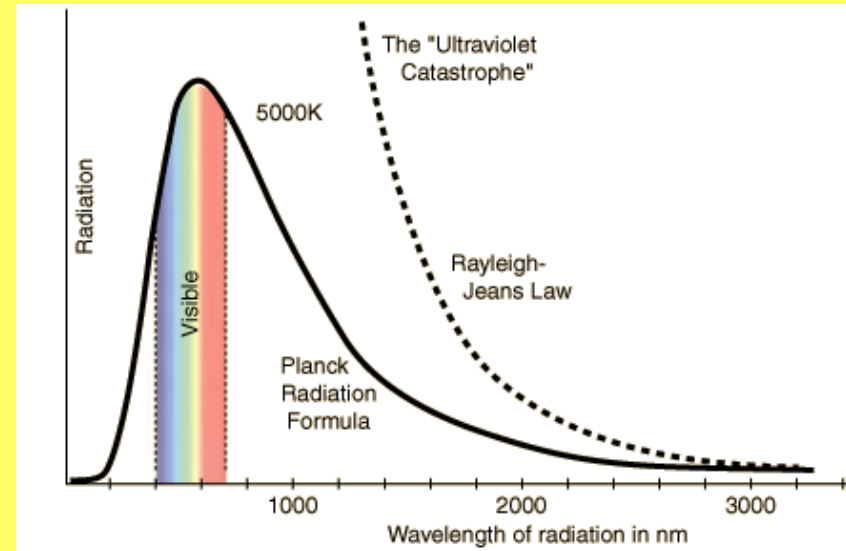
$$I(\nu) \propto \nu^2$$

Η θεωρία Planck (1900) πρότεινε (πετυχημένα) την κβάντωση:

$$\epsilon = n \cdot h\nu$$

όπου $h\nu$ το ελάχιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να έχει ένα ΗΜ κύμα (**quantum** = κομμάτι)

Προκύπτει ο νόμος του Planck:



$$I(\nu, T) d\nu = \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

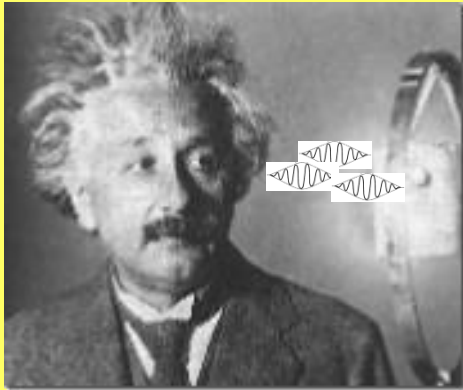
Σταθερά του Planck:

$$h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ (eV}\cdot\text{s)}$$

Σταθερά του Boltzmann:
 $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

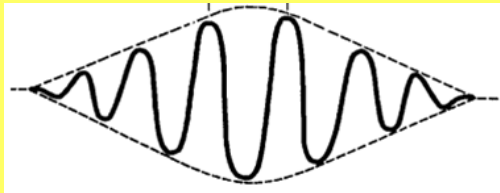
Πλήρης συμφωνία με τις πειραματικές καμπύλες!

Ο Einstein επιβεβαιώνει την κβαντική φύση του φωτός, ερμηνεύοντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



Einstein (βραβείο Nobel, 1918):

- Η ενέργεια του φωτός είναι κβαντισμένη (πρόταση Planck)
- Το κάθε **κβάντο** (quantum) φωτός έχει **ενέργεια $\epsilon = h\nu$** και δρα σαν ανεξάρτητη και αυτοτελής οντότητα (το λέμε **φωτόνιο**).

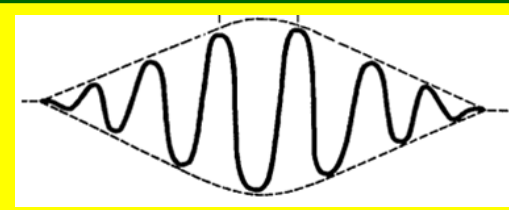


Ένα φωτόνιο ως
«πακέτο κύματος»

Στα επόμενα, θα μιλήσουμε με λεπτομέρειες για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα φαινόμενο που έπαιξε καθοριστικό ρόλο για την ανάπτυξη της κβαντικής Φυσικής.

**Το φως είναι
ροή φωτονίων!**

Απλές σχέσεις για τα φωτόνια



Το φωτόνιο είναι ένα «πακέτο κύματος» καθορισμένου μήκους κύματος, συχνότητας και ενέργειας.

Η συχνότητα ν του φωτός είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος λ :

$$\nu = c / \lambda$$

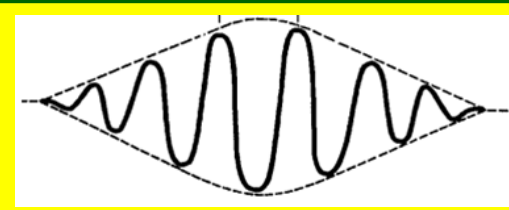
Το κάθε φωτόνιο φέρει καθορισμένη ενέργεια που δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon = h \nu = h c / \lambda$$

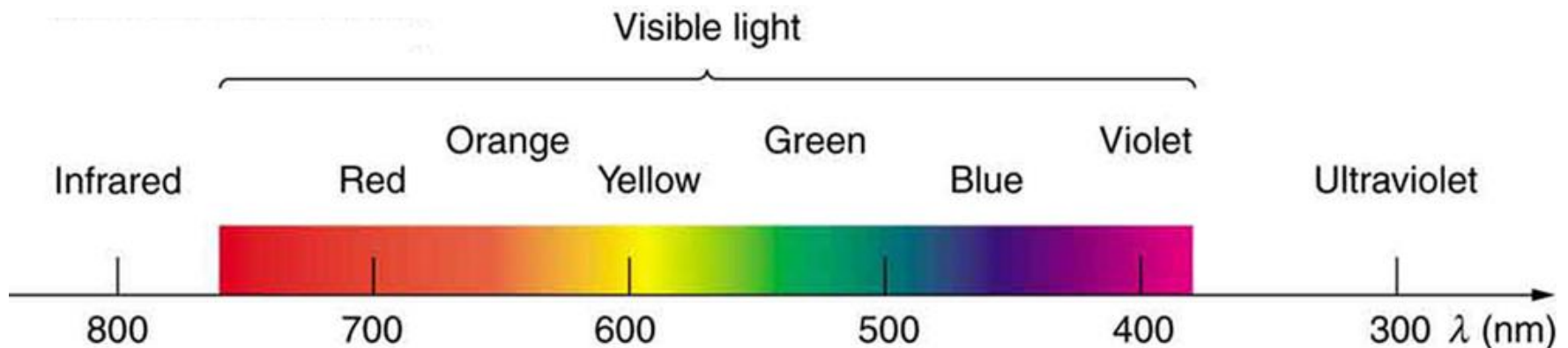
Όταν έχουμε **μονοχρωματικό φως** σημαίνει ότι το κάθε φωτόνιο της δέσμης έχει το ίδιο* μήκος κύματος λ με τα άλλα. Άρα έχει επίσης και την ίδια συχνότητα και την ίδια ενέργεια.

* Όταν λέμε “ίδιο” εννοούμε εντός των πλαισίων της κβαντικής απροσδιοριστίας.

Αριθμητική εφαρμογή



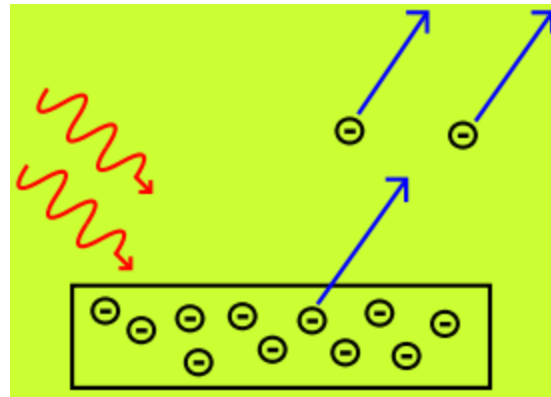
Το **οπτικό μέρος του φάσματος** (ορατό φως) έχει μήκη κύματος που βρίσκονται στην περιοχή, χοντρικά, μεταξύ 400 και 700 nm. Στο σχήμα φαίνονται επίσης οι περιοχές των βασικών χρωμάτων που βλέπουμε.



ΑΣΚΗΣΗ: Για τα χρώματα κόκκινο, κίτρινο, πράσινο και ιώδες (θεωρείστε τα μήκη κύματος 700, 600, 500 και 400 nm) να βρεθούν οι ενέργειες των αντίστοιχων φωτονίων (σε μονάδες Joule και σε eV).

2^ο μέρος

Το φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο



Αναστάσιος Λιόλιος
Εργαστήριο Ατομικής Φυσικής ΑΠΘ

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Η κβαντική φύση του φωτός αποκαλύπτεται με το
φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Είναι η αλληλεπίδραση φωτονίων με ηλεκτρόνια δέσμια σε κάποιο υλικό. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει σαν συνέπεια την εκπομπή των ηλεκτρονίων από το υλικό, όταν προσπίπτει σε αυτά φωτεινή ακτινοβολία. Παρατηρείται πιο εύκολα σε μέταλλα.

Χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Η εκπομπή ηλεκτρονίων γίνεται ακαριαία.
- Ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται είναι ανάλογος της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (δηλαδή της ροής των φωτονίων).
- Η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων έχει συνεχές φάσμα με τιμές από το μηδέν ως μία συγκεκριμένη τιμή T_{\max} και αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα.
- Κάτω από μία χαρακτηριστική συχνότητα κατωφλίου ν_0 (εξαρτάται από το υλικό) δεν γίνεται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Η ερμηνεία του ΦΦ είναι αδύνατη με την κυματική θεώρηση του φωτός και γίνεται μόνο αν θεωρηθεί η κβαντική φύση του φωτός.

ΕΡΜΗΝΕΙΑ του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Το κάθε φωτόνιο μπορεί να αλληλεπιδράσει μόνο με ένα ηλεκτρόνιο. Για να συμβεί αυτό πρέπει απαραίτητως το φωτόνιο να έχει ενέργεια $h\nu$ μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης w του συγκεκριμένου ηλεκτρονίου στο υλικό, ώστε να το ελευθερώσει. Το ηλεκτρόνιο που ελευθερώνεται παίρνει το περίσσευμα της ενέργειας του φωτονίου ως κινητική ενέργεια: $T = h\nu - w$.

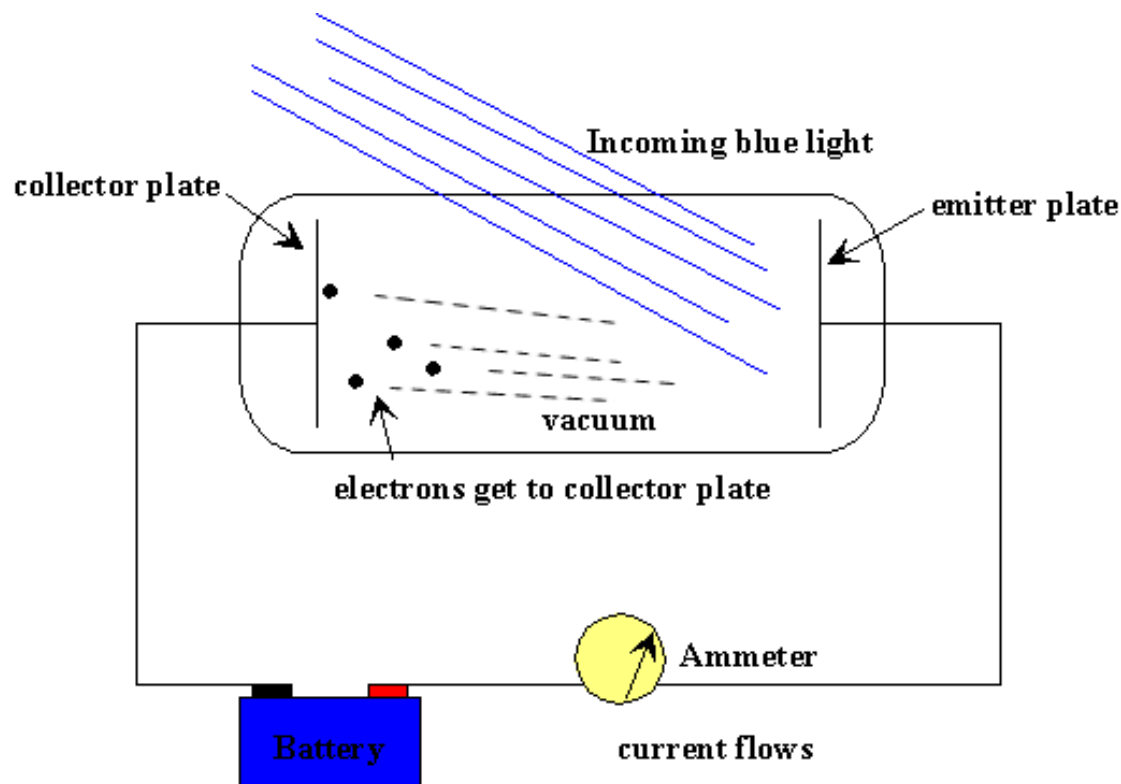
Τα δέσμια ηλεκτρόνια του υλικού, ευρισκόμενα σε διάφορες ενεργειακές στάθμες και σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια, έχουν και διαφορετικές ενέργειες σύνδεσης w . Η ελάχιστη από αυτές τις ενέργειες ονομάζεται **ενέργεια ή έργο εξόδου ϕ** και τα αντίστοιχα ηλεκτρόνια είναι τα πιο εύκολα για να βγούν και βγαίνουν με τη μέγιστη κινητική ενέργεια που είναι:

