

Επώνυμο	Όνομα
Ζαχαρίας	Χριστόφορος

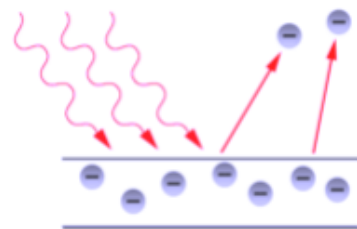
Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Σκοπός

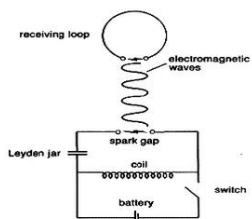
Ο σκοπός της σημερινής άσκησης έγκειται στην μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Θα ασχοληθούμε με την περιγραφή του φαινομένου, την εξήγησή του, την πειραματική του εφαρμογή και τελικά την εύρεση βασικών φυσικών μεγεθών από τα πειραματικά δεδομένα.

Στοιχεία θεωρίας

Εισαγωγή: Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια μεταλλική επιφάνεια απελευθερώνει ηλεκτρόνια στο περιβάλλον όταν πάνω της προσπίπτει φως. Τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν στο εσωτερικό ενός αγωγού περιορίζονται στο χώρο που καταλαμβάνει ο αγωγός, από δυνάμεις που εμποδίζουν τη διάχυσή τους στο περιβάλλον. Όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του αγωγού κάποια ηλεκτρόνια απορροφούν ενέργεια αρκετή για να υπερνικήσουν αυτές τις δυνάμεις και βγαίνουν από το μέταλλο. Η ταχύτητα με την οποία βγαίνουν, εξαρτάται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων που προκαλούν την εξαγωγή τους.



Ιστορική αναδρομή: Θεωρίες για το φως και την αλληλεπίδρασή του με την ύλη, εντοπίζονται ήδη από την αρχαιότητα. Αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι θεωρούσαν ότι το φως αποτελείται από σωματίδια τα οποία ανακλώνται στα διάφορα αντικείμενα και εν συνεχεία προσπίπτουν στο μάτι μας διεγείροντάς το. Τον 17^ο αιώνα, ο Newton υποστήριξε την σωματιδιακή φύση του φωτός προκειμένου να αποδείξει του νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης. Στην συνέχεια οι Huygens και Young αποδεικνύουν με τα φαινόμενα της συμβολής και της περίθλασης πως το φως είναι κύμα. Την θεωρία αυτή υποστηρίζει και ο Maxwell, ο οποίος μάλιστα αποδεικνύει πως το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Μέχρι περί τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, άλλοι υποστηρίζουν την σωματιδιακή φύση του φωτός και άλλοι την κυματική.

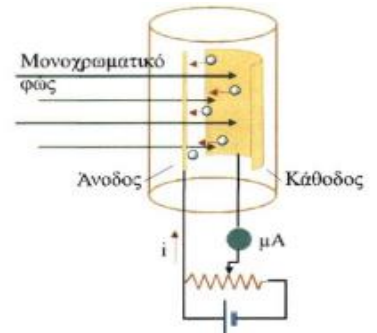


Η ιστορία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου ξεκινά το 1887. Την εποχή αυτή, ο Heinrich Hertz μελετούσε την παραγωγή και την υποδοχή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποίησε έναν δέκτη που αποτελείτο από ένα πηνίο με διάκενο σπινθηρισμού, όπου κατά την ανίχνευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων φαίνεται μια σπίθα. Τοποθέτησε τον δέκτη αυτό σε ένα σκοτεινό κουτί ώστε να βλέπει την σπίθα καλύτερα. Ωστόσο, παρατήρησε πως το μέγιστο μήκος της σπίθας μειώθηκε όταν ο δέκτης βρισκόταν στο κουτί. Στην συνέχεια, τοποθέτησε ένα πάνελ από γυαλί μεταξύ της πηγής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και του δέκτη το οποίο απορροφούσε την υπεριώδη ακτινοβολία που βοηθούσε τα ηλεκτρόνια στο άλμα τους. Παρατήρησε τότε ότι το μήκος της σπίθας μειώθηκε. Η ίδια μείωση δεν παρατηρήθηκε, όταν αντί για γυαλί τοποθέτησε χαλαζία, ο οποίος δεν απορροφά υπεριώδη ακτινοβολία. Ο Hertz δημοσίευσε τα αποτελέσματα, χωρίς όμως να ασχοληθεί ξανά με το φαινόμενο αυτό.

Το πείραμα αυτό του Hertz έδωσε το έναυσμα σε μια σειρά από φυσικούς της εποχής ώστε να μελετήσουν σε βάθος την επίδραση του φωτός και ιδιαίτερα της υπεριώδους ακτινοβολίας σε φορτισμένα σώματα. Ο Thomson το 1899 μελέτησε το υπεριώδες φως σε σωλήνες Crookes. Συμπέρανε ότι τα σωματίδια που είδε ήταν τα ίδια με εκείνα των καθοδικών ακτίνων (ηλεκτρόνια). Το ρεύμα λόγω της διέγερσης των σωματιδίων αυτών από το υπεριώδες φως μεταβάλλονταν ανάλογα με την ένταση και το χρώμα, δηλαδή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Μεγαλύτερη ένταση, σήμαινε μεγαλύτερο ρεύμα.

Το 1900 ανακαλύφθηκε ο ιονισμός των αερίων από υπεριώδες φως από τον Philipp Lenard. Καθώς από την επίδραση αυτή παρατηρήθηκε δημιουργία μεγάλων θετικών ιόντων και μικρών αρνητικών ιόντων, οι φυσικοί υπέθεσαν πως το φαινόμενο αυτό αποτελεί στην ουσία αποτέλεσμα του φαινομένου του Hertz επί των στερεών σωματιδίων που υπάρχουν στο αέριο. Την ίδια εποχή ο Max Planck, προτείνει την κβαντική θεωρία προκειμένου να εξηγήσει την ακτινοβολία μέλανος σώματος. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, τα σωματίδια εκπέμπουν και απορροφούν ενέργεια με διακριτό και όχι συνεχή τρόπο. Στηριζόμενος στην θεωρία αυτή, ο Albert Einstein υποστήριξε πως το φως αποτελείται από σωματίδια, τα φωτόνια τα οποία έχουν κβαντισμένη ενέργεια. Μέσω της θεώρησης αυτής, ότι δηλαδή το φως έχει σωματιδιακή φύση, ο Einstein κατάφερε να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κερδίζοντας το βραβείο Νόμπελ.

Μελέτη φωτοηλεκτρικού φαινομένου: Για την βαθιά, ενδελεχή μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου θα χρησιμοποιήσουμε τη διάταξη του διπλανού σχήματος (φωτοκύτταρο). Μέσα σε ένα γυάλινο σωλήνα υψηλού κενού τοποθετούμε δύο ηλεκτρόδια. Το πρώτο που χρησιμεύει ως κάθοδος, έχει μεγάλη επιφάνεια φέρει επίστρωση από ένα αλκαλιμέταλλο και όταν φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται από το δεύτερο ηλεκτρόδιο την άνοδο. Με τη βοήθεια μιας ποτενσιομετρικής διάταξης μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια. Τέλος, με ένα μικροαμπερόμετρο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα μπορούμε να μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος που οφείλεται στα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η φωτιζόμενη κάθοδος. Όταν η κάθοδος φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) τα οποία επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων και καταλήγουν στην άνοδο.



Πειραματικά διαπιστώνεται ότι:

1. Εκπομπή φωτοηλεκτρονίων έχουμε μόνο όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη ή ίση μιας ορισμένης συχνότητας, η οποία είναι χαρακτηριστική για το μέταλλο. Αυτή η οριακή συχνότητα ονομάζεται συχνότητα κατωφλίου (f_0).
2. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αποσπώνται από το μέταλλο ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογος της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο μέταλλο.
3. Η ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια δεν εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας αλλά μόνο από τη συχνότητά της και αυξάνεται όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας μεγαλώνει.

Η εξήγηση των παραπάνω παρατηρήσεων δεν μπορεί να γίνει μέσω της κλασσικής θεωρίας. Έστω λοιπόν ένας ατομικός πυρήνας, γύρω από τον οποίο περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια. Για να αποκολληθεί το οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο από την έλξη του πυρήνα, πρέπει να προσλάβει ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται έργο εξαγωγής και συμβολίζεται με ϕ . Αυτή η ενέργεια, μπορεί να δοθεί στα ηλεκτρόνια με διάφορους τρόπους. Ένας απλός τρόπος είναι η θέρμανση του υλικού. Ωστόσο, ένας άλλος τρόπος που μπορεί να γίνει αυτό είναι ο βομβαρδισμός των ατόμων με φωτεινή ακτινοβολία. Το φως, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μεταφέρει ενέργεια, επομένως, είναι αναμενόμενο ότι τα ηλεκτρόνια κάποιου μετάλλου μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από το φως και να εξέλθουν από το μέταλλο. Η κλασική θεωρία όμως δε μπόρεσε να ερμηνεύσει το γεγονός, ότι η εξαγωγή ηλεκτρονίων από το μέταλλο και η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται εξαρτάται από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι από την ένταση της ακτινοβολίας.

