

**Προσδιορισμός της τιμής του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου.
Προσομοιώνοντας το πείραμα του Millikan στην τάξη**

Δημήτρης Νάκος και Χαρίτων Πολάτογλου

Ένας τρόπος να βοηθηθεί η κατανόηση των επιστημονικών εννοιών από τους μαθητές είναι η επανάληψη μέσα στην τάξη ιστορικών πειραμάτων. Με τον όρο αυτό εννοούμε πειράματα του παρελθόντος τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για να πείσουν για την αποδοχή κάποιας θεωρίας. Μέσα από αυτά πολλές απόψεις για τη Φύση αναιρέθηκαν, νέες θεωρίες αντικατέστησαν παλιές και σε κάποιες μεμονωμένες περιπτώσεις είχαμε επιστροφή σε παλαιότερες θεωρίες.

Η ανάπτυξη στην τάξη ενός ιστορικού πειράματος αποτελεί ένα άριστο παιδαγωγικό μέσο για τις ιδέες, τις παρατηρήσεις και την ανάλυση του θέματος που αφορά το πείραμα. Δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ως πλούσια πηγή εμπειρίας τόσο για τους μαθητές όσο και για τους καθηγητές των Φυσικών Επιστημών, αφού τους δίνεται η δυνατότητα να κατανοήσουν τους τρόπους με τους οποίους οι επιστημονικές ιδέες αλλάζουν μέσα στον χρόνο και πώς η φύση αυτών των ιδεών και των χρήσεων στις οποίες τίθενται επηρεάζεται από τα κοινωνικά, ηθικά, πνευματικά και πολιτιστικά πλαίσια στα οποία αναπτύσσονται. Έρχονται σε επαφή με τις ιστορικές ρίζες της σύγχρονης επιστήμης, με τρόπο που αναδεικνύονται οι σύνθετες σχέσεις μεταξύ θεωρίας και πειράματος και αντιλαμβάνονται τις δυσκολίες που προβάλλουν οι λαθεμένες, ίσως, επικρατούσες αντιλήψεις στον κοινωνικό και επιστημονικό περίγυρο της εποχής (Irwin, 2000; Klopfer, 1969; Monk & Osborn, 1997).

Το πείραμα του Millikan - Ιστορική αναδρομή

Κατά τα πρώτα χρόνια των ανακαλύψεων στον χώρο της ατομικής και υποατομικής Φυσικής, η αριθμητική τιμή πολλών φυσικών μεγεθών δεν ήταν γνωστή, παρόλο που το μέχρι τότε θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και οι πειραματικές μέθοδοι έθεταν σε γενικές γραμμές αριθμητικούς περιορισμούς. Η ιστορία της μέτρησης του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου ξεκινά από την εργασία του Βρετανού φυσικού J.J. Thomson και τον προσδιορισμό του λόγου του ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα του. Μετέπειτα ερευνητικές προσπάθειες του Thomson και ιδιαίτερα του Charles Wilson, πέτυχαν την

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο

προσέγγιση της τιμής του ηλεκτρικού φορτίου του ηλεκτρονίου και έθεσαν τις βάσεις για τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε από τον Millikan λίγα χρόνια αργότερα.

