

Ο Αϊνστάιν, το Νόμπελ και το διδακτικό σενάριο. Μια ενδιαφέρουσα συνάντηση!

Κυριακόπουλος Νικόλαος

*M.Sc. Φυσικός, Καθηγητής Γενικού Λυκείου Νεμέας
nkyriak@gmail.com*

Περίληψη

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα οι περισσότεροι επιστήμονες πίστευαν πως ότι μπορούσε να μάθει κανείς για τη Φυσική ήταν ήδη γνωστό. Οι νόμοι της Κλασικής Μηχανικής και της Θερμοδυναμικής είχαν ερμηνεύσει ένα μεγάλο φάσμα φαινομένων, ενώ ο Maxwell ενοποιώντας τον Ηλεκτρισμό με το Μαγνητισμό μέσα από μια κομψή θεωρία, αποκάλυψε πέραν όλων των άλλων και την κυματική φύση του φωτός. Στις αρχές το 20^{ου} αιώνα όμως έγινε μια πραγματική επανάσταση στο χώρο της Φυσικής, μιας και τα διάφορα πειραματικά αποτελέσματα από πειράματα της εποχής όπως η ακτινοβολία του μέλανος σώματος, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton, δεν μπορούσαν να ερμηνευθούν μέσα από την επικρατούσα θεωρία της κλασικής ηλεκτροδυναμικής. Ο Einstein το 1905 στην εργασία του για την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, ανέδειξε μια άλλη υπόσταση του φωτός τη σωματιδιακή (Young, 1992). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός διδακτικού σεναρίου που συνδυάζει ΤΠΕ και εργαστηριακή πρακτική, με σκοπό οι μαθητές καθοδηγούμενοι να περάσουν μέσα από τα πειραματικά μονοπάτια του φωτοηλεκτρικού φαινομένου που αναδεικνύουν τη σωματιδιακή φύση του φωτός. Το διδακτικό σενάριο εντάσσεται στο μάθημα της Φυσικής Γενικής Παιδείας της Γ' Λυκείου και ευελπιστεί να εισάγει τους μαθητές στον μικρόκοσμο της Σύγχρονης Φυσικής.

Λέξεις - Κλειδιά: Φως, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κβαντομηχανική, ΤΠΕ, πείραμα.

Εισαγωγή

Στις τελευταίες δεκαετίες του 19^{ου} αιώνα ήταν γνωστό από διάφορα πειράματα, ότι όταν το φως προσπίπτει πάνω σε ορισμένες μεταλλικές επιφάνειες, τότε εκπέμπονται από αυτές ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια φωτοηλεκτρόνια (Young, 1992). Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μελετήθηκε από τους Hallwacs και Lenard στην περίοδο 1886-1900 με τελείως απρόσμενα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία δεν μπορούσαν να ερμηνευθούν με βάση την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Ο Einstein το 1905 -παράλληλα με την εργασία του για τη σχετικότητα- ερμήνευσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο βασιζόμενος στις ιδέες του Max Planck περί κβάντωσης του φωτός. Σύμφωνα με τον Einstein, όταν μια φωτεινή ακτίνα απλώνεται από ένα σημείο, η ενέργεια δεν κατανέμεται ομοιόμορφα αλλά αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό κβάντων ενέργειας, που κινούνται το καθένα αδιαίρετο και μπορούν να απορροφώνται ή να παράγονται ως όλον. Για την εργασία του αυτή- και όχι για τη σχετικότητα- ο Einstein τιμήθηκε το 1921 με το βραβείο Νόμπελ (Γραμματικάκης, 2006).