Η χρήση της κβαντικής θεωρίας αίρει το αδιέξοδο. Ας υποθέσουμε πως το φως αποτελείται από φωτόνια (σωματιδιακή φύση). Το κάθε φωτόνιο, σύμφωνα με την θεωρία του Einstein, έχει ενέργεια που εξαρτάται από την συχνότητά του και είναι κβαντισμένη ως ακέραιο πολλαπλάσιο μιας σταθεράς η οποία αργότερα ονομάστηκε σταθερά του Planck:

$$E = hf \quad (1)$$

Τα ηλεκτρόνια θα απελευθερωθούν από την έλξη του πυρήνα μόνο αν απορροφήσουν ένα φωτόνιο με αρκετή ενέργεια για να συμβεί κάτι τέτοιο. Επίσης, το κάθε φωτόνιο, μπορεί να απορροφήθει από ένα και μόνον ηλεκτρόνιο. Κατά την απορρόφηση αυτή, η ενέργεια του φωτονίου μεταβιβάζεται εξ' ολοκλήρου στο ηλεκτρόνιο. Έτσι λοιπόν, για να εξέλθει ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο θα πρέπει να απορροφήσει ένα τέτοιο φωτόνιο ώστε:

$$hf - \varphi \geq 0 \quad \Rightarrow \quad f \geq \frac{\varphi}{h}$$

Επομένως, η συχνότητα κατωφλίου που αναφέραμε παραπάνω είναι ίση με:

$$f_0 = \frac{\varphi}{h} \quad (2)$$

Αν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα κατωφλίου η αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των φωτονίων που πέφτουν στην κάθοδο ανά μονάδα χρόνου και επομένως αύξηση του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που εξέρχονται από το μέταλλο στον ίδιο χρόνο.

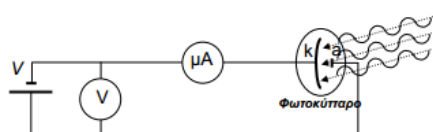
Έστω τώρα ότι ένα ηλεκτρόνιο καταφέρνει να ξεφύγει από το άτομο. Η ενέργεια με την οποία θα κινηθεί θα ισούται με ότι έχει απομείνει από την διαφυγή του, δηλαδή:

$$K = hf - \varphi$$

Η τελευταία εξίσωση είναι γνωστή ως φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein. Προφανώς και η ενέργεια αυτή θα είναι κινητική. Όπως βλέπουμε από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση, η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από κάποιο μέταλλο εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η ταχύτητα λοιπόν, με την οποία κινείται το ηλεκτρόνιο μετά την διαφυγή του είναι ίση με:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = hf - \varphi \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2 \frac{(hf - \varphi)}{m_e}}$$

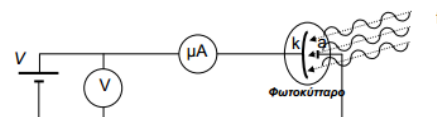
Ας επιστρέψουμε τώρα στο φωτοκύτταρο, στην διάταξη δηλαδή που περιγράψαμε στην αρχή. Με βάση τα παραπάνω, όταν ρίξουμε φως κατάλληλης συχνότητας στην κάθοδο πολλά από τα ηλεκτρόνια που αποτελούν το μέταλλο της καθόδου, θα ξεφύγουν και θα αρχίσουν να κινούνται προς τυχαίες διευθύνσεις. Προφανώς κάποια από αυτά προσπέφτουν τελικά στην άνοδο. Μπορούμε να συγκεντρώσουμε όλα τα



ηλεκτρόνια στην άνοδο, εφαρμόζοντας κατάλληλη τάση μέσω της ποτενσιομετρικής διάταξης. Η τάση αυτή θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η κάθοδος να είναι αρνητικότερη της ανόδου. Ονομάζουμε την κατάσταση αυτή **ορθή πόλωση** (βλ. σχήμα). Στην περίπτωση αυτή, η

άνοδος θα έλξει όλα τα διαφεύγοντα ηλεκτρόνια. Στην άνοδο θα παρατηρηθεί πλεόνασμα ηλεκτρονίων, δηλαδή αρνητικού φορτίου. Αντίθετα στη κάθοδο, λόγω της διαφυγής πολλών ηλεκτρονίων, θα παρατηρηθεί συγκέντρωση θετικού φορτίου. Όταν κλείσουμε το κύκλωμα, τα ηλεκτρόδια θα δρουν πλέον ως πηγή με αποτέλεσμα το μικροαμπερόμετρο να δείχνει ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι πολύ ισχνό και εξαρτάται από το πόσα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, την ένταση της ακτινοβολίας δηλαδή που προσπίπτει στην κάθοδο, από το μέταλλο της καθόδου και από άλλους παράγοντες.

Έστω τώρα πως εφαρμόζουμε στο φωτοκύτταρο αντίθετη τάση, δηλαδή τάση τέτοια ώστε η κάθοδος να είναι θετικότερη της ανόδου (**αντίστροφη πόλωση**). Στην κατάσταση αυτή, μόνο ένα μέρος των ηλεκτρονίων είναι ικανό να φτάσει έως την άνοδο και να δημιουργήσει τελικά ένα πολύ μικρό ρεύμα. Όσο αυξάνεται η αντίθετη τάση, όλο και λιγότερα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην άνοδο και όλο και περισσότερο το ρεύμα αυτό μικραίνει, έως ότου εφαρμόσουμε μια συγκεκριμένη οριακή τιμή διαφοράς δυναμικού, οπότε και θα έχουμε μηδενισμό του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα.

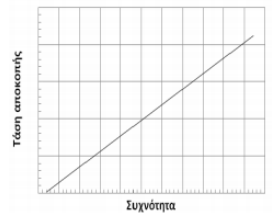


Στην περίπτωση λοιπόν που φωτίζουμε την κάθοδο με φωτόνια ενέργειας $E > \phi$, ώστε τα ηλεκτρόνια να μπορούν να ξεφύγουν από τα άτομα, με ταυτόχρονη εφαρμογή αντίστροφης πόλωσης θα παρατηρήσουμε ότι για κάποια τιμή της τάσης V_{SV} δεν υπάρχει ρεύμα στο κύκλωμα. Η φυσική ερμηνεία του φαινομένου έγκειται στο γεγονός πως με βάση την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται ώστε ένα ηλεκτρόνιο να πραγματοποιήσει το άλμα από την κάθοδο στην άνοδο για τάση V είναι ίση με eV , όπου e το φορτίο του ηλεκτρονίου. Όσο αυξάνουμε την αντίστροφη τάση, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια πρέπει να έχουν τα ηλεκτρόνια καθώς ξεφεύγουν από την έλξη των ατόμων, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη ενέργεια και άρα συχνότητα (από τον τύπο του Einstein) πρέπει να έχουν τα αρχικώς προσπίπτοντα στη κάθοδο φωτόνια, ώστε τελικά να πραγματοποιηθεί το άλμα. Επομένως, για συγκεκριμένη συχνότητα φωτονίων υπάρχει μια οριακή τάση V_{sv} , για την οποία κανένα από τα ηλεκτρόνια δεν έχει την απαιτούμενη ενέργεια να φτάσει στην άνοδο και άρα δεν υπάρχει κανένα ρεύμα στο κύκλωμα. Η οριακή αυτή τάση V_{sv} ονομάζεται **δυναμικό αποκοπής**. Προφανώς, για κάθε τιμή διαφοράς δυναμικού μεγαλύτερης της οριακής τάσης, θα συνεχίσει να μην υπάρχει ρεύμα στο κύκλωμα. Πειραματικά προκύπτει ότι το δυναμικό αποκοπής εξαρτάται και από το υλικό της καθόδου.

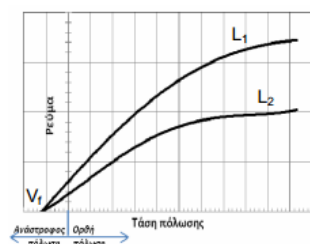
Η μαθηματική πλευρά του ζητήματος είναι αρκετά απλή. Έχοντας ως στόχο τον υπολογισμό του δυναμικού αποκοπής, θεωρούμε πως ένα ηλεκτρόνιο, απορροφά φωτόνιο ενέργειας hf μεγαλύτερης από την ϕ , τέτοια ώστε μόλις που να φτάνει στην άνοδο. Αυτό σημαίνει πως έχουμε εφαρμόσει στο κύκλωμα, αντίστροφη πόλωση με τάση V_{sv} . Τότε:

$$hf = eV_{sv} + \phi \quad \Rightarrow \quad V_{sv} = \frac{h}{e} f - \frac{\phi}{e} \quad (3)$$

Τα μεγέθη h (σταθερά του Planck), ϕ (έργο εξαγωγής) και e (φορτίο ηλεκτρονίου) είναι ως γνωστόν σταθερά και αμετάβλητα. Επομένως, η σχέση στο πλαίσιο αποτελεί στην ουσία μια γραμμική εξίσωση του δυναμικού αποκοπής με την συχνότητα των φωτονίων που προσπίπτουν στην κάθοδο. Έτσι, η σχέση μεταξύ των δυο μεγεθών που υπονοήθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο μέσω της φυσικής ερμηνείας, είναι γραμμική. Η γραφική παράσταση μιας τέτοιας γραμμικής σχέσης $y = ax + \beta$ είναι προφανώς ευθεία όπως στο διπλανό σχήμα. Η ευθεία τέμνει τους άξονες στην συχνότητα κατωφλίου f_0 .