Πιο συγκεκριμένα, ο Wilson ανακάλυψε ότι τα ιόντα μπορούν να λειτουργήσουν ως κέντρα συμπύκνωσης μικροσκοπικών σταγονιδίων νερού, όταν μια αέρια μάζα με υψηλό ποσοστό υγρασίας ψυχθεί απότομα μέσω ταχείας εκτόνωσης. Η εκμετάλλευση της ανακάλυψης αυτής οδήγησε στη δημιουργία του θαλάμου νέφωσης (ή θαλάμου Wilson), μιας ιδιαίτερα χρήσιμης ανιχνευτικής διάταξης στον τομέα της σωματιδιακής Φυσικής. Στις αρχές του 20ού αιώνα, η ανακάλυψη του Wilson χρησιμοποιήθηκε από την ερευνητική του ομάδα του Thomson για την παραγωγή ηλεκτρικά φορτισμένων νεφών με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό της τιμής του φορτίου του ηλεκτρονίου. Τα αρχικά αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ανακριβή, σε σχέση με την παραδεκτή σήμερα τιμή για το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Με την έλευση στο προσκήνιο του Robert Millikan επιτεύχθηκε σημαντική πρόοδος. Ο ίδιος πίστευε στην υπόθεση ότι υπήρχε ένα ελάχιστο ηλεκτρικό φορτίο, αυτό του ηλεκτρονίου. Ο Millikan, το 1908, χρησιμοποίησε τη μέθοδο του Wilson, η οποία βασιζόταν στη μελέτη νέφωσης υδρατμών, που κινούνταν υπό την επίδραση βαρυτικού και ηλεκτρικού πεδίου. Με τη μέθοδο αυτή βρήκε μια μέση τιμή του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου που ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη και με μεγάλη διασπορά των μετρήσεων (Millikan, 1947). Το πειραματικό αυτό αποτέλεσμα αντί να οδηγήσει το Millikan στο συμπέρασμα ότι η υπόθεσή του για την κβάντωση του φορτίου ήταν εσφαλμένη, τον οδήγησε στην ανάγκη βελτίωσης της πειραματικής μεθόδου που χρησιμοποιούσε. Έτσι, την ίδια χρονιά, κάνοντας μια σημαντική βελτίωση της μεθόδου, υπολόγισε μια μέση τιμή που είναι πιο κοντά στην αναμενόμενη (μέση τιμή του $e = 4,06 \cdot 10^{-10}$ esu [1], [2]) και έκρινε τα αποτελέσματα άξια να δημοσιευθούν.

Το καλοκαίρι του 1909, προκειμένου να μειώσει ακόμη πιο πολύ το λάθος που οφειλόταν στην εξάτμιση των σταγονιδίων του νερού, χρησιμοποίησε μια πηγή τάσης 10000V αντί των 4000V που χρησιμοποιούσε μέχρι στιγμής. Τότε συνέβη ένα αναπάντεχο γεγονός. Η δημιουργία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου λόγω της υψηλής τάσης διασκόρπισε το σύννεφο ακαριαία και άφησε λίγες σταγόνες οι οποίες φαίνονταν ως διακριτά λαμπερά σημεία. Ο Millikan αργότερα θυμάται στην αυτοβιογραφία του: «Ο διασκορπισμός φάνηκε στην αρχή να καταστρέφει το πείραμά μου. Αλλά όταν επανέλαβα το πείραμα, είδα με μιας ότι είχα κάτι πολύ περισσότερο ενδιαφέρον... Κάθε φορά που το πείραμα επαναλαμβανόταν το σύννεφο διασκορπιζόταν από το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο και μερικές μεμονωμένες σταγόνες παρέμεναν σε θέα για χρονικό διάστημα που μεταβαλλόταν από 30 ως 60 δευτερόλεπτα» (Millikan, 1950). Η ύπαρξη σταγόνων νερού που απομένανε έδινε τη δυνατότητα σ' αυτόν για μετρήσεις σε μεμονωμένες σταγόνες με φορτίο που θα οφείλονταν σε ένα ή μερικά ηλεκτρόνια. Ωστόσο, ο Millikan παρατήρησε ακόμη ένα παράξενο φαινόμενο. Κάποιες φορές, φορτισμένες σταγόνες νερού που ισορροπούσαν στο ηλεκτρικό πεδίο, ξαφνικά, άλλαζαν εντελώς την κίνηση τους. Η ασυνέχεια στις παρατηρήσεις του ήταν ενδιαφέρουσα. Ταίριαζε καλά με την

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο

υποτιθέμενη ασυνέχεια στην ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου. Πάλι με τα λόγια του Millikan: «είδα ξαφνικά να κάθεται ένα ιόν σε μια σταγόνα που ισορροπούσε (από τον αέρα που την περιέβαλε)» (Holton, 1978). Εν τω μεταξύ, ο Millikan συνέχισε να βελτιώνει τη μέθοδό του και να χρησιμοποιεί λάδι αντί για νερό. Με αυτή τη βελτιωμένη μέθοδο, ο Millikan δημοσίευσε νέα και πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα (Millikan, 1911).