Σενάριο διδασκαλίας

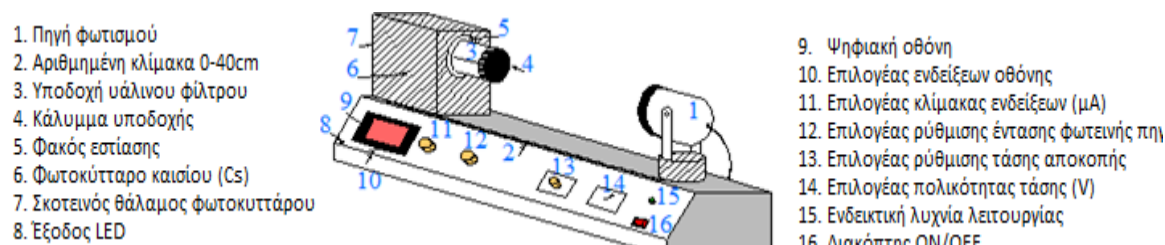
Διδακτικοί στόχοι

Οι μαθητές πραγματοποιούν κατάλληλα πειράματα ώστε να εξάγουν τους πειραματικούς νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Επίσης διαπιστώνουν την αδυναμία της κλασικής ηλεκτροδυναμικής να ερμηνεύσει τους νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και τους ερμηνεύουν με βάση τη κβαντική θεώρηση του φωτός. Τέλος υπολογίζουν τη σταθερά του Planck, το έργο εξαγωγής του μετάλλου και την οριακή συχνότητα (Young, 1992 · Τραχανάς, 1991). Στα πλαίσια της ομαδοσυνεργατικής διδασκαλίας οι μαθητές εκτιμούν την αξία της ομαδικής εργασίας στην ανακάλυψη της νέας γνώσης, ενώ συνδέουν το φαινόμενο με καθημερινές τεχνολογικές εφαρμογές.

Υλικοτεχνική υποδομή

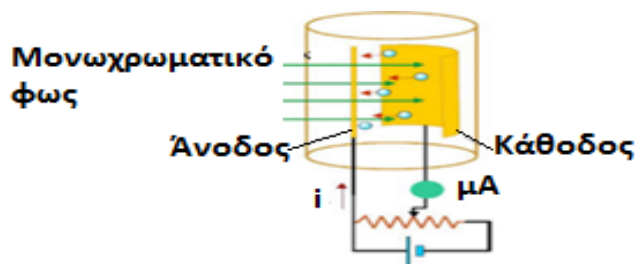
Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται:

Στην εικόνα 1 φαίνεται η πειραματική διάταξη με την οποία πραγματοποιούνται όλα τα πειράματα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (<http://ekfe.eyr.sch.gr/>).



Εικόνα 1: Πειραματική διάταξη φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Στην υποδοχή των φίλτρων μπορεί να τοποθετείται ένα από τα έξι υάλινα μονοχρωματικά φίλτρα, το κόκκινο (630nm), το πορτοκαλί (580nm), το κίτρινο σκούρο (550nm), το κίτρινο ανοιχτό (510nm), το πράσινο (520nm) και το μπλε (470nm). Το φωτοκύτταρο Cs της συσκευής (εικόνα 2) αποτελείται από δυο αγώγιμα ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, που περικλείονται σε ένα γυάλινο αερόκενο σωλήνα.



Εικόνα 2: Διάταξη φωτοκυττάρου.

Η κάθοδος έχει μεγάλη επιφάνεια και φέρει επίστρωση από το αλκαλιμέταλλο Cs. Με μια ποτενσιομετρική διάταξη δύναται να μεταβάλλεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων. Όταν μονοχρωματικό φως προσπίπτει πάνω στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια της καθόδου, τότε εκπέμπονται από αυτή φωτοηλεκτρόνια, και έτσι στο εξωτερικό κύκλωμα ανιχνεύεται ηλεκτρικό ρεύμα (φωτορεύμα) που μετρείται με το μικροαμπερόμετρο (Young, 1992).

Λογισμικό που χρησιμοποιείται:

Χρησιμοποιείται το λογισμικό PHET INTERACTIVE SIMULATIONS (<http://phet.colorado.edu/el/>), περιβάλλον προσομοίωσης "φωτοηλεκτρικό φαινόμενο".