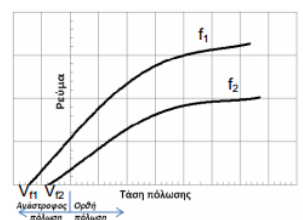


Μπορούμε επίσης, χωρίς την χρήση μαθηματικών σχέσεων, να δούμε την συμπεριφορά των υπολοίπων από τις παραμέτρους που έχουμε θέσει στην μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Ας πάρουμε για παράδειγμα της ένταση L της προσπίπτουσας στην κάθοδο ακτινοβολίας (φωτόνια ανά μονάδα χρόνου). Με την κβαντική θεώρηση των πραγμάτων, η ένταση L δεν έχει καμία επίδραση στην τάση αποκοπής. Η τελευταία εξαρτάται, όπως φαίνεται ξεκάθαρα από την σχέση που βρήκαμε και από την θεωρία που αναπτύξαμε, μόνο από την συχνότητα των φωτονίων. Από εκεί και πέρα όμως, όταν τα φωτόνια έχουν την απαιτούμενη ενέργεια για να αποσπασουν τα ηλεκτρόνια από τα άτομα, η ένταση τους επηρεάζει φυσικά τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται ανά μονάδα χρόνου. Περισσότερα ηλεκτρόνια συνεπάγονται μεγαλύτερη



ένταση ρεύματος στο κύκλωμα. Για συγκεκριμένη ένταση τώρα, το ρεύμα εξαρτάται από το πόσα από τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν τελικά στην άνοδο, που με την σειρά του εξαρτάται από την τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου. Όταν για μια συγκεκριμένη τάση σε ορθή πόλωση συγκεντρώνονται πλέον όλα τα ηλεκτρόνια στην άνοδο, τότε το ρεύμα σταθεροποιείται. Λέμε τότε ότι έχουμε φτάσει στον κόρο. Η ποιοτική εικόνα των παραπάνω περιγράφεται με την διπλανή γραφική παράσταση.

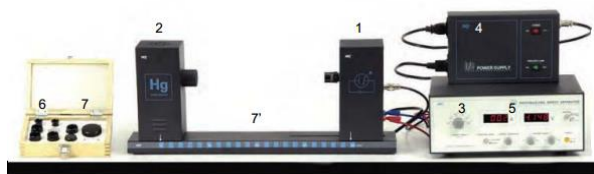
Λίγο-πολύ τα ίδια πράγματα ισχύουν και στην περίπτωση που σχεδιάσουμε την ίδια γραφική παράσταση για σταθερή ένταση αλλά για διαφορετικές συχνότητες προσπιπτόντων φωτονίων. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός πως για διαφορετικές συχνότητες παρατηρούνται διαφορετικές τάσεις αποκοπής. Συνεπώς η γραφική παράσταση έχει τώρα την διπλανή μορφή.



Εφαρμογές: Οι εφαρμογές του φωτοηλεκτρικού φαινομένου ακόμη και στην καθημερινή εμπειρία μας δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν πλήρως σε μια τέτοια εργασία. Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε μόνο κάποιες από τις εφαρμογές του. Αυτές σχετίζονται με την λειτουργία των φωτοκύτταρων, των ηλιακών στοιχείων, των φωτογραφικών μηχανών, πολλών ιατρικών συσκευών ακόμη και σε κιάλα νυκτός.

Πειραματικό μέρος

Πειραματική διάταξη: Στο θεωρητικό μέρος, είδαμε αναλυτικά την διάταξη του φωτοκύτταρου, της πλέον βασικής διάταξης για την μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Έτσι και εμείς, θα χρησιμοποιήσουμε κάτι παρόμοιο. Η ακριβής ονομασία της πειραματικής μας διάταξης είναι συσκευή **PASCO**. Η όλη διάταξη



φαίνεται στην διπλανή εικόνα. Αποτελείται από διάφορα μέρη τα οποία είναι κατάλληλα συνδεδεμένα προκειμένου να μπορεί να πραγματοποιηθεί μια εύκολη και απλή μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Αναλυτικά με βάση τα νούμερα που φαίνονται στην εικόνα έχουμε:

1. Το κυβικό αυτό κουτί περιέχει το **φωτοκύτταρο**, την βασική διάταξη που θα χρησιμοποιήσουμε στο πείραμά μας. Αναλυτική περιγραφή της διάταξη και της λειτουργίας του φωτοκύτταρου έχει δοθεί στην θεωρία. Η κυκλική θύρα του κουτιού χρησιμεύει στο έλεγχο της έντασης του φωτός που θα προσπίπτει στην κάθοδο, μέσω της τοποθέτησης σε αυτήν κατάλληλων διαφραγμάτων.
2. Στο δεύτερο κυβικό κουτί εμπεριέχεται **πηγή φωτεινής ακτινοβολίας**. Το φως της πηγής προέρχεται από την διέγερση αερίου υδραργύρου Hg. Για τον λόγο αυτό και η πηγή πρέπει να θερμανθεί πριν την χρήση.
3. Όπως αναφέρθηκε στην θεωρία, το ρεύμα που δημιουργείται λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στο κύκλωμα είναι ελάχιστο. Για τον λόγο αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε έναν **ενισχυτή ρεύματος**.
4. Στην θέση 4 υπάρχει κατάλληλο **τροφοδοτικό**.
5. Στην ίδια συσκευή με τον ενισχυτή ρεύματος, υπάρχουν και **αμπερόμετρο** και **βολτόμετρο**. Με την βοήθεια του ενισχυτή ρεύματος, το αμπερόμετρο είναι σε θέση να μετρήσει ρεύματα με ακρίβεια της τάξης των 10^{-13}A . Το βολτόμετρο δεν χρειάζεται ιδιαίτερη βοήθεια καθώς οι διάφορες τάσεις που θα εφαρμόσουμε είναι της τάξης των V.
6. Το κουτί αυτό περιέχει μια σειρά οπτικών φίλτρων, καθένα από τα οποία επιτρέπει την διέλευση ενός και μόνο μήκους κύματος φωτεινής ακτινοβολίας να διέλθει, ενώ μπλοκάρει όλα τα υπόλοιπα. Τα φίλτρα αυτά προσαρμόζονται στην θύρα της θήκης του φωτοκύτταρου. Κατά αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα της προσπίπτουσας στην κάθοδο ακτινοβολίας. Διαθέτουμε φίλτρα των 365nm, των 405nm, των 436nm, των 546nm και των 577nm.
7. Στο κουτί αυτό περιέχονται επίσης διαφράγματα. Τα διαφράγματα τοποθετούνται και αυτά στην θύρα του φωτοκύτταρου και ο ρόλος τους έγκειται στον έλεγχο της έντασης του φωτός. Ανάλογα με την διάμετρο του κάθε διαφράγματος, διέρχεται διαφορετική ένταση από το εσωτερικό τους. Διαθέτουμε διαφράγματα διαμέτρου 2mm, 4mm και 8mm.

Πείραμα 1: Μέτρηση σταθερά Planck και προσδιορισμός συχνότητας κατωφλίου

Σε αυτό το πρώτο πείραμα, θα επιδιώξουμε τον προσδιορισμό της σταθεράς του Planck και κατ' επέκταση την εύρεση της συχνότητας κατωφλίου για συγκεκριμένα μήκη κύματος και διαφράγματα. Το σκεπτικό για έναν τέτοιο υπολογισμό, προέρχεται από την σχέση (3), η οποία συνδέει γραμμικά τάση αποκοπής και συχνότητα προσπίπτουσας στην κάθοδο ακτινοβολίας μέσω κάποιων σταθερών. Μια από αυτές τις σταθερές είναι φυσικά και η σταθερά του Planck. Όπως δείξαμε και είναι προφανές, η γραφική παράσταση της σχέσης αυτής είναι ευθεία με (θεωρητική) κλίση ίση με h/e . Στην κλίση αυτή εμπεριέχεται και η ζητούμενη ποσότητα. Έτσι, ο υπολογισμός της σταθεράς του Planck ανάγεται στην εύρεση της κλίσης.

Η εύρεση της παραπάνω κλίσης πειραματικά είναι απλή υπόθεση. Το μόνο που χρειάζεται να κάνουμε είναι για διάφορες συχνότητες φωτεινής ακτινοβολίας, να βρίσκουμε το δυναμικό αποκοπής. Στην συνέχεια

ειδικό λογισμικό μπορεί εύκολα να σχεδιάσει την πειραματική ευθεία, την οποία και θα συγκρίνουμε με τη θεωρητική. Ας δούμε την διαδικασία αυτή πιο αναλυτικά.

Έχουμε στην διάθεσή μας την συσκευή PASCO. Τα διάφορα εξαρτήματα που διαθέτει έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο αντίστοιχο εδάφιο. Αρχικά, καλύπτουμε την πηγή της φωτεινής ακτινοβολίας με κατάλληλο κάλυμμα, έτσι ώστε να μην επηρεάζει το φωτοκύτταρο αλλά και την όρασή μας. Επειδή χρειάζεται κάποιος χρόνος για να θερμανθεί το αέριο υδραργύρου που περιέχει η πηγή και να αρχίσει έτσι να ακτινοβολεί, την ενεργοποιούμε αμέσως. Περιμένουμε γύρω στα 20 λεπτά. Αξιοποιούμε τον χρόνο αυτό για να ρυθμίσουμε τον ενισχυτή ρεύματος που περιέχει το αμπερόμετρο και το βολτόμετρο, ώστε να δείχνουν τιμή μηδέν όταν δεν μετρούν ρεύμα. Επίσης θέτουμε τον ενισχυτή ρεύματος στα 10^{-13}A και το βολτόμετρο σε εύρος -2 έως 0 V.

Όταν πια η πηγή θερμανθεί αρκετά επιλέγουμε ένα από τα διαφράγματα που διαθέτουμε και καλύπτουμε την θύρα του φωτοκύτταρου. Πάνω από το διάφραγμα τοποθετούμε επιπλέον φίλτρο μήκους κύματος. Αφαιρούμε το κάλυμμά της πηγής. Τώρα στο φωτοκύτταρο παρατηρείται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στο αμπερόμετρο εμφανίζονται ενδείξεις διάφορες του μηδενός. Ψάχνουμε την τιμή εκείνη της αντίθετης τάσης (εξ' ου και η αρνητικές τιμές) για την οποία μηδενίζεται η ένδειξη του αμπερομέτρου. Τότε θα έχουμε εντοπίσει σύμφωνα με την θεωρία και το δυναμικό αποκοπής. Είμαστε έτοιμοι πλέον να αρχίσουμε τις μετρήσεις μας.