Έτσι, χάρη στις ιδέες του Millikan, τα προβλήματα της προσέγγισης του Thomson εξαλείφονται. Εστιάζοντας την προσοχή του ερευνητή σε ένα συγκεκριμένο σταγονίδιο κάθε φορά, αποφεύγεται η αβεβαιότητα μετρήσεων σε ένα νέφος. Κατά βάση ο Millikan στο πείραμά του κατάφερε να μετρήσει τον ρυθμό πτώσης μιας συγκεκριμένης σταγόνας λαδιού, η οποία έχει αποκτήσει τελική ταχύτητα υπό την επίδραση της βαρύτητας και της αντίστασης του αέρα. Εφαρμόζοντας ένα αντιτιθέμενο ηλεκτρικό πεδίο, η σταγόνα αυτή (εφόσον είχε ηλεκτρικό φορτίο) θα αισθανόταν και μια κατακόρυφη ηλεκτρική δύναμη η οποία για κατάλληλες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου, θα ανάγκαζε τη σταγόνα να κινηθεί προς τα επάνω. Έχοντας τα δεδομένα της κίνησης της σταγόνας χωρίς και με την παρουσία του ηλεκτρικού πεδίου και εφαρμόζοντας αναλυτικούς υπολογισμούς, κατέστη δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του ηλεκτρικού φορτίου της σταγόνας [3].

Η συσκευή

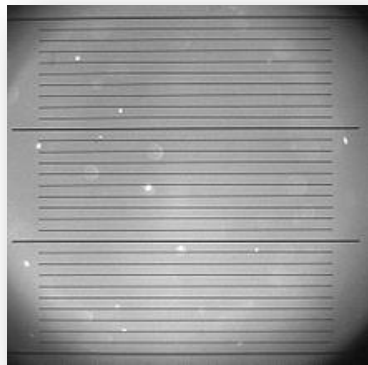
Η συσκευή Millikan και Fletcher (Εικόνα 1) αποτελούνταν από ένα παράλληλο ζεύγος οριζόντιων μεταλλικών πλακών, οι οποίες κρατούνταν σε απόσταση μεταξύ τους από έναν δακτύλιο φτιαγμένο από μονωτικό υλικό, μεταξύ των οποίων σχηματίζονταν ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Μία λεπτή ομίχλη σταγονιδίων λαδιού που δημιουργούσε ένας ψεκαστήρας, εκτοξεύονταν μέσα στο θάλαμο πάνω από τις πλάκες. Το σύνηθες λάδι θα εξατμιζόταν κάτω από τη θερμότητα της φωτεινής πηγής, με αποτέλεσμα η μάζα της σταγόνας λαδιού να αλλάξει κατά τη διάρκεια του πειράματος. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ειδικό λάδι το οποίο είχε μια εξαιρετικά χαμηλή τάση ατμών.



Εικόνα 1. Η συσκευή του πειράματος της σταγόνας λαδιού των Millikan και Fletcher. (Πηγή http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Millikan%E2%80%99s_oil-drop_apparatus_1.jpg).

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο

Τα σταγονίδια του λαδιού, αποκτούσαν αρχικά ηλεκτρικό φορτίο λόγω τριβής στο εσωτερικό του ψεκαστήρα. Τα σταγονίδια εισέρχονταν στον χώρο του ηλεκτρικού πεδίου διαμέσου οπής στο επάνω μέρος της πειραματικής διάταξης. Χρησιμοποιώντας τον πλευρικό φωτισμό της διάταξης, τα σταγονίδια μπορούσαν να παρατηρηθούν με τη χρήση οπτικού συστήματος (π.χ. ενός μικροσκοπίου), ως φωτεινά σημεία σε σκούρο υπόβαθρο. Με τη βοήθεια βαθμονομημένου προσοφθάλμιου φακού κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του ρυθμού πτώσης ή ανόδου ξεχωριστών σταγόνων (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Χρησιμοποιώντας τον πλευρικό φωτισμό και το οπτικό σύστημα της διάταξης, τα σταγονίδια μπορούν να παρατηρηθούν ως φωτεινά σημεία σε σκούρο υπόβαθρο (Πηγή: https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQv2_jgi9_ZkBc1GsQp6jDE09iPDWFswx6lfl2_0ahQRZ_DzuJVfg).