Οργάνωση της τάξης, διδακτική μεθοδολογία και διαχείριση διδακτικού χρόνου

Οι μαθητές είναι χωρισμένοι σε ομάδες των 4 ατόμων και δουλεύουν ομαδοσυνεργατικά (Ματσαγγούρας, 2000) στο σχολικό εργαστήριο φυσικών επιστημών. Η διδακτική μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η καθοδηγούμενη ανακάλυψη (Χαλκιά, 2012). Η διδασκαλία εκτιμάται να ολοκληρώνεται σε δυο διδακτικές ώρες, ενώ οι μαθητές είναι καλό να έχουν ως προαπαιτούμενες γνώσεις τις βασικές έννοιες της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Η διδασκαλία προτείνεται να ξεκινάει επικαλούμενος ο διδάσκων αυτό που συμβαίνει όταν κάποιος βρεθεί σε μια κλειστή πόρτα και υπάρχει φωτοκύτταρο ή όταν προσπίπτει φως στο κομπιουτεράκι με το ηλιακό κύτταρο. Συγκεκριμένα ζητεί από τους μαθητές να περιγράψουν το τι παρατηρούν με μια σειρά χρονικής ακολουθίας, μέσα από τη λογική "αιτίας - αποτελέσματος" (Κασσέτας, 2004). Οι μαθητές διατυπώνουν τις παρατηρήσεις τους και καλούνται να ανακαλύψουν το φαινόμενο μέσα από το δρόμο του πειράματος.

Οι πειραματικές δραστηριότητες

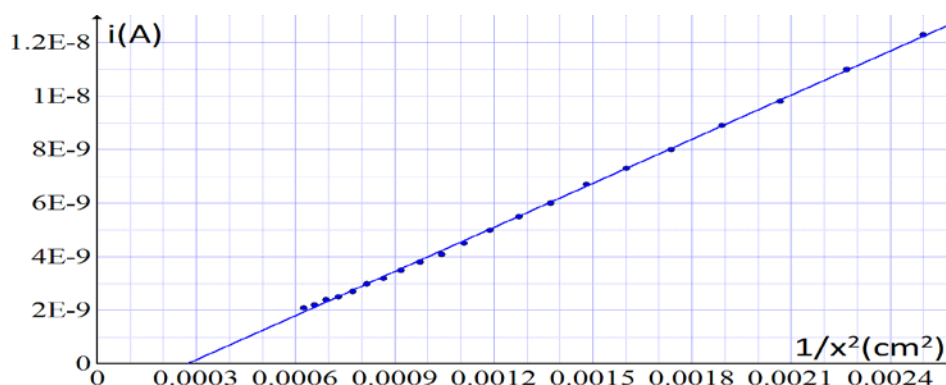
1^η Δραστηριότητα:

Προετοιμασία συσκευής:

- "Επιταχύνουσα" τάση $V=10V$ μεταξύ των ηλεκτροδίων του φωτοκύτταρου.
- Τοποθέτηση κόκκινου υάλινου φίλτρου στην υποδοχή φίλτρων.
- Ρύθμιση για μεσαία ένταση προσπίπτοντος φωτός.

Λήψη μετρήσεων:

Οι μαθητές μεταβάλλουν την απόσταση x μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτοκύτταρου μειώνοντάς την από $x=40cm$ σε $x=20cm$ με βήμα $1cm$. Για κάθε τιμή απόστασης καταγράφουν και μια τιμή έντασης φωτορεύματος i και αποδίδουν τα πειραματικά ζεύγη τιμών $(1/x^2, i)$ σε αντίστοιχο διάγραμμα $i-1/x^2$ (διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1: Γραφική παράσταση $i-1/x^2$.

Από τη γραφική παράσταση οι μαθητές διαπιστώνουν την αναλογία μεταξύ της έντασης του φωτορεύματος i και του αντίστροφου τετραγώνου της απόστασης $1/x^2$.

Συμπέρασμα:

Δίνοντας στους μαθητές ως δεδομένο ότι σύμφωνα με το νόμο της φωτομετρίας η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας I είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης x από τη φωτεινή πηγή (Schaim et al, 1985), διαπιστώνουν την αναλογία μεταξύ της έντασης του φωτοηλεκτρικού ρεύματος i και της έντασης της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας I .