$$T_{\max} = h\nu - \phi$$

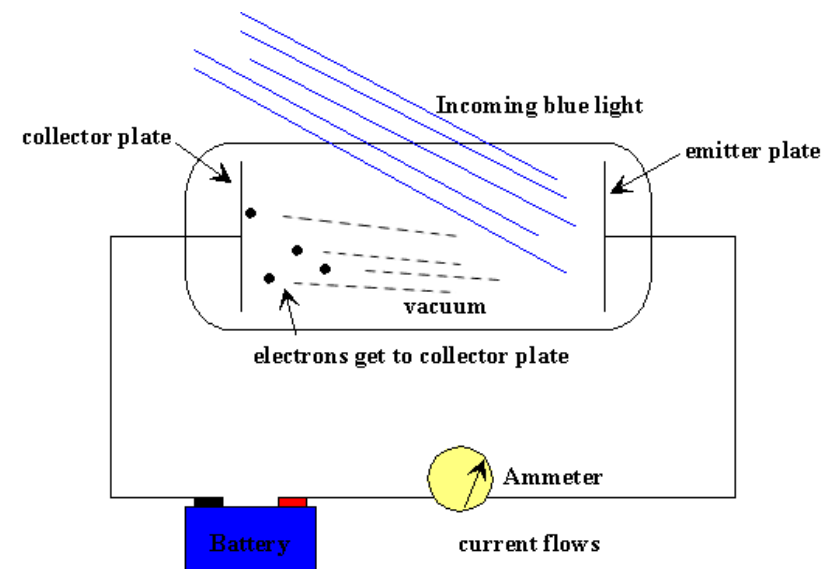
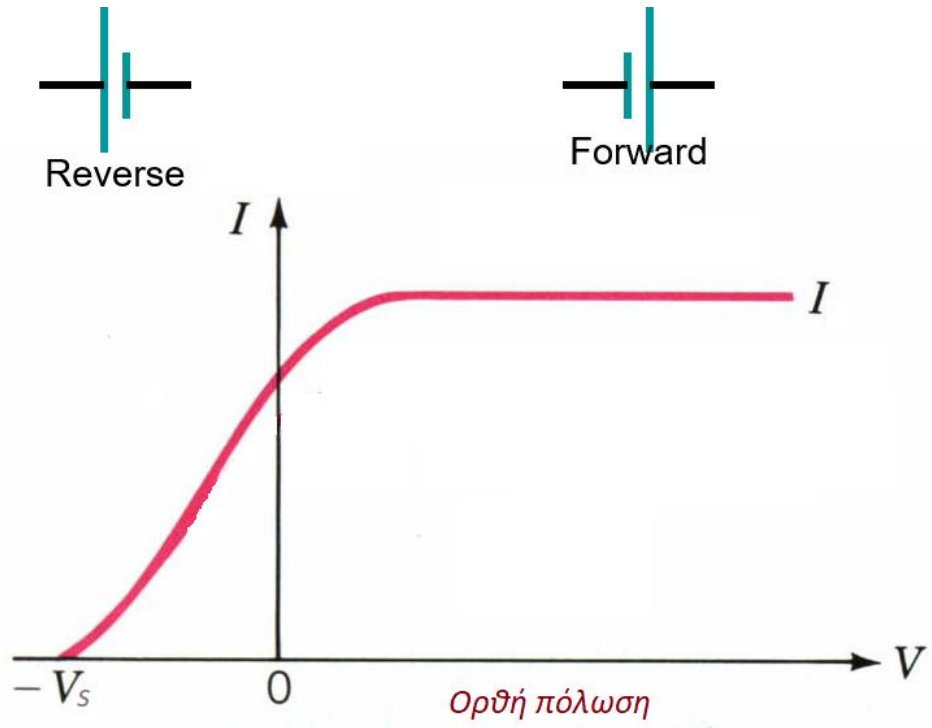
Η εξίσωση αυτή ονομάζεται **φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein (Nobel 2018)**.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να μελετηθεί με μια διάταξη που λέγεται **φωτοκύτταρο** (αερόκενη λυχνία δύο ηλεκτροδίων). Η κάθοδος πρέπει να είναι από μέταλλο με μικρό έργο εξόδου ϕ .



Χαρακτηριστικές καμπύλες Φωτοκυττάρου



**Ορθή ή Ανάστροφη
πόλωση**

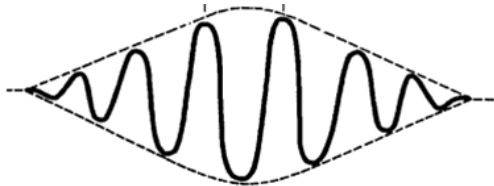
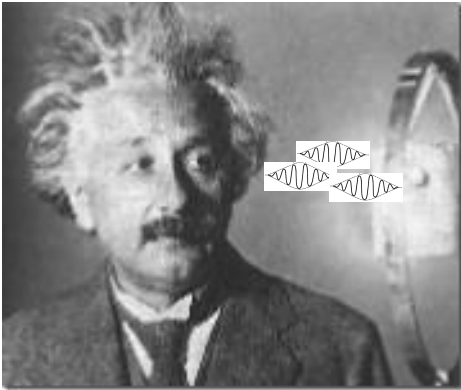
Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοκυττάρου: ερμηνεύονται τα πειραματικά δεδομένα;

1. Αν η συχνότητα ν είναι μικρότερη από κάποια τιμή ν_0 , δεν εμφανίζεται ρεύμα.
2. Αν $\nu > \nu_0$, το ρεύμα εμφανίζεται ακαριαία.
3. Με ορθή πόλωση, τα φωτο-ηλεκτρόνια επιταχύνονται και δίνουν ένα θετικό ρεύμα.
4. Μεγαλύτερη ένταση φωτός συνεπάγεται μεγαλύτερο ρεύμα κόρου.
5. Με ανάστροφη πόλωση, τα φωτο-ηλεκτρόνια επιβραδύνονται, και δίνουν μειωμένο θετικό ρεύμα, μέχρι που το ρεύμα μηδενίζεται όταν η πόλωση πάρει κάποια τιμή $-V_S$ (τάση αποκοπής).

ΑΣΚΗΣΗ

Ποια από τα χαρακτηριστικά του ΦΦ δεν μπορούν να ερμηνευθούν με την κλασσική θεώρηση (κυματική φύση του φωτός); Εξηγείστε γιατί.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: η κβαντική ερμηνεία



Το φωτόνιο ως
πακέτο κύματος

Einstein (βραβείο Nobel, 1918):

- Το φως είναι κβαντισμένο (πρόταση Planck)
- Το κάθε κβάντο (quantum) φωτός έχει ενέργεια $\epsilon = h\nu$ και δρα σαν ανεξάρτητη και αυτοτελής οντότητα (θα το λέμε **φωτόνιο**).
- Το κάθε φωτόνιο μπορεί να δώσει την ενέργειά του σε ένα ηλεκτρόνιο του υλικού και να το αποσπάσει από αυτό αν η ενέργεια $h\nu$ είναι μεγαλύτερη ή ίση από το έργο εξόδου ϕ .
- Η περίσσεια ενέργειας του φωτονίου, δίνεται στο φωτοηλεκτρόνιο ως κινητική ενέργεια:

$$T_{\max} = h\nu - \phi$$

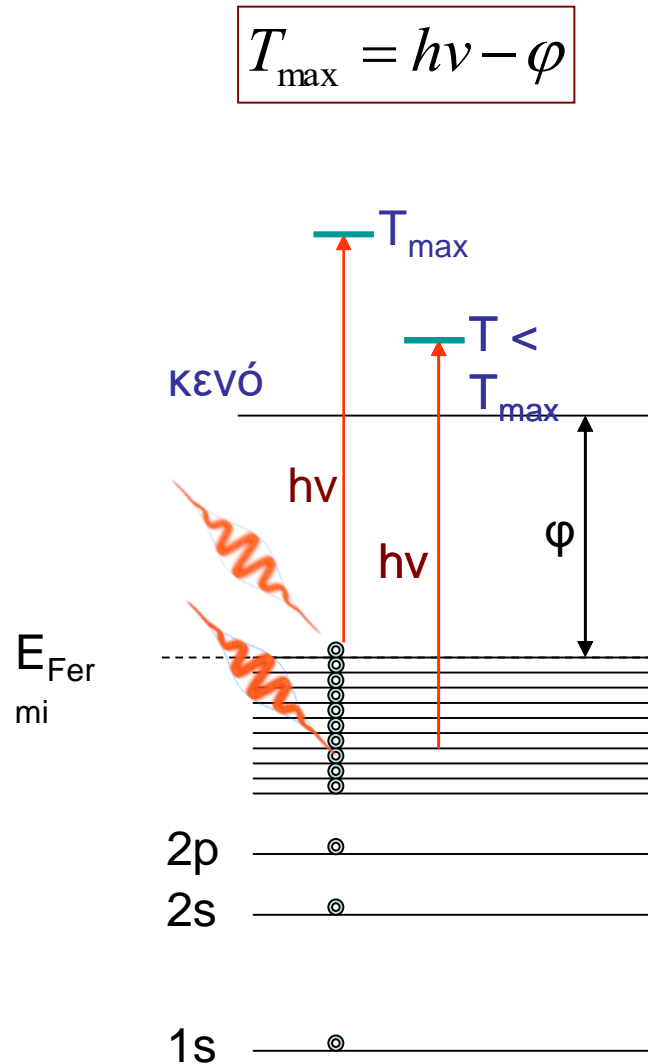
Φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein

Έργο εξόδου και κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων

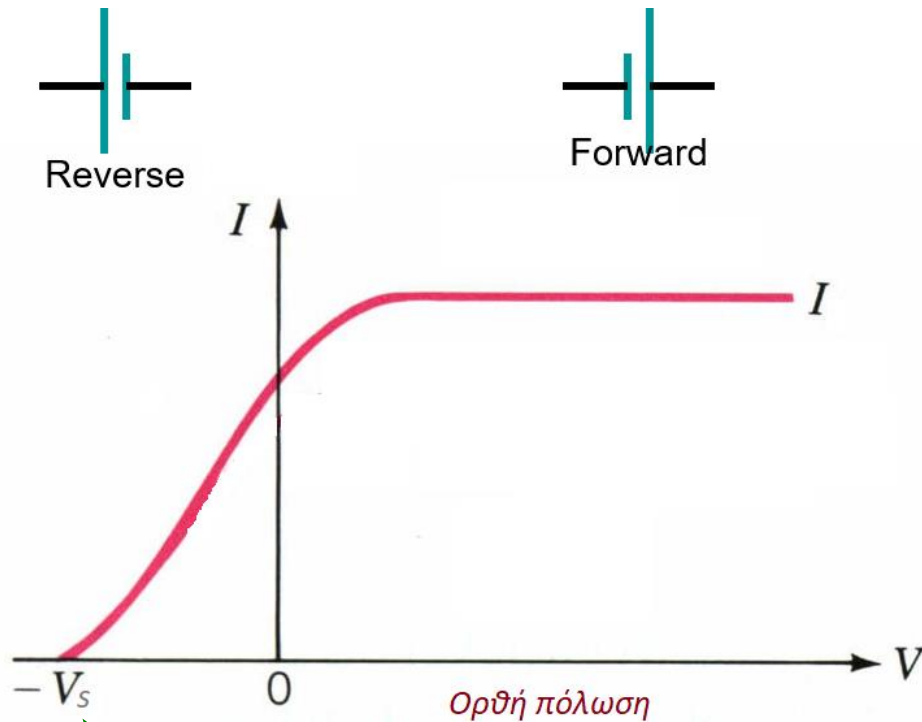
$$T_{\max} = h\nu - \varphi$$

Τα φωτοηλεκτρόνια, ακόμα και όταν παράγονται από μονοχρωματικό φως, έχουν συνεχές φάσμα ενέργειας:

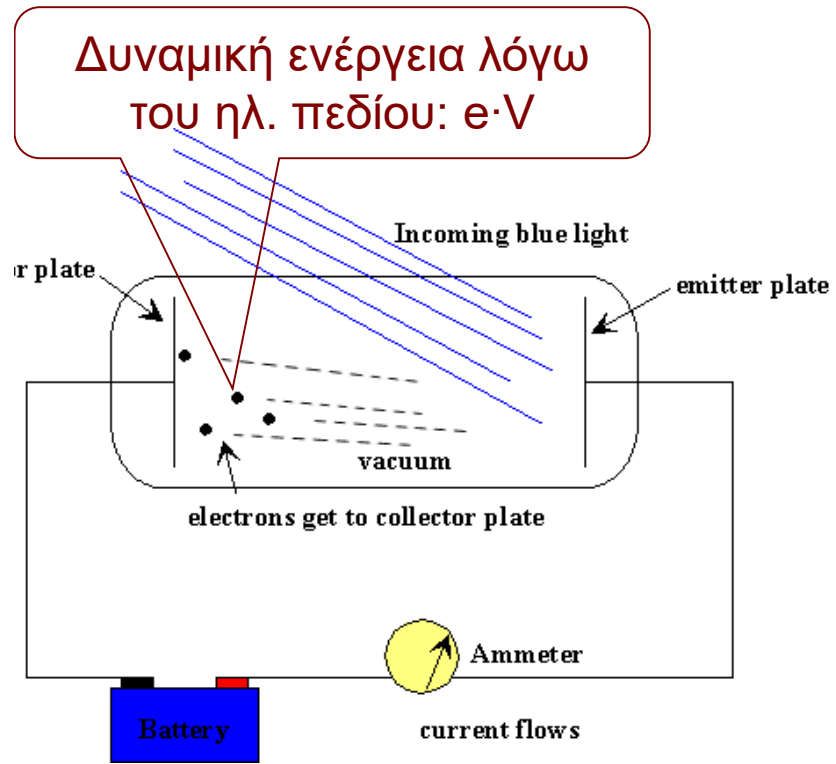
$$0 < T \leq T_{\max}$$



Χαρακτηριστικές καμπύλες Φωτοκυττάρου και δυναμικό αποκοπής



Δυναμικό αποκοπής



Ορθή ή Ανάστροφη πόλωση

Τα ηλεκτρόνια με κιν. ενέργεια T_{max} σταματούν και δεν φτάνουν στην άνοδο όταν τεθεί στην ανάστροφη πόλωση τέτοια τιμή V_s ώστε να ισχύει: $e \cdot V_s = T_{max}$

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και κατώφλι συχνότητας

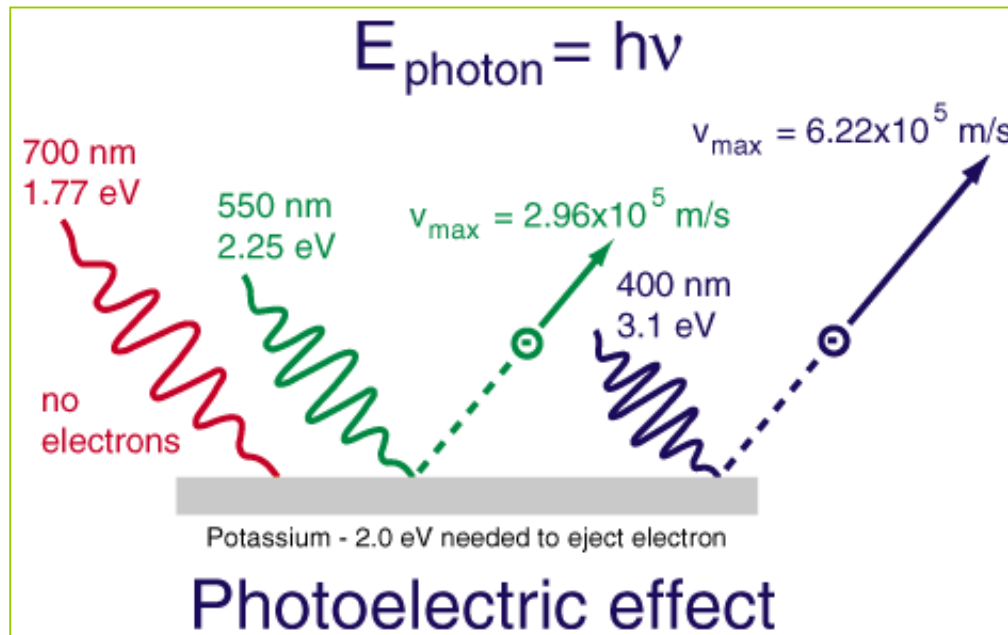
$$T_{\max} = h\nu - \phi$$

Από την φωτ/κη εξίσωση μπορεί εύκολα να βρεθεί η συχνότητα κατωφλίου ν_0 :

$$\nu = \nu_0 \leftrightarrow T_{\max} = 0$$

$$\phi = h\nu_0$$

ΑΣΚΗΣΗ: Να βρεθεί η μέγιστη ταχύτητα των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από την φωτοκάθοδο σε φωτοκύτταρο Καλίου (έργο εξόδου 2 eV), όταν αυτό φωτίζεται με μπλέ ($\lambda = 400 \text{ nm}$), πράσινο ($\lambda = 550 \text{ nm}$) ή κόκκινο ($\lambda = 700 \text{ nm}$) φως.



Άσκηση

Φωτοκύτταρο Na, με έργο εξόδου 2.46 eV, φωτίζεται με φως μήκους κύματος 300 nm. Να βρεθούν (a) Η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων (b) Το μήκος κύματος κατωφλίου και (c) Η μέγιστη ταχύτητα των φωτοηλεκτρονίων.

(a) Για τα φωτόνια ισχύει:

$$\left. \begin{array}{l} E = h\nu \\ \lambda\nu = c \end{array} \right\} \Rightarrow E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{300 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4.14 \text{ eV}$$

Παρατηρούμε ότι $E = h\nu = 4.14 \text{ eV} > \phi = 2.46 \text{ eV}$

άρα γίνεται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων είναι:

$$T_{\max} = E - \phi = 4.14 - 2.46 = 1.68 \text{ eV}$$

(b) Συχνότητα κατωφλίου: $T = 0 \Rightarrow h\nu_c = \phi \Rightarrow \nu_c = \frac{2.46 \text{ eV}}{4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} \Rightarrow \nu_c = 5.942 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

και το μήκος κύματος κατωφλίου: $\lambda_c = \frac{c}{\nu_c} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{5.942 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 505 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 505 \text{ nm}$

(c) Η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων είναι:

$1.68 \text{ eV} \ll 10 \text{ keV}$, άρα χρησιμοποιούμε κλασσική φυσική:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2T}{m}} \Rightarrow v = c \sqrt{\frac{2T}{mc^2}} \Rightarrow v = c \sqrt{\frac{2 \cdot 1.68 \text{ eV}}{511 \cdot 10^3 \text{ eV}}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow v = 2.564 \cdot 10^{-3} c \Rightarrow v = 7.7 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Άσκηση

Το ενεργό υλικό σε φωτοκύτταρο έχει έργο εξαγωγής 3.1 eV. Ποια είναι η ελάχιστη τιμή της αντίστροφης τάσης που πρέπει να τεθεί ώστε στο φωτοκύτταρο ώστε να μηδενιστεί το ρεύμα, όταν προσπίπτει φως με $\lambda = 270 \text{ nm}$;

Ενέργεια φωτονίων:
$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{270 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4.6 \text{ eV}$$

Μέγιστη κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων:

$$T_{\max} = E - \phi = 4.6 \text{ eV} - 3.1 \text{ eV} = 1.5 \text{ eV}$$

Τι επίδραση έχει στα ηλεκτρόνια το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται όταν βάζουμε διαφορά δυναμικού V μεταξύ ανόδου και καθόδου;

ΑΠΑΝΤΗΣΗ:

Τα ηλεκτρόνια (φορτίο e) **κερδίζουν ενέργεια** (αν επιταχύνονται – ορθή πόλωση) ή **χάνουν ενέργεια** (αν επιβραδύνονται – ανάστροφη πόλωση) κατά ένα ποσόν:

$$E_{\delta\omega\nu} = e \cdot V$$

Άσκηση

Το ενεργό υλικό σε φωτοκύτταρο έχει έργο εξαγωγής 3.1 eV. Ποια είναι η ελάχιστη τιμή της αντίστροφης τάσης που πρέπει να τεθεί ώστε στο φωτοκύτταρο ώστε να μηδενιστεί το ρεύμα, όταν προσπίπτει φως με $\lambda = 270 \text{ nm}$;

Ενέργεια φωτονίων:
$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{270 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4.6 \text{ eV}$$

Μέγιστη κινητικά ενέργεια ηλεκτρονίων:

$$T_{\text{max}} = E - \phi = 4.6 \text{ eV} - 3.1 \text{ eV} = 1.5 \text{ eV}$$

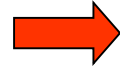
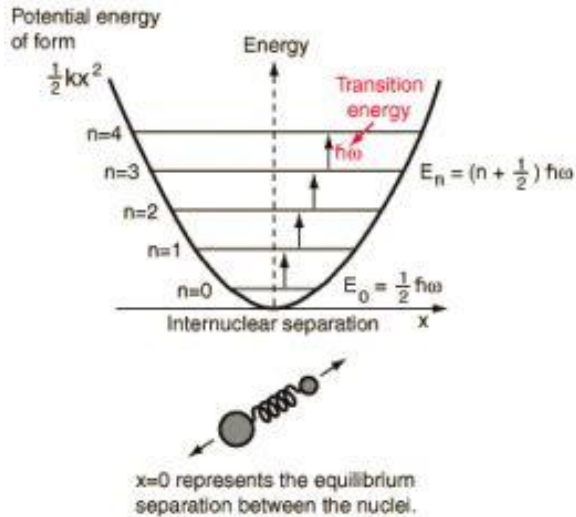
Η τάση αποκοπής για αυτό το μ.κ. θα είναι:

$$e \cdot V_s = T_{\text{max}} = 1.5 \text{ eV} \Rightarrow V_s = 1.5 \text{ V}$$

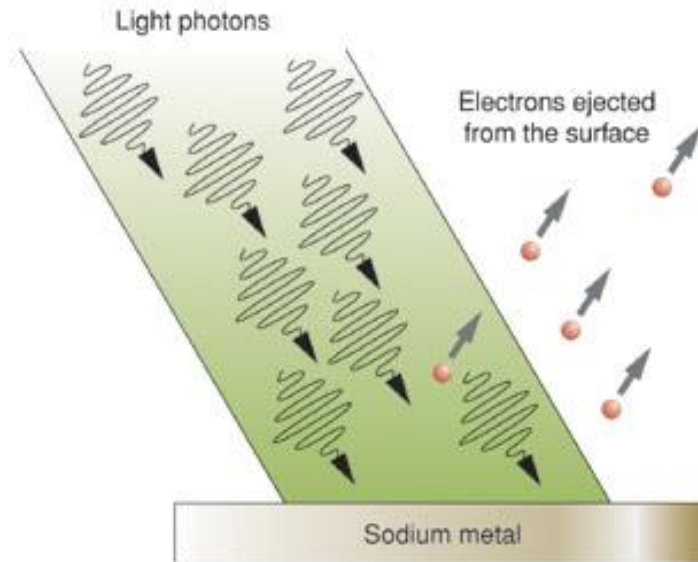
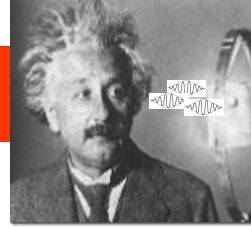
Σε τι συμπέρασμα καταλήγουμε για το φως; Το φως είναι μια ροή κβάντων φωτός (φωτονίων)



Planck



Einstein



$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Ενέργεια των κβάντων φωτός (Planck)

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ (J}\cdot\text{s)}$$
$$h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ (eV}\cdot\text{s)}$$

$$T_{\max} = h\nu - \varphi$$

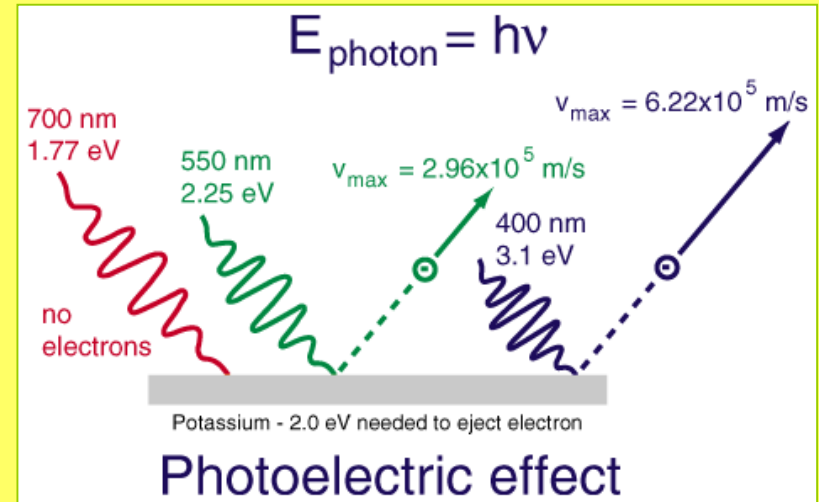
Φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein

Σκοπός της άσκησης

Σκοπός της άσκησης είναι:

α) Η μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Κατά τη μελέτη αυτή προσδιορίζεται πειραματικά η μέγιστη ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων που εξέρχονται από το μέταλλο της καθόδου, για διάφορες συχνότητες προσπίπτοντος μονοχρωματικού φωτός.