Οι τυπικές τιμές της ταχύτητας καθόδου (ή ανόδου), με την εφαρμογή τάσης στη συσκευή, ήταν της τάξης των $0,1 \text{ mm/s}$, κάτι που επέτρεψε τη μακρόχρονη παρατήρηση ενός φορτισμένου σταγονιδίου καθώς αυτό ανερχόταν ή κατερχόταν ανάλογα με το αν εφαρμόζονταν τάση ή όχι στη συσκευή. Επιπρόσθετα μια πηγή ακτινοβολίας (πηγή ακτινών X) τοποθετήθηκε στον χώρο μεταξύ των μεταλλικών πλακών. Αυτή προκαλούσε τον περαιτέρω ιονισμό των μορίων των σταγονιδίων λαδιού, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του φορτίου τους. Η μεταβολή αυτή του φορτίου δεν συνέβαινε με συνεχή τρόπο αλλά σε ακέραια πολλαπλάσια μιας ελάχιστης τιμής φορτίου (του φορτίου του ηλεκτρονίου), κάτι που γίνονταν αντιληπτό με την παρατήρηση της ασυνεχούς μεταβολής της ανοδικής ταχύτητας του σταγονιδίου.

Οι μετρήσεις της ταχύτητας των σταγονιδίων στην πειραματική διάταξη του Millikan λάμβαναν χώρα μόνο όταν η κίνηση των σταγονιδίων, υπό την επίδραση όλων των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά, ήταν ομαλή. Λόγω της, συγκριτικά με τις φυσικές παραμέτρους του συστήματος, μεγάλης τιμής της δύναμης αντίστασης στην κίνηση των σταγονιδίων, η επίτευξη ομαλής κίνησης ήταν ιδιαίτερα γρήγορη, επιτρέποντας την εφαρμογή στην ανάλυση των δεδομένων των νόμων του Νεύτωνα. Το αποτέλεσμα της λήψης δεδομένων κίνησης από την παρατήρηση πολλών χιλιάδων σταγονιδίων καθώς και της υποδειγματικής ανάλυσης αυτών, οδήγησαν στον προσδιορισμό της τιμής του

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο


ηλεκτρικού φορτίου του ηλεκτρονίου, καθώς και στην διαπίστωση της κβάντωσης του φορτίου με πειραματικό σφάλμα της τάξης του 1%.

Επεξεργαζόμενοι τα ιστορικά δεδομένα


Από τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων του πειράματος του Millikan το 1911, το φορτίο ενός σταγονιδίου λαδιού, με βάση τη θεωρητική επεξεργασία των μετρήσεων που περιγράψαμε παραπάνω, για διαδοχικές αναβάσεις του (που επιτυγχάνονταν με αποκατάσταση, διακοπή και επαναποκατάσταση του ηλεκτρικού πεδίου), περιγράφεται από τη λίστα που ακολουθεί σε μονάδες $\times 10^{-19}$ Coulomb:

29.87, 39.86, 28.25, 29.90, 34.90, 36.59, 28.28, 34.95, 39.97, 26.65, 41.47, 30.00, ...

