Εικονικά πειράματα Φυσικής για το λύκειο

DRAFT

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΒΕΛΕΝΤΖΑΣ
ΕΔΙΠ
Τομέας Φυσικής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΘΕΟΔΩΝΗΣ
ΕΔΙΠ
Τομέας Φυσικής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2022

Περιεχόμενα πειραματικού οδηγού λυκείου

Πρόλογος

Η ιδέα για την εκπόνηση του παρόντος οδηγού εικονικών πειραμάτων ξεκίνησε από την ανάγκη της, όσο το δυνατόν, κάλυψης με εξ αποστάσεως διδασκαλία των απαιτήσεων των εργαστηριακών μαθημάτων στην ΣΕΜΦΕ του ΕΜΠ, κατά την περίοδο της καραντίνας λόγω του COVID-19. Εκπονήσαμε ένα βιβλίο με πειράματα και δραστηριότητες που απευθυνόταν σε σπουδαστές (εκδόσεις Κάλλιπος). Στην ίδια λογική σκεφτήκαμε να δημιουργήσουμε και ένα οδηγό πειραμάτων για το λύκειο. Ασφαλώς η εργαστηριακή εργασία με πραγματικές συσκευές και υλικά δεν μπορεί να αναπληρωθεί πλήρως από τα εικονικά πειράματα. Συνεπώς, δεν προτείνουμε την χρήση αποκλειστικά εικονικών πειραμάτων, εκτός και αν υπάρχουν ειδικές συνθήκες , όπως στην καραντίνα, που τα παιδιά δεν μπορούν να εργαστούν στις εγκαταστάσεις του σχολείου ή δεν υπάρχει ο απαραίτητος εξοπλισμός. Είναι δυνατόν όμως τα πειράματα του παρόντος οδηγού να αξιοποιηθούν παράλληλα με το πραγματικό εργαστήριο για διάφορους σκοπούς. Μπορούν για παράδειγμα να δοθούν ως εργασία στο σπίτι για περαιτέρω εξοικείωση των παιδιών με την συλλογή και ανάλυση δεδομένων ή να χρησιμοποιηθούν από τον εκπαιδευτικό στο σχολείο σε εισαγωγικά μαθήματα σχετικά με την επεξεργασία και την παρουσίαση των μετρήσεων. Ακόμα και κάποια από αυτά τα πειράματα θα ήταν ωφέλιμο να δοθούν στους μαθητές πριν την πραγματοποίηση του αντίστοιχου πραγματικού πειράματος για την προετοιμασία τους ή ακόμα και για την κατανόηση του ρόλου των μοντέλων.

Για τη δημιουργία των εικονικών πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν διάφορα λογισμικά όπως το Interactive Physics (IP) ή τα πειράματα Phet. Τα πειράματα μετατράπηκαν σε βίντεο και ο εκπαιδευόμενος με παρατήρηση και χειρισμό καρέ - καρέ του βίντεο μπορεί να πάρει μετρήσεις. Έγινε η επιλογή να καταγραφούν οι προσομοιώσεις ως βίντεο για τους ακόλουθους λόγους:

- Όλοι οι μαθητές/τριες ενδέχεται να μην μπορούν να εγκαταστήσουν τα λογισμικά στις συσκευές τους,

- Στα βίντεο, εμφανίζονται μόνο τα απαραίτητα και επιλεγμένα από εμάς όργανα μέτρησης αντί για όλα τα εργαλεία που διαθέτει το εκάστοτε λογισμικό, έτσι ώστε οι εκπαιδευόμενοι να εκτελούν τις μετρήσεις τους με αντίστοιχα σφάλματα. Για παράδειγμα, σε ένα από τα βίντεο, ένα σώμα κινείται παράλληλα με έναν χάρακα και εμφανίζεται ένα χρονόμετρο. Δεν παρουσιάζονται άλλα διαθέσιμα από το λογισμικό όργανα μέτρησης όπως για τη θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση κ.α. Επομένως, σταματώντας το βίντεο σε ένα καρέ, οι εκπαιδευόμενοι θα πρέπει να είναι σε θέση να μετρήσουν τη θέση από τον χάρακα και να γράψουν τη μέτρηση με τα σωστά σημαντικά ψηφία,

- Είναι δυνατόν να προγραμματιστούν κάποια συστηματικά σφάλματα στο πείραμα που πρέπει να ανακαλύψουν οι μαθητές/τριες, και

- Προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν από πιθανές αλλαγές ή καταργήσεις στο λογισμικό αποφεύγονται, όπως για παράδειγμα έγινε πρόσφατα με το Flash.

Ελπίζουμε εκπαιδευτές και εκπαιδευόμενοι στη Φυσική να βρουν χρήσιμο αυτό τον οδηγό και κάθε πρόταση για τη βελτίωσή του ή για διορθώσεις επιμέρους σημείων είναι όχι μόνο ευπρόσδεκτη αλλά και επιθυμητή. Για το σκοπό αυτό μπορούν οι χρήστες του οδηγού να επικοινωνούν με τους συγγραφείς μέσω email.

Οι συγγραφείς

Αθανάσιος Βελέντζας (avelentz@gmail.com)
Ιωάννης Θεοδώνης (ioannis.theodonis@gmail.com)

Η μέτρηση στη φυσική και η αβεβαιότητά της

<u>Γενικά</u>

Η λήψη μετρήσεων είναι μια από τις θεμελιώδεις επιστημονικές διαδικασίες.

Η μέτρηση αποσκοπεί στον καθορισμό της τιμής ενός φυσικού μεγέθους σχετικά με μια ορισμένη μονάδα μέτρησης.

Το αποτέλεσμα της μέτρησης εκφράζεται με ένα αριθμό και την αντίστοιχη μονάδα μέτρησης. Ο αριθμός δείχνει τη σχέση του μετρούμενου μεγέθους με την μονάδα μέτρησης.

Το αποτέλεσμα της μέτρησης δεν συμπίπτει με την «πραγματική» τιμή του μεγέθους που είναι άγνωστη. Σε μία μέτρηση ενυπάρχει μια αναπόφευκτη «αβεβαιότητα» και έχουμε ένα «σφάλμα».

Διεθνώς ο όρος *accuracy* (και πολλές φορές με την ίδια σημασία ο όρος *validity*) χρησιμοποιείται για να εκφράσουμε το πόσο πλησίον της πραγματικής τιμής είναι το αποτέλεσμα της μέτρησης. Ο όρος *precision* (και πολλές φορές με την ίδια σημασία ο όρος *reliability*) χρησιμοποιείται για να εκφράσουμε το πόσο μικρή διασπορά έχουμε στο αποτέλεσμα διαδοχικών μετρήσεων ενός φυσικού μεγέθους. Στην ελληνική βιβλιογραφία κάποιοι συγγραφείς χρησιμοποιούν τον όρο *ορθότητα* για το *accuracy* και τον όρο *ακρίβεια* για το *precision*, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν τον όρο *ακρίβεια* για το *accuracy* και τον όρο *αξιοπιστία* για το *precision* θεωρώντας ότι έχει την ίδια σημασία με τον όρο *reliability*.

<u>Σφάλμα μέτρησης</u>

Απόλυτο σφάλμα μέτρησης ορίζεται η διαφορά της μετρήσιμης τιμής (x) ενός μεγέθους από την πραγματική τιμή του (x_o)

$$e = |x - x_o| \quad (1)$$

Το *% σχετικό σφάλμα* ορίζεται ως το % ποσοστό του απόλυτου σφάλματος επί της πραγματικής τιμής του μεγέθους και δίνει

$$\sigma = \frac{|x-x_o|}{x_o} 100\% \quad (2)$$

Στην πράξη στο εργαστήριο, προκειμένου να εκτιμήσουμε πόσο καλό (ορθό) είναι το αποτέλεσμα μιας μέτρησης ή γενικότερα το αποτέλεσμα ενός εργαστηριακού υπολογισμού, επειδή δεν ξέρουμε την πραγματική τιμή (x_0), συγκρίνουμε το αποτέλεσμα (x) με αυτό της βιβλιογραφίας (x_α), το οποίο ονομάζεται αποδεκτή τιμή και που θεωρούμε ότι είναι η ορθότερη ή σωστότερα η τιμή με την μικρότερη αβεβαιότητα.

$$\sigma = \frac{|x-x_\alpha|}{x}100\% \quad (3)$$

Παράδειγμα: Έστω δύο μαθητές Α, Β εκτέλεσαν ένα πείραμα υπολογισμού της επιτάχυνσης της βαρύτητας εκτελώντας κάποιες μετρήσεις. Το αποτέλεσμα του μαθητή Α ήταν 9,98m/s^2, ενώ του Β ήταν 9,71m/s^2. Η βιβλιογραφία στον συγκεκριμένο τόπο δίνει την τιμή 9,81m/s^2. Εφαρμόζοντας την προηγούμενη σχέση (3) για κάθε μαθητή έχουμε

$$\sigma_A = \frac{|9{,}98-9{,}81|}{9{,}81}100\% = 1{,}73\%$$

$$\sigma_B = \frac{|9{,}71-9{,}81|}{9{,}81}100\% = 1{,}02\%$$

Αφού $\sigma_B<\sigma_A$ θεωρούμε καλύτερο το αποτέλεσμα του Β μαθητή.

<u>Είδη σφαλμάτων</u>

Συστηματικά σφάλματα: Παραμένουν αμετάβλητα σε διαδοχικές μετρήσεις. Οφείλονται κυρίως σε ατέλεια των οργάνων μέτρησης ή της μεθόδου που χρησιμοποιείται, αλλά μπορεί να οφείλονται και στον ίδιο τον πειραματιστή.

Τυχαία σφάλματα: Οφείλονται σε διάφορους απρόβλεπτους παράγοντες που μεταβάλλονται τυχαία με το χρόνο και μπορεί να είναι αρνητικά ή θετικά.

Λαμβάνοντας υπόψη διάφορες πηγές σφαλμάτων μπορεί να μειωθούν με κατάλληλες παρεμβάσεις, αλλά δεν μηδενίζονται.

<u>Μέση τιμή μετρήσεων</u>

Στην πράξη για τη μείωση των τυχαίων σφαλμάτων μπορεί μια μέτρηση να επαναληφθεί πολλές φορές και στη συνέχεια ως αποτέλεσμα να θεωρήσουμε τη μέση τιμή αυτών των μετρήσεων. Η μέση τιμή $\bar{x}$, των αποτελεσμάτων $x_1, x_2, \ldots x_\nu$ μιας μέτρησης που επαναλαμβάνεται ν φορές δίνεται από τη σχέση

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_\nu}{\nu} \tag{4}$$

Η μέση τιμή είναι η καλύτερη εκτίμηση για την πραγματική τιμή x_o που μπορούμε να κάνουμε στην περίπτωση των τυχαίων σφαλμάτων.

Εξήγηση: Μπορούμε να γράψουμε

$$x_1 = x_o + e_1, \;\; x_2 = x_o + e_2, \;\; \ldots \;\; x_\nu = x_o + e_\nu$$

όπου e_1, $e_2, \ldots$ e_ν τα τυχαία σφάλματα τα οποία μπορεί να είναι θετικά ή αρνητικά. Η σχέση (4) τότε γίνεται

$$\bar{x} = x_o + \frac{e_1 + e_2 + \cdots + e_\nu}{\nu}$$

Θεωρώντας ότι τα τυχαία σφάλματα παίρνουν με τις ίδιες πιθανότητες θετικές και αρνητικές τιμές, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος ν τόσο το κλάσμα πλησιάζει στο μηδέν και άρα η μέση τιμή προσεγγίζει την πραγματική.

Αβεβαιότητα μέτρησης

Η αβεβαιότητα αποτελεί αναπόφευκτο στοιχείο μιας μέτρησης. Για να αποκτήσει νόημα μια μέτρηση πρέπει να συνοδεύεται από τη γνώση της αβεβαιότητάς της. Με άλλα λόγια, ο πειραματιστής πρέπει να έχει εκτίμηση του φάσματος τιμών μεταξύ των οποίων βρίσκεται η πραγματική τιμή του φυσικού μεγέθους που μετρά. Προφανώς πρέπει να γίνεται προσπάθεια για την μείωση της αβεβαιότητας σε μια μέτρηση, η οποία όμως δεν μπορεί να μηδενιστεί.

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης πρέπει να γράφεται στη μορφή

$$x \pm \Delta x$$

όπου x η καλύτερα εκτιμώμενη τιμή για το μετρούμενο μέγεθος (για επαναλαμβανόμενη μέτρηση η $\bar{x}$) και Δx η απόλυτη τιμή της αβεβαιότητας. Δηλαδή, με αυτή τη γραφή δηλώνεται ότι η πραγματική τιμή του μεγέθους x_o, με πολύ μεγάλη πιθανότητα, είναι πλησίον της τιμής x και βρίσκεται μέσα στην περιοχή τιμών από x-Δx έως x+Δx.

Στην πράξη χρησιμοποιείται συχνά και η *σχετική αβεβαιότητα*

$$\frac{\Delta x}{|x|}$$

ή η *% σχετική αβεβαιότητα*

$$\frac{\Delta x}{|x|}100\%$$

με τις οποίες μπορεί να γίνει σύγκριση αβεβαιοτήτων μεταξύ μετρήσεων. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της σχετικής αβεβαιότητας τόσο ακριβέστερη λέμε ότι είναι η μέτρηση.

Παρατήρηση: Οι όροι «σφάλμα» και «αβεβαιότητα» καλόν είναι να μην συγχέονται. Όπως αναφέρθηκε «σφάλμα» είναι η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους, ενώ η αβεβαιότητα είναι μια «ποσοτικοποίηση» της αμφιβολίας για το αποτέλεσμα μέτρησης.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέτρησης

Προηγουμένως πρέπει να συζητηθούν τα σημαντικά ψηφία και η στρογγυλοποίηση.

Σημαντικά ψηφία (ΣΨ)

Είναι τα ψηφία της αριθμητικής τιμής ενός φυσικού μεγέθους που γνωρίζουμε ότι είναι λίγο πολύ σωστά και συμβατά με την ακρίβεια που γνωρίζουμε την τιμή του. Μεγαλύτερη πιθανότητα να μην είναι σωστό έχει το τελευταίο ψηφίο.

Είναι όλα τα ψηφία εκτός από τα συνεχόμενα μηδενικά στην αρχή του αριθμού.

Παραδείγματα ΣΨ

Ένα ΣΨ: 3 - 0,3 – 0,003 – 3.10^{5} - 3.10^{-5}

Δύο ΣΨ: 15 – 0,18 – 0,020 – $2,0.10^{-3}$ – $0,99.10^{6}$

Τρία ΣΨ: 0,183 – 10,0 - 0,0201 – $2,00.10^{3}$ – $0,991.10^{6}$

Παρατήρηση: Σε περιπτώσεις με μηδενικά στο τέλος χωρίς κόμμα π.χ. 100 είναι ένα ΣΨ (κάποιοι το γράφουν θεωρώντας 3ΣΨ), για να είναι 3 ΣΨ γράφουμε $1,00.10^{2}$ γι' αυτό καλά είναι σε τέτοιες περιπτώσεις να δηλώνεται ρητά ο αριθμός των ΣΨ.

Πράξεις με σημαντικά ψηφία

Όταν το αποτέλεσμα προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό / διαίρεση δύο ή περισσοτέρων αριθμών, τότε αυτό δε μπορεί να έχει περισσότερα σημαντικά ψηφία από τον αριθμό που έχει τα λιγότερα. Για παράδειγμα (-3,25Χ0,21) / 0,8 = - 0,9

Όταν το αποτέλεσμα προκύπτει από την πρόσθεση / αφαίρεση δυο ή περισσότερων αριθμών τότε βρίσκουμε την ελάχιστη τάξη των ψηφίων των αριθμών και επιλέγουμε τη μέγιστη μεταξύ αυτών. Αυτή θα είναι η ελάχιστη τάξη ψηφίων του αποτελέσματος. Για παράδειγμα 10,001 + 0,0003 - 0,85 = 9,15

Στρογγυλοποίηση

Όταν θέλουμε να στρογγυλοποιήσουμε ένα αποτέλεσμα σε μια τιμή με ορισμένο αριθμό ΣΨ τότε ακολουθούμε τους παρακάτω κανόνες.

Κανόνας 1: Αν το δεξιότερο από το τελευταίο ΣΨ είναι 0,1,2,3,4 παραλείπεται.

Κανόνας 2: Αν το δεξιότερο από το τελευταίο ΣΨ είναι 5,6,7,8,9 τότε το τελευταίο ΣΨ αυξάνεται κατά 1.

Παραδείγματα

2 ΣΨ: $1,42 \cong 1,4$ ή $1,46 \cong 1,5$

3 ΣΨ: $1,432.10^3 \cong 1,43.10^3$ ή $1,506.10^3 \cong 1,51.10^3$

Παρατήρηση: Για μια πιο λεπτομερή επεξεργασία μετρήσεων αν το δεξιότερο από το τελευταίο ΣΨ είναι το 5 τότε ελέγχουμε αν μετά το 5 ακολουθούν και άλλα ψηφία που δεν είναι μηδέν. Αν ακολουθούν (κάτι που είναι και το πιο συνηθισμένο) τότε εφαρμόζεται ο παραπάνω κανόνας 2. Στην περίπτωση που μετά το 5 δεν ακολουθούν άλλα μη μηδενικά ψηφία ακολουθείται η παρακάτω σύμβαση. Αν το τελευταίο ΣΨ είναι άρτιος ακολουθείται ο κανόνας 1, ενώ αν είναι περιττός ο κανόνας 2. Αυτή η παρατήρηση στο πλαίσιο του σχολικού εργαστηρίου ίσως δεν έχει έννοια εφαρμογής και αρκούν οι δύο προαναφερόμενοι κανόνες.

Η παρουσίαση του αποτελέσματος μέτρησης/μετρήσεων

Για τη χρήση στο σχολικό εργαστήριο όπου συνήθως λαμβάνεται περιορισμένος αριθμός μετρήσεων η αβεβαιότητα Δx δεν έχει έννοια να δίνεται με περισσότερα από ένα ΣΨ. Τότε στην παρουσίαση του αποτελέσματος και η μέση τιμή θα δίνεται και αυτή με την ακρίβεια της αβεβαιότητας. Για παράδειγμα, σε μία μέτρηση μήκους έχουμε βρει $\bar{x}$=24,17m και με τον υπολογιστή έχουμε βρει (όπως θα δούμε στη συνέχεια) Δx=0,423m. Τότε στρογγυλοποιούμε την αβεβαιότητα με 1ΣΨ, οπότε προκύπτει Δx=0,4m και άρα η μέση τιμή θα στρογγυλοποιηθεί στο ένα δέκατο του μέτρου, δηλαδή $\bar{x}$=24,2m. Τελικά γράφουμε το αποτέλεσμα στη μορφή (24,2±0,4)m.

Περιπτώσεις υπολογισμού αβεβαιότητας

Μέτρηση με αναλογικό όργανο

Τα αναλογικά όργανα έχουν κλίμακα μέτρησης και δείκτη. Το όργανο δεν αναγράφει το αποτέλεσμα της μέτρησης αλλά ο πειραματιστής το προσδιορίζει με εκτίμηση από τη θέση του δείκτη. Αν ο πειραματιστής εκτιμά ότι η τιμή που «διαβάζει» είναι μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής x_{min} και μιας μέγιστης x_{max}, τότε η εκτίμηση για τη μέτρηση είναι

$$x = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}$$

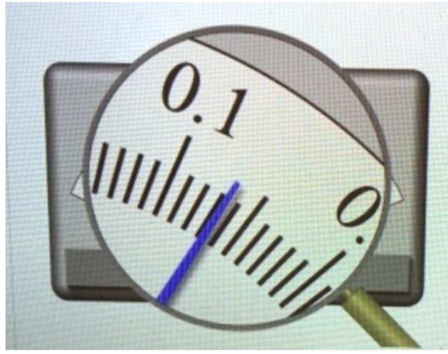
Και η αβεβαιότητα

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

Το αποτέλεσμα της μέτρησης γράφεται $x \pm \Delta x$

Ένας πρακτικός κανόνας είναι ο πειραματιστής να γράφει ως x την καλύτερη κατ' αυτόν εκτίμηση και ως Δx να θεωρεί το μισό της απόστασης μεταξύ των δύο πλησιέστερων γραμμών της κλίμακας του οργάνου.