Θα εκτελέσουμε το πείραμα για όλους τους συνδυασμούς φραγμάτων και φίλτρων μηκών κύματος έτσι ώστε να εξάγουμε περισσότερα αποτελέσματα για μεγαλύτερη ακρίβεια. Ξεκινάμε με το διάφραγμα των 2mm και τοποθετούμε διαδοχικά όλα τα φίλτρα που διαθέτουμε στο φωτοκύτταρο βρίσκοντας κάθε φορά το δυναμικό αποκοπής παίζοντας με το βολτόμετρο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Διάφραγμα διαμέτρου 4mm		
α/α	Φίλτρο (nm)	V_{sv} (V)
1	365 ± 5	$-1,890 \pm 0,002$
2	405 ± 5	$-1,520 \pm 0,002$
3	436 ± 5	$-1,326 \pm 0,002$
4	546 ± 5	$-0,776 \pm 0,002$
5	577 ± 5	$-0,571 \pm 0,002$

Τα σφάλματα που συνοδεύουν τις πειραματικές τιμές οφείλονται στην ακρίβεια των οργάνων. Δόθηκαν από τον κατασκευαστή αυτών. Επίσης, κάποιος θα μπορούσε να πει πως δεν μας ενδιαφέρει το μήκος κύματος αλλά η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Υπάρχει όμως μια σχέση, η **θεμελιώδης κυματική εξίσωση**, που συνδέει τα δυο μεγέθη και είναι η:

$$c = \lambda f \quad (4)$$

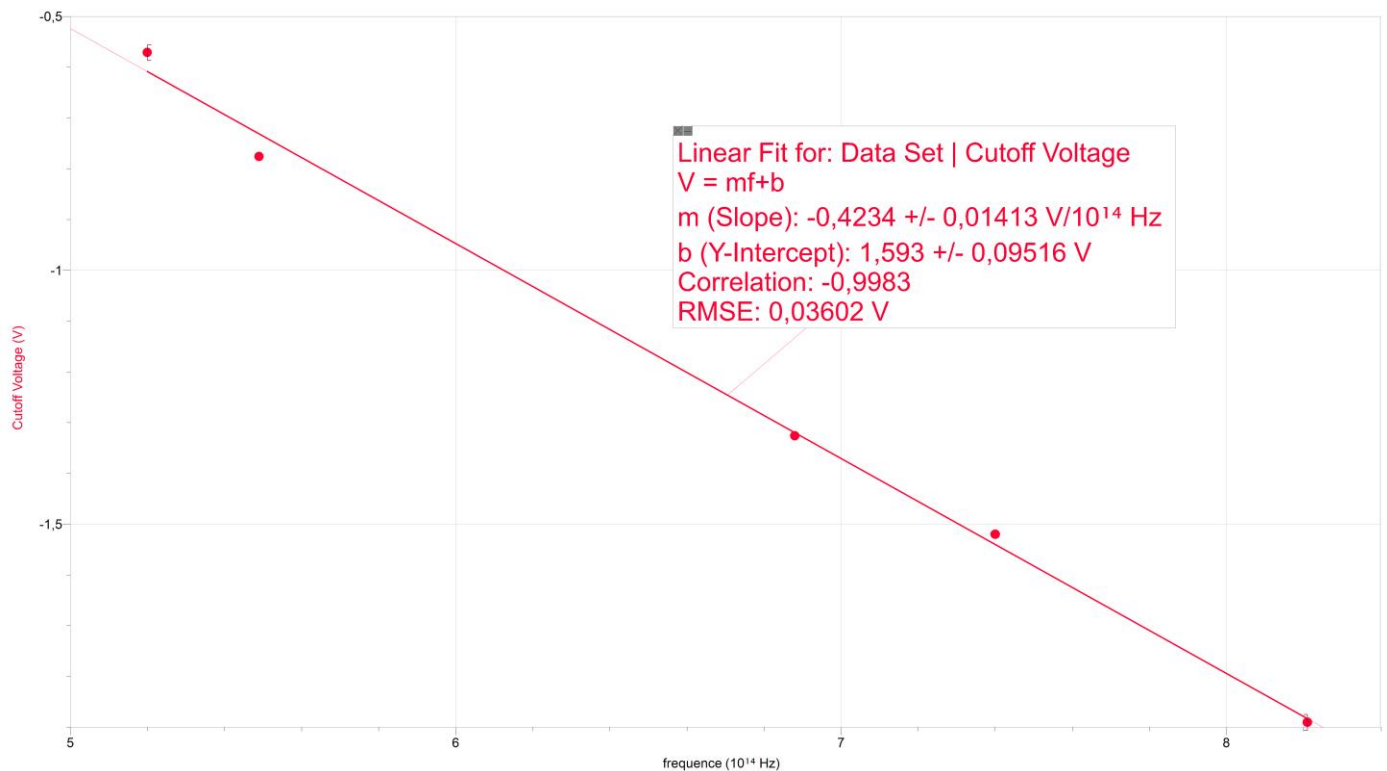
όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Κατά προσέγγιση, θεωρούμε την ταχύτητα του φωτός στον αέρα του εργαστηρίου ίση με την ταχύτητά του στο κενό. Η ταχύτητα αυτή είναι ίση με $2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ περίπου και αποτελεί ένα από τα λίγα φυσικά μεγέθη που δεν έρχονται με σφάλμα. Έτσι λοιπόν, γνωρίζοντας το μήκος κύματος είναι σαν να ξέρουμε την συχνότητα της ακτινοβολίας. Για κάθε φράγμα, η συχνότητα αυτή είναι ίση με:

Φίλτρο (nm)	Συχνότητα (Hz)
365 ± 5	$(8,21 \pm 0,10) \times 10^{14}$
405 ± 5	$(7,40 \pm 0,09) \times 10^{14}$
436 ± 5	$(6,88 \pm 0,08) \times 10^{14}$
546 ± 5	$(5,49 \pm 0,05) \times 10^{14}$
577 ± 5	$(5,20 \pm 0,05) \times 10^{14}$

Τα σφάλματα στην συχνότητα υπολογίστηκαν με την μέθοδο διάδοσης σφάλματος. Βάση της μεθόδου αυτής έχουμε πως:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \lambda} \delta \lambda\right)^2} = \frac{c}{\lambda^2} \delta \lambda$$

Θυμηθείτε πως η ταχύτητα του φωτός έρχεται χωρίς σφάλμα γι' αυτό και δεν εμφανίζεται στην παραπάνω σχέση ως ξεχωριστός όρος. Είμαστε έτοιμο πλέον να σχεδιάσουμε την γραφική παράσταση της συνάρτησης $V_{sv} = f(f)$ δηλαδή της συνάρτησης (3). Εισάγουμε τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα στο λογισμικό Logger Pro, ειδικά σχεδιασμένο για τέτοιου τύπου διεργασίες. Παίρνουμε την παρακάτω γραφική παράσταση:



Παρατηρούμε ότι ακριβώς όπως περιμέναμε από την θεωρία, τα πειραματικά σημεία ακολουθούν μια πολύ καλή γραμμική κατανομή. Το γεγονός αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τα στοιχεία που μας έχει δώσει το λογισμικό στην έξοδο. Για τον σχεδιασμό της παραπάνω προσεγγιστικής ευθείας, έχει χρησιμοποιηθεί από το λογισμικό η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Από την μέθοδο αυτή προκύπτει ότι μια ευθεία προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τα πειραματικά σημεία όταν τα μεγέθη **RSME** και **Correlation** τείνουν στο μηδέν και στην μονάδα αντίστοιχα. Το RSME εκφράζει την μέση τετραγωνική απόσταση των σημείων που εντοπίσαμε πειραματικά από την προσεγγιστική ευθεία. Όσο μικρότερη η ευθεία αυτή, τόσο πιο πολύ τείνουν τα σημεία στην ευθεία και έτσι τόσο πιο ακριβής είναι η μέτρησή μας. Αντίθετα, η συσχέτιση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην μονάδα. Η συσχέτιση στην ουσία δείχνει την σχέση που υπάρχει μεταξύ των διάφορων σημείων. Όσο πιο κοντά τείνει στην μονάδα, τόσο πιο πολύ συσχετίζονται τα σημεία μας, κάτι που σημαίνει πως όλα τα σημεία εκφράζουν την ίδια μέτρηση.