β) Ο προσδιορισμός της σταθεράς h του Planck. Η σταθερά προκύπτει από τη σχέση μεταξύ της ενέργειας των φωτοηλεκτρονίων με τη συχνότητα του φωτός και από την **φωτοηλεκτρική εξίσωση**.



ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Τι χρειαζόμαστε για την πειραματική μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου;

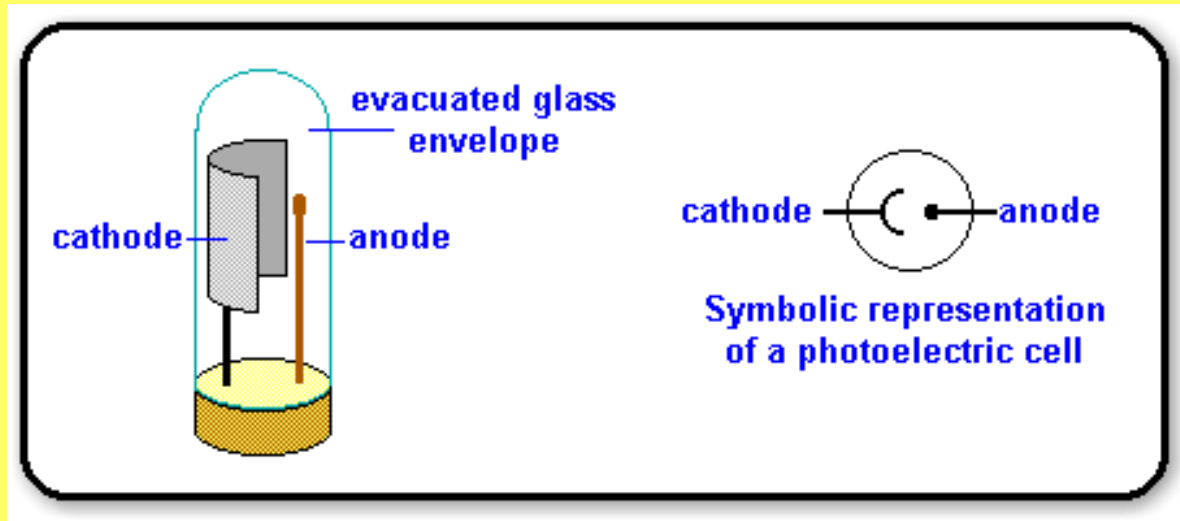
- Μια πηγή μονοχρωματικού φωτός.
- Μια μεταλλική επιφάνεια που να βγάζει εύκολα ηλεκτρόνια.
- Έναν χώρο κενό αέρος ώστε τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια (που τα λέμε και φωτοηλεκτρόνια) να μπορούμε να τα “χειριζόμαστε” καταλλήλως εφαρμόζοντας κάποια τάση επιβράδυνσης ή επιτάχυνσης.
- Έναν συλλέκτη των φωτοηλεκτρονίων που να τα στέλνει σε έναν μετρητή.

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Τι χρειαζόμαστε για την πειραματική μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου;

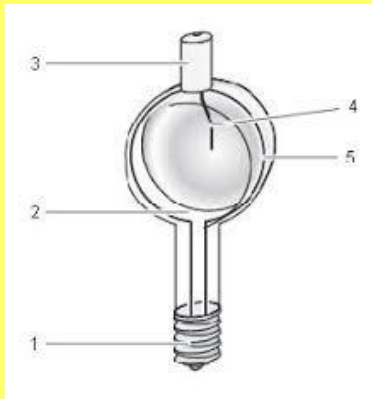
- Μια πηγή μονοχρωματικού φωτός (λυχνία Hg, φίλτρα, οπτική διάταξη)
- Μια μεταλλική επιφάνεια που να βγάζει εύκολα ηλεκτρόνια (φωτοκάθοδος)
- Έναν χώρο κενό αέρος ώστε τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια (που τα λέμε και φωτοηλεκτρόνια) να μπορούμε να τα “χειριζόμαστε” καταλλήλως εφαρμόζοντας κάποια τάση επιβράδυνσης ή επιτάχυνσης (φωτοκύτταρο και κατάλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα)
- Έναν συλλέκτη των φωτοηλεκτρονίων που να τα στέλνει σε έναν μετρητή (αμπερόμετρο που μετρά το ρεύμα των φωτοηλεκτρονίων).

Το φωτοκύτταρο και η λειτουργία του

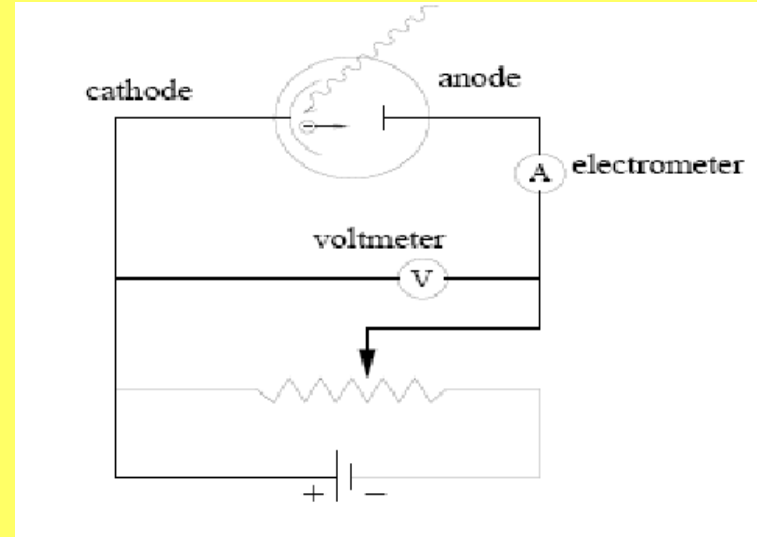
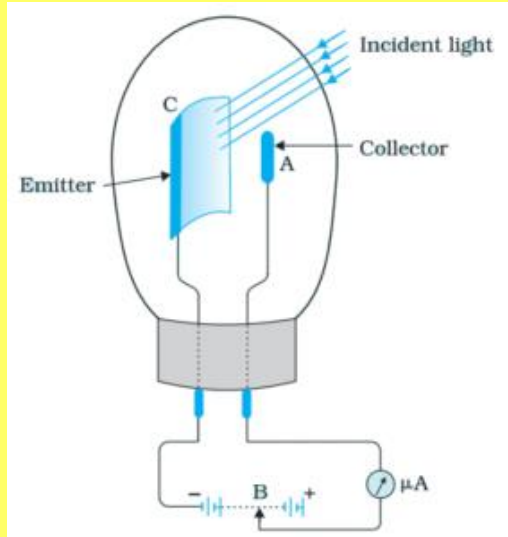


Τα **φωτοκύτταρα** ή **φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες**, παλιά ήταν **λυχνίες κενού** όπως αυτές που χρησιμοποιούμε για τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στο εργαστήριο (εικόνες).

Σήμερα, τα φωτοκύτταρα είναι συνήθως στοιχεία στερεάς κατάστασης, π.χ. **φωτοδίοδοι**. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγοί με την επαφή τους ευαίσθητη στο φως. Το ρεύμα που διέρχεται μέσα από την επαφή μεταβάλλεται σύμφωνα με την ποσότητα φωτός που δέχεται.



Το φωτοκύτταρο και η λειτουργία του



Η καταλληλότερη διάταξη για τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είναι το **φωτοκύτταρο**.

Όταν στην φωτοκάθοδο (μεταλλική επιφάνεια με μικρό έργο εξόδου ϕ των ηλεκτρονίων) προσπίπτει φως συχνότητας μεγαλύτερης από κάποιο όριο (ν_0), προκαλείται εξαγωγή ηλεκτρονίων.

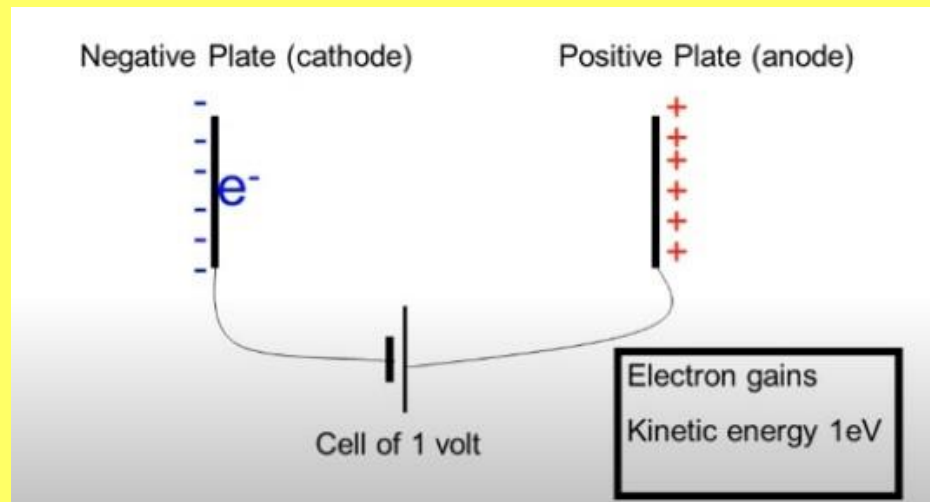
Τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν κινητική ενέργεια σε μια περιοχή, από σχεδόν μηδέν έως μια μέγιστη τιμή T_{\max} . Η μέγιστη τιμή κινητικής ενέργειας των φωτοηλεκτρονίων εξαρτάται από την συχνότητα ν του προσπίπτοντος φωτός και από το έργο εξόδου ϕ των ηλεκτρονίων από την μεταλλική επιφάνεια.

Η μονάδα ενέργειας eV

Ένα **ηλεκτρονιοβόλτ** (συμβολισμός: eV, συχνά προφέρεται «η-βί») αποτελεί μονάδα μέτρησης της ενέργειας και χρησιμοποιείται συνήθως στην ατομική και υπο-ατομική Φυσική.

Ένα (1) eV, εκφράζει το ποσό της κινητικής ενέργειας που αποκτά ένα μη δεσμικό ηλεκτρόνιο καθώς περνά από ηλεκτροστατική διαφορά δυναμικού ενός βολτ (V), στο κενό.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$



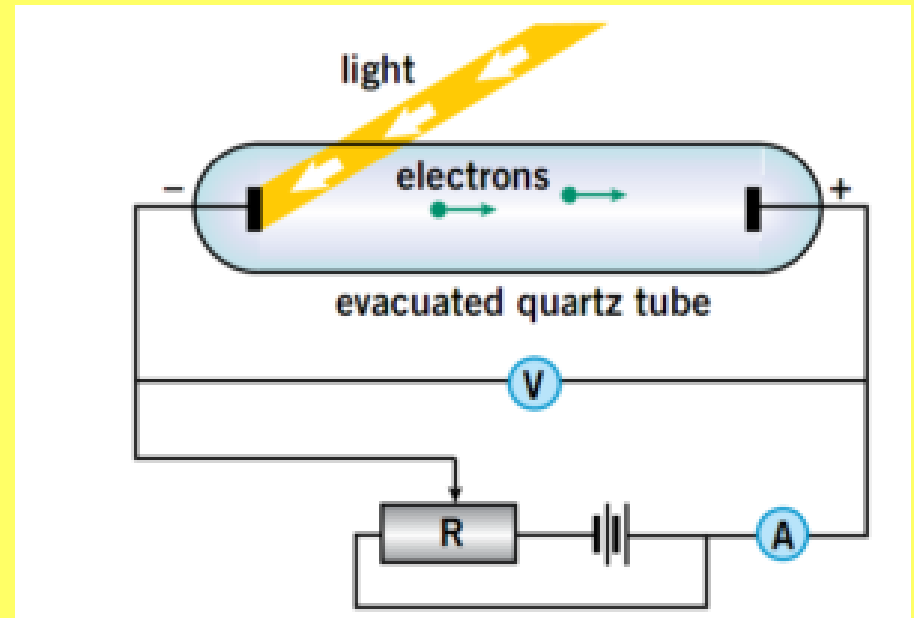
“Χειρισμός” των ηλεκτρονίων στο φωτοκύτταρο και εύρεση της μέγιστης κινητικής τους ενέργειας

Όταν προσπίπτει κατάλληλο φως στην κάθοδο και εξέρχονται φωτοηλεκτρόνια, κάποια από αυτά φτάνουν στην άνοδο και δημιουργούν **ανοδικό ρεύμα**. Αυτό σημαίνει ότι το ΦΦ δημιουργεί ΗΕΔ δύναμη που κλείνει το κύκλωμα, χωρίς την ανάγκη ενός τροφοδοτικού που να παρέχει τάση V_{AK} μεταξύ ανόδου-καθόδου.

Εφαρμόζοντας **ορθή πόλωση** V_{AK} (η άνοδος θετική) τα εξερχόμενα φωτοηλεκτρόνια κερδίζουν ενέργεια eV_{AK} και έτσι υποβοηθούνται να φτάσουν στην άνοδο και το ρεύμα μεγαλώνει.