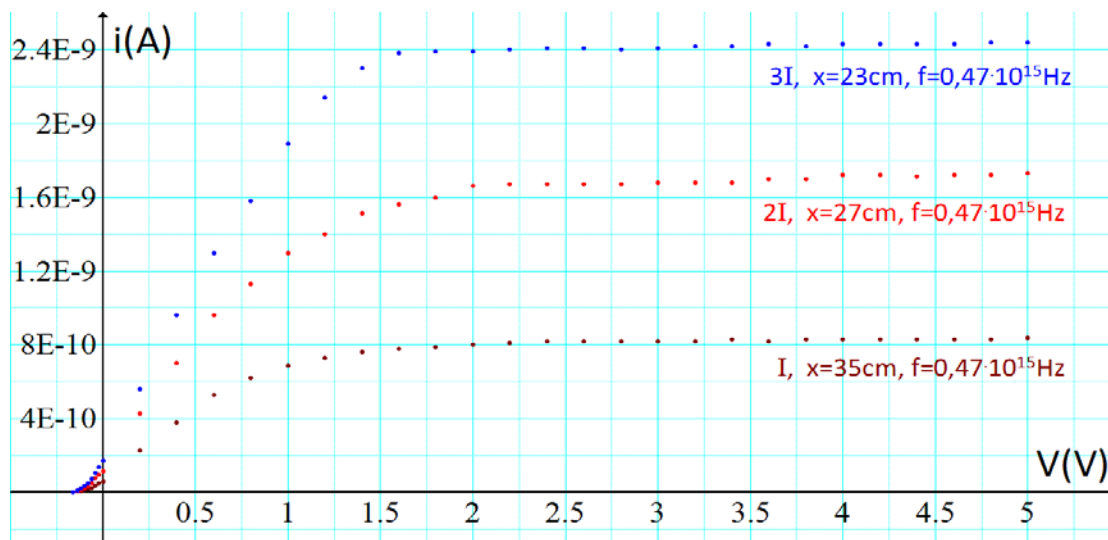
2^η Δραστηριότητα:

Προετοιμασία συσκευής:

- Τοποθέτηση κόκκινου υάλινο φίλτρου στην υποδοχή φίλτρων.
- Ρύθμιση για μεσαία ένταση προσπίπτοντος φωτός.

Λήψη μετρήσεων:

Μεταβάλλοντας οι μαθητές την “επιβραδύνουσα” τάση V από 0V έως -0,16V με βήμα 0,02V λαμβάνουν τιμές για την ένταση του φωτορεύματος i . Κάθε φορά για μια συγκεκριμένη τιμή της τάσης V λαμβάνουν τρία πειραματικά ζεύγη τιμών (V, i) που αντιστοιχούν σε αποστάσεις μεταξύ φωτεινής πηγής και φωτοκύτταρου, $x=35\text{cm}$, $x=27\text{cm}$ και $x=23\text{cm}$. Οι αποστάσεις αυτές δεν είναι τυχαίες. Όπως προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις και το συμπέρασμα της 1^{ης} δραστηριότητας αν η αρχική απόσταση είναι $x=35\text{cm}$, τότε σε απόσταση $x=27\text{cm}$ διπλασιάζεται η ένταση του προσπίπτοντος φωτός, ενώ σε απόσταση $x=23\text{cm}$ τριπλασιάζεται. Στη συνέχεια και όμοια με πριν οι μαθητές λαμβάνουν πειραματικές μετρήσεις μεταβάλλοντας την “επιταχύνουσα” τάση από 0V έως 5V με βήμα 0,2V και σχεδιάζουν σε κοινό διάγραμμα $i-V$ τις τρεις γραφικές παραστάσεις για $x=35\text{cm}$, $x=27\text{cm}$ και $x=23\text{cm}$ (διάγραμμα 2).