Ας πάμε όμως στα πρακτικά του ζητήματος. Η κλίση που δίνει το λογισμικό βλέπουμε πως ισούται με:

$$\kappa = (-4,234 \pm 0,141) \times 10^{-15} \text{ V} / \text{Hz}$$

Αν συγκρίνουμε την πειραματική καμπύλη με την θεωρητική (3), θα δούμε πως η κλίση αυτή ισούται με τον λόγο της σταθεράς του Planck προς το φορτίο του ηλεκτρονίου. Το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι ίσο με $-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ με ασήμαντο σφάλμα. Έτσι, ευκολά τώρα υπολογίσουμε το h και το σφάλμα του από την μέθοδο διάδοσης σφάλματος:

$$\kappa = \frac{h}{e} \Rightarrow h = \kappa \cdot e = -4,234 \times 10^{-15} \frac{V}{Hz} \cdot (-1,602) \times 10^{-19} C = 6,783 \times 10^{-34} J \cdot s$$

Ο έλεγχος των μονάδων επιβεβαιώνει του υπολογισμούς μας. Αναλυτικά:

$$\frac{V}{Hz} \cdot C = V \cdot s \cdot C = CV \cdot s = J \cdot s$$

Πράγματι, οι μονάδες της σταθεράς του Planck είναι $J \cdot s$. Τώρα, όσον αφορά το σφάλμα, έχουμε:

$$\delta h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial \kappa} \delta \kappa\right)^2} = e \cdot \delta \kappa = 1,602 \times 10^{-19} C \cdot 0,1413 \times 10^{-15} \frac{V}{Hz} = 0,226 \times 10^{-34} J \cdot s$$

Τελικά λοιπόν:

$$h = (6,783 \pm 0,226) \times 10^{-34} J \cdot s$$

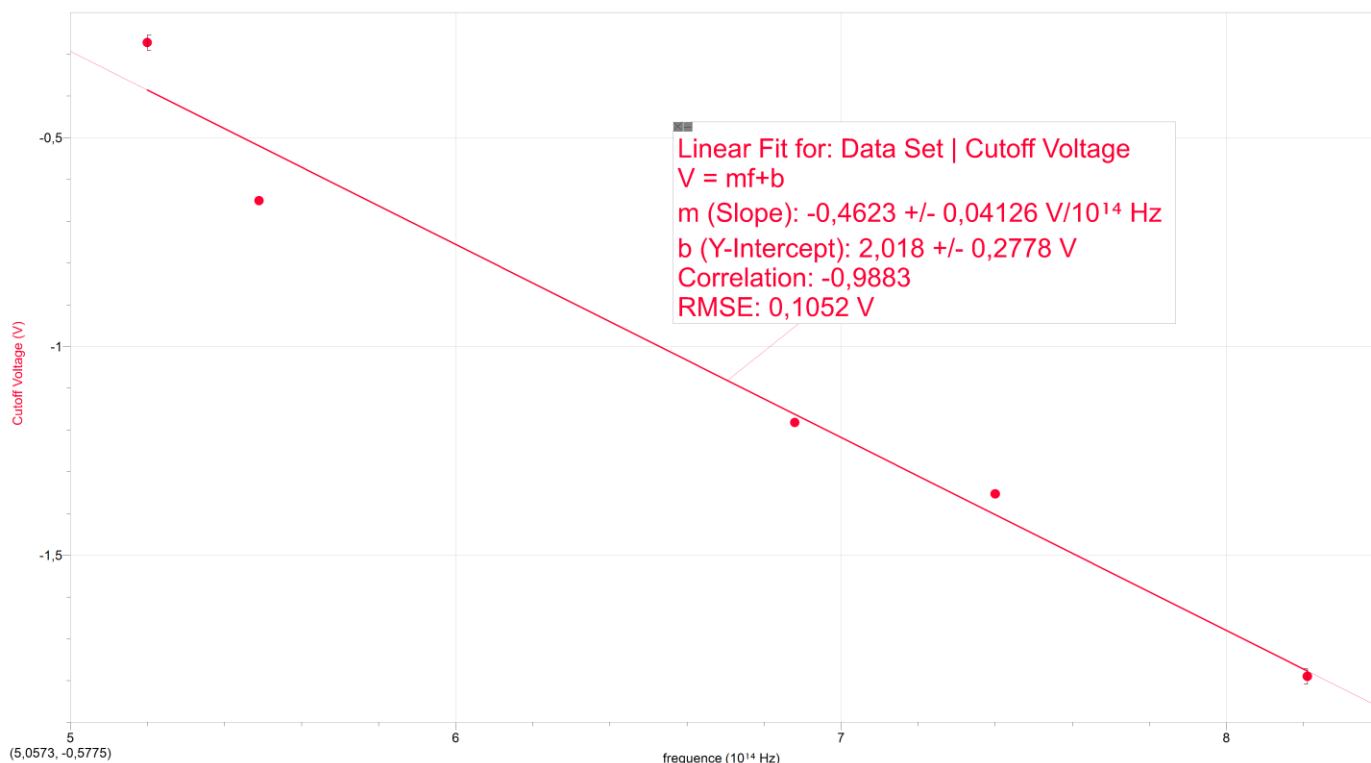
Το σχετικό σφάλμα της παραπάνω τιμής είναι της τάξης μόλις του **3,3%**. Γενικά στην φυσική, ένα σχετικό σφάλμα είναι αποδεκτό αν είναι μικρότερο του 5%. Έχουμε λοιπόν πετύχει την απαιτούμενη ακρίβεια. Αυτό ήταν αναμενόμενο και λόγω της μεγάλης ακρίβειας της γραφικής παράστασης που σχεδιάσαμε παραπάνω και εξηγήσαμε αναλυτικά. Το μόνο που μένει τώρα είναι να δούμε αν η μέτρησή μας συμφωνεί με την θεωρία. Σίγουρα, όταν αν το πείραμα γινόταν για πρώτη φορά, δεν θα είχαμε την δυνατότητα αυτή και θε έπρεπε να βασιστούμε στην ακρίβεια των μετρήσεών μας και στην σύγκριση πολλαπλών μετρήσεων. Ο σκοπός μας όμως δεν είναι γενικά αυτός, αλλά η σωστή εκτέλεση του πειράματος. Γνωρίζουμε λοιπόν πως η θεωρητική τιμή της σταθεράς του Planck είναι ίση με $h_0 = 6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$. Συνεπώς, η απόκλιση της πειραματικής μας τιμής είναι της τάξης του **2,4%**. Η απόκλιση αυτή είναι παραπάνω από αποδεκτή και μας δίνει την δυνατότητα να πούμε πως το πείραμα στέφθηκε από απόλυτη επιτυχία.

Αφού τελειώσαμε πλέον με το διάφραγμα διαμέτρου 4mm, το αντικαθιστούμε με αυτό των 2mm και επαναλαμβάνουμε την προηγούμενη διαδικασία στο ακέραιο. Τοποθετούμε διαδοχικά όλα τα φίλτρα που διαθέτουμε στο φωτοκύτταρο και αφήνουμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο να δράσει. Υπολογίζουμε το δυναμικό αποκοπής. Οι μετρήσεις με αυτό το φράγμα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάφραγμα διαμέτρου 2mm		
α/α	Φίλτρο (nm)	V _{sv} (V)
1	365 ± 5	-1,790 ± 0,002
2	405 ± 5	-1,353 ± 0,002
3	436 ± 5	-1,182 ± 0,002
4	546 ± 5	-0,651 ± 0,002
5	577 ± 5	-0,272 ± 0,002

Τα φίλτρα είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήσαμε πριν άρα δεν χρειάζεται να υπολογίσουμε ξανά τις αντίστοιχες συχνότητες. Καθώς τα πράγματα έγιναν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με πριν, η γραφική παράσταση που θα δώσει το λογισμικό για τα νέα δεδομένα περιμένουμε να είναι πάλι μια καλή ευθεία. Μια μικρή επιφύλαξη αποτελεί το κατά πόσον τα όργανά μας και συγκεκριμένα το αμπερόμετρο διατήρησε τη ρύθμισή του όσον αφορά την μηδενική ένδειξη. Ωστόσο, ακόμη και κάτι τέτοιο να μην συμβαίνει, δεν πρόκειται να δούμε εμφανή διαφορά σε σχέση με πριν.

Για να μην κουράζουμε άλλο το θέμα, ας βάλουμε τα δεδομένα στο λογισμικό. Παίρνουμε ως έξοδο το εξής αποτέλεσμα:



Παρατηρούμε πως σε αυτήν την μέτρηση, αν και η συσχέτιση έχει παραμείνει σε ικανοποιητικά επίπεδα, η τετραγωνική απόκλιση των πειραματικών σημείων από την καμπύλη έχει αυξηθεί. Αυτό αυτόματος δεν σημαίνει πως η μέτρηση έχει αλλοιωθεί. Στην ουσία, έχουμε χάσει λίγη ακρίβεια (precision), δηλαδή τα σημεία βρίσκονται ακόμη γύρω από την πραγματική τιμή αλλά πιο διασκορπισμένα γύρω από αυτήν. Οι επιφυλάξεις λοιπόν που διατυπώσαμε στην προηγούμενη παράγραφο εισακούσθηκαν. Ωστόσο, μια πιο σημαντική αιτία για την μείωση της ακρίβειάς μας αποτελεί ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που παρατηρήθηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος. Συγκεκριμένα, κατά την καταγραφή των μετρήσεων, παρατηρήθηκε έντονη μεταβολή της ένδειξης του αμπερομέτρου, χωρίς ποτέ να σταθεροποιείται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι απολύτως λογικό η συμπεριφορά αυτή του αμπερομέτρου να έχει περάσει στις διάφορες μετρήσεις μας και εν τέλει στην γραφική παράσταση, αυξάνοντας τα πειραματικά σφάλματα. Συνεισφορά θα μπορούσε επίσης να έχει και το διάφραγμα