Για παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα η βελόνα είναι πιο κοντά στο 0,13 και το μισό της απόσταση ανάμεσα σε δύο γραμμές της κλίμακας του οργάνου είναι 0,005 άρα η τελική μέτρηση πρέπει να γραφεί ως 0,130±0,005. Παρατηρήστε ότι έχουμε προσθέσει ένα μηδέν στο τέλος της μέτρησης γιατί πρέπει η μέτρηση να δίνεται με την ακρίβεια(δεκαδικά ψηφία) της αβεβαιότητας.



Μέτρηση με ψηφιακό όργανο

Σε ένα ψηφιακό όργανο αναγράφεται σε μία οθόνη το αποτέλεσμα της μέτρησης με ένα αριθμό. Για παράδειγμα, η ένδειξη μιας ηλεκτρονικής ζυγαριάς κατά τη ζύγιση ενός σώματος μπορεί να είναι 24,2g. Αν δεν έχουμε κάποια πληροφορία από τον κατασκευαστή του οργάνου δεν γνωρίζουμε αν το τελευταίο ψηφίο προκύπτει από στρογγυλοποίηση για να υποθέσουμε ότι η τιμή είναι μεταξύ 24,15g και 24,24 g ή είναι το τελευταίο ψηφίο της ακρίβειας του οργάνου, δηλαδή η μέτρηση να είναι μεταξύ του 24,20 g και του 24,29 g. Για το λόγο αυτό, καλά είναι σε αυτή την περίπτωση να θεωρούμε την αβεβαιότητα όσο μια μονάδα του τελευταίου ψηφίου της ένδειξης. Δηλαδή, στο παράδειγμα θα γράφαμε το αποτέλεσμα ως (24,2 ± 0,1)g.

Παρατήρηση: Στα ψηφιακά αλλά και στα αναλογικά όργανα πολλές φορές δίνει ο κατασκευαστής την αβεβαιότητα, είτε απολύτως, είτε ποσοστιαία. Σε αυτές τις περιπτώσεις καλόν είναι να λαμβάνεται αυτή υπόψη γιατί σε αρκετές περιπτώσεις είναι ακόμα μεγαλύτερη από ότι εκτιμάμε με τους παραπάνω τρόπους.

Επανάληψη μέτρησης

Όπως ήδη αναφέρθηκε, για μείωση των τυχαίων σφαλμάτων επαναλαμβάνεται η μέτρηση αρκετές φορές. Τότε, ως καλύτερη εκτίμηση για την τιμή του μεγέθους που μετριέται, θεωρείται η μέση τιμή των μετρήσεων που έγιναν. Υπάρχουν διάφορα εργαλεία στατιστικής για το προσδιορισμό της αβεβαιότητας, όπως η συνήθως χρησιμοποιούμενη *τυπική απόκλιση της μέσης τιμής*. Στο επίπεδο του εργαστηρίου της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης για τον προσδιορισμό της απροσδιοριστίας Δx θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η *μέση απόκλιση* (mean deviation).

Αναλυτικότερα, έστω ότι μια μέτρηση επαναλήφθηκε ν φορές και το αποτέλεσμα των μετρήσεων ήταν $x_1, x_2, \ldots x_\nu$, τότε υπολογίζουμε

(α) την μέση τιμή, από τη σχέση (4)

(β) την απόλυτη τιμή της διαφοράς κάθε μέτρησης i, από την μέση τιμή (απόκλιση)

$$|x_i - \bar{x}|$$

(γ) την μέση απόκλιση, από την παρακάτω σχέση (5)

$$\Delta x = \frac{|x_1-\bar{x}|+|x_2-\bar{x}|+\cdots+|x_\nu-\bar{x}|}{\nu} \qquad (5)$$

Το τελικό αποτέλεσμα γράφεται ως $\bar{x} \pm \Delta x$

<u>Η διάδοση της αβεβαιότητας</u>

Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε πειραματικά ένα μέγεθος f το οποίο προκύπτει από μια γνωστή σχέση δύο ή περισσότερων άλλων μεγεθών $x,y,\ldots$ των οποίων μπορούμε να μετρήσουμε πειραματικά τις τιμές. Για παράδειγμα, σε ένα πείραμα μετράμε το διάστημα που διανύει είναι σώμα και τον αντίστοιχο χρόνο και θέλουμε να υπολογίσουμε την μέση ταχύτητα, που ξέρουμε ότι ορίζεται ως το πηλίκο των παραπάνω μεγεθών. Τίθεται όμως το ερώτημα: Αν $\Delta x, \Delta y, \ldots$ οι τιμές της αβεβαιότητας για τα μετρήσιμα μεγέθη, ποια είναι αβεβαιότητα Δf για το μέγεθος f; Υπάρχει μια γενική μαθηματική σχέση με τη βοήθεια της οποίας γίνεται ο υπολογισμός, ωστόσο στην περίπτωση του εργαστηρίου της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης μπορούμε να υπολογίσουμε το Δf προσεγγιστικά σε κάποιες περιπτώσεις.

(1) Η περίπτωση του αθροίσματος ή της διαφοράς

Αν είναι $f=x+y$ ή $f=x-y$ τότε έχουμε ότι $\Delta f= \Delta x+\Delta y$

Πράγματι είναι

$$(x\pm\Delta x)+(y\pm\Delta y)= (x+y) \pm (\Delta x +\Delta y) \qquad (6)$$

και

$$(x\pm \Delta x) - (y\pm \Delta y)= (x-y)\pm (\Delta x +\Delta y) \qquad (7)$$

(2) Η περίπτωση του γινομένου φυσικού μεγέθους επί σταθερά

Αν είναι f=α*x, όπου α μία σταθερά τότε έχουμε ότι Δf= |α|*Δx

Πράγματι μπορούμε να γράψουμε

$$\alpha(x \pm \Delta x) = \alpha x \pm |\alpha| \Delta x \quad (8)$$

(3) Η περίπτωση του γινομένου ή του πηλίκου

Αν είναι f=x*y ή f=x/y τότε έχουμε ότι Δf= $|f|(\frac{\Delta x}{|\chi|} + \frac{\Delta y}{|y|})$

Πράγματι θεωρώντας αμελητέο το γινόμενο Δx*Δy μπορούμε να γράψουμε

$$(x \pm \Delta x)(y \pm \Delta y) = (xy) \pm |xy|(\frac{\Delta x}{|\chi|} + \frac{\Delta y}{|y|}) \quad (9)$$

και

$$(x \pm \Delta x):(y \pm \Delta y) = (x:y) \pm |x:y|(\frac{\Delta x}{|\chi|} + \frac{\Delta y}{|y|}) \quad (10)$$

(4) Η περίπτωση μεγέθους υψωμένο στο τετράγωνο

Αν είναι f=x^2 τότε έχουμε ότι Δf=2|x|Δx

Πράγματι ανάλογα με την σχέση (9), θεωρώντας x=y μπορούμε να γράψουμε

$$(x \pm \Delta x)^2 = \chi^2 \pm 2|x|\Delta x \quad (11)$$

Παρατήρηση: Γενικά αν $f=x^n y^m z^k\ldots$ μπορούμε με καλή προσέγγιση να γράφουμε

$$\frac{\Delta f}{|f|} = \left|n\,\frac{\Delta x}{x}\right| + \left|m\,\frac{\Delta y}{y}\right| + \left|k\,\frac{\Delta z}{z}\right| + \ldots$$

Γραφικές παραστάσεις

Η χρήση των γραφικών παραστάσεων

Αρκετές φορές στην εργαστηριακή εργασία απαιτείται η αναπαράσταση των αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων. Μια γραφική παράσταση μπορεί να αναδείξει χαρακτηριστικά που δεν είναι εμφανή σε ένα πίνακα τιμών και να εξαχθούν συμπεράσματα. Στο σχολικό εργαστήριο μια γραφική παράσταση κυρίως χρησιμοποιείται για τα εξής:

1) Σε γραμμικές σχέσεις μπορεί να υπολογισθεί πειραματικά η τιμή φυσικών μεγεθών από την κλίση και τα σημεία τομής της γραφικής παράστασης με τους άξονες. Για παράδειγμα, κατά τη μελέτη στο εργαστήριο μιας ομαλά επιταχυνόμενης κίνησης με χρήση φωτοπυλών σχεδιάζεται η γραφική παράσταση της ταχύτητας με το χρόνο υ-t. Γνωρίζοντας την αντίστοιχη θεωρητική σχέση $\upsilon=\upsilon_o+\alpha t$, μπορούμε από την κλίση να υπολογίσουμε την τιμή της επιτάχυνσης α και από το σημείο τομής της γραφικής παράστασης με τον άξονα των ταχυτήτων να προσδιορίσουμε την αρχική ταχύτητα υ_o.

2) Μπορούμε να προσδιορίσουμε την τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής την οποία δεν μπορούμε να μετρήσουμε πειραματικά μέσω της τιμής της εξαρτώμενης μεταβλητής από την γραφική παράσταση. Για παράδειγμα μπορούμε να βαθμονομήσουμε ένα ελατήριο για να χρησιμοποιείται ως δυναμόμετρο. Χαράσσουμε την γραφική παράσταση του βάρους που αναρτούμε από το ελατήριο συναρτήσει της επιμήκυνσής του με τη βοήθεια βαριδιών γνωστού βάρους. Στη συνέχεια αναρτώντας από το ελατήριο ένα σώμα με άγνωστο βάρος μετρούμε την επιμήκυνση και με τη βοήθεια του διαγράμματος υπολογίζεται η τιμή του βάρους του σώματος.

3) Για να επαληθευτεί ή να διερευνηθεί η θεωρητική σχέση μεταξύ δύο μεγεθών. Αν για παράδειγμα διαπιστωθεί ότι η γραφική παράσταση της ταχύτητας με το χρόνο σε μια κίνηση είναι ευθεία συμπεραίνουμε ότι η κίνηση είναι ομαλά επιταχυνόμενη. Επειδή οι σχέσεις μεταξύ δύο μεγεθών, που διερευνούμε, δεν είναι γραμμικές και με τις καμπύλες δεν είναι εύκολο να προσδιορίσουμε τη σχέση, την κάνουμε γραμμική αλλάζοντας τις μεταβλητές. Για να γίνει κατανοητό θα αναφέρουμε δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Παράδειγμα 1: Έστω μελετάμε μία κίνηση στο εργαστήριο με φωτοπύλες λαμβάνοντας τιμές για τη θέση x και το χρόνο t και θέλουμε να διαπιστώσουμε ότι είναι ομαλά επιταχυνόμενη ή θεωρώντας ότι είναι ομαλά επιταχυνόμενη να υπολογίσουμε την επιτάχυνση α. Η θεωρητική σχέση είναι

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

Θέτουμε X=x και Y=t^2, οπότε προκύπτει η γραμμική σχέση

$$X = \frac{1}{2}aY$$

Στη συνέχεια κάνουμε τη γραφική παράσταση X-Y προκειμένου να βγάλουμε τα συμπεράσματά μας, δηλαδή ότι η σχέση είναι γραμμική ή από την κλίση $\alpha/2$ να υπολογισθεί η επιτάχυνση.

Παράδειγμα 2: Έστω μελετάμε την ταλάντωση απλού εκκρεμούς λαμβάνοντας τιμές για την περίοδο T και το μήκος L προκειμένου να υπολογίσουμε την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας g. Η παρακάτω θεωρητική σχέση μεταξύ T και L δεν είναι γραμμική.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Φέρνουμε τη σχέση στη μορφή

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g}L$$

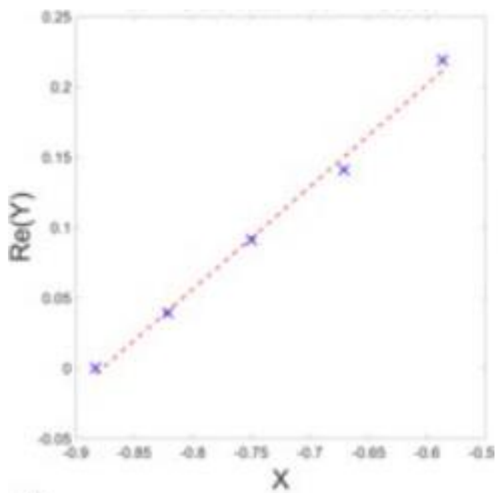
Θέτουμε Y=T^2 και κάνουμε τη γραφική παράσταση της γραμμικής σχέσης Y-L, η κλίση της οποίας είναι $4\pi^2/g$ και άρα μπορεί να υπολογισθεί η τιμή του g.

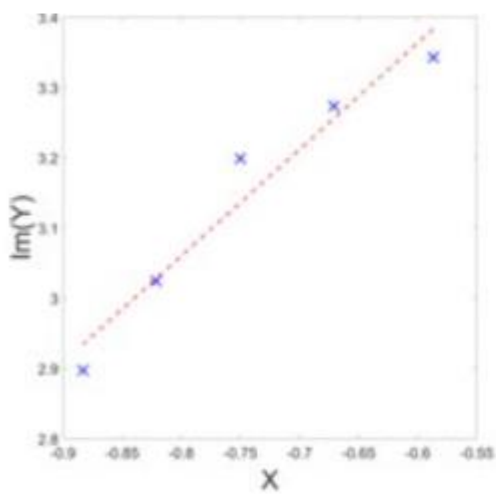
Κανόνες για το σωστό σχεδιασμό των γραφικών παραστάσεων

Βήμα 1: Πάνω σε χαρτί μιλιμετρέ επιλέγουμε τους δύο άξονες. Στον οριζόντιο άξονα (άξονας τετμημένων) τοποθετούμε την ανεξάρτητη μεταβλητή γράφοντας το όνομα (ή το σύμβολο) του φυσικού μεγέθους μαζί με την μονάδα στην οποία μετρήθηκε, για παράδειγμα t(s) ή t/s. Στον κατακόρυφο άξονα (άξονας τεταγμένων) τοποθετούμε την εξαρτημένη μεταβλητή, για παράδειγμα υ(m/s).

Βήμα 2: Βαθμονομούμε τους δύο άξονες. Οι υποδιαιρέσεις καλό είναι να αντιστοιχούν σε 1, 2, 5 μονάδες ή αντίστοιχα πολλαπλάσια σε δυνάμεις του 10. Δεν είναι ανάγκη να αρχίζουν οι άξονες από το μηδέν, αν οι τιμές βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από αυτό. Επάνω σε κάθε άξονα σημειώνουμε τις τιμές της κλίμακας όχι όμως και τις τιμές των πειραματικών μετρήσεων. Η εκλογή των κλιμάκων για τους δύο άξονες πρέπει να είναι τέτοια, ώστε τα πειραματικά σημεία να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος από το χαρτί σχεδίασης.

Βήμα 3: Αναπαριστούμε τα ζεύγη τιμών. Σε κάθε ζεύγος τιμών του πίνακα μετρήσεων αντιστοιχεί ένα πειραματικό σημείο. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορα σύμβολα για τα σημεία όπως σταυρός, τελεία, κυκλάκι ή τετραγωνάκι. Συνδέουμε τα πειραματικά σημεία με ομαλή γραμμή και όχι τεθλασμένη. Όταν δεν μπορούμε να φέρουμε ευθεία γραμμή που να διέρχεται από τα σημεία, τότε χαράσσουμε την ευθεία γραμμή που προσεγγίζει τα περισσότερα και τα υπόλοιπα τα κατανέμει ισόρροπα από τη μια και την άλλη πλευρά.





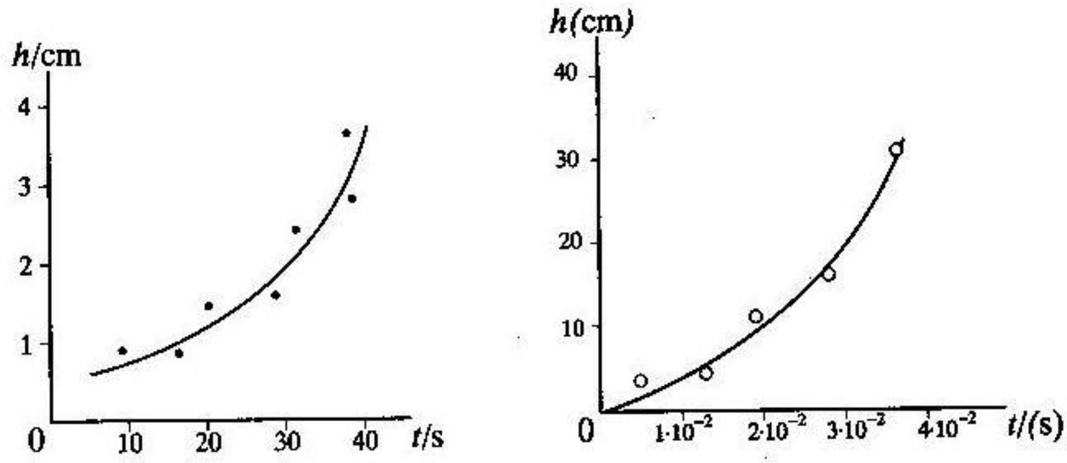
Εύρεση κλίσης ευθείας

Η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει καλύτερα τα δεδομένα σας, υπολογίζεται από δύο σημεία της γραφικής παράστασης που βολεύουν στην ανάγνωση τιμών και όχι από πειραματικά ή πειραματικό σημείο. Έστω ότι έχουμε γραφική παράσταση που παριστά μια γραμμική σχέση y-x. Επιλέγουμε δύο σημεία A(x_1,y_1) και B(x_2,y_2) της ευθείας που βολεύουν ώστε να «διαβάζουμε καλύτερα τις συντεταγμένες και γράφουμε

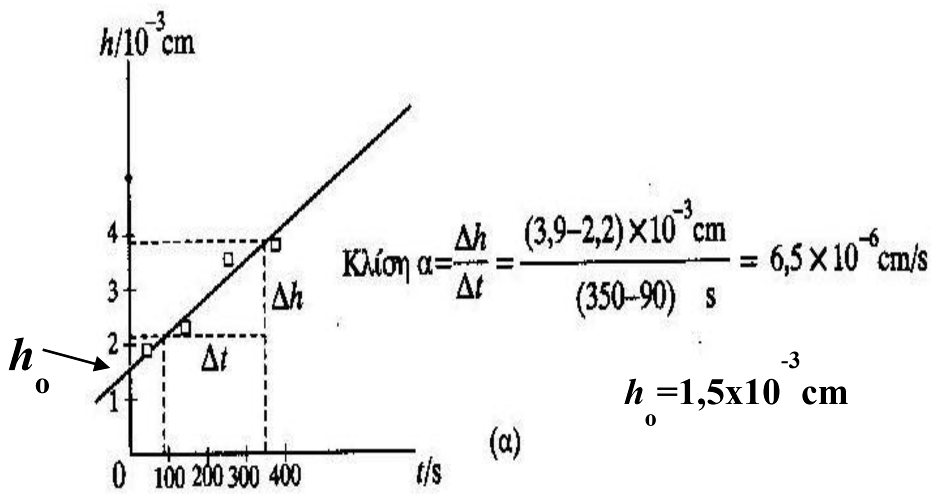
$$\text{Κλίση}=\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$$

Η κλίση γενικά δεν παριστάνει εφαπτομένη γωνίας. Όταν τα δυο μεγέθη είναι διαφορετικά (έχουν διαφορετικές διαστάσεις) τότε το πηλίκο τους δεν είναι αδιάστατο μέγεθος, άρα δεν μπορεί να αντιστοιχηθεί κατά μοναδικό τρόπο μια εφαπτομένη γωνίας. Για παράδειγμα μια μονάδα μήκους στον άξονα y μπορεί να παριστά 30m, ενώ μια μονάδα μήκους στον άξονα x να παριστά 2s. Τότε η κλίση μιας ευθείας 30m/2s=15m/s θα αντιστοιχούσε σε εφαπτομένη γωνίας 45^o δηλαδή σε 1.