Διάγραμμα 2: Τρεις γραφικές παραστάσεις $i-V$ για $x=35\text{cm}$, $x=27\text{cm}$ και $x=23\text{cm}$ σε κοινό διάγραμμα.

Συμπεράσματα:

Από τις τρεις γραφικές παραστάσεις στο κοινό διάγραμμα 2, οι μαθητές καθοδηγούνται στο να συμπεράνουν τα εξής:

- Για συγκεκριμένη τιμή έντασης I και συχνότητας f της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας καθώς η “επιταχύνουσα” τάση V αυξάνει από μηδέν έως μια υψηλή θετική τιμή, η ένταση i του φωτορεύματος αυξάνει επίσης από μια μη μηδενική τιμή μέχρι μια μέγιστη τιμή.

μή. Μάλιστα από μια τιμή τάσης και πάνω η ένταση του φωτορεύματος σταθεροποιείται χωρίς πλέον να αυξάνει, γεγονός που υποδηλώνει ότι όλα τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο φθάνουν στην άνοδο.

- Για συγκεκριμένη τιμή έντασης I και συχνότητας f της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας καθώς η “επιβραδύνουσα” τάση V μεταβάλλεται από $0V$ έως $-0,16V$, η ένταση i του φωτορεύματος μειώνεται από μια μη μηδενική τιμή μέχρι την τιμή μηδέν. Η τάση για την οποία το φωτορέυμα μηδενίζεται και η ροή των ηλεκτρονίων σταματά ονομάζεται τάση αποκοπής V_{α} . Για τη μέγιστη κινητική ενέργεια K_{\max} των εκπεμπόμενων από την κάθοδο

ηλεκτρονίων θα ισχύει: $K_{\max} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u_{\max}^2 = e \cdot V_{\alpha}$ (1)

- Για ορισμένη συχνότητα προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας, η ένταση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της έντασης του φωτορεύματος.

- Όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παραμένει η ίδια, η τάση αποκοπής δεν εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας. Και στις τρεις περιπτώσεις $V_{\alpha} = -0,16V$.

3^η Δραστηριότητα:

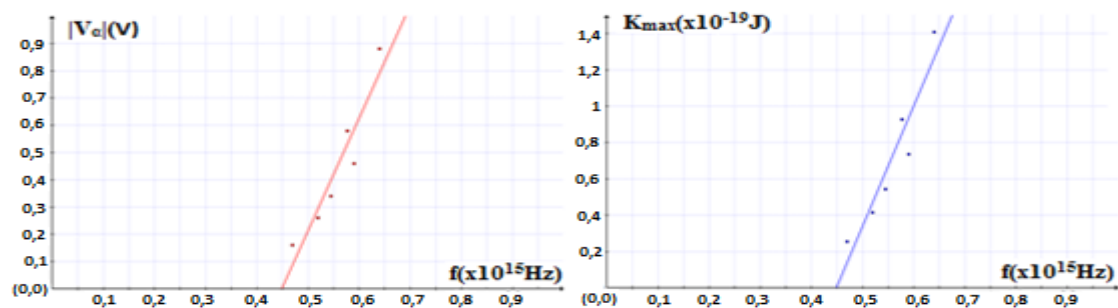
Προετοιμασία συσκευής:

- Η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτοκύτταρου ρυθμίζεται στα 25cm.

- Ρύθμιση για μεσαία ένταση προσπίπτοντος φωτός.

Λήψη μετρήσεων:

Για καθένα από τα έξι υάλινα χρωματικά φίλτρα που διαδοχικά τοποθετούν οι μαθητές στην υποδοχή μετρούν την τάση αποκοπής V_{α} και σχεδιάζουν τη γραφική παράσταση $|V_{\alpha}|=f(f)$ (διάγραμμα 3). Επίσης με βάση τη σχέση (1) σχεδιάζουν και τη γραφική παράσταση $K_{\max}=f(f)$ (διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 3: Γραφική παράσταση $V_{\alpha}=f(f)$

Διάγραμμα 4: Γραφική παράσταση $K_{\max}=f(f)$

Συμπεράσματα:

Τα μεγέθη V_{α} και K_{\max} εξαρτώνται γραμμικά από την f . Επίσης όταν η f είναι μικρότερη από μια ελάχιστη τιμή f_c (οριακή συχνότητα) δεν εξέρχονται ηλεκτρόνια από την κάθοδο άρα δεν παρατηρείται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όσο μεγάλη και αν είναι η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας. Επίσης οι μαθητές κατά τη διάρκεια του πειράματος μεταβάλλουν την ένταση του φωτός και διαπιστώνουν ότι η V_{α} (και επομένως και η K_{\max}) δεν εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας.

4^η Δραστηριότητα:

Προετοιμασία συσκευής:

- Η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτοκύτταρου ρυθμίζεται στα 25cm.
- Ρύθμιση για μεσαία ένταση προσπίπτοντος φωτός.
- Στην υποδοχή τοποθετείται ένα υάλινο χρωματικό φίλτρο της επιλογής των μαθητών.

Πραγματοποίηση πειράματος:

Οι μαθητές παρεμβάλλουν την παλάμη τους μεταξύ της φωτεινής πηγής και της υποδοχής του υάλινου φίλτρου και παρατηρούν άμεση πτώση της έντασης του φωτορεύματος μέχρι μηδενισμού του. Κατόπιν απομακρύνουν την παλάμη τους και διαπιστώνουν άμεση αποκατάσταση του φωτορεύματος (χρόνος απόκρισης της τάξης 10^{-9} s).

Συμπέρασμα:

Οι μαθητές συμπεραίνουν ότι το φωτορέυμα εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με την πρόσπτωση της φωτεινής ακτινοβολίας στην κάθοδο, χωρίς χρονική καθυστέρηση.

Οι πειραματικοί νόμοι του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Οι μαθητές συνοψίζουν τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα συμπληρώνοντας τις προτάσεις στους τέσσερεις παρακάτω νόμους που αποτελούν τους πειραματικούς νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (Τραχανάς, 1991).

1^{ος} Νόμος: Η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος ...*αυξάνεται*... ...*ανάλογα*... με την ένταση της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας.

2^{ος} Νόμος: Η μέγιστη κινητική ενέργεια των εξερχομένων ηλεκτρονίων ...*δεν*... ...*εξαρτάται*... από την ...*ένταση*... της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας, παρά μόνο από τη ...*συχνότητά*... της.

3^{ος} Νόμος: Φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται μόνο όταν η ...*συχνότητα*... της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας είναι ...*μεγαλύτερη*... από μια ελάχιστη τιμή f_c , χαρακτηριστική του υλικού της φωτοκάθοδου. Η f_c ονομάζεται οριακή συχνότητα ή συχνότητα κατωφλίου.

4^{ος} Νόμος: Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν ...*ταυτόχρονα*... με την πρόσπτωση της φωτεινής δέσμης στη φωτοκάθοδο.

Απόπειρα κλασσικής ερμηνείας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Στο σημείο αυτό οι μαθητές βασιζόμενοι στις γνώσεις που έχουν αποκτήσει από την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία καθώς και σε κάποιες βασικές γνώσεις που τους δίνει ο διδάσκων, καθοδηγούνται να διαπιστώσουν κατά πόσο η κλασική ηλεκτροδυναμική μπορεί να εξηγήσει τους πειραματικούς νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Συγκεκριμένα διαπιστώνουν ότι ο 1^{ος} Νόμος ερμηνεύεται από την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία ενώ οι υπόλοιποι τρεις όχι (Τραχανάς, 1991).

Η ευφυής σύλληψη!