Πάμε όμως στο ζουμί του θέματος. Η κλίση που δίνει το λογισμικό ισούται με:

$$\kappa = (-4,623 \pm 0,413) \times 10^{-15} \text{ V / Hz}$$

Συνεπώς έχουμε διαδοχικά:

$$h = \kappa \cdot e = -4,623 \times 10^{-15} \frac{\text{V}}{\text{Hz}} \cdot (-1,602) \times 10^{-19} \text{ C} = 7,406 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\delta h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial \kappa} \delta \kappa\right)^2} = e \cdot \delta \kappa = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,413 \times 10^{-15} \frac{\text{V}}{\text{Hz}} = 0,662 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Τελικά λοιπόν:

$$h = (7,406 \pm 0,622) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

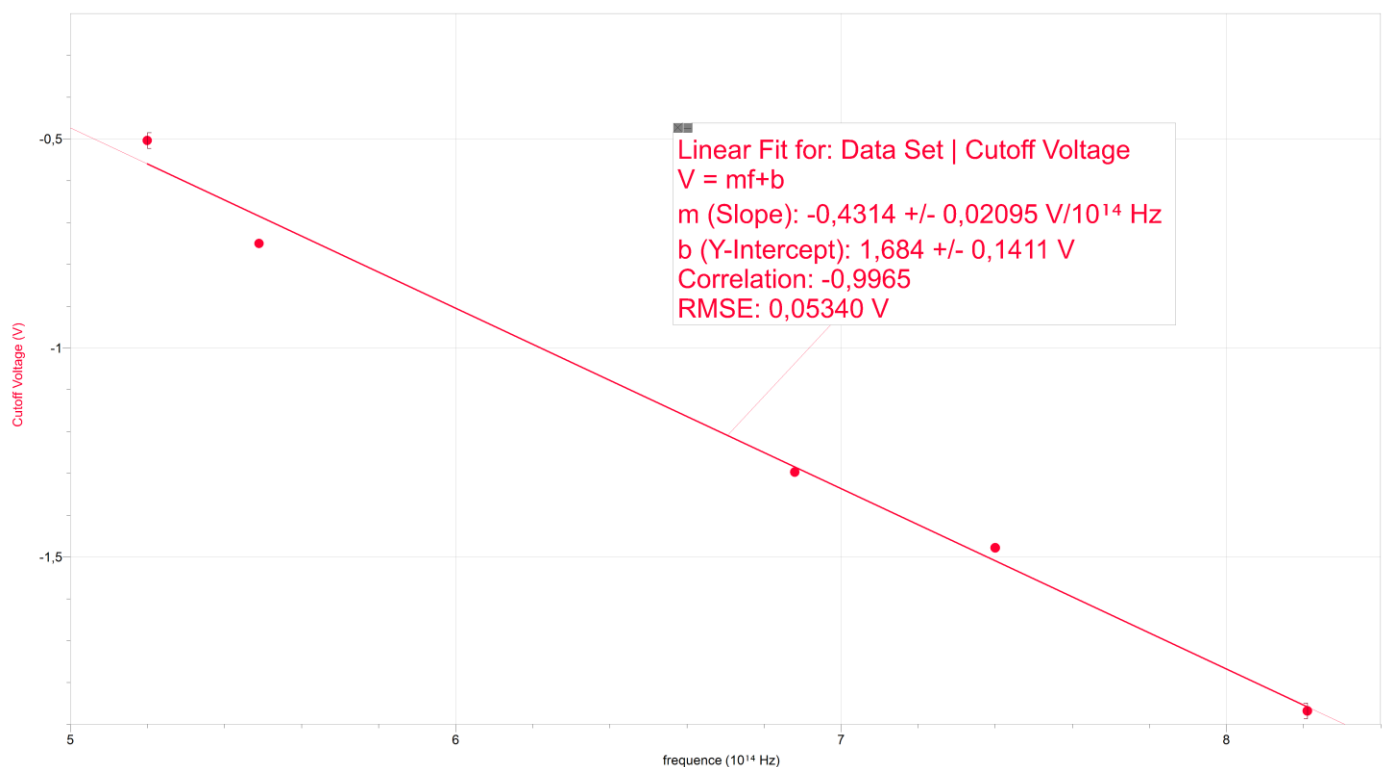
Το σχετικό σφάλμα της μέτρησης στην περίπτωση αυτή είναι της τάξης του **8,4%**, αρκετά αυξημένη σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση. Η απόκλιση από την θεωρητική τιμή από την άλλη, είναι της τάξης του **11%**. Προφανώς η πειραματική αυτή τιμή δεν είναι τόσο ακριβής όσο η προηγούμενη και δεν μπορεί να χρήζει

της απόλυτης εμπιστοσύνης μας. Βελτίωση θα μπορούσε να επέλθει με υπομονετικότερη εκτέλεση του πειράματος, αδύνατον στις χρονικά περιορισμένες συνθήκες ενός εργαστηρίου.

Ας δούμε όμως και τις τελευταίες μετρήσεις. Θα είναι περισσότερο ακριβείς, ή θα συγκεντρώσουν ακόμη περισσότερα σφάλματα από τις προηγούμενες μετρήσεις; Αντικαθιστούμε το φράγμα διαμέτρου 2mm με αυτό των 8mm. Εκτελούμε την ίδια διαδικασία. Οι μετρήσεις φαίνονται στο επόμενο πίνακα:

Διάφραγμα διαμέτρου 8mm		
α/α	Φίλτρο (nm)	V_{sv} (V)
1	365 ± 5	$-1,868 \pm 0,002$
2	405 ± 5	$-1,478 \pm 0,002$
3	436 ± 5	$-1,297 \pm 0,002$
4	546 ± 5	$-0,750 \pm 0,002$
5	577 ± 5	$-0,504 \pm 0,002$

Κάποιος ίσως αναρωτηθεί γιατί το δυναμικό αποκοπής διαφέρει από διάφραγμα σε διάφραγμα για συγκεκριμένο φίλτρο, από την στιγμή που, όπως είδαμε αναλυτικά, εξαρτάται μόνο από την συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι από την έντασή της. Ειδικότερα το διάφραγμα των 2mm δίνει αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα από τα άλλα δυο. Μια τέτοια ερώτηση θα είχε μια πολύ ενδιαφέρουσα απάντηση. Ας δούμε όμως την μορφή της γραφικής παράστασης για τα παραπάνω δεδομένα:



Η μέτρηση αυτή συμπίπτει περισσότερο ως προς ακρίβεια και σφάλματα με την πρώτη του διαφράγματος των 4mm. Παρατηρούμε ότι συσχέτιση και τετραγωνική απόκλιση ανταποκρίνονται καλύτερα στις ιδανικές τιμές και πως τα σφάλματα είναι μειωμένα σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση, αλλά λίγο πιο αυξημένα σε σχέση με την πρώτη μέτρηση. Χωρίς πολλά λόγια, προκύπτουν τα εξής:

$$\kappa = (-4,314 \pm 0,209) \times 10^{-15} \text{ V} / \text{Hz}$$

$$h = \kappa \cdot e = -4,314 \times 10^{-15} \frac{\text{V}}{\text{Hz}} \cdot (-1,602) \times 10^{-19} \text{ C} = 6,911 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\delta h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial \kappa} \delta \kappa\right)^2} = e \cdot \delta \kappa = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,209 \times 10^{-15} \frac{\text{V}}{\text{Hz}} = 0,335 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Άρα τελικά:

$$h = (6,911 \pm 0,335) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Το σχετικό σφάλμα είναι εδώ **4,8%**, ενώ η απόκλιση από την θεωρητική τιμή **4,3%**. Η ακρίβεια της μέτρησης αυτής είναι ανάμεσα στις δυο προηγούμενες.

Πείραμα 2: Μελέτη χαρακτηριστικών καμπύλων με σταθερή συχνότητα και διαφορετικές εντάσεις

Στο αυτό το δεύτερο πείραμα, θα επιχειρήσουμε την μελέτη των χαρακτηριστικών καμπύλων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Με τον όρο χαρακτηριστικές καμπύλες, αναφερόμαστε σε γραφικές παραστάσεις όπως αυτές που είδαμε στην θεωρία και συνδέουν το ρεύμα με την τάση. Έτσι, με αυτό το πείραμα, θα εξακριβώσουμε το αν τα όσα φαινόμενα που είδαμε θεωρητικά έχουν βάση, ή χάνουμε τον χρόνο μας.

Όπως λέει και ο τίτλος του πειράματος, να μελετήσουμε πρώτα την πρώτη περίπτωση, όπου η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην κάθοδο είναι σταθερή και μεταβάλλεται η έντασή της. Με βάση την θεωρία, περιμένουμε πως όταν είμαστε σε μεγαλύτερη τάση από την τάση αποκοπής, η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα του φωτοκύτταρου εμφανίζει εξάρτηση από την ένταση της ακτινοβολίας, αφού όσο περισσότερα φωτόνια προσπίπτουν στην κάθοδο, τόσα περισσότερα ηλεκτρόνια διαφεύγουν και τόσα περισσότερα φτάνουν έως την άνοδο με αποτέλεσμα το ρεύμα να αυξάνει. Η αποτύπωση των παραπάνω με γραφικό τρόπο γίνεται όπως έχουμε δει στην θεωρία. Ας δούμε αν θα επιβεβαιωθούν οι προβλέψεις μας.

Ξανά διαμετρούμε το αμπερόμετρο ώστε να δείχνει μηδέν όταν δεν μετράει κανένα ρεύμα. Επειδή θα χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερες τάσεις από την τάση αποκοπής, ρυθμίζουμε το βολτόμετρο σε εύρος -2 έως 30 V και τον ενισχυτή ρεύματος σε ακρίβεια 10^{-11} . Τοποθετούμε για αρχή στην θύρα του φωτοκύτταρου το διάφραγμα των 2mm και πάνω από αυτό το φίλτρο των 436nm. Ξεκινάμε τις μετρήσεις βρίσκοντας την τάση αποκοπής. Στην συνέχεια, αυξάνουμε την τάση με ρυθμό 1V και ταυτόχρονα καταγράφουμε το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Οι μετρήσεις που πήραμε παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Διάφραγμα 2mm , φίλτρο 436nm	
V (V)	I ($\times 10^{-11}$A)
-1,3 ± 0,002	0,00 ± 0,01
-0,3 ± 0,002	2,50 ± 0,01
0,7 ± 0,002	6,90 ± 0,01
1,7 ± 0,002	12,6 ± 0,01
2,7 ± 0,002	19,4 ± 0,01
3,7 ± 0,002	23,7 ± 0,01
4,7 ± 0,002	25,5 ± 0,01
5,7 ± 0,002	27,8 ± 0,01
6,7 ± 0,002	30,8 ± 0,01
7,7 ± 0,002	33,5 ± 0,01

Υπάρχει μια επιφύλαξη για το σφάλμα του ρεύματος, λόγω πάλι της αμφιταλάντευσης της ένδειξης του αμπερομέτρου μας. Όσον αφορά τις μετρήσεις αυτές καθ' αυτές, όπως εύκολα βλέπουμε, η εξάρτηση που υπάρχει μεταξύ τάσης και έντασης δεν είναι σε καμία περίπτωση γραμμική ή έχει κάποια άλλη εμφανή μορφή, όπως και περιμένουμε. Πριν όμως προχωρήσουμε στην σχεδίαση της γραφικής παράστασης, θα ήταν καλύτερο σε αυτό το πείραμα αντίθετα με το προηγούμενο, να γίνει η αποτύπωση όλων των γραφικών παραστάσεων στο ίδιο διάγραμμα ώστε η σύγκριση μεταξύ των να είναι πιο εύκολη. Έτσι λοιπόν, συνεχίζου-

με τις υπόλοιπες μετρήσεις.

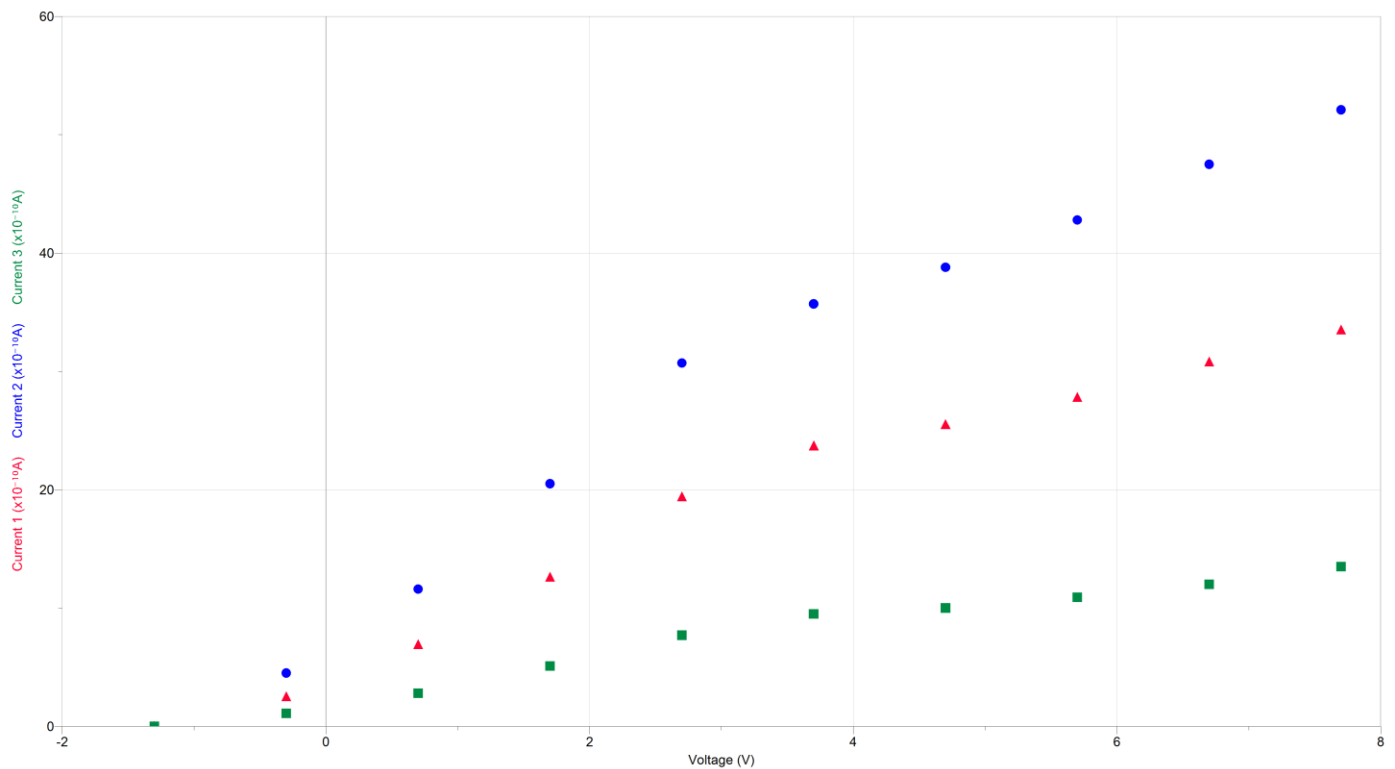
Αντικαθιστώντας το διάφραγμα με αυτό των 4mm και με το ίδιο φίλτρο, επαναλαμβάνουμε την διαδικασία με τον ίδιο τρόπο. Η μόνη διαφορά τώρα έγκειται στο ότι στην περίπτωση αυτή πρέπει να θέσουμε την ακρίβεια του ενισχυτή ρεύματος στα 10^{-10}A , καθώς σε διαφορετική περίπτωση δεν μπορούμε να δούμε την ένδειξη. Οι μετρήσεις που πήραμε φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Διάφραγμα 4mm , φίλτρο 436nm	
V (V)	I ($\times 10^{-10}\text{A}$)
-1,3 $\pm$ 0,002	0,00 $\pm$ 0,01
-0,3 $\pm$ 0,002	4,50 $\pm$ 0,01
0,7 $\pm$ 0,002	11,60 $\pm$ 0,01
1,7 $\pm$ 0,002	20,50 $\pm$ 0,01
2,7 $\pm$ 0,002	30,70 $\pm$ 0,01
3,7 $\pm$ 0,002	35,70 $\pm$ 0,01
4,7 $\pm$ 0,002	38,80 $\pm$ 0,01
5,7 $\pm$ 0,002	42,80 $\pm$ 0,01
6,7 $\pm$ 0,002	47,50 $\pm$ 0,01
7,7 $\pm$ 0,002	52,10 $\pm$ 0,01

Τέλος, τοποθετούμε στην θύρα του φωτοκύτταρου το διάφραγμα διαμέτρου 8mm. Οι μετρήσεις τώρα είναι:

Διάφραγμα 8mm , φίλτρο 436nm	
V (V)	I ($\times 10^{-10}\text{A}$)
-1,3 $\pm$ 0,002	0,00 $\pm$ 0,01
-0,3 $\pm$ 0,002	1,10 $\pm$ 0,01
0,7 $\pm$ 0,002	2,80 $\pm$ 0,01
1,7 $\pm$ 0,002	5,10 $\pm$ 0,01
2,7 $\pm$ 0,002	7,70 $\pm$ 0,01
3,7 $\pm$ 0,002	9,50 $\pm$ 0,01
4,7 $\pm$ 0,002	10,00 $\pm$ 0,01
5,7 $\pm$ 0,002	10,90 $\pm$ 0,01
6,7 $\pm$ 0,002	12,00 $\pm$ 0,01
7,7 $\pm$ 0,002	13,50 $\pm$ 0,01

Με ενδιαφέρον παρατηρούμε πως για διάφραγμα διαμέτρου 4mm, παρατηρείται μεγαλύτερο ρεύμα στο κύκλωμα από ότι για διάφραγμα 8mm. Λογικά θα περίμενε κανείς πως το διάφραγμα με την μεγαλύτερη διάμετρο, θα επέτρεπε την διέλευση περισσότερου φωτός και έτσι θα προκαλούσε μεγαλύτερο ρεύμα. Μια λογική εξήγηση του φαινομένου θα ήταν να έχει κάποιος μπερδέψει τα διαφράγματα. Ωστόσο, χωρίς την ύπαρξη απτών αποδείξεων για κάτι τέτοιο, ας συνεχίσουμε με την σχεδίαση των γραφικών παραστάσεων. Εισάγουμε τα δεδομένα και από τις τρεις μετρήσεις στο λογισμικό Logger Pro και εξάγουμε το εξής (κόκκινα το πρώτο σετ μετρήσεων, μπλε το δεύτερο και πράσινα το τρίτο, η ίδια σύμβαση ισχύει και στο επόμενο πείραμα):



Δεν μπορεί να τεθεί καμία αμφισβήτηση λοιπόν για το αν η θεωρία μας ισχύει. Παρατηρούμε λοιπόν πως η γραφικές παραστάσεις ακολουθούν το μοτίβο που έχουμε αναλύσει στην θεωρία. Οι λόγοι που βλέπουμε το συγκεκριμένο μοτίβο έχουν αναλυθεί τουλάχιστον δυο φορές στα παραπάνω. Συνεπώς, δεν χρειάζεται να γίνει επιπλέον συζήτηση επί του θέματος. Η μόνη επιφύλαξη που υπάρχει, διατυπώθηκε στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο.