Με **ανάστροφη πόλωση** V_{AK} (η άνοδος αρνητική) τα εξερχόμενα φωτοηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια ίση με eV_{AK} και έτσι δυσκολεύονται να φτάσουν στην άνοδο. Όσο μεγαλύτερη είναι η V_{AK} τόσο λιγότερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο και το ρεύμα μειώνεται. Αν η απώλεια ενέργειας eV_{AK} γίνει ίση με την T_{max} τότε κανένα ηλεκτρόνιο δεν φτάνει στην άνοδο και το ρεύμα αποκόπτεται εντελώς. Την τιμή της ανάστροφης τάσης που συμβαίνει ο μηδενισμός του ρεύματος, την ονομάζουμε **τάση αποκοπής V_s** . Προφανώς θα ισχύει:

$$T_{max} = eV_s$$



3^ο μέρος

**Η πειραματική διάταξη
και η πειραματική διαδικασία**

**Αναστάσιος Λιόλιος
Εργαστήρια Ατομικής Φυσικής ΑΠΘ**

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από:

- Φωτεινή πηγή (φασματική λυχνία Hg)
- Συστοιχία οπτικών φίλτρων για τη λήψη μονοχρωματικής ακτινοβολίας
- Φωτοκύτταρο (αερόκενη σωλήνα από χαλαζία με κάθοδο επιμεταλλωμένη με κάλιο και άνοδο από πλατίνα)
- Τροφοδοτικό της φωτεινής πηγής
- Τροφοδοτικό του φωτοκύτταρου
- Βολτόμετρο
- Ηλεκτρόμετρο
- Καλώδια σύνδεσης

Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μία **φωτεινή πηγή**, μία **οπτική διάταξη** για την λήψη μονοχρωματικής ακτινοβολίας, ένα **φωτοκύτταρο** με το αντίστοιχο **τροφοδοτικό** και **όργανα μέτρησης** της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου του φωτοκυττάρου και του ανοδικού ρεύματος (ηλεκτρόμετρο).

Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



Η **φωτεινή πηγή** αποτελείται από μια φασματική **λυχνία Hg**.

Το **φωτοκύτταρο** αποτελείται από μια αερόκενη λυχνία από χαλαζία.

Η **οπτική διάταξη επιλογής μονοχρωματικού φωτός** και το φωτοκύτταρο είναι τοποθετημένα σε ένα φωτοστεγές κιβώτιο.

Το **τροφοδοτικό** του φωτοκυττάρου παρέχει **ανάστροφη πόλωση** 0 έως -5 Volt.

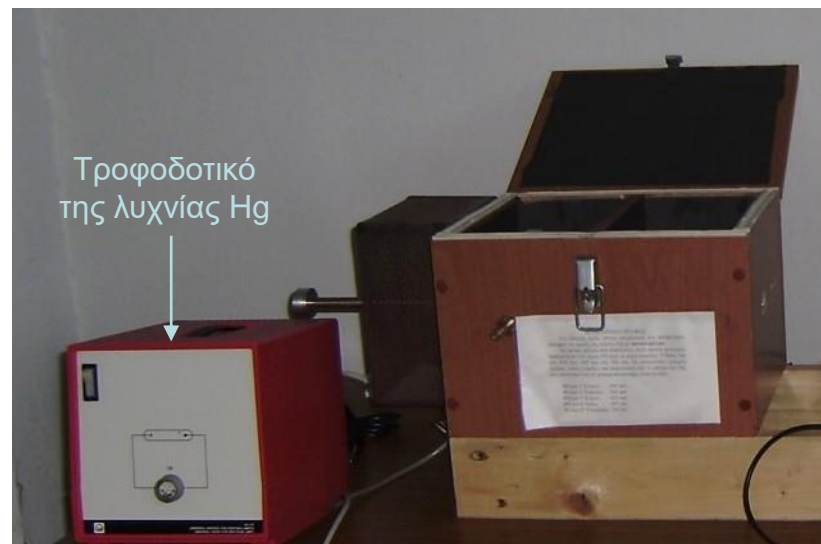
Το ανοδικό ρεύμα που μετράμε είναι της τάξης των 10^{-12} με 10^{-11} Ampere.

Μέτρηση της σταθεράς του Planck

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

1. Αναγνωρίστε τις συσκευές. Για την περιγραφή και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρόμετρου βλέπε στο Παράρτημα 1 (σελίδα 91).
2. Ανάψτε το τροφοδοτικό της λυχνίας Hg.

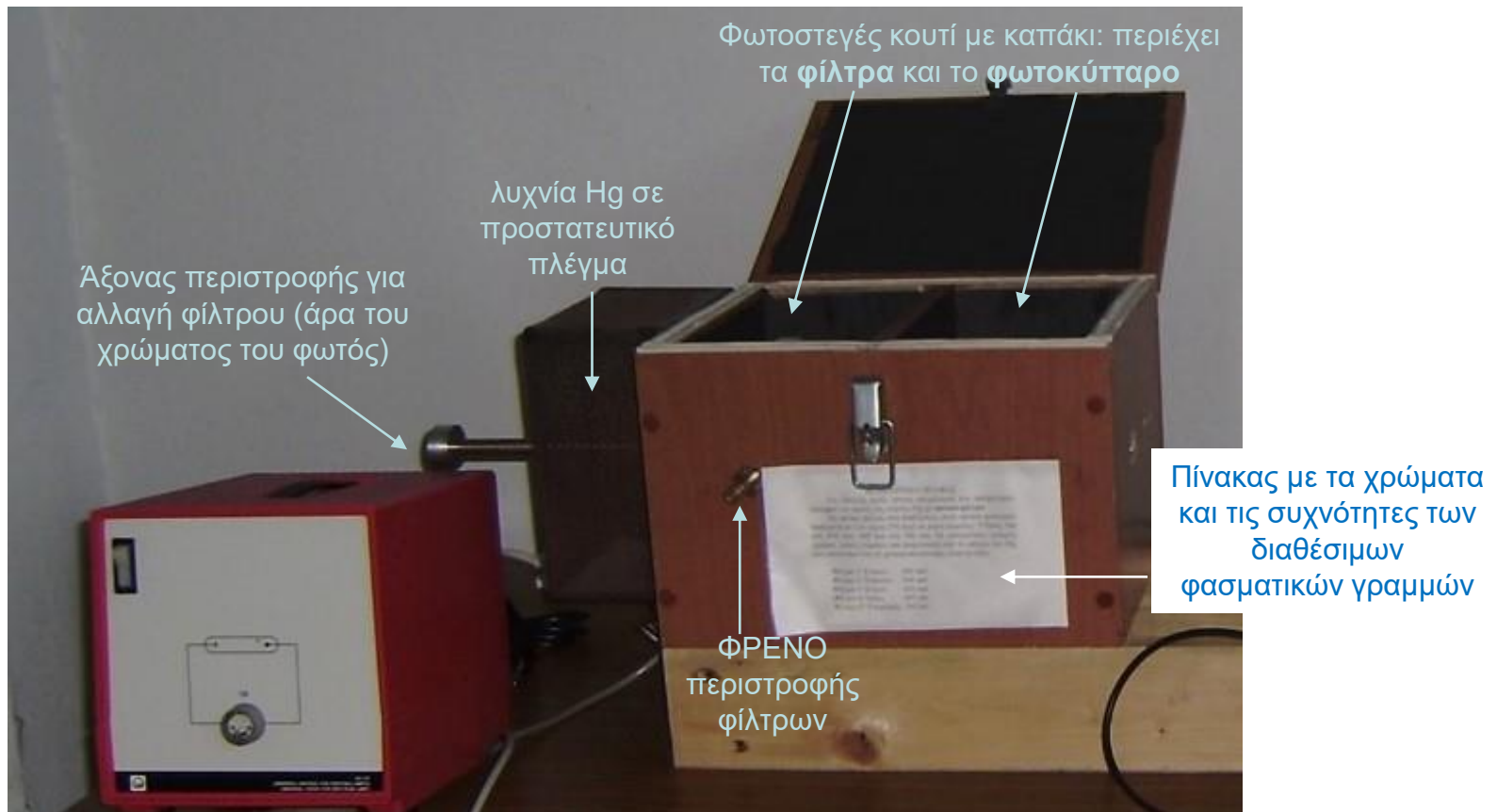
Μην σβήσετε το τροφοδοτικό της λυχνίας Hg πριν από το τέλος της άσκησης. Αν τυχόν σβήσει κατά την διάρκεια της άσκησης μην το ανάβετε αν δεν περάσουν τουλάχιστον 15 min. Μια βραχυχρόνια διακοπή της λειτουργίας της λυχνίας Hg μπορεί να την καταστρέψει.



Επιλογή του μονοχρωματικού φωτός

(για το οποίο θα μετρήσουμε το φωτορεύμα υπό ανάστροφη πόλωση του φωτοκυττάρου).

4. Φροντίστε ώστε στην κάθοδο του φωτοκύτταρου να πέφτει μια από τις διαθέσιμες μονοχρωματικές ακτινοβολίες με την επιλογή ενός φίλτρου. Πόση είναι η ενέργεια (σε eV) των φωτονίων της ακτινοβολίας;



Ετοιμασία του ηλεκτρομέτρου Keithley 610 C για τις μετρήσεις του ανοδικού ρεύματος



3. Βάλτε τον διακόπτη ελέγχου μέτρησης του ηλεκτρόμετρου στην θέση LOCK και ανάψτε το όργανο (διακόπτης οργάνου στην θέση OFF). Επιλέξτε με τον διακόπτη κλίμακας B την θέση ' 10^{-11} Ampere'. Μετά από μερικά λεπτά βάλτε τον διακόπτη οργάνου στην θέση +. Κάντε διόρθωση του μηδενός.

Για την λειτουργία του ηλεκτρομέτρου

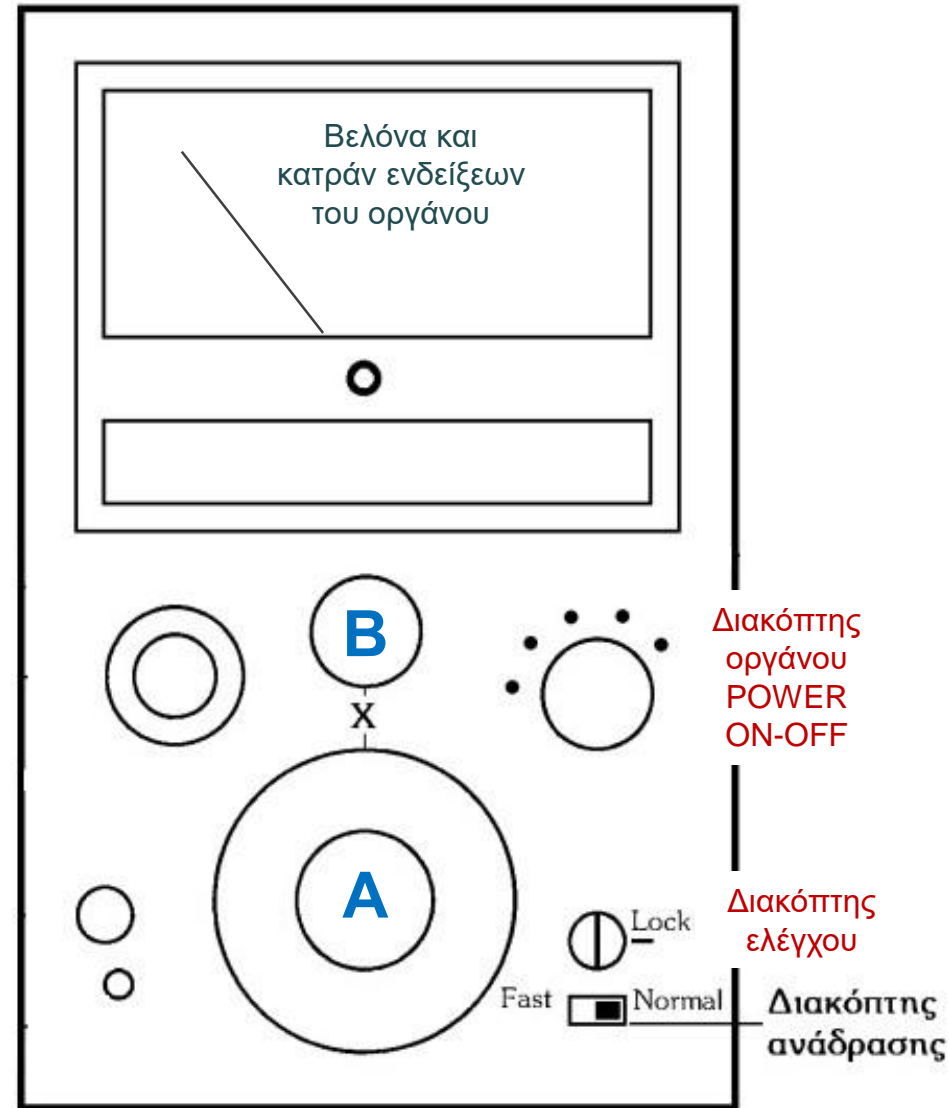
Οι μετρήσεις του ανοδικού ρεύματος του φωτοκυττάρου γίνονται με ευαίσθητο ηλεκτρόμετρο (Keithley 610C). Στο εργαστήριο χρησιμοποιούμε το ηλεκτρόμετρο ως **Αμπερόμετρο**.