Κβαντική ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Το 1905 ο Einstein πρώτος διατύπωσε μια μεγαλοφυή θεωρία που έμελε να ερμηνεύσει με πολύ απλό τρόπο τα «περίεργα» πειραματικά δεδομένα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Ο Einstein βασιζόμενος και επεκτείνοντας τις ιδέες του Max Planck για την κβάντωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, υπέθεσε ότι το φως (και οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό κύ-

μα) συχνότητας f αποτελείται από μια "βροχή" φωτονίων όπου το κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια E που ισούται με $E = h \cdot f$ (2), όπου $h=6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ η σταθερά του Planck. Κατά τον Einstein στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο η εντοπισμένη ενέργεια σε ένα φωτόνιο hf μεταφέρεται ακαριαία και ολόκληρη σε ένα και μόνο ηλεκτρόνιο του μετάλλου της φωτοκάθodu με μια διαδικασία «όλα ή τίποτα», σε αντίθεση με τη συνεχή μεταφορά ενέργειας στη κλασική θεωρία. Συνδυάζοντας ο Einstein την ιδέα αυτή με τη Διατήρηση της Ενέργειας πρότεινε ότι από την ενέργεια hf που απορροφά ένα ηλεκτρόνιο, ένα μέρος χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του ηλεκτρονίου από το μέταλλο (έργο εξαγωγής $W_{\text{εξ}}$), ενώ η υπόλοιπη παραμένει στο ηλεκτρόνιο ως κινητική ενέργεια (μέγιστη κινητική ενέργεια εξαγωγής K_{max}), δηλαδή: $h \cdot f = W_{\text{εξ}} + K_{\text{max}}$ (3). Η σχέση (3) αποτελεί τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein. Η θεωρία αυτή αναδεικνύει τη σωματιδιακή φύση του φωτός.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο οι μαθητές να μπου στα μονοπάτια της σκέψης του Einstein και κυρίως στη σωματιδιακή υπόσταση του φωτός, μέσω του λογισμικού PHET INTERACTIVE SIMULATIONS (<http://phet.colorado.edu/el/>) και του περιβάλλοντος προσομοίωσης "φωτοηλεκτρικό φαινόμενο" (εικόνα 3).



Εικόνα 3: Περιβάλλον προσομοίωσης "φωτοηλεκτρικό φαινόμενο" του λογισμικού PhET.

Μέσω του λογισμικού οι μαθητές παρατηρούν ότι για συγκεκριμένες αρχικές συνθήκες τους πειράματος για κάθε ένα φωτόνιο που προσπίπτει στην κάθοδο, εκπέμπεται και ένα φωτοηλεκτρόνιο από αυτή. Έτσι ενθαρρύνονται να δεχτούν μια διαφορετική φύση του φωτός από αυτή που μέχρι τώρα γνώριζαν και σε ένα επόμενο στάδιο να γνωρίσουν τη θεωρία του Einstein σύμφωνα με την οποία θα κληθούν να ερμηνεύσουν τους τέσσερις πειραματικούς νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (Τραχανάς, 1991).

Ερμηνεία 1^{ου} Νόμου: Όσα περισσότερα φωτόνια προσπίπτουν στη φωτοκάθοδο, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας τόσο περισσότερα φωτοηλεκτρόνια θα εξέρχονται από αυτή. Συνεπώς η ένταση του φωτορεύματος αυξάνεται ανάλογα με την φωτεινή ένταση.

Ερμηνεία 2^{ου} Νόμου: Η φωτοηλεκτρική εξίσωση (3) δείχνει ότι η μέγιστη ταχύτητα των εξερχόμενων ηλεκτρονίων εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι από την έντασή της.

Ερμηνεία 3^{ου} Νόμου: Από την εξίσωση (3) φαίνεται αμέσως ότι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι δυνατό μόνο όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής του μετάλλου. Η οριακή συχνότητα f_c προσδιορίζεται από τη σχέση $hf_c = W_{εξ}$ (4) και η τιμή της εξαρτάται από το συγκεκριμένο μέταλλο.

Ερμηνεία 4^{ου} Νόμου: Τα φωτοηλεκτρόνια εκπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα με τη στιγμή του φωτισμού της μεταλλικής επιφάνειας διότι σύμφωνα με τη σωματιδιακή φύση του φωτός, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια δεν είναι πλέον ισοκατανεμημένη πάνω στο κυματομέτωπο, αλλά συγκεντρωμένη σε μικρά δεμάτια (πακέτα), τα φωτόνια ή κβάντα, καθένα από τα οποία αλληλεπιδρά ακαριαία με ένα από τα ηλεκτρόνια του μετάλλου, στο οποίο μεταφέρει την ορμή και την ενέργειά του.

Υπολογισμός της σταθεράς του Planck, του έργου εξαγωγής του μετάλλου $W_{εξ}$ και της οριακής συχνότητας f_c

- Από την κλίση της ευθείας του διαγράμματος 4, οι μαθητές βρίσκουν ότι $h = 6,616 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$. Από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, άρα το πειραματικό σφάλμα είναι της τάξης του 0,2%!

- Από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση (3) και για οποιοδήποτε ζεύγος τιμών (f , K_{\max}), οι μαθητές υπολογίζουν το έργο εξαγωγής, το οποίο κατά μέσο όρο προκύπτει ότι είναι $W_{εξ} = 2,98 \times 10^{-19} \text{ J}$. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή και τη διεθνή βιβλιογραφία το έργο εξαγωγής του Cs είναι $2,87 \times 10^{-19} \text{ J}$, άρα το πειραματικό σφάλμα είναι της τάξης του 3,8%.

- Από τη σχέση (4) προκύπτει ότι: $f_c = \frac{W_{εξ}}{h} = \frac{2,98 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,616 \times 10^{-34}} = 0,45 \times 10^{15} \text{ Hz}$.

Άρα: $\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0,45 \times 10^{15} \text{ Hz}} = 666 \text{ nm}$

Συζήτηση-επίλογος

Η αλματώδης ανάπτυξη της Φυσικής καθώς και τα τεχνολογικά επιτεύγματα της, καθιστούν πλέον επιτακτική την ανάγκη για την εισαγωγή εννοιών Σύγχρονης Φυσικής στη διδακτέα ύλη του Λυκείου. Έτσι συνέχεια του παρόντος διδακτικού σεναρίου θα μπορούσε να αποτελέσει η φασματική αποτύπωση της ύλης μέσω των φασμάτων εκπομπής και απορρόφησης. Η ομαδοσυνεργική διδασκαλία, καθώς και η αξιοποίηση του σχολικού εργαστηρίου των φυσικών επιστημών σε συνδυασμό με τις ΤΠΕ, μπορούν να αναδείξουν καινοτόμες διδακτικές πρακτικές που είναι ικανές να εισάγουν τους μαθητές ακόμα και στις δύσκολες έννοιες της Κβαντικής Φυσικής. Έτσι σε ένα νέο σχολείο που θα συνδέει τη γνώση με την τεχνολογία και δε θα δίνει έμφαση στην πολυδαίδαλη ασκησιολογία, θα πρέπει να αναδεικνύονται όλες οι καινοτόμες προσπάθειες που λαμβάνουν υπόψη τους τα σύγχρονα διδακτικά εργαλεία και τις αρχές της παιδαγωγικής και διδακτικής επιστήμης.

Βιβλιογραφία

Γραμματικάκης, Γ. (2006). *Η αυτοβιογραφία του φωτός*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

Κασσέτας, Α. (2004). *Το Μήλο και το Κουάρκ*. Αθήνα: Σαββάλας.

- Ματσαγγούρας, Η. (2000). *Ομαδοσυνεργατική διδασκαλία και μάθηση*. Αθήνα: Γρηγόρης.
- Τραχανάς, Σ. (1991). *Κβαντομηχανική Ι*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Χαλκιά, Κ. (2012). *Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες*. Αθήνα: Πατάκης.
- Schaim, H., Dodge, J., Walter, J. (1985). *Εργαστηριακός Οδηγός PSSC Φυσική*, (μετάφραση Παπασταματίου Ν.). Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- Young, H. (1992). *Πανεπιστημιακή Φυσική τόμος Β'*, (μετάφραση από ομάδα πανεπιστημιακών). Αθήνα: Παπαζήσης.