Οι τιμές αυτές είναι αρκετά μεγάλα πολλαπλάσια του ηλεκτρονικού φορτίου και δεν είναι τόσο εύκολο να δούμε ότι όλες είναι ακέραια πολλαπλάσια της ίδιας στοιχειώδους ποσότητας φορτίου. Ωστόσο, οι διαφορές στο ηλεκτρικό φορτίο του σταγονιδίου, από τη μία μέχρι την επόμενη ανάβαση, είναι πολύ μικρότερες. Υπολογίζοντας τη διαφορά ανάμεσα στο φορτίο του σταγονιδίου κατά μία ανάβαση και του φορτίου του στην προηγούμενη, παίρνουμε τις ακόλουθες τιμές, σε μονάδες και πάλι $\times 10^{-19}$ Coulomb:

29.87, 39.86, 28.25, 29.90, 34.90, 36.59, 28.28, 34.95, 39.97, 26.65, 41.47, 30.00, ...

9.99 -11.61 1.66 5.00 1.68 -8.31 6.67 5.02 -13.32 15.09 -11.74 ...

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι αυτές οι διαφορές στο ηλεκτρικό φορτίο είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας ελάχιστης ποσότητας ίσης με περίπου $1.665 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Χρησιμοποιώντας ως μονάδα φορτίου την τελευταία ελάχιστη ποσότητα $e = 1.665 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, οι προηγούμενες διαφορές στο φορτίο από τη μία μέχρι την επόμενη μέτρηση είναι:

29.87, 39.86, 28.25, 29.90, 34.90, 36.59, 28.28, 34.95, 39.97, 26.65, 41.47, 30.00, ...

 $\approx 6e \approx -7e \approx 1e \approx 3e \approx 1e \approx -5e \approx 4e \approx 3e \approx 8e \approx 9e \approx -7e \dots$

Η ερμηνεία είναι προφανώς ότι το ηλεκτρόνιο έχει ένα φορτίο περίπου $1.665 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, και ότι στις διαδοχικές αναβάσεις η σταγόνα έχασε πρώτα έξι ηλεκτρόνια ή αρνητικά ιόντα, στη συνέχεια κέρδισε επτά, στη συνέχεια έχασε ένα, μετά τρία, στη συνέχεια έχασε ένα, και ούτω καθεξής.

Με την επανάληψη αυτού το πειράματος για πολλές σταγόνες λαδιού, ο Millikan υπολόγισε μια μέση τιμή για το ηλεκτρονικό φορτίο της τάξης των $1.592 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, με μια πειραματική αβεβαιότητα περίπου $0.003 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο

Προσομοιώνοντας το πείραμα υπολογισμού του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου στην τάξη

Για να εισάγουμε τους μαθητές στη λογική επεξεργασίας των μετρήσεων του πειράματος του Millikan, προτείνεται το ακόλουθο πείραμα, που μπορεί να γίνει στο εργαστήριο αλλά και μέσα στην τάξη. Στόχος της διαδικασίας είναι η κατανόηση της λογικής που οδήγησε τον Millikan στον υπολογισμό της μονάδας ενός φυσικού μεγέθους (φορτίου), που στην πραγματικότητα δεν μπορούσε να δει.

Απαιτούμενα όργανα και υλικά

- Ζυγός με ακρίβεια 0,1 g τουλάχιστον.
- Μερικά κέρματα των 0,01€.
- Μερικά ίδια αδιαφανή κυλινδρικά κουτάκια συσκευασίας φωτογραφικού φιλμ, με τα καπάκια τους.
- Μερικά φύλλα χιλιοστομετρικού χαρτιού.

Προετοιμασία του πειράματος

Ο εκπαιδευτικός τοποθετεί τυχαίο αριθμό κερμάτων, από 6-7 έως 20-25, μέσα σε κάθε κουτάκι και το κλείνει. Οι μαθητές σχηματίζουν ομάδες των δύο ατόμων. Κάθε ομάδα έχει στη διάθεσή της ένα κλεισμένο κουτί και ένα φύλλο χιλιοστομετρικού χαρτιού. Ο ζυγός θα είναι σε κοινή χρήση για όλες τις ομάδες.

Αν υποθέσουμε ότι έχουν σχηματιστεί 15 ζευγάρια μαθητών και δεδομένου ότι στο κάθε ζευγάρι αντιστοιχούν περίπου 5 έως 20 κέρματα, θα χρειαστούν σχεδόν 200 κέρματα, 15 κουτάκια και 15 φύλλα χιλιοστομετρικού χαρτιού, ένα για κάθε ομάδα. Αν οι ομάδες είναι σημαντικά λιγότερες από 15 είναι καλό να δοθούν από 2 κουτάκια με κέρματα στην κάθε ομάδα.