Παρατίθενται σχήματα για κατανόηση των παραπάνω



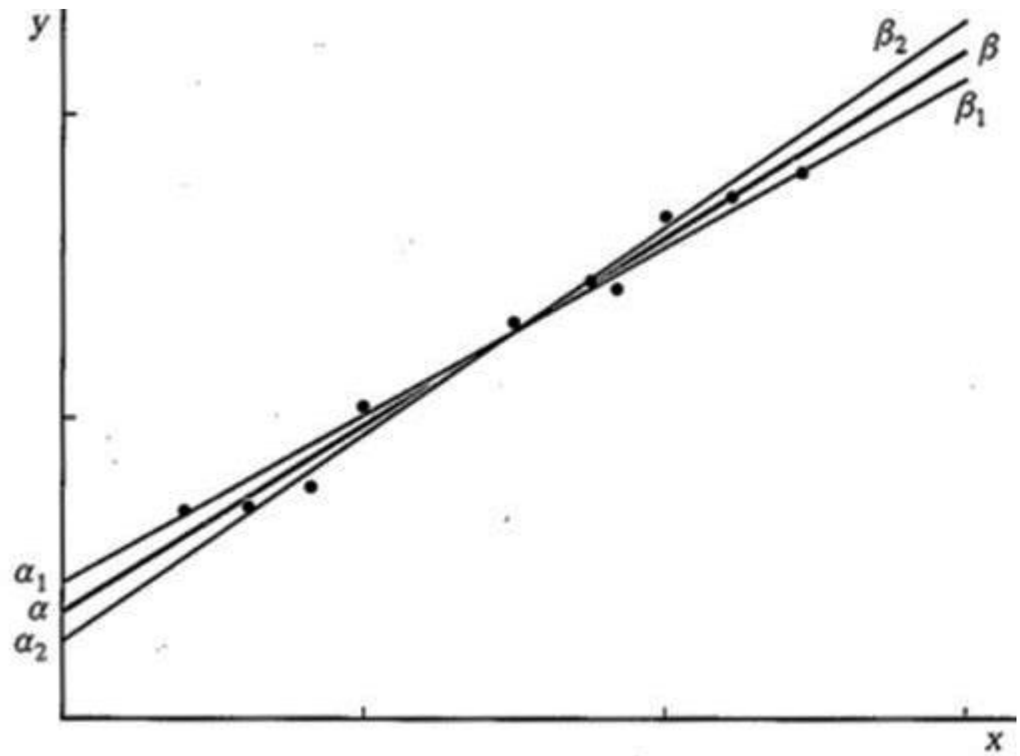
Σωστός τρόπος χάραξης καμπυλών



Υπολογισμός των παραμέτρων ευθείας και των αβεβαιοτήτων τους

Στην περίπτωση μιας γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεγεθών y=βx+α, που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση στο εργαστήριο, τίθεται το ερώτημα πως υπολογίζονται οι βέλτιστοι παράμετροι α, β και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες. Υπάρχει η μέθοδος των «ελαχίστων τετραγώνων» με την οποία γίνεται συνήθως ο υπολογισμός. Στο επίπεδο όμως της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης προτείνεται η γραφική μέθοδος που έχει μικρότερη ακρίβεια είναι όμως ωστόσο καλύτερα κατανοητή.

Κατασκευάζουμε την γραφική παράσταση y-x, από την οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί το β υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας και το α από το σημείο τομής της ευθείας



με τον άξονα των y. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε την «καλύτερη» ευθεία για τα σημεία που βρίσκονται πάνω από το δεξιό και κάτω από το αριστερό μέρος της ευθείας. Αυτή η ευθεία έχει κλίση β_1 και τέμνει των άξονα των y στο α_1, όπως στο παραπάνω σχήμα. Όμοια χαράσσουμε την «καλύτερη» ευθεία για τα σημεία που βρίσκονται κάτω από το δεξιό και πάνω από το αριστερό μέρος της ευθείας. Αυτή η ευθεία έχει κλίση β_2 και τέμνει των άξονα των y στο α_2. Τότε οι αβεβαιότητες για τα α και β προσεγγιστικά είναι

$$\Delta\alpha=(\alpha_1-\alpha_2)/2 \quad (12) \quad \text{και} \quad \Delta\beta=(\beta_2-\beta_1)/2 \quad (13)$$

Α΄ ΛΥΚΕΙΟΥ

Α1-Πειραματική μελέτη της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης

Σκοπός της άσκησης

Να υπολογισθεί πειραματικά η ταχύτητα κινούμενου αντικειμένου

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να κατασκευάσουν διάγραμμα σε χαρτί μιλιμετρέ και να υπολογίσουν κλίση
- Να εξηγούν τη φυσική σημασία των σημείων τομής γραφικής παράστασης με τους άξονες.

Θεωρητικό υπόβαθρο

Η εξίσωση κίνησης για σώμα που εκτελεί ευθύγραμμη ομαλή κίνηση στον άξονα x είναι

$$x=x_o+\upsilon t \quad (1)$$

Συνεπώς, η γραφική παράσταση της x=f(t) είναι ευθεία και η κλίση ισούται με την ταχύτητα. Επίσης, άξονας των x τέμνεται από τη γραφική παράσταση στη θέση x_o στην οποία βρίσκεται το κινητό την στιγμή t=0.

Μέθοδος

Στο προτεινόμενο εικονικό πείραμα ο πειραματιστής έχει να χειριστεί ένα βίντεο κατασκευασμένο από προσομοίωση στο Interactive Physics, όπου ένα παιγνίδι - αυτοκινητάκι κινείται ομαλά πάνω σε ευθύγραμμο δρόμο στον οποίο είναι προσαρμοσμένος ο άξονας x και επίσης είναι ορατό και χρονόμετρο. Μπορεί με χειρισμό του βίντεο με το ποντίκι να σταματά σε διάφορα καρέ και να καταγράφει τη θέση και τη χρονική στιγμή προκειμένου να δημιουργήσει την γραφική παράσταση x=f(t) και από την κλίση να υπολογίσει την ταχύτητα.

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πειραματική μελέτη της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης

1. Παρακολουθήστε το βίντεο του πειράματος στη διεύθυνση https://youtu.be/P99YIKx2Zl0 ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Σε αυτό φαίνεται ένα παιγνίδι – αμαξάκι που κινείται με μπαταρία πάνω σε ευθύγραμμο δρόμο. Στο δρόμο είναι προσαρμοσμένη μια μετροταινία μεγάλου μήκους την οποία θεωρείστε τη ως άξονα *x*. Έτσι μπορείτε να καταγράφετε (σε m), αν σταματήσετε το βίντεο σε κάποιο καρέ, τη θέση του αυτοκινήτου. Παράλληλα στην οθόνη βλέπετε και ένα χρονόμετρο σε λειτουργία. Στο βίντεο έχει ληφθεί ένα τμήμα της κίνησης του αμαξιού. Δοκιμάστε να χειριστείτε το βίντεο με το ποντίκι ώστε να επιλέγετε διάφορα καρέ της κίνησης που θα σταματάτε το βίντεο για τη λήψη μετρήσεων. Επίσης, αποφασίστε ένα οποιοδήποτε σημείο του αμαξιού (προτείνουμε το κέντρο του μπροστινού τροχού) του οποίου η θέση θα θεωρείται ως θέση του αμαξιού.

2. Αφού εξοικειωθείτε με τη χρήση του βίντεο, να επιλέξετε 6 θέσεις που να «απλώνονται» σχεδόν σε όλη την ορατή διαδρομή του αμαξιού στο βίντεο. Για κάθε θέση *x* σημειώστε την τιμή της και την αντίστοιχη χρονική στιγμή προκειμένου να συμπληρώσετε τον πίνακα 1.

Πίνακας 1

Α/Α	Θέση *x*(m)	Χρονική στιγμή *t*(s)
1		
2		
3		
4		
5		
6		

3. Εξηγείστε με βάση τις τιμές του πίνακα 1 γιατί η κίνηση του αμαξιού μπορεί να θεωρηθεί ευθύγραμμη ομαλή.

………………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………

3. Να κάνετε σε χαρτί μιλιμετρέ, του οποίο να επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας, τη γραφική παράσταση x=f(t) με τα 6 ζεύγη τιμών (x,t) του πίνακα 1. Σύμφωνα με το βήμα 3 αναμένουμε αυτή η γραφική παράσταση να είναι ευθεία. Να προεκτείνεται τη γραφική παράσταση από τη μία μεριά ώστε να τμήσει τον άξονα x (θεωρώντας ότι η κίνηση γίνεται με την ίδια ταχύτητα και στο χρονικό διάστημα που δεν φαίνεται στο βίντεο)

4. Να υπολογίσετε με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων από την κλίση της ευθείας x=f(t) την ταχύτητα του αμαξιού.

………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

5. Από τη γραφική παράσταση, χωρίς υπολογισμούς, να βρείτε τη θέση του αμαξιού την στιγμή t=0, δίνοντας τις απαραίτητες εξηγήσεις.

………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

Α2- Μέτρηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας με την μελέτη της πτώσης σώματος

Σκοπός της άσκησης

Να υπολογισθεί η επιτάχυνση της βαρύτητας, g, με μέτρηση του ύψους και του αντίστοιχου χρόνου πτώσης μιας σφαίρας.

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να υπολογίσουν μέση τιμή
- Να κατασκευάσουν διάγραμμα σε χαρτί μιλιμετρέ και να υπολογίσουν την κλίση
- Να υπολογίσουν το συστηματικό σφάλμα στη μέτρηση του χρόνου

Θεωρητικό υπόβαθρο

Όταν ένα σώμα αφήνεται να πέσει κοντά στην επιφάνεια της Γης και η αντίσταση του αέρα είναι αμελητέα, το σώμα εκτελεί κίνηση με σταθερή επιτάχυνση, την επιτάχυνση της βαρύτητας g. Συγκεκριμένα ισχύει η σχέση:

$$h = \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

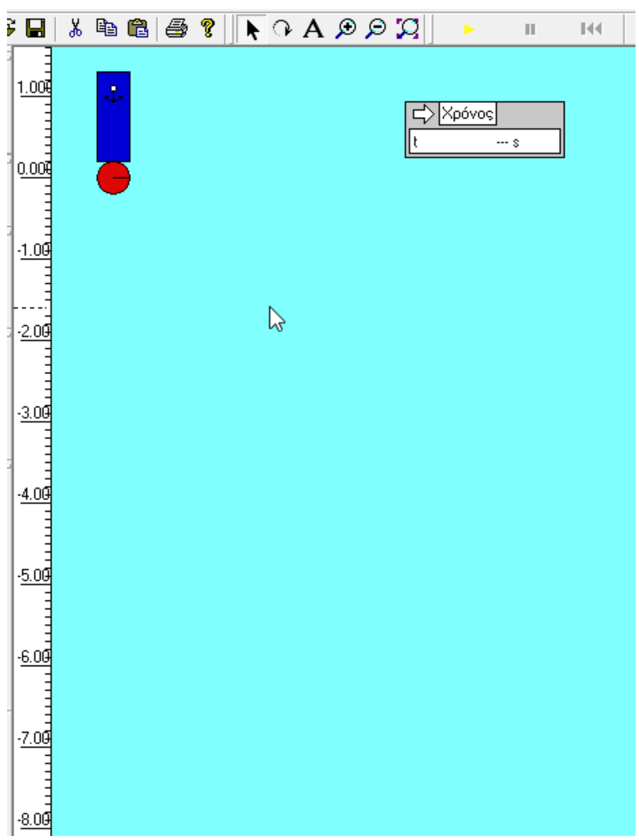
όπου h το ύψος από το οποίο αφέθηκε και t ο αντίστοιχος χρόνος.

Μέθοδος

Στο εργαστήριο μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του g είναι η παρακάτω. Μία μεταλλική σφαίρα συγκρατείται με ηλεκτρομαγνήτη. Με την βοήθεια διακόπτη Δ1 διακόπτεται το ρεύμα στον ηλεκτρομαγνήτη και η σφαίρα ελευθερώνεται να πέσει, ενώ ταυτόχρονα αρχίζει να μετρά το χρόνο ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο. Όταν η σφαίρα πέσει κατά h χτυπά πάνω σε διακόπτη Δ2 με την βοήθεια του οποίου σταματά το χρονόμετρο να μετρά. Το ύψος h μετριέται με μετροταινία και συνεπώς από την ένδειξη *t* του χρονομέτρου και το ύψος *h* μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (1) η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας *g*.

Η προηγούμενη διαδικασία προσομοιώνεται σε βίντεο. Τη στιγμή t=0 (αρχή του βίντεο) το ρεύμα στον ηλεκτρομαγνήτη μηδενίζεται και η σφαίρα ελευθερώνεται και πραγματοποιεί ελεύθερη πτώση (Σχήμα 1). Σταματώντας το βίντεο σε διαφορετικά σημεία, μπορεί να μετρηθεί το ύψος πτώσης *h* σε m με τη βοήθεια του κατακόρυφου χάρακα, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος πτώσης *t* σε s καταγράφεται στο χρονόμετρο.

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο ηλεκτρομαγνήτης έχει πυρήνα από σίδηρο και παρουσιάζει μεγάλη αυτεπαγωγή, ως εκ τούτου το ρεύμα σε αυτόν δεν μηδενίζεται ακριβώς τη στιγμή που ανοίγει ο διακόπτης Δ1 και ξεκινά το χρονόμετρο. Υπάρχει λοιπόν μια μικρή χρονική καθυστέρηση στην απελευθέρωση της σφαίρας και ο χρόνος που μετρά το χρονόμετρο είναι ελαφρώς μεγαλύτερος από αυτόν της ελεύθερης πτώσης.



Σχήμα 1. Προσομοίωση της πτώσης μιας σφαίρας

Στο συγκεκριμένο πείραμα θα ληφθούν μετρήσεις για 5 ζεύγη τιμών (h,t). Το g θα υπολογισθεί με δύο μεθόδους.

1η μέθοδος

Για κάθε ένα ζεύγος μπορεί από την σχέση (1) να υπολογισθεί η τιμή του g και στη συνέχεια να υπολογισθεί η μέση τιμή.

2η μέθοδος

Η σχέση (1) μπορεί να γραφεί στη μορφή

$$t = \sqrt{\frac{2}{g}}\sqrt{h} \quad (2)$$

Αν κατασκευαστεί από τις παραπάνω μετρήσεις ένα διάγραμμα t=f($\sqrt{h}$) προφανώς θα είναι ευθεία με κλίση b

$$b = \sqrt{\frac{2}{g}} \quad (3)$$

Από τη κλίση προφανώς υπολογίζεται η τιμή του g. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να υπολογισθεί και το συστηματικό σφάλμα από το σημεία που τέμνει η γραφική παράσταση τον άξονα των χρόνων. Μάλιστα εδώ προκύπτει μια περίπτωση αναδεικνύεται η διαφορά των δύο μεθόδων καθότι στη δεύτερη μέθοδο υπολογίζεται το g χωρίς να υπεισέρχεται το συστηματικό σφάλμα.

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μέτρηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας με την μελέτη της πτώσης σώματος

1. Παρακολουθήστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtube.com/shorts/Mat-z5dbdmE ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το qrcode που φαίνεται στην δίπλα εικόνα . Εξοικειωθείτε βλέποντας μερικές φορές την ελεύθερη πτώση της σφαίρας και δοκιμάστε να «παγώσετε» το βίντεο σε διάφορες θέσεις της σφαίρας, ίσως προχωρώντας καρέ – καρέ. Αφού εξοικειωθείτε, ξεκινήστε το βίντεο και «παγώστε» τη σφαίρα σε 5 διαφορετικές θέσεις προσπαθώντας να καλύψετε όλο το διαθέσιμο εύρος ύψους από πάνω προς τα κάτω κατά την πτώση της. (Αν χρειαστεί ξεκινήστε και πάλι το βίντεο). Για κάθε μια από αυτές τις 5 θέσεις καταγράψτε με τη βοήθεια του κατακόρυφου χάρακα το ύψος πτώσης h σε m και τον αντίστοιχο χρόνο πτώσης t σε s από το χρονόμετρο, συμπληρώνοντας τις αντίστοιχες στήλες του πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Α/Α θέσης	h**(m)**	t**(s)**	g**(m/s²)**
1			
2			
3			
4			
5			

2. Για κάθε ζεύγος τιμών (h,t) του πίνακα 1 υπολογίστε την τιμή του g με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων και συμπληρώστε την τελευταία στήλη του πίνακα 1. Οι πράξεις να γίνουν στο πρόχειρο, παρακάτω γράψτε μόνο τον υπολογισμό του g στην θέση με το μεγαλύτερο ύψος.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

3. Υπολογίστε την μέση τιμή του g από τις τιμές του πίνακα 1.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

4. Με τις τιμές του πίνακα 1 να συμπληρωθεί ο πίνακας 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Α/Α θέσης	$\sqrt{h}$ **(m$^{1/2}$)**	t **(s)**
1		
2		
3		
4		
5		

5. Να κατασκευαστεί από τις παραπάνω μετρήσεις ένα διάγραμμα t=f($\sqrt{h}$) σε χαρτί μιλιμετρέ το οποίο να επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας. Εξηγήστε γιατί η αναμενόμενη μορφή είναι ευθεία. Υπολογίστε την κλίση της b και από την κλίση αυτή να υπολογισθεί η τιμή του g.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

6. Πως μπορούμε να βρούμε από τη γραφική παράσταση αν υπάρχει και πόσο είναι το συστηματικό σφάλμα στη μέτρηση του χρόνου, όπως αυτό περιγράφεται στη μέθοδο;

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………

7. Υπολογίστε την % σχετική απόκλιση της τιμής του g που υπολογίσατε στο βήμα 5 από την τιμή της βιβλιογραφίας g = 9,81 m/s^2. Κάντε το ίδιο και για την μέση τιμή του g που υπολογίσατε στο βήμα 3. Σε τι συμπέρασμα καταλήγετε; Ποια μέθοδος είναι προτιμότερη στην συγκεκριμένη άσκηση και γιατί;

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………….

Α3 - Μελέτη των νόμων της κίνησης

Σκοπός της άσκησης

Να γίνει η πειραματική επαλήθευση του δεύτερου νόμου του Newton.