Επιλογή κλίμακας μετρήσεων:

Ο επιλογέας **A** τοποθετείται σταθερά στην ένδειξη 10^{-11} Ampere.

Ο επιλογέας **B** τοποθετείται σε κάποια ένδειξη π.χ. 0.1 ή 0.3 , βολική ώστε να επαρκεί για όλες τις τιμές ρεύματος που θα μετρηθούν για το κάθε χρώμα φωτός που προσπίπτει στο φωτοκύτταρο.

Η πλήρης κλίμακα μετρήσεων (full scale) προκύπτει ως το γινόμενο των ενδείξεων των δύο επιλογέων A και B, π.χ. 0.1×10^{-11} Ampere, ή 0.3×10^{-11} Ampere.



Σχηματική παράσταση της εμπρόσθιας όψης του ηλεκτρομέτρου 610 C της Keithley.

Για την λειτουργία του ηλεκτρομέτρου

92 Παράρτημα 1

Ο *διακόπτης οργάνου* είναι ένας πενταθέσιος διακόπτης με τις ενδείξεις POWER OFF, OFF, +, – και CENTER ZERO. Όταν ο διακόπτης αυτός είναι στην θέση POWER OFF το όργανο δεν τροφοδοτείται. Στην θέση OFF το όργανο τροφοδοτείται αλλά δεν είναι έτοιμο για μέτρηση. Στις υπόλοιπες θέσεις το όργανο είναι έτοιμο για μέτρηση.

Ο *διακόπτης ελέγχου της μέτρησης* συνδέει ή αποσυνδέει το προς μέτρηση σήμα με το όργανο. Στην θέση LOCK το σήμα εισόδου δεν συνδέεται με το όργανο. Η θέση αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μηδενός και για την προστασία του οργάνου, όταν π.χ. ανοίγουμε το σκέπασμα του φωτοστεγούς κιβωτίου στην άσκηση 1.

Ο έλεγχος του μηδενός γίνεται με τον *διακόπτη ελέγχου του μηδενός*. Αυτός αποτελείται από έναν διακόπτη για την χοντρική ρύθμιση του μηδενός και από ένα ποτενσιόμετρο για την λεπτή ρύθμιση. Για να γίνει η ρύθμιση του μηδενός, ο διακόπτης ελέγχου της μέτρησης πρέπει να βρίσκεται στην θέση LOCK.

Ο *διακόπτης κλίμακας B* καθορίζει το τι θα μετρήσει το όργανο και την τάξη μεγέθους του σήματος. Το ηλεκτρόμετρο μπορεί να μετρήσει τάση, ένταση ρεύματος, φορτίο και αντίσταση. Η πραγματική κλίμακα της μέτρησης είναι το γινόμενο των ενδείξεων του διακόπτη κλίμακας A και του διακόπτη κλίμακας B.

Για την λειτουργία του ηλεκτρομέτρου

Ο διακόπτης ανάδρασης καθορίζει την ταχύτητα απόκρισης του οργάνου. Για μέτρηση φορτίου πρέπει να είναι στην θέση FAST. Για οποιαδήποτε άλλη μέτρηση πρέπει να είναι στην θέση NORMAL.

Αμπερόμετρο

Προδιαγραφές :

Περιοχή: $10^{-14} - 0,3 \text{ A}$ σε 28 κλίμακες full scale

Ακρίβεια του οργάνου : $\pm 2\%$ της μέγιστης τιμής της κλίμακας,
για τις κλίμακες $0,3 \times 10^{-11} - 0,3 \text{ A}$

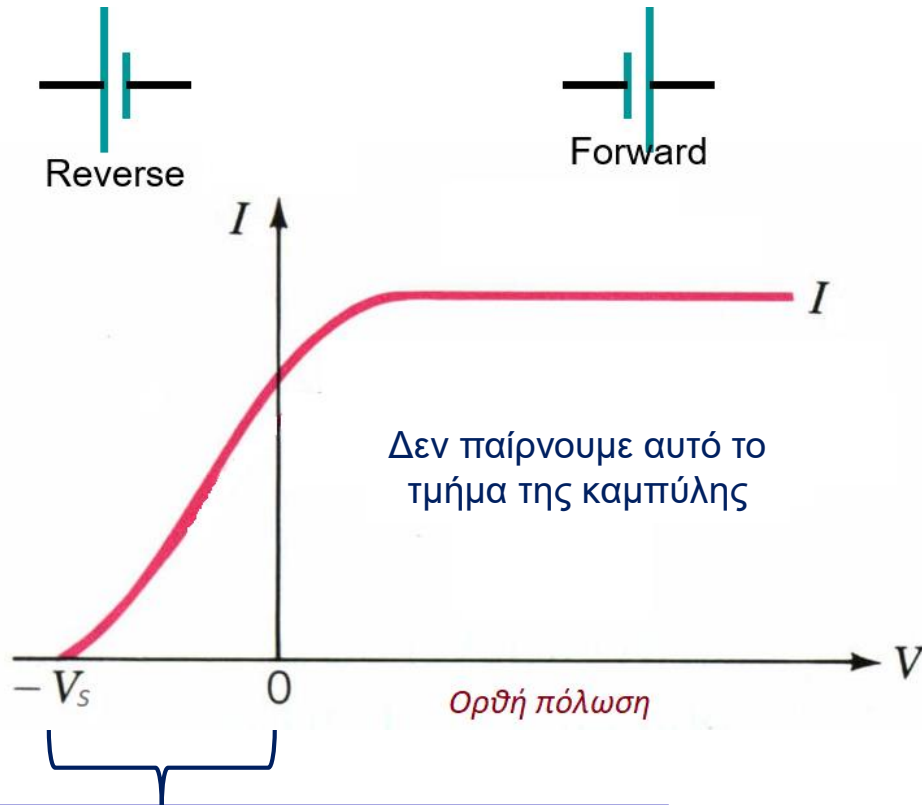
$\pm 4\%$ της μέγιστης τιμής της κλίμακας,
για τις υπόλοιπες κλίμακες

Μετρήσεις του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει της ανάστροφης τάσης

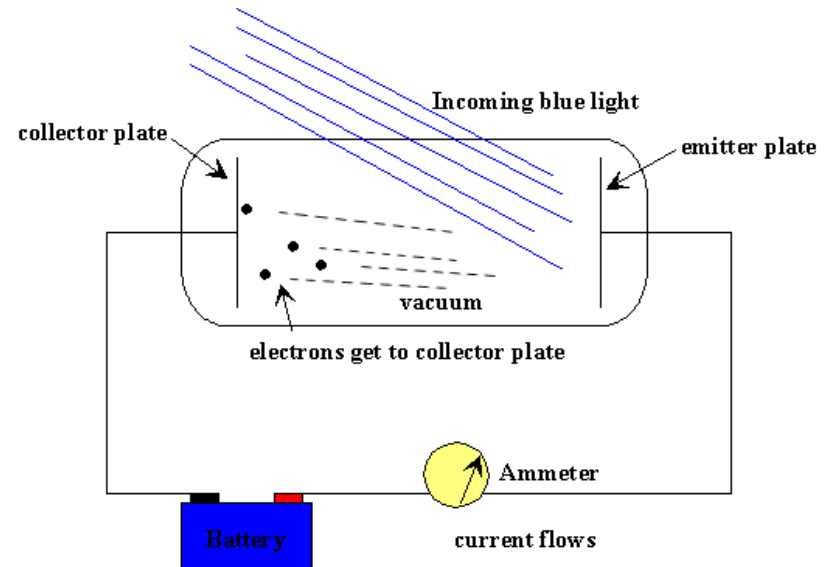
5. Ανάψτε το τροφοδοτικό του φωτοκύτταρου, βάλτε τάση ίση με μηδέν και μετρήστε το φωτόρευμα. Γιατί υπάρχει ρεύμα για τάση ίση με μηδέν;
6. Πάρτε ζεύγη τιμών του φωτορεύματος σαν συνάρτηση της ~~ορθής πόλωσης~~, ανά 1 volt. Σχεδιάστε την καμπύλη.
7. Πάρτε 5 – 10 ζεύγη τιμών του φωτορεύματος σαν συνάρτηση της ανάστροφης πόλωσης και σχεδιάστε την καμπύλη. Βρείτε την τάση αποκοπής V_S και την μέγιστη ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων (σε eV). Εκτιμήστε το σφάλμα στο V_S .
8. Επαναλάβετε το βήμα 7 για όλες τις διαθέσιμες συχνότητες.



Χαρακτηριστικές καμπύλες Φωτοκυττάρου



Παίρνουμε μετρήσεις γι' αυτό το τμήμα της καμπύλης (δηλ. με ανάστροφη πόλωση), για να βρούμε την V_s , δηλαδή την τάση στην οποία το ρεύμα μηδενίζεται.



Ορθή ή Ανάστροφη πόλωση

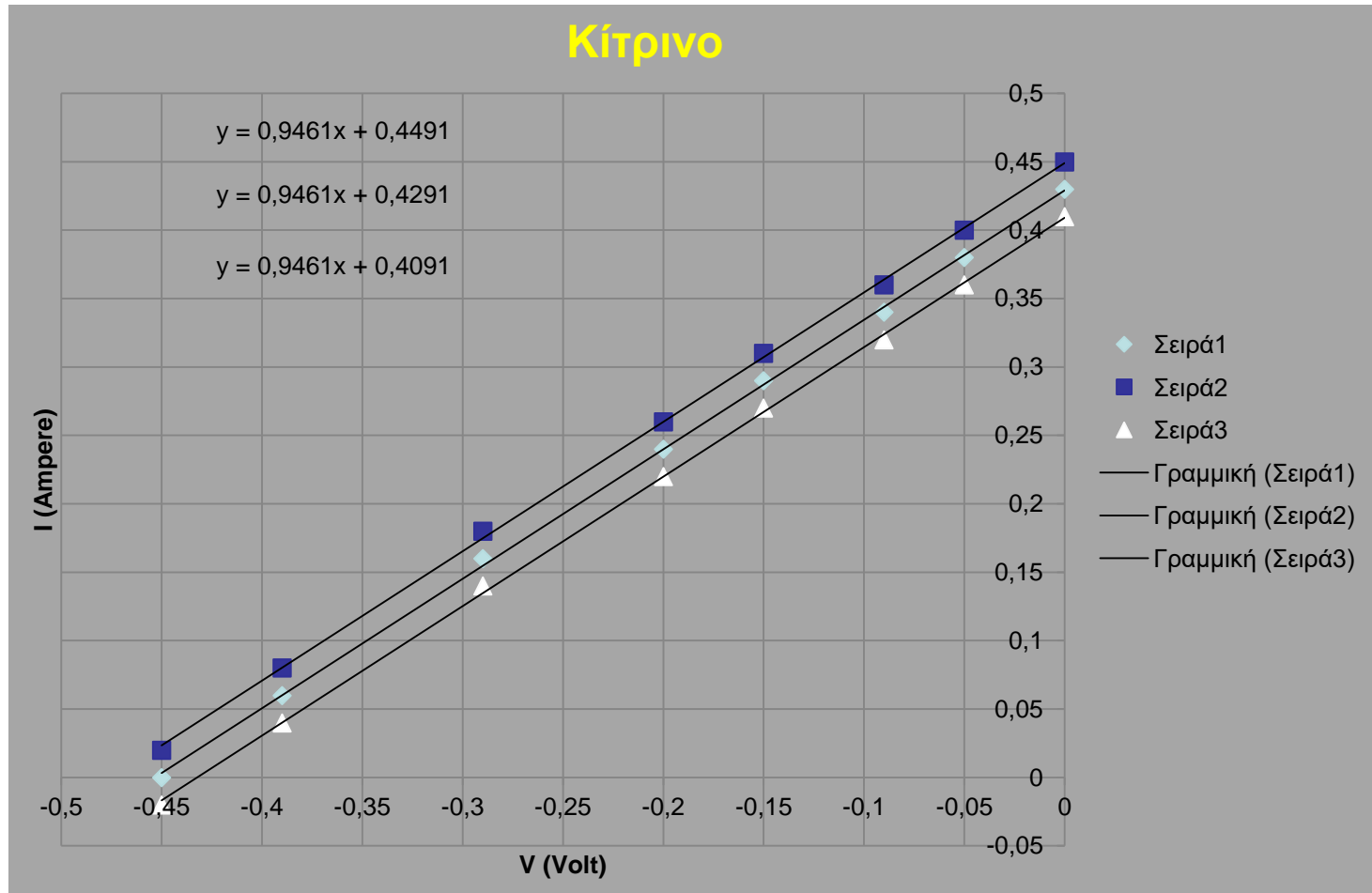
Σφάλματα: στο μετρούμενο ρεύμα υπάρχει σφάλμα που αντιστοιχεί στο 2% της κλίμακας που χρησιμοποιήσαμε. Αυτό συνεπάγεται και κάποιο πειραματικό σφάλμα στην προσδιοριζόμενη τιμή της V_s το οποίο πρέπει να εκτιμήσουμε και να λάβουμε υπόψιν στα περαιτέρω.

Παράδειγμα μετρήσεων του ρεύματος I συναρτήσει της ανάστροφης τάσης V , όταν το φωτοκύτταρο φωτίζεται με μονοχρωματικό φως **κίτρινου** χρώματος. Οι δύο τελευταίες στήλες είναι για την εκτίμηση του σφάλματος στο V_s (είναι ένας τρόπος εκτίμησης γραφικά από το διάγραμμα που προκύπτει).

κίτρινο				
Συχνότητα ν (Hertz)	V (Volt)	$I * 10^{-11}$ (Ampere)	(+)2% σφάλμα	(-)2% σφάλμα
$519,9 * 10^{12}$	0	0,43	0,45	0,41
	-0,05	0,38	0,4	0,36
	-0,09	0,34	0,36	0,32
	-0,15	0,29	0,31	0,27
	-0,2	0,24	0,26	0,22
	-0,29	0,16	0,18	0,14
	-0,39	0,06	0,08	0,04
	-0,45	0	0,02	-0,02

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για τη μεταβολή της ανάστροφης τάσης V στις μετρήσεις μας, μπορούμε αν θέλουμε να πάμε **με βήματα 0.1 Volt** όταν το φωτοκύτταρο φωτίζεται με φως κίτρινου ή πράσινου χρώματος και **με βήματα 0.2 Volt** όταν το φωτοκύτταρο φωτίζεται με φως χρώματος κυανού, ιώδους ή υπεριώδους.

Διάγραμμα των μετρήσεων που παίρνουμε για το τμήμα της καμπύλης με ανάστροφη πόλωση (ενδιάμεση ευθεία). Η πάνω και η κάτω ευθεία χρησιμοποιούνται βοηθητικά για την εκτίμηση του σφάλματος στο V_s .



Από το διάγραμμα βρίσκουμε ότι η τάση αποκοπής με το σφάλμα της είναι, για το κίτρινο χρώμα: $V_s = 0,45 \pm 0,02$ Volt.

Παρομοίως, βρίσκουμε το V_s για κάθε μία από τις συχνότητες ν που διαθέτουμε και έτσι καταρτίζουμε τον παρακάτω πίνακα:

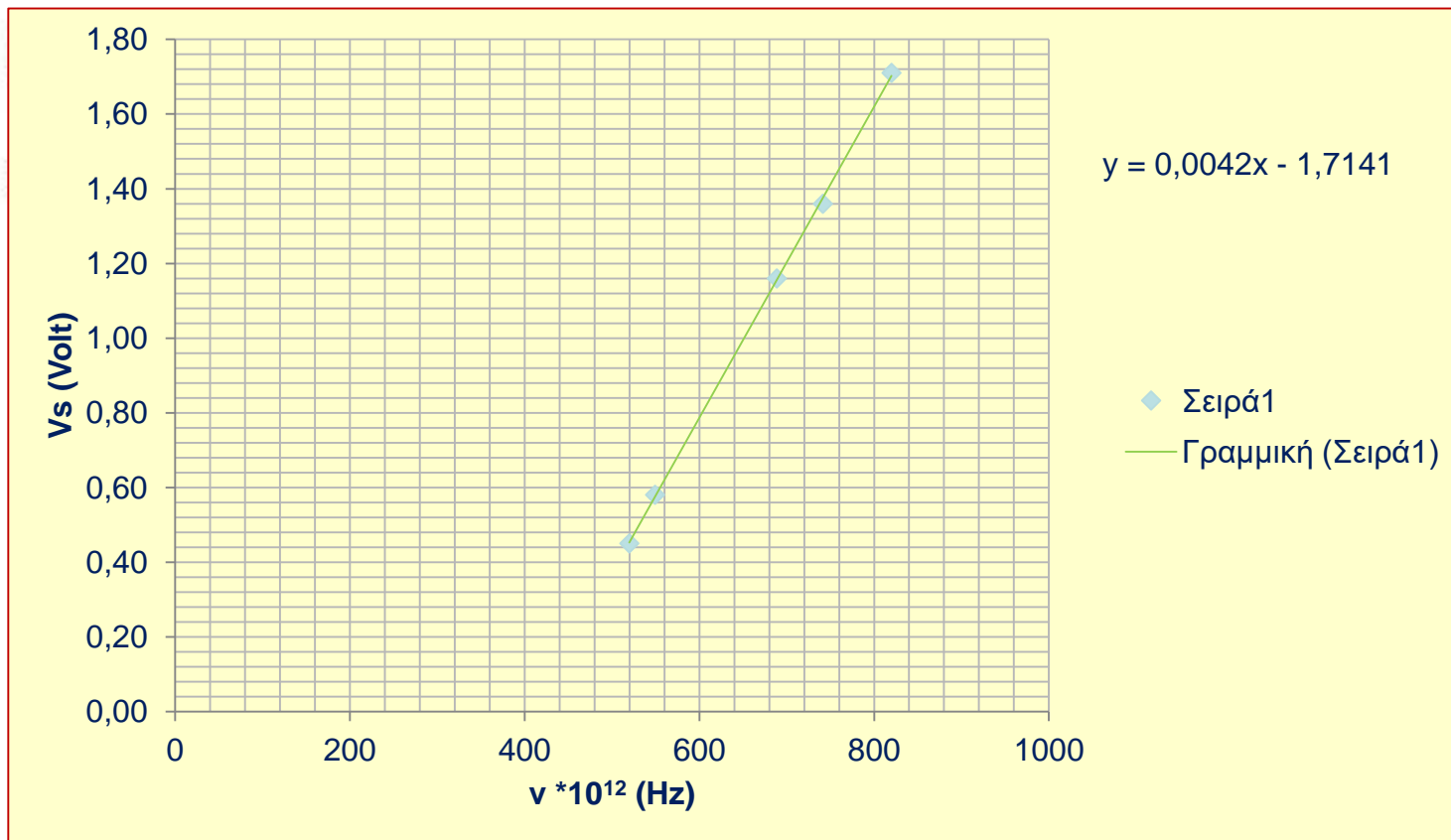
χρώμα	Συχνότητα ν (THz)	Δυναμικό αποκοπής V_s	V_s (Volt) με πειραμ. σφάλμα
κίτρινο	519,9	0,45	$0,45 \pm 0,02$
πράσινο	549,3	0,58	$0,58 \pm 0,03$
κυανό	688,4	1,16	$1,16 \pm 0,03$
ιώδες	741,3	1,36	$1,36 \pm 0,02$
υπεριώδες	819,7	1,71	$1,71 \pm 0,02$

Μέγιστη ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων (eV)

Η τιμή της μέγιστης ενέργειας των φωτοηλεκτρονίων είναι ίση με την τάση αποκοπής της κάθε συχνότητας επί το φορτίο e.

χρώμα	T_{\max} (J)	T_{\max} (eV)
κίτρινο	$0,72 \cdot 10^{-19}$	0,45
πράσινο	$0,93 \cdot 10^{-19}$	0,58
κυανό	$1,86 \cdot 10^{-19}$	1,16
ιώδες	$2,18 \cdot 10^{-19}$	1,36
υπεριώδες	$2,74 \cdot 10^{-19}$	1,71

9. Χαράζετε το διάγραμμα της τάσης αποκοπής σαν συνάρτηση της συχνότητας του προσπίπτοντος φωτός. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων βρείτε την καλύτερη ευθεία που διέρχεται από τα πειραματικά σας σημεία. Από την κλίση και την τετμημένη επί την αρχή της ευθείας βρείτε την σταθερά του Planck και το έργο εξόδου του καλίου, θεωρώντας την τιμή $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} = 4,803 \times 10^{-10} \text{ esu}$ για το φορτίο του ηλεκτρονίου.



Γραμμική εξάρτηση της τάσης V_s από τη συχνότητα ν του φωτός

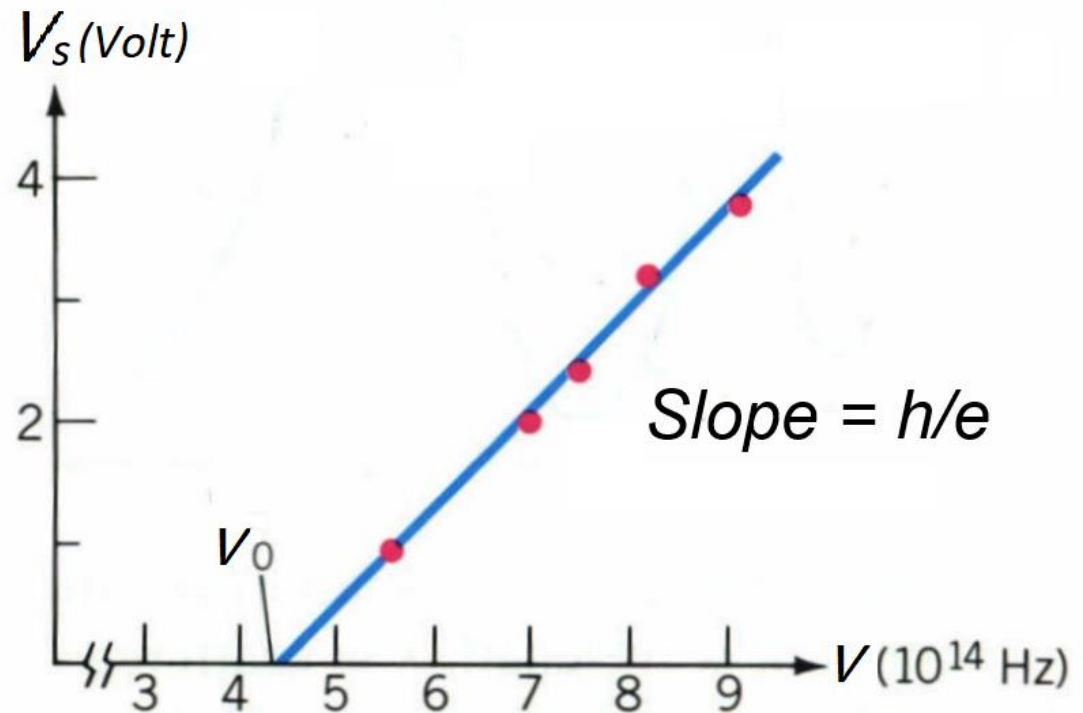
$$T_{\max} = h\nu - \phi$$

$$eV_s = h\nu - \phi$$

$$V_s = (h/e)\nu - \phi/e$$

Δηλαδή, υπάρχει γραμμική εξάρτηση της τάσης V_s από τη συχνότητα ν του φωτός.

Η κλίση της ευθείας ισούται με h/e , οπότε γνωστού όντως του φορτίου e του ηλεκτρονίου, βρίσκουμε πειραματικά την σταθερά h .



Για τον υπολογισμό του σφάλματος στους συντελεστές της ευθείας και από αυτούς στη σταθερά του Planck

Παίρνοντας τις σχέσεις των σφαλμάτων για ευθεία της μορφής $y=\beta x+\alpha$.

$$A = \sum \frac{x_i}{\sigma_i^2}, B = \sum \frac{1}{\sigma_i^2}, C = \sum \frac{y_i}{\sigma_i^2}, D = \sum \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}, E = \sum \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}, F = \sum \frac{y_i}{\sigma_i^2}$$

$$\alpha = \frac{DC-EA}{DB-A^2}, \beta = \frac{EB-CA}{DB-A^2}$$

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{D}{DB-A^2}, \sigma_\beta^2 = \frac{B}{DB-A^2}$$

Και από τη σχέση (6) για $V_s \rightarrow y$ και $v \rightarrow x$ προκύπτει:

A	B	C	D	E	F
6577472	9722,222	10733,33	4591130086	7850789	14309,39

$$\alpha = -1,71922 \text{ και } \beta = 0,004173$$

$$\sigma_\beta = 0,000842 = \sigma_{h/e} \text{ και } \sigma_\alpha = 0,0578 = \sigma_\phi$$

$$\text{άρα } h/e = 0,00417 \pm 0,00084$$

$$\text{οπότε } h = 6,73 \cdot 10^{-34} \pm 0,0042 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$$

**Προσοχή: όχι στα
πολλά δεκαδικά!**

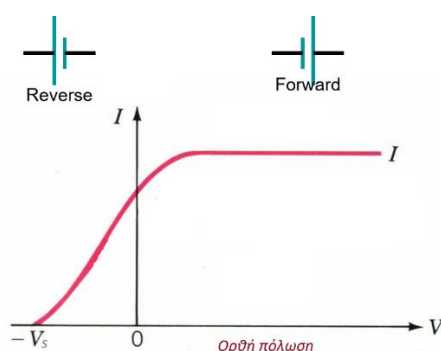
10. Εξηγείστε γιατί δεν χρησιμοποιούμε την κόκκινη γραμμή του Hg.
11. Σχόλια, συμπεράσματα.

Σκοπός της άσκησης είναι:

α) Η μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Κατά τη μελέτη αυτή προσδιορίζεται πειραματικά η μέγιστη **ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων** που εξέρχονται από το μέταλλο της καθόδου, για διάφορες συχνότητες ν του προσπίπτοντος μονοχρωματικού φωτός.

β) Ο προσδιορισμός της σταθεράς h του Planck. Η σταθερά προκύπτει από τη σχέση μεταξύ της ενέργειας των φωτοηλεκτρονίων με τη συχνότητα του φωτός και από την **φωτοηλεκτρική εξίσωση**:

$$T_{\max} = h\nu - \phi$$



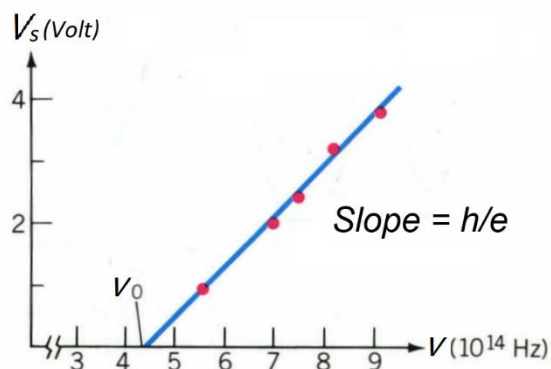
Στο φωτοκύτταρο, αν εφαρμόσουμε **ορθή πόλωση** V (η άνοδος θετική) τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια κερδίζουν ενέργεια eV , υποβοηθούνται να φτάσουν στην άνοδο και το ρεύμα μεγαλώνει. Η χαρακτηριστική καμπύλη φτάνει σχεδόν αμέσως σε κόρο (σταθερή τιμή).

Με **ανάστροφη πόλωση** V (η άνοδος αρνητική) τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια ίση με eV και έτσι δυσκολεύονται να φτάσουν στην άνοδο. Όσο μεγαλύτερη είναι η V τόσο λιγότερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο και το ρεύμα μειώνεται (η καμπύλη τείνει προς το μηδέν). Αν η απώλεια ενέργειας eV γίνει ίση με την T_{\max} τότε δεν φτάνουν ηλεκτρόνια στην άνοδο και το ρεύμα αποκόπτεται εντελώς. Την τιμή της ανάστροφης τάσης που συμβαίνει ο μηδενισμός του ρεύματος, την ονομάζουμε **τάση αποκοπής V_s** . Προφανώς θα ισχύει:

$$T_{\max} = eV_s \quad \text{άρα:} \quad V_s = (h/e)\nu - \phi/e$$

Δηλαδή, **υπάρχει γραμμική εξάρτηση της τάσης V_s από τη συχνότητα ν του φωτός.**

Η κλίση της ευθείας ισούται με h/e ,
οπότε γνωστού όντως του φορτίου e
του ηλεκτρονίου,
βρίσκουμε πειραματικά την σταθερά h .



A. Πηγή φωτός και οπτική διάταξη με φίλτρα για την επιλογή μονοχρωματικού φωτός

Ανάψτε το τροφοδοτικό της λυχνίας Hg. Αν είναι ήδη αναμμένο, μην το σβήσετε και το ξαναανάψετε. Μια βραχυχρόνια διακοπή λειτουργίας του μπορεί να καταστρέψει τη λυχνία. Μην σβήσετε το τροφοδοτικό πριν τελειώσετε την άσκηση.

Ανοίξτε το καπάκι της οπτικής διάταξης και κοιτάξτε μέσα στο ξύλινο κουτί. Το κουτί είναι χωρισμένο στη μέση με ένα ξύλινο διαχωριστικό τοίχωμα που φέρει οπή. Στο αριστερό μέρος του κουτιού θα δείτε έναν όρθιο δίσκο με 5 οπές, οι οποίες έχουν ένα οπτικό φίλτρο η κάθε μια. Ο δίσκος μπορεί να περιστραφεί με τη βοήθεια ενός μεταλλικού άξονα που προβάλλει έξω από την αριστερή πλευρά του ξύλινου κουτιού. Ο δίσκος με τα φίλτρα κρατά τη θέση του με τη βοήθεια ενός φρένου που υπάρχει στην έξω πλευρά του κουτιού. Το φρένο είναι ένα καρφί με ελατήριο και μπορεί να τραβηχτεί προς τα έξω αν θέλουμε να ελευθερωθεί ο δίσκος και να περιστραφεί.

Επιλέξτε κάποιο από τα χρώματα του φωτός της λυχνίας Hg, είτε ζητώντας τη βοήθεια του διδάσκοντα (είναι το πιο εύκολο τουλάχιστον για την πρώτη αλλαγή), είτε προσπαθώντας να κάνετε τα εξής: Ελευθερώστε τον δίσκο, τραβώντας το φρένο προς τα έξω, και γυρίστε τον μεταλλικό άξονα που προβάλλει αριστερά, κοιτώντας ποιο χρώμα περνά από τον δίσκο. Τα χρώματα φαίνονται καλύτερα αν στηρίξετε ένα λευκό χαρτί στο ξύλινο διαχωριστικό τοίχωμα του κουτιού. Η σειρά των φίλτρων και των χρωμάτων είναι κυκλική και φαίνεται στον πίνακα των χρωμάτων που είναι κολλημένος έξω από το κουτί. Όταν μπει το χρώμα που θέλετε, αφήστε το φρένο να γυρίσει στη θέση του. Τώρα, το φως με το χρώμα που επιλέξατε περνά από το ξύλινο διαχωριστικό τοίχωμα στο δεξιό μέρος του κουτιού και πέφτει επάνω στο φωτοκύτταρο που βρίσκεται προστατευμένο μέσα σε μαύρο μεταλλικό περίβλημα που φέρει μία σχισμή για τη διόδο του φωτός. Είστε έτοιμοι για τη μέτρηση του ανοδικού ρεύματος!

Επιλογή του μονοχρωματικού φωτός

(για το οποίο θα μετρήσουμε το φωτορεύμα υπό ανάστροφη πόλωση του φωτοκυττάρου).

Φροντίστε ώστε στην κάθοδο του φωτοκυττάρου να πέφτει μια από τις διαθέσιμες μονοχρωματικές ακτινοβολίες με την επιλογή ενός φίλτρου. Πόση είναι η ενέργεια (σε eV) των φωτονίων της ακτινοβολίας;



B. Ηλεκτρόμετρο για τη μέτρηση του ανοδικού ρεύματος στο φωτοκύτταρο

Οι μετρήσεις του ανοδικού ρεύματος του φωτοκυττάρου γίνονται με το ευαίσθητο ηλεκτρόμετρο Keithley 610C. Στο εργαστήριο χρησιμοποιούμε το ηλεκτρόμετρο ως Αμπερόμετρο. ΤΟΠΟΘΕΤΟΥΜΕ ΤΟΝ ΕΠΙΛΟΓΕΑ Α ΣΤΑΘΕΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΔΕΙΞΗ 10^{-11} Ampere.

Πριν ανοίξουμε την τροφοδοσία του οργάνου, βάζουμε τον διακόπτη ελέγχου μετρήσεων στη **θέση LOCK** (με πίεση προς τα μέσα του διακόπτη και στροφή του κατά 90°). Κατόπιν, βάζουμε τον διακόπτη έναρξης του οργάνου από την θέση POWER OFF, στη θέση +.

Όσο κάνουμε ρυθμίσεις του φωτός και της κλίμακας, ο διακόπτης ελέγχου πρέπει να είναι στη **θέση LOCK** (με πίεση προς τα μέσα του διακόπτη και στροφή του κατά 90°). Μόνο όταν τελειώσουμε με τις ρυθμίσεις και θέλουμε να πάρουμε μετρήσεις ρεύματος, μόνο τότε βγάζουμε τον διακόπτη ελέγχου από τη **θέση LOCK** (με πίεση προς τα μέσα του διακόπτη και στροφή του κατά 90°).

Για τις μετρήσεις ρεύματος, συμβουλευτείτε την εικόνα που ακολουθεί.

Για την λειτουργία του ηλεκτρομέτρου

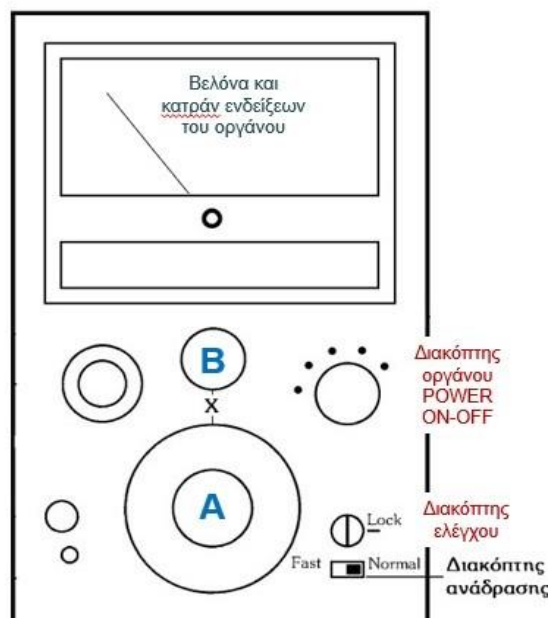
Οι **μετρήσεις του ανοδικού ρεύματος** του φωτοκυττάρου γίνονται με ευαίσθητο ηλεκτρόμετρο (Keithley 610C). Στο εργαστήριο χρησιμοποιούμε το ηλεκτρόμετρο ως **Αμπερόμετρο**.

Επιλογή κλίμακας μετρήσεων:

Ο **επιλογέας A** τοποθετείται **σταθερά** στην ένδειξη 10^{-11} Ampere.

Ο **επιλογέας B** τοποθετείται σε κάποια ένδειξη π.χ. 0.1 ή 0.3, βολική ώστε να επαρκεί για όλες τις τιμές ρεύματος που θα μετρηθούν για το κάθε χρώμα φωτός που προσπίπτει στο φωτοκύτταρο.

Η πλήρης κλίμακα μετρήσεων (full scale) προκύπτει ως το γινόμενο των ενδείξεων των δύο **επιλογέων A και B**, π.χ. 0.1×10^{-11} Ampere, ή 0.3×10^{-11} Ampere.



Σχηματική παράσταση της εμπρόσθιας όψης του ηλεκτρομέτρου 610 C της Keithley.

Γ. Τροφοδοτικό τάσης, ρύθμιση και μέτρηση της τάσης στο φωτοκύτταρο



ΠΩΣ ΠΑΙΡΝΟΥΜΕ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Βάζουμε στη θέση ON τον διακόπτη τροφοδοτικού και δεξιά τον διακόπτη ενδείξεων τάσης.

Περιστρέφοντας το ποντεσιόμετρο για τη ρύθμιση της τάσης, βάζουμε ως πρώτη τιμή τάσης την τιμή μηδέν. Στο ηλεκτρόμετρο, βγάζουμε από τη θέση LOCK τον διακόπτη ελέγχου και τότε βλέπουμε την βελόνα να κινείται και να δείχνει το ρεύμα. Αν σε αυτή την πρώτη μέτρηση το ρεύμα είναι πολύ μεγάλο, οπότε η βελόνα πάει τέρμα δεξιά, ή αν το ρεύμα είναι πολύ μικρό, οπότε η βελόνα πάει σε ένδειξη κάτω από το 1/3 της κλίμακας, τότε αλλάζουμε την κλίμακα ευαισθησίας του ηλεκτρομέτρου ώστε η βελόνα να έχει κάποια θέση πριν από το τέρμα δεξιά και πάνω από το 1/3 της κλίμακας.

Αν ο επιλογέας B είναι σε τιμή 1 – 0.1 – 0.01 κλπ, τότε διαβάζουμε στην επάνω κλίμακα που έχει τέρμα δεξιά τον αριθμό 10. Αν ο επιλογέας B είναι σε τιμή 3 – 0.3 – 0.03 κλπ, τότε διαβάζουμε στην επάνω κλίμακα που έχει τέρμα δεξιά τον αριθμό 3. Το γινόμενο του επιλογέα B επί τον επιλογέα A, π.χ. 0.1×10^{-11} Ampere, είναι η πλήρης κλίμακα (full scale), δηλαδή αυτό που είναι η ένδειξη στο τέρμα δεξιά.

Αλλάζουμε την τιμή της ανάστροφης τάσης, οπότε βλέπουμε το ρεύμα να μειώνεται. Σημειώνουμε το ζεύγος τιμών **V – I**. Επαναλαμβάνουμε και παίρνουμε **4-10 ζεύγη τιμών** μέχρις ότου έχουμε περίπου μηδενισμό του ρεύματος. Με αυτά τα ζεύγη τιμών μπορούμε να βρούμε την τάση αποκοπής V_s για τη συγκεκριμένη συχνότητα ν του φωτός που επιλέξαμε. **ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Για τη μεταβολή της ανάστροφης τάσης V, μπορούμε αν θέλουμε να πάμε με **βήματα 0.1 Volt** όταν το φωτοκύτταρο φωτίζεται με φως κίτρινου ή πράσινου χρώματος και με **βήματα 0.2 Volt** όταν το φωτοκύτταρο φωτίζεται με φως χρώματος κυανού, ιώδους ή υπεριώδους

Όταν πάρουμε αυτές τις μετρήσεις, βάζουμε στη θέση LOCK τον διακόπτη ελέγχου του ηλεκτρομέτρου και επιλέγουμε ένα άλλο χρώμα για το φωτοκύτταρο. Αυτό το κάνουμε συνολικά για τις **5 συχνότητες** μονοχρωματικού φωτός που διαθέτουμε.

Δείχνουμε τις μετρήσεις μας στον διδάσκοντα για σύντομο έλεγχο.