Ενέργειες

Αρχικά, κάθε ομάδα μετρά τη μάζα του γεμάτου με κέρματα κουτιού που έχει μπροστά της. Όλες οι μετρήσεις καταγράφονται στον πίνακα της τάξης και μεταφέρονται στα τετράδια των μαθητών κατά αύξουσα σειρά. Ζητείται από την κάθε ομάδα να παραστήσει τα δεδομένα σε ένα ιστόγραμμα. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τα αριθμητικά δεδομένα τίθεται ως πρόβλημα ο υπολογισμός της μάζας ενός κέρματος. Για να βοηθήσουμε τους μαθητές μπορούμε να τους υποδείξουμε ότι μπορούν να το πετύχουν με διαδοχικές αφαιρέσεις και ενδεχομένως, αφαιρέσεις των διαφορών των αριθμητικών δεδομένων που διαθέτουν.

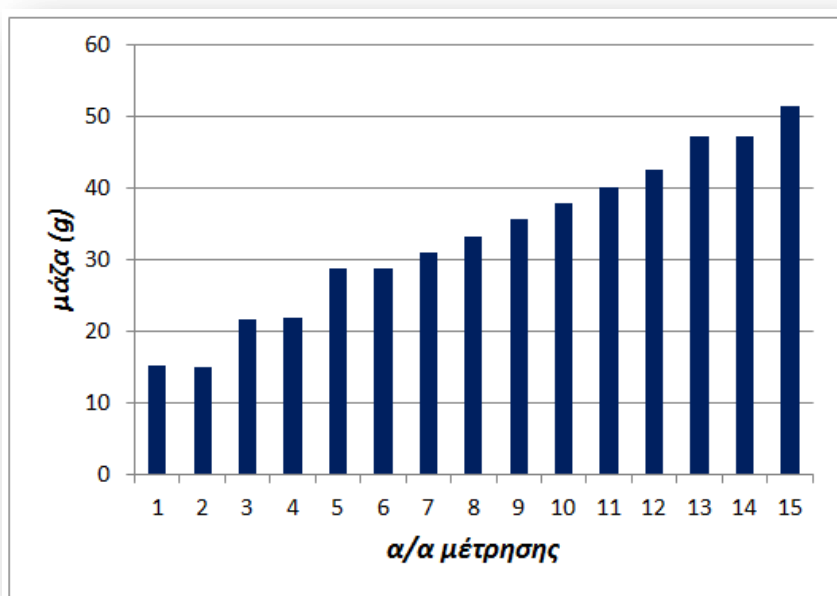
Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο

Αποτελέσματα

Το παραπάνω πείραμα πραγματοποιήθηκε σε σχολική τάξη με 15 ομάδες μαθητών της Β' Λυκείου. Οι μετρήσεις, σε αύξουσα σειρά, των ομάδων αυτών δίνονται στον Πίνακα 1. Η γραφική τους αναπαράσταση σε ιστόγραμμα δίνεται στο Διάγραμμα 1.

α/α μέτρησης	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
μάζα (g)	15.2	15.1	21.8	22.0	28.9	28.9	31.0	33.3	35.7	38.0	40.2	42.5	47.2	47.2	51.6

Πίνακας 1. Αριθμητικά δεδομένα από την εφαρμογή σε τάξη της δραστηριότητας.



Διάγραμμα 1. Αναπαράσταση των δεδομένων σε ιστόγραμμα.