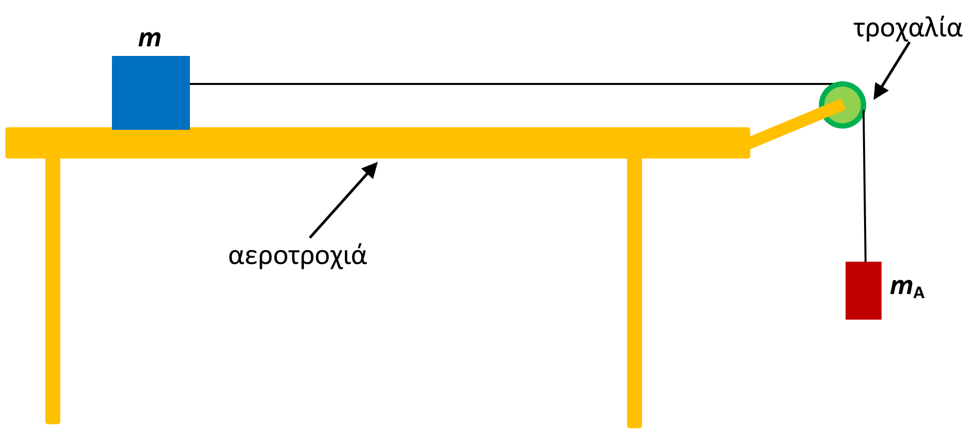
Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να υπολογίσουν μέση τιμή
- Να κατασκευάσουν διάγραμμα σε χαρτί μιλιμετρέ και να υπολογίσουν κλίση

Θεωρητικό υπόβαθρο

Θεωρούμε την διάταξη του σχήματος 1



Σχήμα 1. Η πειραματική διάταξη για τη μελέτη των νόμων της κίνησης

Το σώμα μάζας m μπορεί να γλιστρά πρακτικά χωρίς τριβές πάνω στην οριζόντια αεροτροχιά. Αυτό συνδέεται, μέσω πρακτικά άμαζου και μη εκτατού νήματος που περνά από την τροχαλία, με το σώμα μάζας m_A και βάρους B_A. Θεωρώντας ότι η τροχαλία στρέφεται γύρω από τον άξονά της χωρίς τριβή και ότι έχει αμελητέα ροπή αδράνειας, γράφοντας τον δεύτερο νόμο του Newton για κάθε ένα σώμα μπορούμε να καταλήξουμε για την επιτάχυνση κίνησης των σωμάτων στη σχέση

$$a = \frac{B_A}{m+m_A} \quad (1), \text{ όπου } B_A = m_A g \quad (2)$$

Αν τα σώματα αφεθούν να κινηθούν από την ακινησία και σε χρόνο t το καθένα διανύσει διάστημα s, θα ισχύει

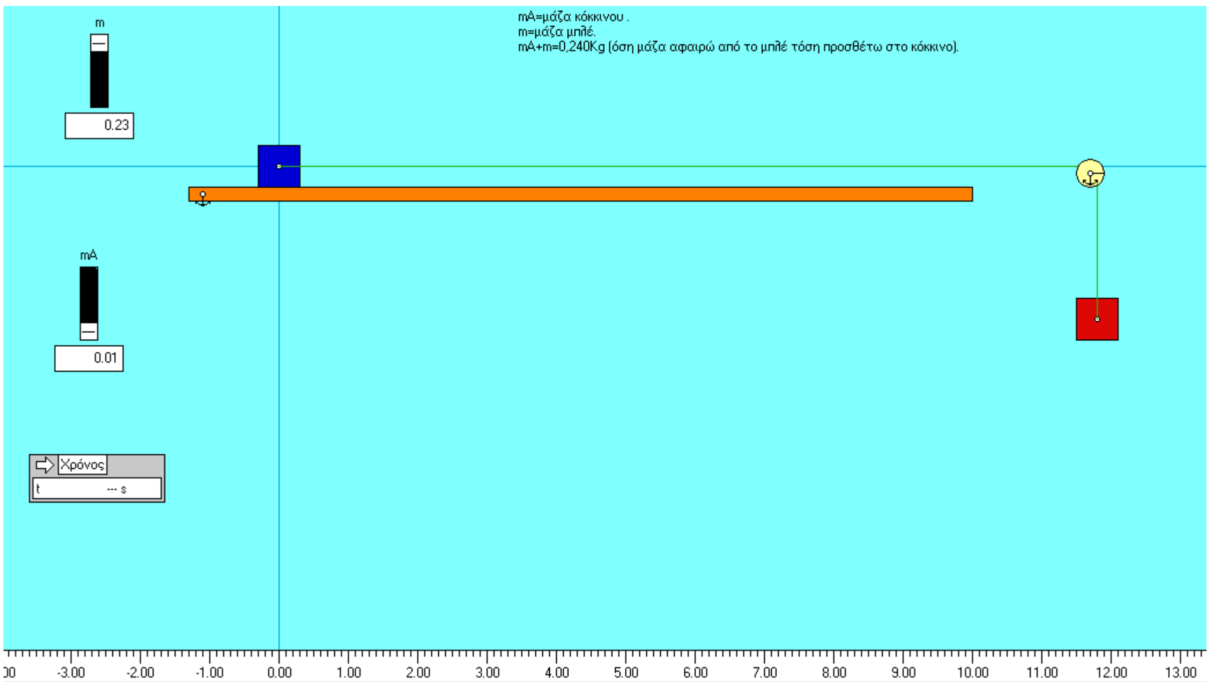
$$s = \frac{1}{2}at^2 \quad (3)$$

Μέθοδος

Η μάζα m περιέχει ένα αριθμό βαριδιών, τα οποία μπορεί να αποσπαστούν και να προστεθούν διαδοχικά στη μάζα m_A , ώστε ενώ αυξάνεται το βάρος B_A το άθροισμα των δύο μαζών (m+m_A) μένει σταθερό.

Στο εργαστήριο το πείραμα κίνησης του συστήματος επαναλαμβάνεται, για παράδειγμα, πέντε φορές με διαφορετικές τιμές της μάζας m_A αλλά με σταθερό το άθροισμα (m+m_A). Με τη βοήθεια φωτοπυλών και μετροταινίας προσαρμοσμένης στην αεροτροχιά μπορεί να υπολογισθεί σε κάθε επανάληψη η επιτάχυνση. Στη συνέχεια γίνεται η κατασκευή του διαγράμματος a=f(B_A) και ο υπολογισμός της κλίσης b, η τιμή της οποίας πρέπει να επαληθεύει την σχέση (1).

Η προηγούμενη διαδικασία προσομοιώνεται σε 5 διαδοχικά βίντεο (Σχήμα 2). Συγκεκριμένα, κάθε βίντεο αναπαριστά την κίνηση των σωμάτων από την ηρεμία για ένα διαφορετικό ζεύγος τιμών των μαζών m και m_A, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι τιμές των μαζών αναγράφονται στους αντίστοιχους μετρητές. Με χειρισμό του βίντεο είναι δυνατό το σταμάτημα των σωμάτων διάφορες χρονικές στιγμές από την εκκίνηση. Οι χρονικές στιγμές καταγράφονται από το χρονόμετρο, ενώ το αντίστοιχο διάστημα s του σώματος μάζας m μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια του οριζόντιου χάρακα που φαίνεται στην οθόνη. Συνεπώς, από την σχέση (3) είναι δυνατός ο υπολογισμός της επιτάχυνσης για κάθε μια από τις 5 διαφορετικές τιμές του βάρους B_A (μία σε κάθε βίντεο).



Σχήμα 2. Προσομοίωση του πειράματος μελέτης των νόμων της κίνησης

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

1. Παρακολουθήστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/mo7Z--hqmzo ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode του διπλανού σχήματος. Εξοικειωθείτε βλέποντας μερικές φορές και δοκιμάστε να το σταματάτε σε διάφορες θέσεις της κίνησης των σωμάτων. Στη συνέχεια, ξεκινήστε το βίντεο από την αρχή και κατά τη διάρκεια του πειράματος 1, σταματήστε την κίνηση των σωμάτων σε τρεις θέσεις της επιλογής σας. Για κάθε μία από τις τρεις θέσεις καταγράψτε τη μετατόπιση *s* της μάζας *m* με τη βοήθεια του οριζόντιου χάρακα που φαίνεται στην οθόνη και τους αντίστοιχους χρόνους κίνησης *t* από το χρονόμετρο. Για κάθε μία από τις τρεις θέσεις υπολογίστε την επιτάχυνση από την σχέση (3) με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων και στη συνέχεια υπολογίστε την μέση τιμή της, ώστε να συμπληρώσετε τον Πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

m_A( )	m( )	t ( )	s( )	a( )	$a_{μέση}$(m/s^2)

2. Να επαναλάβετε την προηγούμενη διαδικασία για τα υπόλοιπα τέσσερα πειράματα του βίντεο και να συμπληρωθούν οι αντίστοιχοι πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

m_A( )	m( )	t ( )	s( )	a( )	$a_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\eta}$(m/s^2)

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

m_A( )	m( )	t ( )	s( )	a( )	$a_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\eta}$(m/s^2)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

m_A( )	m( )	t ( )	s( )	a( )	$a_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\eta}$(m/s^2)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

m_A( )	m( )	t ( )	s( )	a( )	$a_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\eta}$(m/s^2)

3. Θεωρώντας ως επιτάχυνση του συστήματος, για κάθε τιμή της μάζας m_A, την αντίστοιχη μέση τιμή, να συμπληρώσετε τον Πίνακα 6, λαμβάνοντας υπόψη ότι g=9,81m/s^2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6

m_A( )	B_A( )	a(m/s^2)

4. Με τις τιμές του πίνακα 6 να σχεδιάσετε σε χαρτί μιλιμτρέ το διάγραμμα a=f(B_A), το οποίο να επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας. Εξηγείστε γιατί η αναμενόμενη μορφή είναι ευθεία.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………

5. Υπολογίστε την κλίση b της a=f(B_A) από το διάγραμμα.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………

6. Να υπολογισθεί η θεωρητική της κλίσης *b* με βάση την σχέση 1 και η % απόκλιση της πειραματικής από την θεωρητική τιμή της κλίσης. Ποια τα συμπεράσματά σας σχετικά με την επαλήθευση του $2^{ου}$ νόμου του Newton που μελετήσατε πειραματικά;

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

Α4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΠΤΩΣΗ ΣΩΜΑΤΟΣ

Σκοπός της άσκησης

Να επιβεβαιωθεί η διατήρηση της μηχανικής ενέργειας σώματος κατά την ελεύθερη πτώση του.

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία Να κατασκευάσουν διάγραμμα σε χαρτί μιλιμετρέ και να υπολογίσουν την κλίση

Θεωρητικό υπόβαθρο

Όταν ένα σώμα αφήνεται να πέσει κοντά στην επιφάνεια της Γης και η αντίσταση του αέρα είναι αμελητέα, το σώμα εκτελεί κίνηση με σταθερή επιτάχυνση g και η μηχανική του ενέργεια διατηρείται.

Έστω ότι το σώμα μάζας αφήνεται να πέσει από ύψος H από το έδαφος και κινείται κατά μήκος του άξονα y του οποίου η αρχή είναι στο έδαφος και η θετική φορά προς τα πάνω. Θεωρώντας στο έδαφος την δυναμική ενέργεια μηδέν, το σώμα σε μία θέση κατά την πτώση του θα έχει δυναμική ενέργεια $U=mgy$ και κινητική ενέργεια $K=mv^2/2$, όπου v η ταχύτητα σε αυτή τη θέση. Στο χρονικό διάστημα της κίνησης του σώματος από τη στιγμή που αφέθηκε ως την συγκεκριμένη θέση θα έχει μείωση της δυναμικής του ενέργειας κατά

$$|\Delta U| = mg(H-y) \quad (1)$$

και αύξηση της κινητικής του ενέργειας κατά

$$\Delta K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

Η διατήρηση της μηχανικής ενέργειας του σώματος οδηγεί στην σχέση

$$\Delta K = |\Delta U| \; (3)$$

Θεωρούμε τρεις θέσεις (1,2,3) του σώματος σε ύψη $y_1 > y_2 > y_3$, τέτοιες ώστε ο χρόνος κίνησης (T) από την θέση 1 στην θέση 2 να είναι όσο από την θέση 2 στην θέση 3. Με άλλα λόγια το σώμα βρίσκεται στην θέση 2 στη μέση του χρονικού διαστήματος $\Delta t=2T$ της κίνησης από την θέση 1 στην θέση 3. Επειδή η κίνηση είναι ομαλά επιταχυνόμενη, δηλαδή η ταχύτητα αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο, είναι εύκολο να δειχθεί ότι η ταχύτητα του σώματος στη θέση 2 είναι ίση κατά μέτρο με τη μέση ταχύτητα για την κίνηση από τη θέση 1 στη θέση 3. Με άλλα λόγια ισχύει

$$v_2 = \frac{|\Delta y|}{\Delta t} = \frac{y_1 - y_3}{2T} \quad (4)$$

Μέθοδος

Μια μικρή σιδερένια σφαίρα αφήνεται την στιγμή $t=0$ από τη θέση (0), η οποία βρίσκεται σε ύψος $y_o=H$ από το έδαφος να πέσει ελεύθερα (Σχήμα 1). Την στιγμή t_1 βρίσκεται στη θέση (1) σε ύψος y_1. Ονομάζουμε στη συνέχεια θέση (2) την θέση που βρίσκεται η σφαίρα μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα T, δηλαδή την στιγμή t_1+T . Σε κάθε μία από τις υπόλοιπες θέσεις που απεικονίζονται στο σχήμα 1 θεωρούμε ότι η σφαίρα βρίσκεται μετά χρόνο T από την στιγμή που ήταν στην προηγούμενη θέση.

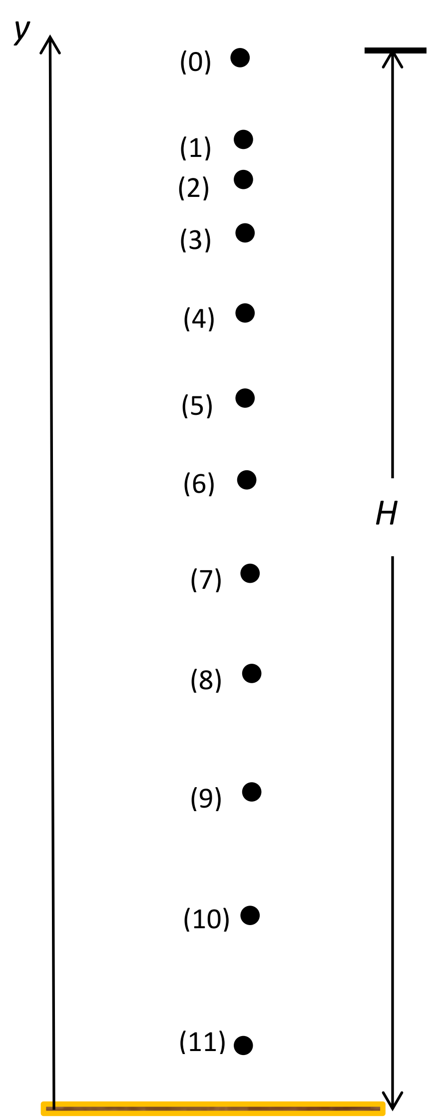
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο θεωρητικό υπόβαθρο η ταχύτητα στη θέση (2) θα είναι όσο η μέση ταχύτητα της κίνησης μεταξύ των θέσεων (1) και (3), δηλαδή αυτή υπολογίζεται από την σχέση (4). Όμοια

- η ταχύτητα στη θέση (4) θα είναι όσο η μέση ταχύτητα της κίνησης μεταξύ των θέσεων (3) και (5),

- η ταχύτητα στη θέση (6) θα είναι όσο η μέση ταχύτητα της κίνησης μεταξύ των θέσεων (5) και (7),

- η ταχύτητα στη θέση (8) θα είναι όσο η μέση ταχύτητα της κίνησης μεταξύ των θέσεων (7) και (9),

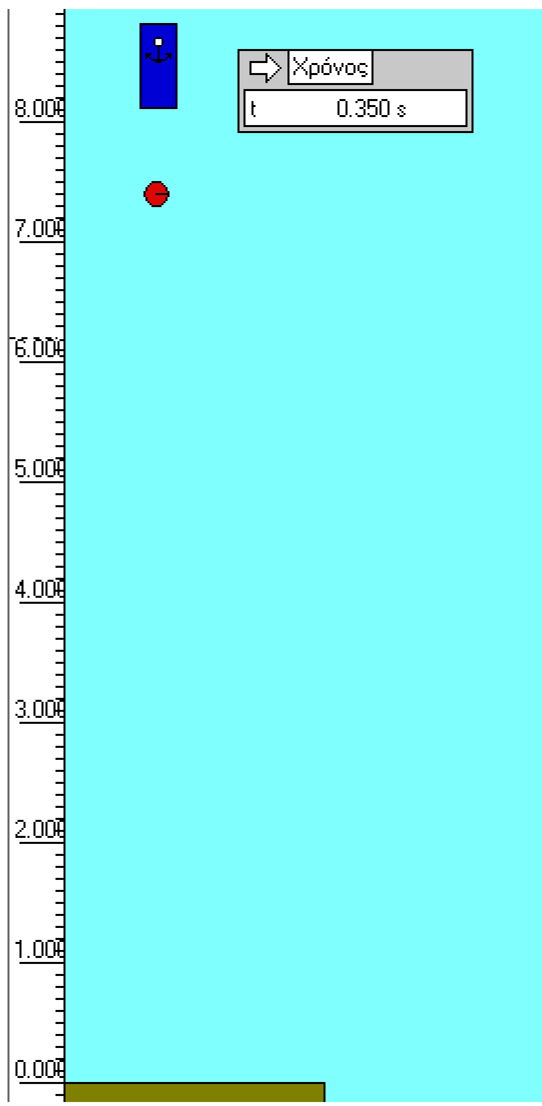
- η ταχύτητα στη θέση (10) θα είναι όσο η μέση ταχύτητα της κίνησης μεταξύ των θέσεων (9) και (11).



Σχήμα 1. Διάφορες θέσεις τις σφαίρας κατά την πτώση της

Για κάθε μια από τις θέσεις (2),(4),(6),(8) και (10), αν μπορούμε να μετρήσουμε τα διάφορα ύψη και τον αντίστοιχο χρόνο πτώσης, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας. Στη συνέχεια από τις σχέσεις (1) και (2) είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μείωσης της δυναμικής ενέργειας από την θέση (0) έως την κάθε μια από τις προηγούμενες 5 θέσεις και η αντίστοιχη αύξηση της κινητικής ενέργειας. Από την σύγκριση των μεγεθών ΔK και ΔU ελέγχεται κατά πόσο διατηρείται η μηχανική ενέργεια.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα άσκηση παρουσιάζεται ένα βίντεο με την προσομοίωση της πτώσης της σφαίρας (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Προσομοίωση της πτώσης της σφαίρας

Σταματώντας το βίντεο ανά τακτά διαστήματα είναι δυνατή η μέτρηση του ύψους με τον κατακόρυφο χάρακα και ο χρόνος με το χρονόμετρο, προκειμένου να ακολουθηθεί η διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως.