Πείραμα 3: Μελέτη χαρακτηριστικών καμπύλων με σταθερή ένταση και διαφορετικές συχνότητες

Το πείραμα αυτό είναι στην ουσία συνέχεια του προηγούμενου. Αντί τώρα να αλλάζουμε κάθε φορά τα διαφράγματα, δηλαδή την ένταση της ακτινοβολίας, θα κρατήσουμε ένα συγκεκριμένο διάφραγμα και θα αλλάζουμε τα φίλτρα μήκους κύματος. Τοποθετούμε λοιπόν στην θύρα του φωτοκύτταρου το διάφραγμα των 4mm και χωρίς πολλά λόγια, ξεκινάμε τις μετρήσεις με το φίλτρο των 436nm. Περιμένουμε να είναι λίγο πολύ ίδιες με αυτές που πήραμε στο προηγούμενο πείραμα πάλι για το ίδιο διάφραγμα. Έτσι:

Διάφραγμα 4mm , φίλτρο 436nm	
V (V)	I ($\times 10^{-10} \text{A}$)
$-1,3 \pm 0,002$	$0,00 \pm 0,01$
$-0,3 \pm 0,002$	$5,00 \pm 0,01$
$0,7 \pm 0,002$	$11,40 \pm 0,01$
$1,7 \pm 0,002$	$21,00 \pm 0,01$
$2,7 \pm 0,002$	$31,70 \pm 0,01$
$3,7 \pm 0,002$	$37,00 \pm 0,01$
$4,7 \pm 0,002$	$39,70 \pm 0,01$
$5,7 \pm 0,002$	$43,80 \pm 0,01$
$6,7 \pm 0,002$	$49,30 \pm 0,01$
$7,7 \pm 0,002$	$53,30 \pm 0,01$

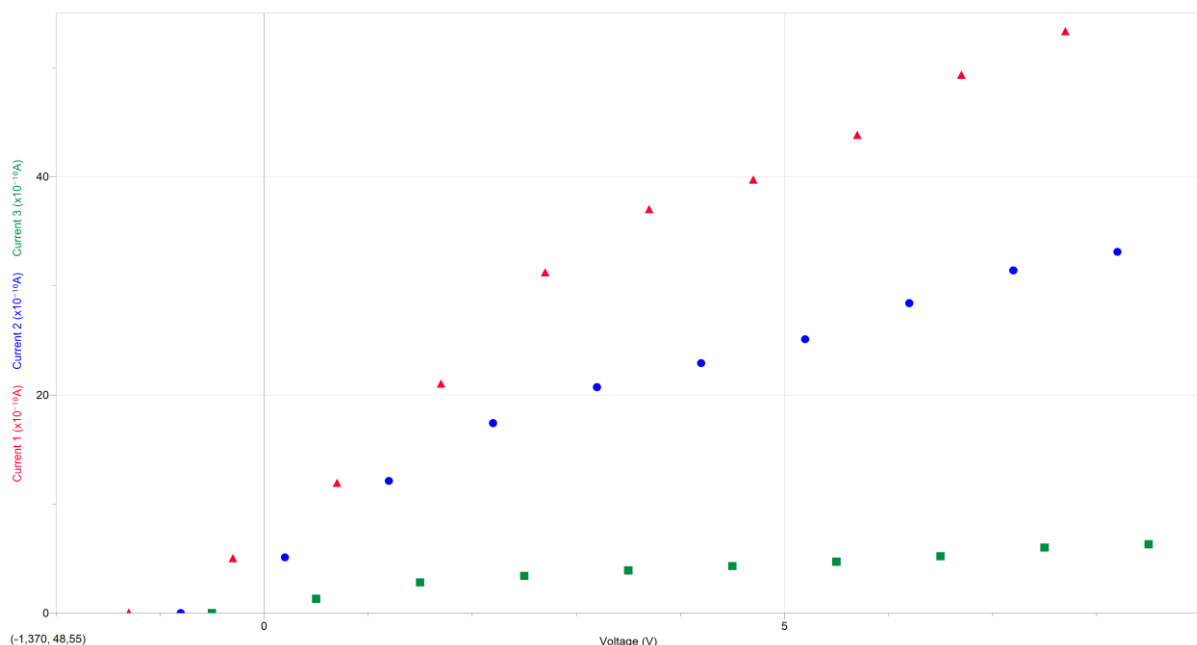
Αυτό που αξίζει να παρατηρήσουμε, είναι πως όλες οι παραπάνω μετρήσεις έχουν μια απόκλιση περίπου $2-3 (\times 10^{-10} \text{A})$ από αυτές του πειράματος 2. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα η αμφιταλάντευση του αμπερομέτρου. Πάμε στο φίλτρο των 546nm. Εδώ βρήκαμε:

Διάφραγμα 4mm , φίλτρο 546nm	
V (V)	I ($\times 10^{-10} \text{A}$)
$-0,8 \pm 0,002$	$0,00 \pm 0,01$
$0,2 \pm 0,002$	$5,10 \pm 0,01$
$1,2 \pm 0,002$	$12,10 \pm 0,01$
$2,2 \pm 0,002$	$17,40 \pm 0,01$
$3,2 \pm 0,002$	$20,70 \pm 0,01$
$4,2 \pm 0,002$	$22,90 \pm 0,01$
$5,2 \pm 0,002$	$25,10 \pm 0,01$
$6,2 \pm 0,002$	$28,40 \pm 0,01$
$7,2 \pm 0,002$	$31,40 \pm 0,01$
$8,2 \pm 0,002$	$33,10 \pm 0,01$

Ακόμα και η απλή σύγκριση των μετρήσεων στους δυο πίνακες επιβεβαιώνει την θεωρία μας. Για το φίλτρο με το μικρότερο μήκος κύματος και άρα την μεγαλύτερη ενέργεια φωτονίων (θυμηθείτε την εξίσωση (4)) το δυναμικό αποκοπής είναι μεγαλύτερο (δηλαδή πιο αρνητικό) από αυτό για το άλλο φίλτρο όπως και θα έπρεπε. Επίσης, το φίλτρο αυτό, για ίση τάση προκαλεί μεγαλύτερο ρεύμα, όπως και πάλι θα έπρεπε. Για το τρίτο φίλτρο τώρα των 577nm:

Διάφραγμα 4mm , φίλτρο 577nm	
V (V)	I ($\times 10^{-10} \text{A}$)
$-0,5 \pm 0,002$	$0,00 \pm 0,01$
$0,5 \pm 0,002$	$1,30 \pm 0,01$
$1,5 \pm 0,002$	$2,80 \pm 0,01$
$2,5 \pm 0,002$	$3,40 \pm 0,01$
$3,5 \pm 0,002$	$3,90 \pm 0,01$
$4,5 \pm 0,002$	$4,30 \pm 0,01$
$5,5 \pm 0,002$	$4,70 \pm 0,01$
$6,5 \pm 0,002$	$5,20 \pm 0,01$
$7,5 \pm 0,002$	$6,00 \pm 0,01$
$8,5 \pm 0,002$	$6,30 \pm 0,01$

Τα ίδια με πριν ισχύουν και για αυτό το σετ μετρήσεων που υπολογίστηκε με χαμηλότερης συχνότητας φως. Εισάγουμε τα δεδομένα στο λογισμικό στο ίδιο διάγραμμα και παίρνουμε την ακόλουθη εικόνα:



Τα σχόλια είναι περιττά. Παρατηρούμε διαφορετική αρχή, σημείο κόρου όσο αυξάνει η τάση και γενικά τα ίδια πράγματα με αυτά που περιγράψαμε αναλυτικά στην θεωρία. Συνεπώς, μπορούμε να ισχυριστούμε πως τα πειράματα 2 και 3 πέτυχαν πλήρων τον στόχο τους και επιβεβαίωσαν την θεωρία.

Επίλογος: Το σημερινό πείραμα, ξεκίνησε από μια σύντομη και περιεκτική ανάλυση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Αναλύσαμε στις πρώτες σελίδες την συμπεριφορά των ηλεκτρονίων της ύλης όταν σε αυτά προσπέσουν φωτόνια διαφορετικών συχνοτήτων και εντάσεων. Χρησιμοποιώντας τα ενδιαφέροντα αυτά αποτελέσματα στα οποία καταλήξαμε, περάσαμε με επιτυχία στο πειραματικό μέρος όπου υπολογίσαμε μια από τις πιο σημαντικές σταθερές της φυσικής. Στην συνέχεια είδαμε μέσω των χαρακτηριστικών καμπύλων την επιβεβαίωση των θεωρητικών μας προβλέψεων. Ωστόσο, η σημαντικότητα του πειράματος το οποίο πραγματοποιήσαμε σήμερα, έγκειται στο γεγονός πως οδηγούμενη από ένα καθαρά φυσικό φαινόμενο όπως το φωτοηλεκτρικό, μπορέσαμε μέσω γραφικών παραστάσεων να υπολογίσουμε σταθερές που σχετίζονται με την μαθηματική φύση του προβλήματος. Η αντίληψη της άρρηκτης σύνδεση φυσικής και μαθηματικής θεωρίας καθώς και η μαγεία που πηγάζει από το κάθε μικρό βήμα στην εξερεύνηση των αγνώριστων (για εμάς) μονοπατιών της φυσικού κόσμου, πρέπει οπωσδήποτε να προστεθούν στα οφέλη από την σημερινή πειραματική διαδικασία.

Βιβλιογραφία

- Διαδικτυακή:
 - http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/nu_lectures/lecture6/hertz/Hertz_exp.html
 - http://ekfe.ser.sch.gr/documents/experiment/mixalis/ser_fys_glykio_fotohlekttriko.pdf
 - http://www.aua.gr/~bethanis/from_photoelectric_to_quantum.pdf
- Giancoli: Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, Τόμος Β', Μετάφραση: Κεχαγιάς Αλέξανδρος, Κωνσταντίνος Σφέτσος, Γιώργος Τσιπολίτης, 4^η έκδοση 2011.
- Αλέκος Ιωάννου–Γιάννης Ντάνος–Άγγελος Πήττας–Στάυρος Ράπτης: Φυσική Θετικής και τεχνολογικής κατεύθυνσης, Γ' τάξη Γενικού Λυκείου, 1999.
- Σημειώσεις Φυσικής IV: Σύγχρονη Φυσική.
- Φυλλάδιο Εργαστηρίου Φυσικής IV: Ηλεκτρομαγνητισμός και Σύγχρονη Φυσική.