Υιοθετώντας τη λογική του πειράματος του Millikan, η μικρότερη διαφορά μεταξύ των μαζών δύο κουτιών αντιστοιχεί στη μάζα ενός κέρματος. Για παράδειγμα, όπως προκύπτει από διαδοχικές αφαιρέσεις:

$$31,0-33,3=2,3 \text{ g}$$

$$33,3-35,7=2,4 \text{ g}$$

$$38,0-35,7=2,3 \text{ g}$$

$$28,9-31,0=2,1 \text{ g}$$

αλλά και αφαιρέσεις των διαφορών:

$$[51,6-47,2]-[42,5-40,2]=2,1 \text{ g}$$

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο

Υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί, που δίνουν τελικά τιμές μεταξύ 2,1 g και 2,4 g. Η μέση τιμή των διαφορών αυτών προκύπτει κοντά στα 2,3 g, που αντιστοιχεί στη μάζα του ενός κέρματος.

Για να αντιληφθούν οι μαθητές τους περιορισμούς της διαδικασίας που ακολούθησαν και τις ομοιότητες και διαφορές με το πραγματικό πείραμα, καταστρώνουμε με τη βοήθειά τους και συζήτηση στην ολομέλεια τον Πίνακα 2. Σε αυτόν αναφέρονται οι αντιστοιχίσεις ανάμεσα στο πείραμα του Millikan και την προτεινόμενη πειραματική διαδικασία.

Πείραμα Millikan	Προτεινόμενη διαδικασία
Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο.	Μάζα του ενός κέρματος.
Σταγόνα ορυκτέλαιου	Το κουτάκι με τα κέρματα
Υπολογισμός της ηλεκτρικής δύναμης στην κάθε σταγόνα. Υπολογισμός του ηλεκτρικού φορτίου της κάθε σταγόνας.	Μέτρηση της μάζας του κάθε κουτιού με τα κέρματα.
Παρόμοια τεχνική επεξεργασίας των μετρήσεων	
Υπολογισμός του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου.	Υπολογισμός της μάζας του ενός κέρματος.

Πίνακας 2. Αντιστοιχίες μεταξύ του πειράματος Millikan και της προτεινόμενης δραστηριότητας.

Συζήτηση

Στην διαδικασία που προτείνεται, μας ενδιαφέρει να αναδειχθεί η λογική της επεξεργασίας των δεδομένων του πειράματος Millikan. Για να γίνει αντιληπτή η ακρίβεια της μεθόδου, μετά από 10 μετρήσεις της μάζας 10 μονόλεπτων, με ζυγό ακρίβειας 0,1 g προέκυψε για τη μάζα του ενός κέρματος η τιμή $(2,308 \pm 0,008)$ g ή καλύτερα, λαμβανομένης υπόψη της αβεβαιότητας της ζυγαριάς: $(2,31 \pm 0,01)$ g.

Για να πεισθούν οι μαθητές για την ορθότητα της μεθόδου μπορούμε να τους ζητήσουμε να βρουν το πλήθος των κερμάτων που έχει το κάθε κουτάκι, αφού τους δώσουμε τη μάζα του, την οποία έχουμε προηγουμένως υπολογίσει. Το κουτάκι που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα έχει μάζα περίπου 6 g. Η μάζα του κουτιού δεν είναι απαραίτητη, μπορεί να υπολογιστεί κι αυτή -με εξαίρεση την περίπτωση που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της μάζας ενός κέρματος- χρειάζονται μόνο κάποιες πρόσθετες εκτιμήσεις. Δεν προτείνεται, ωστόσο, η τελευταία διαδικασία γιατί καθιστά περισσότερο περίπλοκη τη διαδικασία χωρίς να προσφέρει ουσιαστικά στο διδακτικό μας στόχο.

Εναλλακτικά, η παραπάνω διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με οποιαδήποτε συλλογή αντικειμένων ίσης μάζας (συνδετήρες, φύλλα A4, κουμπιά κλπ). Σε κάθε περίπτωση, προτείνεται ο εκπαιδευτικός να μεριμνήσει να μην υπάρχουν σε όλα τα κουτάκια αντικείμενα μόνον άρτιου ή μόνο

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο

περιττού πλήθους, κάτι που πρακτικά προκύπτει έτσι κι αλλιώς εφόσον έχουμε αρκετά μεγάλο πλήθος κουτιών.