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΠΤΩΣΗ ΣΩΜΑΤΟΣ

1. Παρακολουθήστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtube.com/shorts/X_V8wm3c_sQ?feature=share ή σκανάρετε το αντίστοιχο qrcode του δίπλα σχήματος , στο οποίο προσομοιώνεται η ελεύθερη πτώση μιας μεταλλικής σφαίρας, μάζας m = 0,500 Kg, η οποία αποδεσμεύεται να κινηθεί από ηλεκτρομαγνήτη την στιγμή t=0 και εξοικειωθείτε σταματώντας τη σφαίρα σε διαφορές θέσεις κατά την πτώση της. Σημειώστε το αρχικό ύψος από το οποίο αφέθηκε να κινηθεί

H = ……………………………………………………………

2. Ξεκινήστε το βίντεο από την αρχή και σταματήστε το λίγο μετά την εκκίνηση, για παράδειγμα τη στιγμή t=0,15s. Αυτή τη θέση καταγράψτε τη ως θέση (1) και σημειώστε το ύψος y_1 στο οποίο βρίσκεται η σφαίρα. Στη συνέχεια σταματήστε το βίντεο κάθε 0,1s, για άλλες 10 θέσεις τις σφαίρας, δηλαδή για παράδειγμα τις στιγμές 0,25s, 0,35s …. , 1,15s. Για κάθε θέση καταγράψτε το ύψος y και την αντίστοιχη ένδειξη του χρονομέτρου ώστε να συμπληρώστε τον πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Θέση	***t*(s)**	***y* (m)**
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

8		
9		
10		
11		

3. Με τη διαδικασία που περιγράφηκε στη μέθοδο υπολογίστε για κάθε μία από τις θέσεις (2),(4),(6),(8),(10) την ταχύτητα της σφαίρας, με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων, ώστε να συμπληρώσετε τον πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Θέση	***v* (s)**
2	
4	
6	
8	
10	

Δείξτε αναλυτικά τον υπολογισμό της ταχύτητας που κάνατε για μια μόνο θέση, έστω για την θέση (6).

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………

4. Ακολουθώντας την διαδικασία που αναφέρθηκε στη μέθοδο, συμπληρώστε τον πίνακα 3

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Θέση	$\boldsymbol{\Delta K}$ **(J)**	$\boldsymbol{\lvert \Delta U \rvert}$ **(J)**
2		
4		
6		
8		
10		

5. Με τα στοιχεία του πίνακα 3 κατασκευάστε το διάγραμμα ΔK=f($|\Delta U|$) σε χαρτί μιλιμετρέ το οποίο να επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας. Υπολογίστε την κλίση. Ποια η τιμή της κλίσης που αναμένατε θεωρητικά; Υπολογίστε την % απόκλιση της πειρατικής από τη θεωρητική τιμή της κλίσης.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

Β΄ ΛΥΚΕΙΟΥ

B1 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ, ΤΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΟΥ ΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΥΛΙΚΟΥ

Σκοπός της άσκησης

Να προσδιορισθεί η χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή και να υπολογισθεί πειραματικά η διηλεκτρική σταθερά του κενού και η σχετική διηλεκτρική σταθερά υλικού.

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να κατασκευάσουν διάγραμμα και να υπολογίσουν την κλίση γραφικά
- Να υπολογίσουν μέση τιμή και τη μέση απόκλιση.

Θεωρητικό υπόβαθρο

Πυκνωτής είναι σύστημα δύο αγωγών (ονομάζονται και οπλισμοί) και έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο και ηλεκτρική ενέργεια. Όταν ο πυκνωτής φορτιστεί εφαρμόζοντας διαφορά δυναμικού V μεταξύ των οπλισμών του τότε αυτός αποκτά φορτίο Q (ο ένας οπλισμός αποκτά φορτίο $–Q$ και ο άλλος $+Q$).

Η χωρητικότητα πυκνωτή ορίζεται από την σχέση

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

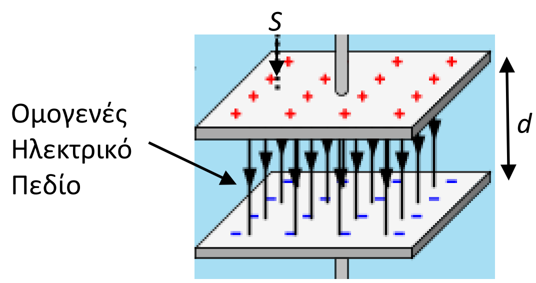
Η χωρητικότητα είναι χαρακτηριστικό μέγεθος του πυκνωτή και εξαρτάται από τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά και το μονωτικό υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών. Η μονάδα χωρητικότητας στο SI είναι το 1 farad (1F).

Όταν οι οπλισμοί είναι δύο επίπεδες μεταλλικές πλάκες εμβαδού S η κάθε μια ο πυκνωτής ονομάζεται επίπεδος πυκνωτής (Σχήμα 1).

Αν d η απόσταση μεταξύ των οπλισμών και μεταξύ αυτών υπάρχει κενό, η χωρητικότητα δίνεται από την σχέση

$$C_o = \varepsilon_o \frac{S}{d} \quad (2)$$

όπου ε_o=8,85.10^{-12} F/m, η λεγόμενη διηλεκτρική σταθερά του κενού.



Σχήμα 1 Επίπεδος πυκνωτής

Όταν μεταξύ των οπλισμών πυκνωτή τοποθετηθεί κάποιο μονωτικό υλικό τότε η χωρητικότητά του αυξάνεται και γίνεται $C>C_o$.

Ο λόγος

$$\varepsilon = \frac{C}{C_o} \quad (3)$$

ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού. Επειδή για τον αέρα η τιμή της ε είναι περίπου 1, όταν μεταξύ των οπλισμών υπάρχει αέρας για τη χωρητικότητα χρησιμοποιούμε την σχέση (2).

Μέθοδος

Αν στο εργαστήριο με ένα τροφοδοτικό εφαρμόσουμε τάση V στα άκρα πυκνωτή (με αέρα μεταξύ των οπλισμών), τότε αυτός θα αποκτήσει φορτίο Q. Με εκφόρτιση κατόπιν του πυκνωτή μπορούμε με ένα όργανο μέτρησης του φορτίου να μετρήσουμε το φορτίο

Q. Συνεπώς από την σχέση (1) είναι δυνατός ο υπολογισμός της χωρητικότητας του πυκνωτή. Στην πράξη η μέτρηση επαναλαμβάνεται μερικές φορές για διαφορετικές τιμές της τάσης τροφοδοσίας. Η πειραματική τιμή της χωρητικότητας μπορεί να προκύψει με δύο τρόπους

(α) Σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται η χωρητικότητα από την σχέση (1) και στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της μέσης τιμής.

(β) Με τις πειραματικές τιμές τάσης και φορτίου κατασκευάζεται το διάγραμμα Q=f(V). Προφανώς, όπως προκύπτει από την σχέση (1), η κλίση ισούται με την χωρητικότητα.

Στη συνέχεια διατηρώντας σταθερή την τιμή της τάσης μεταβάλουμε μερικές φορές την απόσταση d μεταξύ των οπλισμών. Κάθε φορά γίνεται μέτρηση του φορτίου του πυκνωτή και συνεπώς μπορεί να υπολογισθεί η χωρητικότητα από την σχέση (1). Με τις πειραματικές τιμές κατασκευάζεται το διάγραμμα C_o=f(1/d). Η σχέση σύμφωνα με τον τύπο (2) είναι γραμμική. Από την κλίση γνωρίζοντας το εμβαδό S είναι δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός της τιμής της σταθεράς ε_o.

Τέλος, τοποθετούμε μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή ένα υλικό του οποίου θέλουμε να προσδιορίσουμε πειραματικά την σχετική διηλεκτρική σταθερά. Για δεδομένη τιμή της τάσης μετρούμε το φορτίο του πυκνωτή Q και στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε τη μέτρηση αφαιρώντας το διηλεκτρικό, οπότε το φορτίο είναι Qo. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση (3). Επειδή στις μετρήσεις, με το υλικό και χωρίς αυτό, έχουμε τη ίδια τάση εύκολα προκύπτει ότι σε αυτή την περίπτωση η σχετική διηλεκτρική σταθερά ισούται με το λόγο $\varepsilon=Q/Qo$. Στην πράξη επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για διάφορες τιμές της τάσης και υπολογίζουμε κάθε φορά το ε και στη συνέχεια λαμβάνουμε ως αποτέλεσμα την μέση τιμή.

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ, ΤΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΟΥ ΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΥΛΙΚΟΥ

1. Παρακολουθείστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtube.com/shorts/X_V8wm3c_sQ?feature=share ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Σε αυτό ο πυκνωτής τροφοδοτείται με διαφορετικές τιμές της τάσης. Κάθε φορά η τιμή της τάσης καταγράφεται στο βολτόμετρο και η τιμή του φορτίου στο καταγραφικό. Εξοικειωθείτε με το περιβάλλον του βίντεο σταματώντας δοκιμαστικά και παρατηρώντας τις τιμές της τάσης και του φορτίου. Στο βίντεο φαίνεται η τιμή του εμβαδού της κάθε πλάκας (το ονομάζει περιοχή μεταξύ των πλακών) και η απόσταση μεταξύ των οπλισμών (το ονομάζει διαχωρισμός). Με τη βοήθεια της σχέσης (2) υπολογίστε την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή της χωρητικότητας C_o, με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

2. Ξεκινήστε από την αρχή το βίντεο και σταματήστε σε διάφορες στιγμές κατά το πείραμα ώστε να συμπληρώσετε τις τιμές του πίνακα 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Α/Α	**Τάση V(V)**	**Q_o(C)**
0	0	0
1		
2		
3		
4		
5	1,5	

3. Σε χαρτί μιλιμετρέ να κάνετε τη γραφική παράσταση Q_o=f(V), την οποία να επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας. Να υπολογίσετε την κλίση και την χωρητικότητα C_o του πυκνωτή εξηγώντας την ακρίβεια με την οποία θα γράψετε το αποτέλεσμα. Να βρείτε την % απόκλιση αυτής της τιμής από την θεωρητική που υπολογίσατε στο προηγούμενο βήμα. Σχολιάστε τη σύγκριση των τιμών.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

4. Παρακολουθήστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/oLEc-tdBaao, ή σκανάρετε το αντίστοιχο qrcode του διπλανού σχήματος, στο οποίο γίνεται μεταβολή της απόστασης μεταξύ των οπλισμών. Εξοικειωθείτε λίγο και στη συνέχεια ξεκινήστε από την αρχή σταματώντας σε ενδιάμεσες θέσεις, ώστε να συμπληρώσετε τις στήλες του πίνακα 2 με την απόσταση μεταξύ των οπλισμών d και το φορτίο Q_o. Στη συνέχεια συμπληρώστε και τις υπόλοιπες στήλες του πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Α/Α	***d*(mm)**	**Q_o (C)**	**1/d (1/m)**	**$C_o=Q_o/V$ (F)**
1	5			
2				
3				
4				
5	10			

5. Εξηγείστε γιατί η σχέση C_o=f(1/d) είναι γραμμική. Στη συνέχεια υπολογίστε την κλίση. Από την κλίση προσδιορίστε πειραματικά την τιμή της σταθεράς ε_o και την % απόκλιση της τιμής που υπολογίσατε πειραματικά από την τιμή της βιβλιογραφίας $\varepsilon_o=8{,}85.10^{-12}$ F/m.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

6. Παρακολουθήστε το βίντεο στην διεύθυνση https://youtu.be/Wffvj1BkA1g ή σκανάρετε το αντίστοιχο qrcode που φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Σε αυτό μπορείτε να δείτε ότι για 5 διαφορετικές τιμές της τάσης μπορεί να μετρηθεί τόσο το φορτίο του πυκνωτή (Q) όταν περιέχει διηλεκτρικό μεταξύ των οπλισμών, όσο και το φορτίο (Q_o) όταν το διηλεκτρικό αφαιρεθεί. Σε κάθε περίπτωση υπολογίστε την τιμή ε της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού και συμπληρώστε τον πίνακα 3. Επίσης, για κάθε μέτρηση υπολογίστε την αβεβαιότητα $\delta\varepsilon$ (με δύο σημαντικά ψηφία) στηριζόμενοι σε ότι γνωρίζετε για τη διάδοση σφαλμάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Α/Α	***V*(V)**	***Q*(C)**	***Q*$_o$(C)**	***ε***	**δ*ε***
1					
2					
3					
4					
5					

7. Υπολογίστε την μέση τιμή του *ε* και την μέση απόκλιση (με ένα σημαντικό ψηφίο). Θεωρώντας την μέση απόκλιση ως την αβεβαιότητα στην τιμή της μέσης τιμής να γράψετε το αποτέλεσμα στη μορφή $\bar{\varepsilon} \pm \delta\bar{\varepsilon}$. Σχολιάστε τη σημασία των αβεβαιοτήτων του πίνακα (δ*ε*) και της $\delta\bar{\varepsilon}$ και δώστε εξήγηση για τη διαφορά τους.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

B2 - Πειραματικός προσδιορισμός της αντίστασης ωμικού αντιστάτη

Σκοπός της άσκησης

Να προσδιορισθεί πειραματικά η αντίσταση ωμικού αντιστάτη

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία και τη διάδοση σφαλμάτων
- Να υπολογίσουν μέση τιμή και τη μέση απόκλιση

Θεωρητικό υπόβαθρο

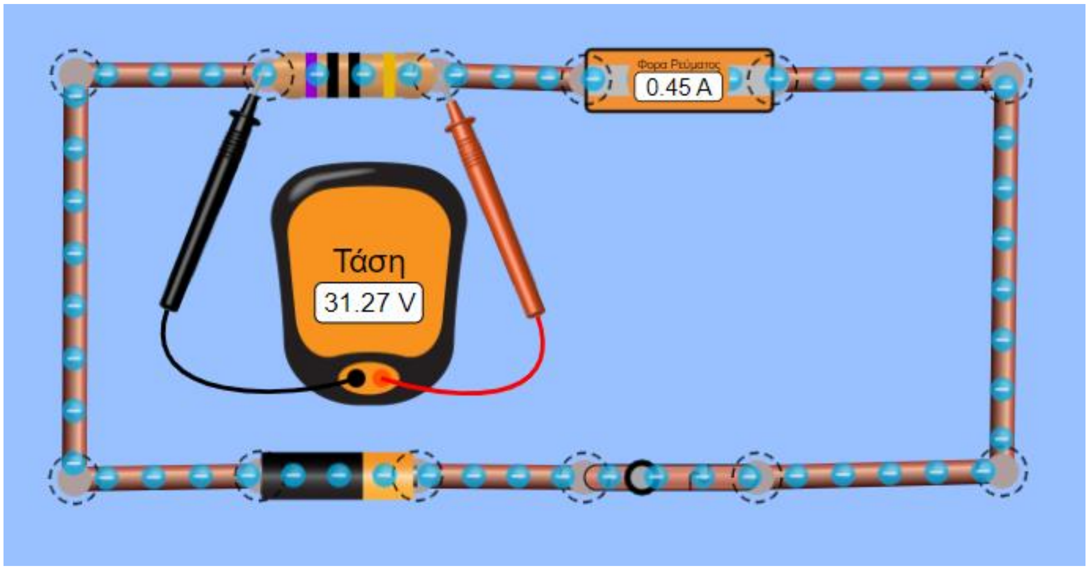
Έστω V η διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός αντιστάτη και I η ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει. Η αντίσταση ωμικού αντιστάτη δίνεται από το πηλίκο

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Αν η τιμή της αντίστασης δεν μεταβάλλεται πρακτικά με τη θερμοκρασία, όπως σε αντιστάτες του εμπορίου, τότε το πηλίκο V/I έχει σταθερή τιμή ανεξάρτητη από την τιμή του ρεύματος. Αν όμως ο αντιστάτης είναι, για παράδειγμα, ένα κομμάτι σύρμα η αντίσταση αλλάζει με την θερμοκρασία και το πηλίκο V/I δεν έχει σταθερή τιμή για διαφορετικές τιμές του ρεύματος. Στην παρούσα άσκηση θα ασχοληθούμε με αντιστάτη σταθερής τιμής.

Μέθοδος

Έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε την αντίσταση ενός αντιστάτη. Κατασκευάζουμε ένα κύκλωμα σαν αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του πειράματος

Με βολτόμετρο μετράμε την τάση στα άκρα του αντιστάτη *V* και με αμπερόμετρο την ένταση του ρεύματος *I* που τον διαρρέει. Το πηλίκο *V/I* μας δίνει την τιμή της αντίστασης. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από τροφοδοτικό και μπορούμε να αλλάζουμε την τάση τροφοδοσίας. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να επαναλάβουμε πειραματικά πολλές φορές την μέτρηση της αντίστασης, προκειμένου να πάρουμε την μέση τιμή ή ακόμα να κάνουμε το διάγραμμα *V*=f(*I*) και από την κλίση να βρούμε την αντίσταση.

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πειραματικός προσδιορισμός της αντίστασης ωμικού αντιστάτη

1. Παρακολουθείστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/3U62ggL6Wfs ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που βρίσκεται στο δίπλα σχήμα. Σε αυτό παρουσιάζεται ένα εικονικό πείραμα προκειμένου να υπολογισθεί πειραματικά η αντίσταση ενός αντιστάτη. Στο πείραμα θα ακολουθηθεί η διαδικασία που αναφέρθηκε στην μέθοδο. Στην αρχή του βίντεο φαίνεται το κλείσιμο του διακόπτη και μια μέτρηση. Καταγράψτε τις ενδείξεις των οργάνων για την πρώτη τάση στα αντίστοιχα κελιά της πρώτης γραμμής του πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Α/Α	***I*(A)**	***V*(V)**	***R*(Ω)**
1			
2			
3			
4			
5			

2. Στην συνέχεια του βίντεο γίνεται αλλαγή της τάσης τροφοδοσίας και λαμβάνονται άλλες τέσσερεις μετρήσεις. Το αποτέλεσμα αυτών των μετρήσεων καταγράφεται στο βίντεο. Με κατάλληλο χειρισμό του βίντεο, καταγράψτε τις μετρήσεις αυτές και συμπληρώστε έτσι την $2^{η}$ και $3^{η}$ στήλη του πίνακα 1.

3. Να υπολογίσετε την τιμή της αντίστασης *R* για κάθε μια από τις μετρήσεις με 3 σημαντικά ψηφία, ώστε να συμπληρώσετε και την $4^{η}$ στήλη του πίνακα 1. Δείξτε τους υπολογισμούς σας μόνο για την περίπτωση της πρώτης γραμμής του πίνακα 1.

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

5. Υπολογίστε την μέση τιμή των 5 τιμών της αντίστασης, καθώς και την μέση απόκλιση. Θεωρώντας τη μέση απόκλιση (με ένα σημαντικό ψηφίο) ως την αβεβαιότητα της μέσης τιμής να γράψετε το αποτέλεσμα στη μορφή $\bar{R} \pm \delta\bar{R}$

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

Β3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΓΕΡΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ

Σκοπός της άσκησης

Να προσδιορισθεί πειραματικά η ηλεκτρεγερτική δύναμη καθώς και η εσωτερική αντίσταση ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος.

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

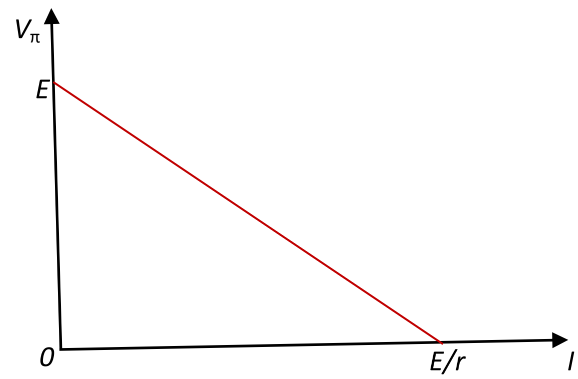
- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία και τη διάδοση σφαλμάτων
- Να κάνουν γραφική παράσταση, να υπολογίσουν κλίση και να εξηγήσουν τη φυσική σημασία των σημείων που τέμνει η γραφική παράσταση τους άξονες.

Θεωρητικό υπόβαθρο

Αν έχουμε μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς ρεύματος με ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) E και εσωτερική αντίσταση r, η οποία τροφοδοτεί κύκλωμα που περιέχει μόνο αντιστάτες, η τάση στους πόλους της είναι

$$V_{\pi}=E-Ir \quad (1)$$

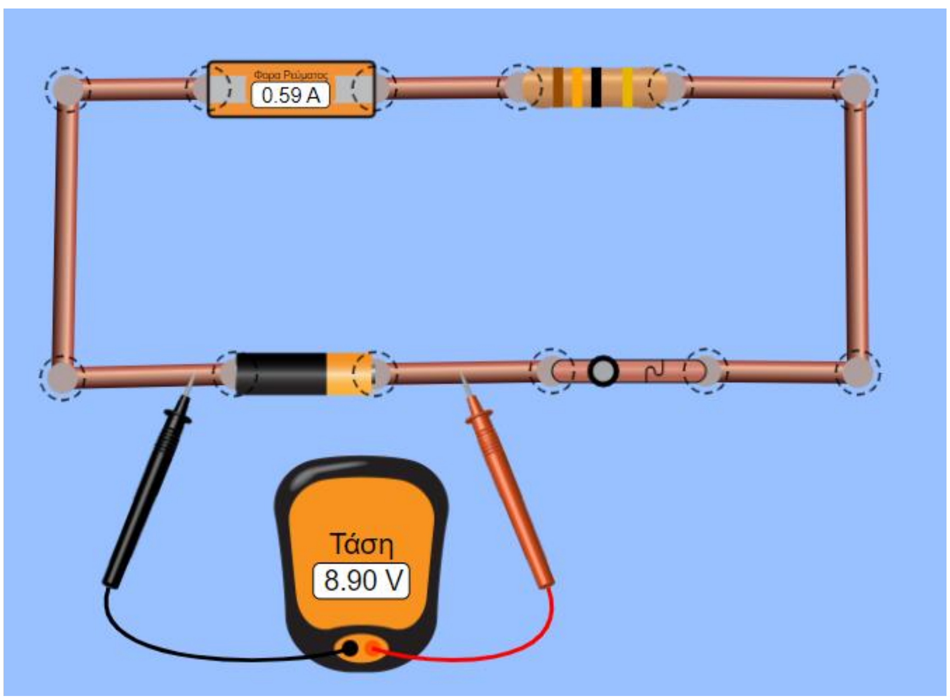
όπου I το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Αν μεταβάλλεται η αντίσταση του κυκλώματος τότε μεταβάλλεται το ρεύμα I και πολική τάση V_{π}. Η γραφική παράσταση $V_{\pi}=\mathrm{f}(I)$ απεικονίζεται στο σχήμα 1. Παρατηρούμε ότι η τομή της ευθείας με τον κατακόρυφο άξονα δίνει την τιμή της ΗΕΔ, ενώ η αντίθετη τιμή της κλίσης (είναι αρνητική) μας δίνει την τιμή της εσωτερικής αντίστασης. Η ΗΕΔ προφανώς ισούται με την πολική τάση όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό, ενώ η τιμή του ρεύματος E/r (για $V_{\pi}=0$) ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης, γιατί αντιστοιχεί σε μηδενική εξωτερική αντίσταση.



Σχήμα 1. Η γραφική παράσταση της σχέσης V_π=f(I)

Μέθοδος

Έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε την ΗΕΔ και την εσωτερική αντίσταση μια μπαταρίας. Κατασκευάζουμε ένα κύκλωμα σαν αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του πειράματος.

Η μέτρηση του ρεύματος γίνεται με αμπερόμετρο και της πολικής τάσης με βολτόμετρο. Αλλάζοντας την τιμή του αντιστάτη του κυκλώματος μπορούμε να πάρουμε μερικά ζεύγη πειραματικών τιμών για τα μεγέθη V_π και I και να σχεδιάσουμε την γραφική παράσταση $V_π$=f(I). Από τη γραφική παράσταση μπορούν να υπολογισθούν οι τιμές των μεγεθών E και r όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο.

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΓΕΡΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

1. Παρακολουθείστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/7vqkSzODIwU ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που βρίσκεται στο διπλανό σχήμα . Σε αυτό παρουσιάζεται ένα εικονικό πείραμα προκειμένου να υπολογισθεί η ΗΕΔ και η εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας. Στο πείραμα θα ακολουθηθεί η διαδικασία που αναφέρθηκε στην μέθοδο. Καταγράψτε την τιμή της πολικής τάσης με το διακόπτη ανοιχτό

……………………………………………

και στον πίνακα 1 τις τιμές της πολικής τάσης και του ρεύματος στην πρώτη μέτρηση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Α/Α	***I*(A)**	**V_π(V)**
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

2. Στη συνέχεια παρακολουθήστε το βίντεο όπου φαίνονται άλλες έξι μετρήσεις, αλλάζοντας διαδοχικά την αντίσταση του κυκλώματος. Χειριζόμενοι κατάλληλα το βίντεο μπορείτε να το σταματάτε όταν το επιθυμείτε ώστε να συμπληρωθεί ο πίνακας 1, για τις μετρήσεις 2 έως 7.

3. Κατόπιν να κατασκευάσετε το διάγραμμα V_{π}=f(I) σε χαρτί μιλιμετρέ και να το επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας. Να προεκτείνετε τη γραφική παράσταση μόνο προς τη μία μεριά ώστε η προέκτασή της να τέμνει τον άξονα των τάσεων. Εξηγείστε γιατί η αναμενόμενη μορφή του διαγράμματος V_{π}=f(I) είναι ευθεία της μορφής y=a+bx.

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

4. Σημειώστε την τιμή της V_{π} στο σημείο τομής της γραφικής παράστασης με τον άξονα των τάσεων. Επίσης υπολογίστε την κλίση της ευθείας.

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

5. Από τις τιμές των μεγεθών που σημειώσατε στο βήμα 4 υπολογίστε

(Α) την ΗΕΔ της πηγής και συγκρίνατε την απάντηση με την τιμή της πολικής τάσης με το διακόπτη ανοιχτό.

(B) την εσωτερική αντίσταση της ηλεκτρικής πηγής.

Εξηγείστε την ακρίβεια με την οποία γράψατε τα τελικά αποτελέσματα.

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………

Β4 - Πειραματικός προσδιορισμός της τιμής της παγκόσμιας σταθεράς των αερίων

Σκοπός της άσκησης

Να προσδιορισθεί πειραματικά η τιμή της παγκόσμιας σταθεράς των αερίων

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να κάνουν γραφική παράσταση και να υπολογίσουν την κλίση.

Προαπαιτούμενες γνώσεις

Καταστατική εξίσωση των αερίων

Θεωρητικό υπόβαθρο

Γνωρίζουμε ότι η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων συνδέει τις τιμές της πίεσης (P), του όγκου (V) και της θερμοκρασίας (T) μιας ποσότητας (n moles) αερίου. Συγκεκριμένα ισχύει

$$PV=nRT \quad (1)$$

R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμή R=0,082 L·atm/mol·K = 8,314 J/mol·K.

Ο αριθμός n των moles μιας μάζας m αερίου με γραμμομοριακή μάζα Mr μπορεί να υπολογιστεί από το πηλίκο

$$n=\frac{m}{M_r} \quad (2)$$

Μέθοδος

Από τις σχέσεις (1) και (2) μπορούμε να γράψουμε

$$P = \frac{mR}{M_r V} T \quad (3)$$

Αν μία ποσότητα αερίου κλειστεί αεροστεγώς σε ένα δοχείου σταθερού όγκου V, τότε αν θερμαίνουμε το αέριο θα αυξάνεται η πίεσή του ανάλογα. Με άλλα λόγια αν για διάφορα ζεύγη τιμών πίεσης – θερμοκρασίας γίνει το αντίστοιχο διάγραμμα αυτό λόγω της (3) αναμένουμε να είναι ευθεία με κλίση

$$b = \frac{mR}{M_r V} \quad (3)$$

Αν η τιμή της κλίσης b προσδιοριστεί από τη γραφική παράσταση P=f(T), με γνωστά τα μεγέθη V, m και Mr , προκύπτει η τιμή της σταθεράς R.

Ο πειραματιστής στο προτεινόμενο εικονικό πείραμα θα παρατηρήσει ένα βίντεο στο οποίο μια ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα έχει διοχετευτεί σε δοχείο σταθερού όγκου και με θέρμανση του αέρα αυξάνεται η πίεση. Οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας είναι εμφανείς στα αντίστοιχα όργανα μέτρησης. Με χειρισμό του βίντεο μπορεί να καταγράψει τα ζεύγη τιμών πίεσης και θερμοκρασίας προκειμένου να ακολουθήσει τη διαδικασία που περιγράφεται προηγουμένως. Το βίντεο δημιουργήθηκε από προσομοίωση από την διεύθυνση

https://www.seilias.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=584&Itemid=63

Φύλλο εργασίας

Πειραματικός προσδιορισμός της τιμής της παγκόσμιας σταθεράς των αερίων

1. Παρακολουθείστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtube.com/shorts/fkfGbeZR4LU?feature=share, ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode του διπλανού σχήματος. Θα δείτε ένα βίντεο στο οποίο μια ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα έχει διοχετευτεί σε δοχείο σταθερού όγκου και με θέρμανση του αέρα αυξάνεται η πίεση. Οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας είναι εμφανείς στα αντίστοιχα όργανα μέτρησης. Επιπλέον, φαίνεται και η τιμή του όγκου του δοχείου. Στο δοχείο έχουν εισαχθεί 20,3g αέρα. Ο ατμοσφαιρικό αέρας είναι μίγμα αερίων με μέση γραμμομοριακή μάζα 29g/mol. Με χειρισμό του βίντεο gas με το ποντίκι να σημειώσετε 6 ζεύγη τιμών θερμοκρασίας και πίεσης, καθώς το αέριο θερμαίνεται προκειμένου να συμπληρώσετε τον πίνακα 1. Για παράδειγμα, από 300K έως και 400K να λαμβάνετε τις μετρήσεις ανά 20 K. Στον πίνακα 1 να αναγράψετε και την τιμή του όγκου του δοχείου.

Πίνακας 1

Α/Α	***T*(K)**	***P*(atm)**	***V*(L)**
1			
2			
3			
4			
5			
6			

2. Μα βάση τις τιμές του πίνακα 1 να κάνετε το διάγραμμα P=f(T) σε χαρτί μιλιμετρέ το οποίο να επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας και να αιτιολογήσετε γιατί αναμένουμε να είναι ευθεία.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

3. Να υπολογίσετε την κλίση της ευθείας b και στη συνέχεια την τιμή της παγκόσμιας σταθεράς των αερίων (σε L.atm/mol.K) με δύο σημαντικά ψηφία, δίνοντας τις απαραίτητες εξηγήσεις.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

4. Να υπολογίσετε την % απόκλιση της τιμής της σταθεράς *R* που υπολογίσατε, από την τιμή της βιβλιογραφίας *R*=0,082 L·atm/mol·K.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

Γ΄ ΛΥΚΕΙΟΥ

Γ1 - Υπολογισμός της επιτάχυνσης της βαρύτητας g με τον απλό αρμονικό ταλαντωτή

Σκοπός άσκησης

Να υπολογισθεί πειραματικά η τιμή της επιτάχυνση της βαρύτητας με τον απλό αρμονικό ταλαντωτή (σύστημα ελατήριο – μάζα)

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να σχεδιάσουν γραφική παράσταση και να υπολογίσουν κλίση

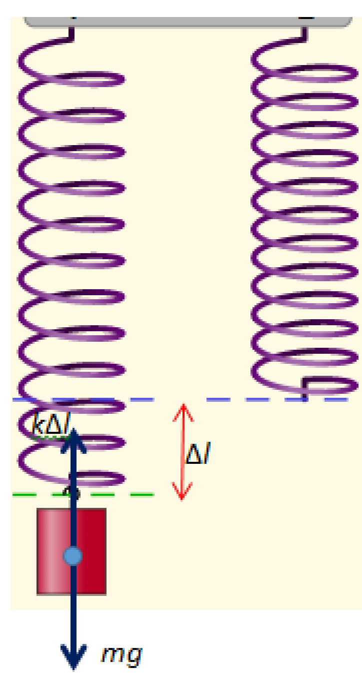
Προαπαιτούμενες γνώσεις

- Η περίοδος του απλού αρμονικού ταλαντωτή (σύστημα ελατήριο - μάζα).

Θεωρητικό υπόβαθρο

Θεωρούμε το σύστημα ελατήριο – μάζα του πλαϊνού σχήματος. Αν η παραμόρφωση του ελατηρίου, σε σχέση με το φυσικό του μήκος, στη θέση ισορροπίας είναι Δl, τότε από την ισορροπία των δυνάμεων έχουμε

$$k\Delta l = mg \quad (1)$$



Αν το σώμα εκτραπεί κατακόρυφα από τη θέση ισορροπίας και αφεθεί ελεύθερο θα εκτελέσει απλή αρμονική ταλάντωση, ανεξάρτητη του πλάτους, με περίοδο

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

Από τις (1) και (2) καταλήγουμε

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta l}{g}} \quad (3)$$

Μέθοδος

Η σχέση (3) μπορεί να γραφεί στη μορφή

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g}\Delta l \quad (4)$$

Αν κρεμάμε διαφορετικά βαρίδια από το ελατήριο θα έχουμε διαφορετικές επιμηκύνσεις Δl και διαφορετικές περιόδους ταλάντωσης. Μπορούμε να μετρήσουμε τις επιμηκύνσεις με υποδεκάμετρο και τις αντίστοιχες περιόδους με χρονόμετρο. Αν κάνουμε τη γραφική παράσταση T^2=f(Δl) αυτή θα είναι ευθεία, όπως προκύπτει από την (4). Η κλίση ($4\pi^2/g$) μπορεί να υπολογισθεί από τη γραφική παράσταση και στη συνέχεια μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Στο εικονικό πείραμα που προτείνουμε έχει αξιοποιηθεί η προσομοίωση Phet «Βαρίδια και ελατήρια». Ο πειραματιστής έχει να χειριστεί 5 βίντεο προκειμένου να λάβει μετρήσεις. Σε κάθε βίντεο κρέμεται διαφορετικό βαρίδι από το ελατήριο και με τη βοήθεια υποδεκάμετρου μπορεί να μετρηθεί η επιμήκυνση Δl. Στη συνέχεια το βαρίδι τίθεται σε κατακόρυφη ταλάντωση και στην οθόνη φαίνεται ένα χρονόμετρο. Όταν η άσκηση γίνεται με υλικά στο εργαστήριο συνήθως με το χρονόμετρο μετράμε τουλάχιστον το χρόνο 10 ταλαντώσεων και διαιρούμε δια 10 προκειμένου να βρούμε την περίοδο με μικρότερο σφάλμα από ότι αν μετράγαμε μια περίοδο. Στο εικονικό πείραμα η λήψη έχει γίνει με την επιλογή «αργή κίνηση» και συνεπώς αρκεί ο πειραματιστής να μετρήσει το χρόνο μόνο δύο ή τριών περιόδων. Η επιλογή «αργή κίνηση» έγινε ώστε από καρέ σε καρέ να μην μεταβάλλεται πολύ η θέση και να μπορεί ο πειραματιστής με χειρισμό του βίντεο με το ποντίκι να προσδιορίζει σε κάποιο καρέ το σώμα σε μια θέση με καλή ακρίβεια, για παράδειγμα στο κάτω άκρο της ταλάντωσης..

Βιβλιογραφικές αναφορές

Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής Τόμος Ι, Τομέας Φυσικής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, Εκδόσεις Συμμετρία (Αθήνα 2010)

Young H.D., Πανεπιστημιακή Φυσική, Όγδοη έκδοση, Εκδόσεις Παπαζήση (Αθήνα 1994)

Φύλλο εργασίας

Υπολογισμός της επιτάχυνσης της βαρύτητας *g* με τον απλό αρμονικό ταλαντωτή

1. Παρακολουθήστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/W20fQWdPpfg ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Σε αυτό το βίντεο και πιο συγκεκριμένα στο πρώτο μέρος του ΑΑΤ1, θα δείτε ότι κρέμεται ένα βαρίδι από ένα ελατήριο και με το υποδεκάμετρο μπορείτε να μετρήσετε την επιμήκυνση Δl στη θέση ισορροπίας και γράψτε το αποτέλεσμα της μέτρησης στο αντίστοιχο κελί του πίνακα 1 με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων.

Στη συνέχεια παρακολουθήστε την ταλάντωση του βαριδιού. Δοκιμάστε με το ποντίκι να βρείτε μία θέση του σώματος και κατόπιν την ίδια θέση μετά από 2 ή 3 περιόδους καταγράφοντας στο πρόχειρο τις αντίστοιχες ενδείξεις του χρονομέτρου. Προσδιορίστε την περίοδο της ταλάντωση και θέστε το αποτέλεσμα στο αντίστοιχο κελί του πίνακα 1 με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων.

Γράψτε με λίγα λόγια πως βρήκατε την περίοδο.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

Πίνακας 1

Βίντεο	**Δ*l*(cm)**	***T*(s)**	**$T^2(s^2)$**
AAT1			
AAT2			
AAT3			
AAT4			
AAT5			

2. Να επαναλάβετε το βήμα 1 διαδοχικά για τα υπόλοιπα κομμάτια του βίντεο AAT2, AAT3, AAT4 και AAT5 και συμπληρώστε χωρίς εξηγήσεις τη $2^η$ και $3^η$ στήλη του πίνακα 1.

3. Συμπληρώστε πλέον και την τελευταία στήλη του πίνακα 1 με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων.

4. Να σχεδιάσετε τη γραφική παράσταση T^2=f(Δ*l*) σε χαρτί μιλιμετρέ και να το επισυνάψετε στο φύλλο εργασίας. Εξηγείστε γιατί αναμένουμε να είναι ευθεία.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

5. Να υπολογίσετε την κλίση b της ευθείας με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

6. Από την κλίση b να υπολογίσετε την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας g με τον κατάλληλο αριθμό σημαντικών ψηφίων, δίνοντας τις απαραίτητες εξηγήσεις. (π=3,14)

…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………………..

7. Υπολογίστε την % απόκλιση της τιμής του g που υπολογίσατε πειραματικά από την τιμή της βιβλιογραφίας ($9,81 m/s^2$).

…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………………

Γ2 - Πειραματικός προσδιορισμός του μήκους κύματος μονοχρωματικού φωτός με πειράματα συμβολής

Σκοπός της άσκησης

Θα μελετηθούν φαινόμενα συμβολής του φωτός και θα προσδιορισθεί πειραματικά το μήκος κύματος μονοχρωματικού φωτός.

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

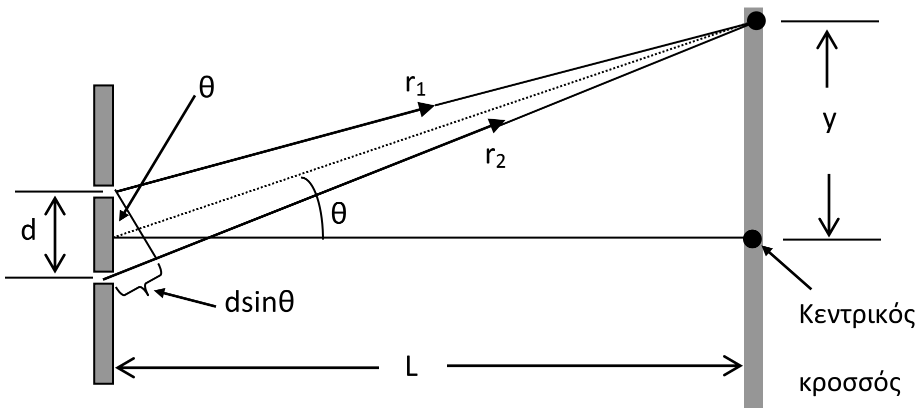
- Να μελετήσουν πειραματικά τα φαινόμενα συμβολής
- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να σχεδιάσουν γραφική παράσταση και να υπολογίσουν την κλίση
- Να υπολογίσουν μέση τιμή και το σφάλμα μέσης τιμής

Προαπαιτούμενες γνώσεις

- Συμβολή φωτός από δύο σύμφωνες σημειακές πηγές

Θεωρητικό υπόβαθρο

Λόγω της κυματικής φύσης του φωτός, δύο φωτεινές πηγές μπορούν να δώσουν φαινόμενα συμβολής. Για να έχουμε στατική συμβολή, δηλαδή κροσσούς σε σταθερές θέσεις, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σύμφωνες πηγές.



Σχήμα 1. Συμβολή από σύμφωνες σημειακές πηγές φωτός

Στο σχήμα 1 έχουμε την περίπτωση όπου μονοχρωματικό φως πέφτει πάνω σε διπλή σχισμή, ενός διαφράγματος. Η σχισμές απέχουν d και είναι πολύ λεπτές. Κάθε μία μπορεί να θεωρηθεί μια δευτερογενής πηγή κυμάτων. Το μέτωπο του κύματος της πηγής φωτός φτάνει συγχρόνως στις σχισμές του διαφράγματος, οπότε αυτές γίνονται νέες πηγές με ίδια συχνότητα και βρίσκονται σε φάση. Συνεπώς αυτές οι πηγές είναι σύμφωνες και τα φωτεινά τους κύματα που φτάνουν σε ένα πέτασμα (για παράδειγμα ένα φύλο λευκού) συμβάλουν και δίνουν στατική συμβολή, δημιουργούν δηλαδή κροσσούς ενισχυτικής ή ακυρωτικής συμβολής σε σταθερές θέσεις. Το πέτασμα απέχει από τις σύμφωνες πηγές απόσταση $L>>d$ και παρατηρούμε το αποτέλεσμα της συμβολής σε αυτό. Έστω σε απόσταση $y<<L$ υπάρχει ένας κροσσός ενισχυτικής συμβολής. Με αυτές τις προϋποθέσεις οι ακτίνες r_1,r_2 είναι σχεδόν παράλληλες και η διαφορά μήκος τους είναι

$$r_1\text{-}r_2=d\sin\theta$$

Όμως θεωρώντας

$$\sin\theta\approx\tan\theta\approx y/L$$

καταλήγουμε

$$r_1\text{-}r_2=dy/L$$

Ενισχυτική συμβολή (φωτεινό κροσσό) έχουμε όταν

$$r_1\text{-}r_2=n\lambda$$

όπου λ το μήκος κύματος του φωτός των πηγών και n=0,±1,± 2,….

Συνδυάζοντας τις δύο τελευταίες σχέσεις έχουμε ότι η θέση του n-οστού κροσσού είναι

$$y = n\lambda\frac{L}{d} \quad (1)$$

Για τον κεντρικό κροσσό είναι n=0.

Καταστρεπτική συμβολή (σκοτεινό κροσσό) έχουμε όταν

$$r_1\text{-}r_2=(n+0,5)\lambda, \text{ όπου } n=0,\pm1,\pm 2,\ldots$$

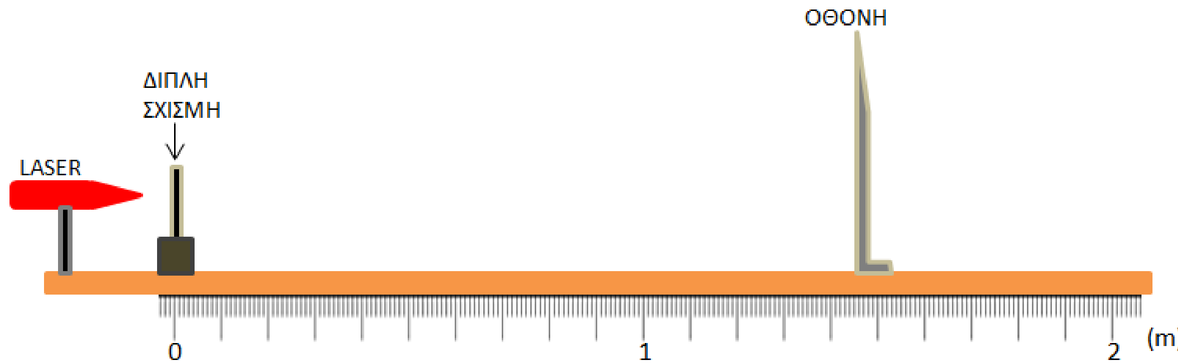
Συνεπώς η θέση των σκοτεινών κροσσών είναι

$$y = (n+\frac{1}{2})\lambda\frac{L}{d}$$

Από την μελέτη κατανομής της έντασης του φωτός που προέρχεται από τη συμβολή των δύο σύμφωνων φωτεινών πηγών στο πείραμα της διπλής σχισμής προκύπτει ότι στις θέσεις των κροσσών ενίσχυσης (φωτεινοί κροσσοί) έχουμε τη μέγιστη τιμή της έντασης (ενισχυτική συμβολή) και ότι στη θέση των σκοτεινών κροσσών έχουμε μηδενική ένταση.

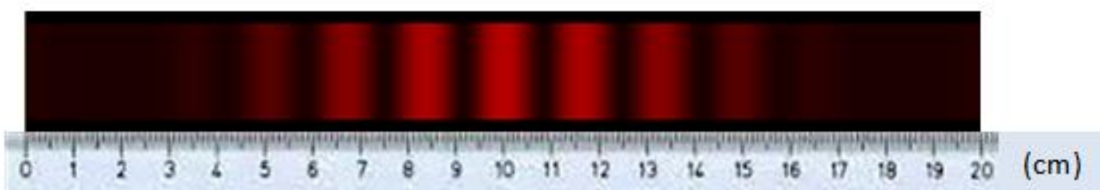
Μέθοδος

Για τη συγκεκριμένη άσκηση προτείνεται η διάταξη του σχήματος 2. Η δέσμη φωτός από το laser πέφτει στη διπλή σχισμή. Η απόσταση d μεταξύ των δύο σχισμών δεν είναι γνωστή και ο πειραματιστής μπορεί να μετρήσει την απόσταση L σχισμής- πετάσματος (οθόνη). Επίσης, μετακινώντας την οθόνη μπορεί να επαναλαμβάνει το πείραμα όσες φορές επιθυμεί για διάφορες αποστάσεις.



Σχήμα 2. Η πειραματική διάταξη για το πείραμα της διπλής σχισμής

Η σχισμές δεν είναι απείρως λεπτές, οπότε ο πειραματιστής θα παρατηρεί στην οθόνη τους κροσσούς συμβολής / περίθλασης με μεταβαλλόμενη ένταση όπως στο σχήμα 3, ωστόσο η σχέση (1) για τη θέση των φωτεινών κροσσών συμβολής ισχύει.



Σχήμα 3. Η εικόνα της συμβολής / περίθλασης στο πέτασμα

Η απόσταση y του κέντρου ενός φωτεινού κροσσού, για παράδειγμα του n=2, από το κέντρο του κεντρικού κροσσού είναι μετρήσιμη και συνεπώς από την σχέση (1) μπορεί να υπολογισθεί πειραματικά το μήκος κύματος του φωτός, εφόσον η απόσταση d είναι γνωστή και αντιστρόφως μπορεί να υπολογισθεί η απόσταση d, αν είναι γνωστό το μήκος κύματος λ.

Θα πραγματοποιηθούν δύο πειράματα. Το πείραμα 1 θα είναι για φως κόκκινου χρώματος γνωστού μήκους κύματος προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση d. Συγκεκριμένα, για 5 ζεύγη τιμών y και L θα γίνει η γραφική παράσταση y=f(L), η οποία είναι ευθεία (σχέση 1). Από την κλίση της ευθείας, αφού το μήκος κύματος είναι γνωστό, μπορεί να υπολογισθεί η τιμή της απόστασης d των σχισμών. Κατόπιν το πείραμα 2 θα είναι για πράσινο φως του οποίου το μήκος κύματος είναι ζητούμενο. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (1) με δεδομένη πλέον την απόσταση d που υπολογίστηκε στο πείραμα 1. Συγκεκριμένα, θα υπολογισθεί το λ για 5 ζεύγη τιμών y και L και στη συνέχεια θα βρεθεί η μέση τιμή.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τομέας Φυσικής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, http://www.physics.ntua.gr/gr/ergasthriakoi_odhgoi.htm

Serway R., Physics for Scientists & Engineers, Third Edition, Απόδοση στα Ελληνικά Ρεσβάνης Λ., Εκδόσεις Κορφιάτη (Αθήνα 1991)

Φύλλο εργασίας

Πειραματικός προσδιορισμός του μήκους κύματος μονοχρωματικού φωτός με πειράματα συμβολής

1. Παρακολουθήστε το πρώτο πείραμα του βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/3UPLieyA4QI, ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Θα καταλάβετε ότι πρόκειται για εκτέλεση του πειράματος συμβολής από διπλή σχισμή, όπως αυτό περιγράφεται στο θεωρητικό υπόβαθρο και στη μέθοδο. Υπάρχουν πέντε επαναλήψεις του πειράματος για διαφορετικές αποστάσεις L μεταξύ οθόνης και διπλής σχισμής. Η απόσταση d μεταξύ των σχισμών δεν είναι γνωστή. Για κάθε επανάληψη μπορείτε να δείτε τους κροσσούς συμβολής με προσαρμοσμένο υποδεκάμετρο. Για κάθε επανάληψη, σταματώντας κατάλληλα το βίντεο καταγράψτε την απόσταση L καθώς και την απόσταση y του κέντρου του κεντρικού κροσσού (n=0) από το κέντρο του μεθεπομένου κροσσού (n=2) και συμπληρώστε τις αντίστοιχες στήλες του πίνακα 1. Το μήκος κύματος του φωτός του «κόκκινου Laser» είναι γνωστό από τον κατασκευαστή και αναγράφεται στον πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Α/Α μέτρησης	***L*(m)**	***y*(cm)**	***λ*(nm)**
1			
2			
3			664nm
4			
5			

2. Κατασκευάστε με τις τιμές του πίνακα 1 τη γραφική παράσταση y=f(L) σε χαρτί μιλιμετρέ και επισυνάψτε το στο φύλλο εργασίας. Εξηγείστε γιατί αναμένουμε να είναι ευθεία και υπολογίστε την κλίση b.

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………..
………………………………………………………………………………………..
………………………………………………………………………………………..

3. Από την τιμή της κλίσης b υπολογίστε την τιμή της απόστασης d μεταξύ των σχισμών

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………………..
………………………………………………………………………………………..
………………………………………………………………………………………..

4. Τώρα να παρακολουθήσετε το δεύτερο πείραμα του παραπάνω βίντεο. Είναι μία επανάληψη του προηγουμένου πειράματος για πράσινο φως του οποίου το μήκος κύματος είναι ζητούμενο. Το πείραμα γίνεται με την ίδια διπλή σχισμή με την οποία έγινε το προηγούμενο πείραμα. Με ανάλογη διαδικασία με αυτή του βήματος 1 συμπληρώστε τη δεύτερη και τρίτη στήλη του πίνακα 2. Κατόπιν με χρήση της σχέσης (1) συμπληρώστε και την τελευταία στήλη του πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Α/Α μέτρησης	***L*(m)**	***y*(cm)**	***λ*(nm)**
1			
2			
3			
4			
5			

4. Υπολογίστε την μέση τιμή του μήκους κύματος του πράσινου φωτός από τις παραπάνω μετρήσεις.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………..

5. Υπολογίστε την μέση απόκλιση δλ την οποία (με ένα σημαντικό ψηφίο) θεωρούμε προσεγγιστικά ως αβεβαιότητα στο υπολογισμό της μέσης τιμής. Γράψτε το τελικό αποτέλεσμα για το μήκος κύματος του πράσινου laser στην μορφή $\bar{\lambda} \pm \delta\lambda$.

……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………………

Γ3 - Μέτρηση του ειδικού φορτίου *e/m* του ηλεκτρονίου

Σκοπός άσκησης

Να υπολογισθεί το πηλίκο του φορτίου προς τη μάζα *e/m* του ηλεκτρονίου

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να υπολογίσουν μέση τιμή

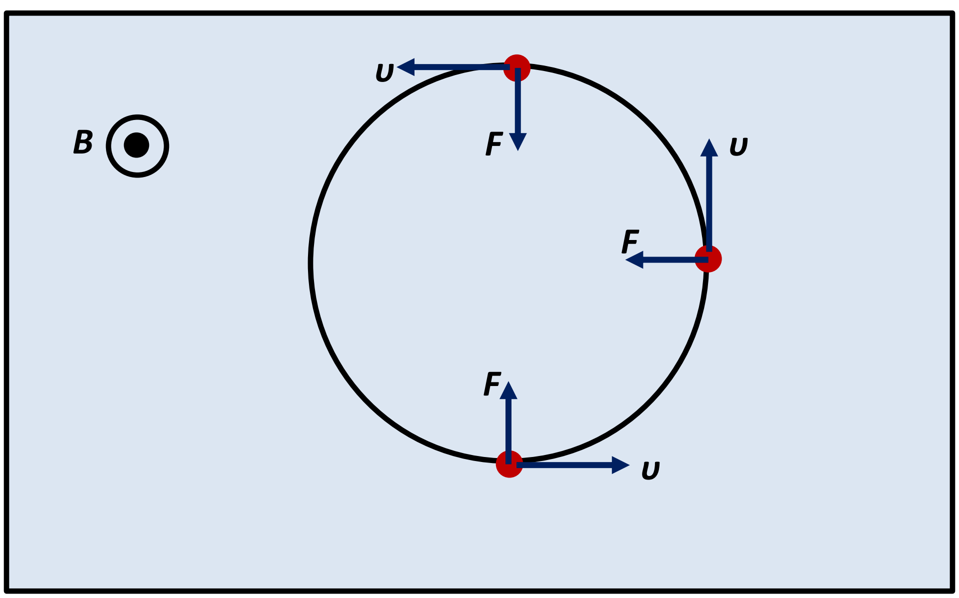
Προαπαιτούμενες γνώσεις

- Κεντρομόλος δύναμη - ομαλή κυκλική κίνηση

- Δύναμη Lorentz σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο μέσα σε μαγνητικό πεδίο

Θεωρητικό υπόβαθρο

Θεωρούμε ότι ένα ηλεκτρόνιο εισέρχεται με ταχύτητα $\boldsymbol{\upsilon}$ μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο $\boldsymbol{B}$, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1. Τότε το ηλεκτρόνιο θα δέχεται δύναμή $\boldsymbol{F}$ συνεχώς κάθετη στην ταχύτητα και θα διαγράψει κυκλική τροχιά ακτίνας r.



Σχήμα 1. Η κίνηση του ηλεκτρονίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο

Για την κίνηση, η ***F*** θα παίζει το ρόλο της κεντρομόλου δύναμης, άρα θα ισχύει

$$Bve = m\frac{v^2}{r} \quad (1)$$

Το ηλεκτρόνιο έχει παραχθεί με θερμιονική εκπομπή και στη συνέχεια επιταχύνθηκε από ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ σημείων με διαφορά δυναμικού *V*.

Για την επιτάχυνση του ηλεκτρονίου από το θεώρημα έργου – ενέργειας έχουμε

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) καταλήγουμε για το πηλίκο e/m στην εξίσωση

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2\,r^2} \quad (3)$$

Αν το μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα ζευγάρι πηνίων Helmholtz, στο κέντρο του συστήματος των πηνίων το πεδίο ***B*** είναι ανάλογο του ρεύματος *I* που τροφοδοτεί τα πηνία. Μπορούμε συνεπώς να γράψουμε

$$B=CI \quad (4)$$

Ο συντελεστής αναλογίας *C* είναι ανάλογος του αριθμού των σπειρών των πηνίων και αντιστρόφως ανάλογος της ακτίνας τους.

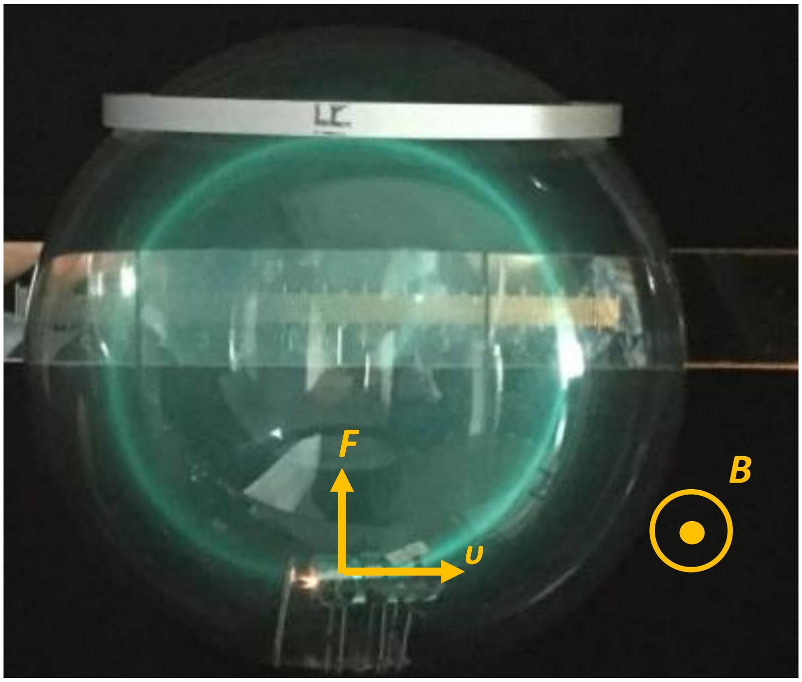
Μέθοδος

Στο εργαστήριο παράγονται ηλεκτρόνια με θερμιονική εκπομπή και στη συνέχεια επιταχύνονται από τάση *V*. Η δέσμη των ηλεκτρονίων εισέρχεται σε λυχνία κενού στην οποία υπάρχει προσθήκη ατμών Hg σε χαμηλή πίεση. Τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του Hg και τα διεγείρουν. Αυτά κατά την αποδιέγερση εκπέμπουν στο ορατό και έτσι είναι έμμεσα ορατή η δέσμη των ηλεκτρονίων, όπως στην εικόνα του σχήματος 2. Η λυχνία βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από σύστημα πηνίων Helmholtz τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύμα *I*. Με βολτόμετρο και αμπερόμετρο μπορούν να μετρηθούν τα μεγέθη *V* και *I*. Επίσης, με κατάλληλη τεχνική μπορεί να μετρηθεί η διάμετρος, άρα και η ακτίνα *r*, της κυκλικής τροχιάς των ηλεκτρονίων.

Οι σχέσεις (3) και (4) δίνουν

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{C^2 I^2 r^2} \quad (5)$$

Γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά των πηνίων μπορεί να υπολογισθεί το C. Οι τιμές των V, I και r μπορούν να μετρηθούν, οπότε είναι δυνατός και ο υπολογισμός του e/m.

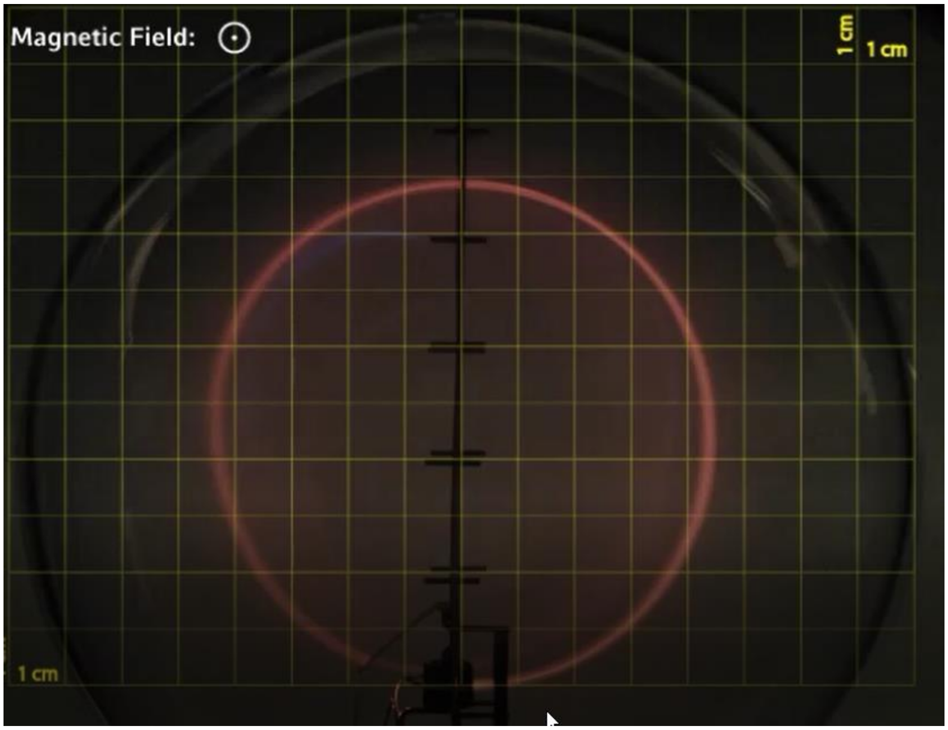


Σχήμα 2. Η έμμεση παρατήρηση της τροχιάς των ηλεκτρονίων στην πραγματική διάταξη

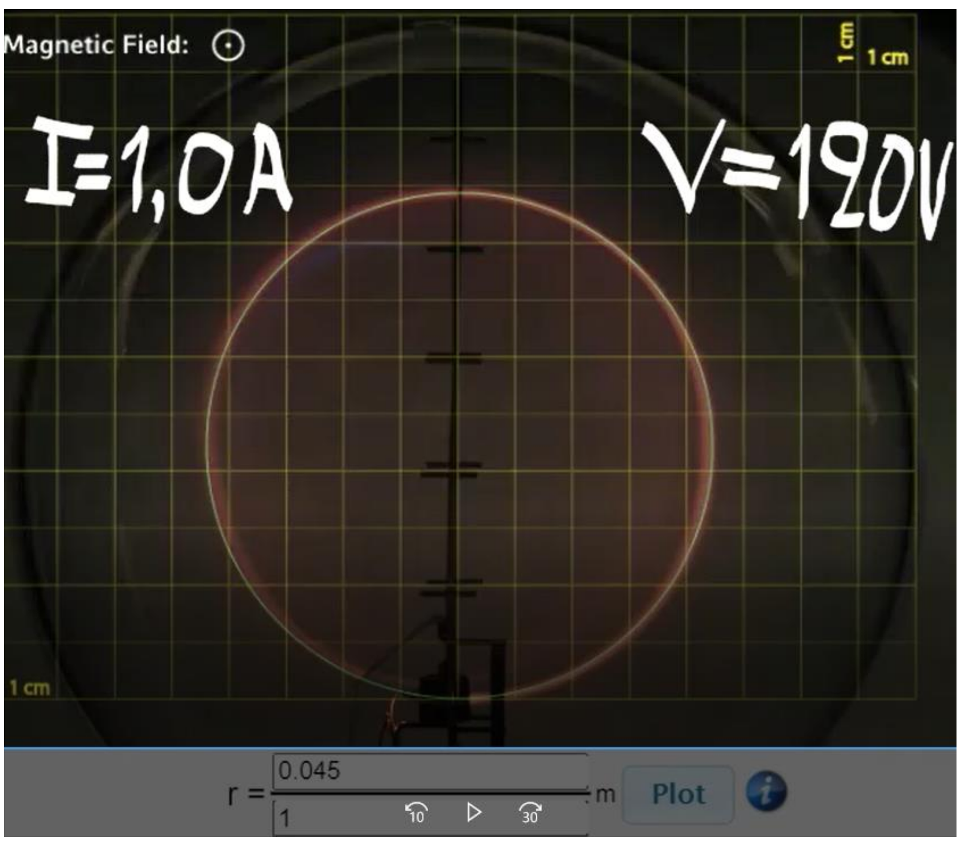
Προσομοίωση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στην άσκηση έλαβε ως βάση αυτή που υπάρχει στην ιστοσελίδα

https://gateway.golabz.eu/embed/apps/dff6d333-2140-46e1-b255-49de889b0005/app.html

Στο σχήμα 3 φαίνεται «έμμεσα» η τροχιά των ηλεκτρονίων για ορισμένες τιμές της τάσης και του ρεύματος. Η προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα μέσω του κουμπιού «Plot» να δημιουργείται ένας (ανοιχτόχρωμος) κύκλος γνωστής ακτίνας ώστε να μπορεί να μετρηθεί η ακτίνα της τροχιάς των ηλεκτρονίων. Για παράδειγμα στην εικόνα (Σχήμα 4) η τροχιά των ηλεκτρονίων προσεγγίζεται από κύκλο ακτίνας 0,045m. Για τις ανάγκες της άσκησης δημιουργήθηκαν βίντεο από την προαναφερόμενη προσομοίωση και για κάθε περίπτωση η τιμές της τάσης και του ρεύματος αναγράφονται για λίγο στο βίντεο όπως στο σχήμα 4.



Σχήμα 3. Η έμμεση παρατήρηση της τροχιάς των ηλεκτρονίων



Σχήμα 4. Η χρήση του Plot βοηθά στον προσδιορισμό της ακτίνας

Βιβλιογραφικές αναφορές

Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής Τόμος Ι, Τομέας Φυσικής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, Εκδόσεις Συμμετρία (Αθήνα 2010)

Young H.D., Πανεπιστημιακή Φυσική, Όγδοη έκδοση, Εκδόσεις Παπαζήση (Αθήνα 1994)

Φύλλο εργασίας

Μέτρηση του λόγου e/m του ηλεκτρονίου

1. Παρακολουθήστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/ntaRqhV0sx8 ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που φαίνεται στο δίπλα σχήμα. Στο βίντεο αυτό προσομοιώνεται η τροχιά δέσμης ηλεκτρονίων που έχουν αρχικά επιταχυνθεί από τάση V=(90±1)V και εισέρχονται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο B κάθετα στις γραμμές. Το πεδίο δημιουργείται από σύστημα πηνίων Helmholtz τα οποία τροφοδοτούνται από ρεύμα I. Με την χρήση του κουμπιού "Plot" γίνεται προσέγγιση της τροχιάς από κύκλο γνωστής ακτίνας. Παρατηρήστε προσεχτικά το πρώτο μέρος του βίντεο (em.1) και σημειώστε την τιμή της ακτίνας της τροχιάς σε cm καθώς και την εκτίμησή σας για το σφάλμα.

$r \pm \delta r=$ ………………………………

Στο βίντεο αναγράφεται η τιμή του ρεύματος I για την συγκεκριμένη μέτρηση, όπως καταγράφηκε από το ψηφιακό αμπερόμετρο στο εργαστήριο. Σημειώστε την τιμή για το ρεύμα I, καθώς και την εκτίμηση για το σφάλμα του οργάνου για το οποίο δεν δίνεται πληροφορία από τον κατασκευαστή

$I \pm \delta I =$…………………………………………….

Η τιμή του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την σχέση (4). Για τα δεδομένα του συστήματος των πηνίων του εργαστηρίου δίνεται ότι

$$C=8{,}0\times10^{-4}\ \mathrm{T/A}$$

Από την σχέση (5) υπολογίστε το e/m (Να μην υπολογισθεί το σφάλμα αλλά η απάντηση να δοθεί με εφαρμογή των κανόνων για τα σημαντικά ψηφία)

$e/m=$…………………………………

2. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στο εργαστήριο για άλλα 4 ζεύγη τιμών των *r* και *I* με σταθερή την τάση *V*=90V. Παρατηρείστε διαδοχικά τα υπόλοιπα μέρη του βίντεο em.2, em.3, em.4, και em.5 και ακολουθείστε την ίδια διαδικασία όπως στο βήμα 1 ώστε να συμπληρωθεί ο Πίνακας 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ .1

Βίντεο	*I*(A)	*r*(cm)	*e*/*m* (C/Kg)
em 1			
em 2			
em 3			
em 4			
em 5			

3. Υπολογίστε τη μέση τιμή του *e/m*.

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

4. Σας δίνεται από την βιβλιογραφία ότι

$$e=1{,}602177\times10^{-19}\text{C και } m=9{,}10939\times10^{-31}\text{Kg}$$

Υπολογίστε την τιμή του πηλίκου από τη βιβλιογραφία και στρογγυλέψτε με όσα σημαντικά ψηφία έχει και η τιμή που υπολογίσατε πειραματικά.

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

5. Υπολογίστε την % απόκλιση της τιμής του *e/m* που υπολογίσατε πειραματικά από την τιμή της βιβλιογραφίας.

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

Γ4 - Πειραματική μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Σκοπός της άσκησης

Να υπολογισθεί πειραματικά η τιμή της σταθεράς του Plank, η συχνότητα κατωφλίου και το έργο εξαγωγής του Na.

Στόχοι

Οι μαθητές/τριες:

- Να ασκηθούν στη λήψη μετρήσεων
- Να δημιουργήσουν πίνακα τιμών
- Να εφαρμόσουν τους σχετικούς κανόνες με τα σημαντικά ψηφία
- Να σχεδιάσουν γραφική παράσταση και να υπολογίσουν κλίση ευθείας
- Να εξηγούν τη φυσική σημασία των σημείων τομής της γραφική παράστασης με τους άξονες.

Προαπαιτούμενες γνώσεις

- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο – νόμοι

Θεωρητικό υπόβαθρο

Έστω ότι στην κάθοδο φωτοκύτταρου, για το υλικό της οποίας το έργο εξαγωγής είναι Φ, προσπίπτει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας f και τα φωτοηλεκτρόνια αποκτούν κινητική ενέργεια K. Ισχύει ότι

$$K=hf-\Phi \quad (1)$$

Αν η τάση αποκοπής είναι V_O τότε γνωρίζουμε ότι αν εφαρμοστεί «αρνητική τάση» όση η τάση αποκοπής τότε τα ηλεκτρόνια αποκτούν μηδενική ταχύτητα ακριβώς πριν φτάσουν στην άνοδο. Από το θεώρημα έργου ενέργειας έχουμε

$$K=eV_O \quad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) μπορούμε να γράψουμε

$$V_O=\frac{h}{e}f-\frac{\Phi}{e} \quad (3)$$

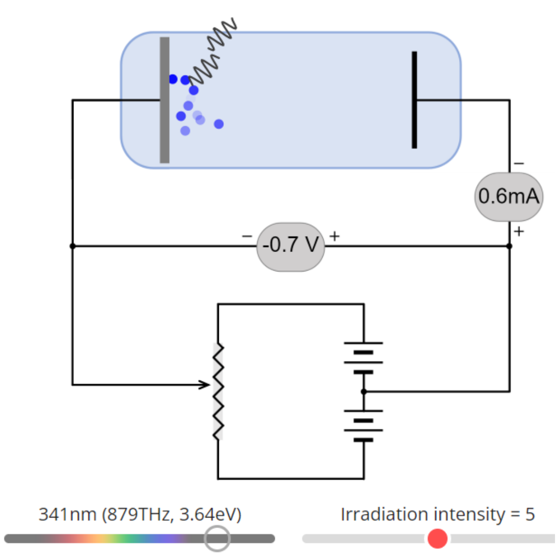
Αν για το ίδιο μέταλλο καθόδου προσπέσουν διαδοχικά ακτινοβολίες διαφορετικής συχνότητας και προσδιορίσουμε την τάση αποκοπής σε κάθε περίπτωση μπορούμε να χαράξουμε την γραφική παράσταση της τάσης αποκοπής V_O συναρτήσει της συχνότητας *f*. Από την σχέση (3) προκύπτει ότι η γραφική παράσταση είναι ευθεία και η κλίσης είναι *h/e*. Συνεπώς από την κλίση εύκολα υπολογίζεται η τιμή της σταθεράς *h* του Plank. Επίσης, το σημείο που η γραφική παράσταση τέμνει τον άξονα των συχνοτήτων προφανώς είναι η συχνότητα κατωφλίου. Τέλος, το σημείο που η γραφική παράσταση τέμνει τον άξονα των τάσεων είναι το $-\Phi/e$ και η απόλυτη τιμή ισούται με το έργο εξαγωγής σε eV.

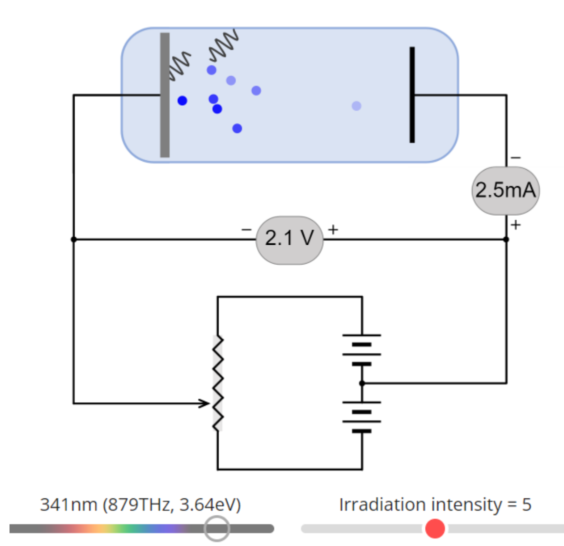
Μέθοδος

Η πειραματική μελέτη θα γίνει μέσω εικονικού πειράματος. Για την δημιουργία του πειράματος αξιοποιήθηκε η προσομοίωση

https://javalab.org/en/photoelectric_effect_2_en/

Από την προσομοίωση δημιουργήθηκαν 5 βίντεο και ο πειραματιστής θα χειρίζεται τα βίντεο αυτά ώστε να λάβει τις απαραίτητες μετρήσεις. Σε κάθε βίντεο το υλικό της καθόδου είναι το ίδιο αλλά είναι διαφορετική η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, προφανώς σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα κατωφλίου ώστε να έχουμε ρεύμα. Σε κάθε περίπτωση γίνεται σταδιακή μεταβολή της τάσης ανόδου-καθόδου από αρνητικές σε θετικές τιμές. Υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής από -5V έως 5V. Ο πειραματιστής σε κάθε βίντεο βλέπει την τιμή του μήκους κύματος της ακτινοβολίας και στα αντίστοιχα όργανα την τιμή της τάσης και του φωτορεύματος, όπως στις παρακάτω εικόνες





Μπορεί με χειρισμό του βίντεο καρέ - καρέ να προσδιορίσει με καλή ακρίβεια την τάση αποκοπής. Για παράδειγμα, μπορεί να εντοπίσει δύο διαδοχικά καρέ όπου στο ένα το αμπερόμετρο να δείχνει μηδέν και στο άλλο την πρώτη μη μηδενική ένταση ρεύματος (0,1A). Εύλογα μπορεί να θεωρηθεί με καλή ακρίβεια ως τάση αποκοπής η απόλυτη τιμή της τάσης ανάμεσα στις δύο τιμές που εμφανίζονται στο βολτόμετρο στα δύο αυτά καρέ. Συνεπώς, με τις 5 τιμές των διαφορετικών μηκών κύματος, άρα και των συχνοτήτων (από τη σχέση $c=\lambda f$) καταγεγραμμένες και την αντίστοιχη τάση αποκοπής σε κάθε περίπτωση μπορεί να χαραχθεί το διάγραμμα της τάσης αποκοπής V_O συναρτήσει της συχνότητας f και στη συνέχεια να ακολουθηθεί η διαδικασία που περιγράφεται στο θεωρητικό υπόβαθρο.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Millikan, R. A. (1916). A direct photoelectric determination of Plank's "h". *Physical Review* **7**,355

Ford W. K. (1974). *Κλασική και Σύγχρονη Φυσική*. Τόμος 3. Μτφρ. Θεοδώρου Γ. Έκδοση Γ. Πνευματικού.

Φύλλο εργασίας

Πειραματική μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

1. Παρακολουθήστε το βίντεο στη διεύθυνση https://youtu.be/BAv-IlnSzYw ή σκανάρετε με τη φορητή συσκευή σας το αντίστοιχο qrcode που βρίσκεται στο διπλανό σχήμα. Στο πρώτο μέρος του βίντεο (photoel1), θα δείτε ένα πείραμα όπου αυξάνεται η τάση ανόδου – καθόδου σε φωτοκύτταρο από αρνητικές σε θετικές τιμές. Περιγράψτε τι δείχνει το αμπερόμετρο καθώς μεταβάλλεται η τάση και δώστε μία εξήγηση με βάση τις γνώσεις σας για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

2. Καταγράψτε το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο αντίστοιχο κελί του πίνακα 1 και στη συνέχεια υπολογίστε την συχνότητα με δεδομένο ότι c=3×10^{8}m/s. Δείξτε τον υπολογισμό αυτό και στη συνέχεια την τιμή της συχνότητας γράψτε τη στο αντίστοιχο κελί του πίνακα 1. (Οι τιμές να είναι με το ίδιο αριθμό σημαντικών ψηφίων με το μήκος κύματος)

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

3. Προσπαθήστε με χειρισμό του βίντεο καρέ-καρέ με το ποντίκι να προσδιορίσετε την τάση αποκοπής V_O και στη συνέχεια συμπληρώστε την πρώτη γραμμή του πίνακα 1. Εξηγείστε πως προσδιορίσατε την τάση αποκοπής V_O.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

Πίνακας 1

Βίντεο	λ (nm)	$f\,(10^{15}$Hz)	V_o(V)
photoel1			
photoel2			
photoel3			
photoel4			
photoel5			

4. Να επαναλάβετε τα προηγούμενα και για υπόλοιπα μέρη του βίντεο photoel2, photoel3, photoel4 και photoel5, χωρίς πλέον να γράψετε εξηγήσεις αλλά να συμπληρώσετε τον πίνακα 1.

5. Αιτιολογείστε ότι η γραφική παράσταση της τάσης αποκοπής V_o συναρτήσει της συχνότητας f αναμένουμε να είναι ευθεία και στη συνέχεια κατασκευάστε αυτή τη γραφική παράσταση σε φύλλο μιλιμετρέ και επισυνάψτε το.

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………

6. Υπολογίστε την κλίση της ευθείας του παραπάνω διαγράμματος και στη συνέχεια υπολογίστε την τιμή της σταθεράς h του Plank με δεδομένο ότι e=1.6×10^{-19}C. Δώστε τις απαραίτητες εξηγήσεις.

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

7. Να υπολογίσετε την % απόκλιση της τιμής της σταθεράς *h* που υπολογίσατε πειραματικά από την θεωρητική $6{,}626 \times 10^{-34}$J.s.

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

6. Υπολογίστε από το διάγραμμα την τιμή της συχνότητας κατωφλίου, δίνοντας της απαραίτητες εξηγήσεις.

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………

7. Υπολογίστε από το διάγραμμα την τιμή του έργου εξαγωγής *Φ* του μετάλλου της καθόδου σε eV, δίνοντας της απαραίτητες εξηγήσεις.

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………

……………………………………………………………………………………………