Ας σημειωθεί ότι προφανώς ο Millikan εκτέλεσε το πείραμά του πολλές εκατοντάδες φορές. Η προτεινόμενη διαδικασία είναι πολύ απλούστερη, καλό είναι όμως να υπάρχουν αρκετές μετρήσεις. Για το λόγο αυτό προτείνεται η διεξαγωγή του πειράματος στην τάξη, από πολλές ομάδες.

Σχόλια

[1]. esu: Ηλεκτροστατικές μονάδες

[2]. Την ίδια εποχή (1908) η βιβλιογραφία ανέφερε σαν την πλέον κατάλληλη τιμή για το φορτίο του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου την τιμή του φορτίου του $e=4,657 \cdot 10^{-10}$ esu, που είχαν υπολογίσει ο Rutherford και ο Geiger. Ο Rutherford και ο Geiger προσδιόρισαν το φορτίο των σωματίων α ίσο με $9,3 \cdot 10^{-10}$ esu και υπέθεσαν ότι ήταν ίσο με το διπλάσιο του φορτίου του ηλεκτρονίου. Έτσι το φορτίο του ηλεκτρονίου θα ήταν $e = 4,65 \cdot 10^{-10}$ esu.

[3]. Το θεωρητικό πλαίσιο των υπολογισμών του Millikan είναι διαθέσιμο στον ενδιαφερόμενο αναγνώστη στο δικτυακό τόπο του περιοδικού *Φυσικές Επιστήμες στην Εκπαίδευση*, ως υποστηρικτικό υλικό του παρόντος άρθρου.

Βιβλιογραφία

Holton, G. (1978). *The scientific imagination: case studies*, Cambridge University Press, Cambridge.

Irwin, A.R. (2000). Historical case studies: teaching the nature of science in context. *Science Education*, 84[1], 5-26.

Klopfer, L.E. (1969). The teaching of science and the history of science. *Journal of Research in Science teaching*, 6, 87-97.

Millikan, R.A. (1911). The isolation of an ion, a precision measurement of its charge, and the correction of Stokes's law. *Physical Review*, 32(4), 349-397.

Millikan, R.A. (1947). *Electrons (+ and -), protons, photons, neutrons, mesotrons, and. Cosmic rays (2nd ed.)*. Chicago: University of Chicago Press. (Original work published 1935).

Millikan, R.A. (1950). *The autobiography of Robert A. Millikan*. Englewood Cliffs, NJ

Monk, M. & Osborne, J. (1997). Placing the history and philosophy of science on the curriculum: a model for the development for pedagogy. *Science Education* 81(4), 405-424.

Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες στο Γυμνάσιο και στο Λύκειο



Ο Δημήτρης Νάκος είναι πτυχιούχος Φυσικός με MSc στις Φυσικές Επιστήμες. Εργάζεται επί 25 έτη ως καθηγητής στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση και τα τελευταία έτη στελεχώνει το Εργαστηριακό Κέντρο Φυσικών Επιστημών (ΕΚΦΕ) του νομού Λάρισας. Εξειδικεύεται στην πειραματική διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών με απλά υλικά καθημερινής χρήσης, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ιστορία και φιλοσοφία των επιστημών.



Ο Χαρίτων Πολάτογλου είναι Αναπληρωτής Καθηγητής στο Α.Π.Θ. Αποφοίτησε από το Τμήμα Φυσικής του Α.Π.Θ., έκανε μεταπτυχιακό στην Ηλεκτρονική Φυσική – Ραδιοηλεκτρολογία στο Α.Π.Θ. και διδακτορική διατριβή στη Θεωρητική Φυσική Στερεάς Κατάστασης. Έκανε μεταδιδακτορική έρευνα στο Ινστιτούτο Fritz Haber της Στουτγάρδης, στο Max-Planck του Βερολίνου, στο Τμήμα Φυσικής Χημείας του Cambridge και στο Τμήμα Υλικών της Οξφόρδης. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα περιλαμβάνουν θέματα Θεωρητικής Φυσικής Στερεάς Κατάστασης, καθώς επίσης θέματα Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών.