

Η «μάχη για το ηλεκτρόνιο»: η διαμάχη των Millikan-Ehrenhaft και η χρήση της για τη διδασκαλία της Φύσης της Επιστήμης

Ελένη Παρασκευοπούλου¹ & Δημήτρης Κολιόπουλος²

1. Εκπαιδευτήρια Γείτονα

2. Πανεπιστήμιο Παιρών

Εισαγωγή

Πολλοί ερευνητές έχουν υποστηρίξει τη χρήση της ιστορίας των Φυσικών Επιστημών σαν ένα πλαίσιο για τη διδασκαλία στοιχείων της φύσης της επιστήμης ΦτΕ (Irwin 2000, Klopfer 1969, Matthews 1994, Monk & Osborn 1997). Το 1969 ο Klopfer ισχυρίστηκε ότι η ιστορία των επιστημών έχει τη δυνατότητα να συμβάλλει στη δημιουργία μιας αντίληψης για τις διαδικασίες, τα πλαίσια και τις εννοιολογικές πλευρές της επιστήμης.

Αρκετοί ερευνητές (Clough, 2003, Ryder, Leach, & Driver, 1999) ισχυρίζονται ότι η ρητή διδασκαλία της ΦτΕ ως διαδικασίας 'ενοματωμένης' μέσα στο πλαίσιο του επιστημονικού περιεχομένου θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο μεγάλη βελτίωση των αντιλήψεων των μαθητών για τη ΦτΕ. Ο Clough, (2003) ισχυρίστηκε ότι οι δραστηριότητες της ΦτΕ που στοχεύουν απευθείας στο να διδάξουν ΦτΕ είναι ανεπαρκείς για την ανάπτυξη αντιλήψεων των μαθητών διότι δεν είναι συνδεδεμένες με το επιστημονικό περιεχόμενο. Μια άλλη έρευνα (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000) έδειξε ότι για να είναι αποτελεσματική η διδασκαλία της φύσης της επιστήμης θα πρέπει να γίνεται ρητή αναφορά στα στοιχεία της φύσης της επιστήμης που αναδεικνύονται από ένα ιστορικό παράδειγμα ή από τη διδασκαλία κάποιου επιστημονικού περιεχομένου π.χ της ελεύθερης πτώσης. Με άλλα λόγια φαίνεται ότι οι μαθητές δεν είναι ικανοί μέσα από την παρουσίαση και μόνο του ιστορικού παραδείγματος ή του επιστημονικού περιεχομένου ή από την εμπλοκή τους σε επιστημονικές δραστηριότητες (σιωπηρή αναφορά) να αντιληφθούν τα χαρακτηριστικά της φύσης της επιστήμης. Οι Abd-El-Khalick & Lederman (2000) συνιστούν να γίνεται σαφής αναφορά στα διάφορα στοιχεία

της ΦτΕ που παρουσιάζονται και να δίνεται έμφαση στην κατανόηση των στοιχείων της ΦτΕ από τους μαθητές, μέσα από τον αναστοχασμό πάνω σε δραστηριότητες που έκαναν.

Ο Niaz (2000), ο Kolstø (2008), και ο McComas (2008) ισχυρίστηκαν ότι η ιστορία των επιστημών και συγκεκριμένα η διαμάχη του Millikan και του Ehrenhaft για το ηλεκτρόνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διδασκαλία και την κατανόηση σε βάθος στοιχείων της ΦτΕ. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται μια προσπάθεια να διερευνηθεί με λεπτομέρεια αν και πώς το ιστορικό γεγονός της διαμάχης των δύο ερευνητών είναι δυνατόν να χρησιμεύσει στην ανάδειξη διαφόρων χαρακτηριστικών της φύσης της επιστήμης τα οποία ν' αποτελέσουν αντικείμενο πραγμάτευσης στο πλαίσιο μιας διδασκαλίας ρητής και ενσωματωμένης στο επιστημονικό περιεχόμενο του μαθήματος της φυσικής.

Το ιστορικό γεγονός

Το ιστορικό γεγονός που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία είναι η διαμάχη των Millikan-Ehrenhaft για την ύπαρξη του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου, που συχνά αναφέρεται ως η 'μάχη για το ηλεκτρόνιο'. Τα γεγονότα διαδραματίζονται γύρω στο 1910 και οδηγούν τους δύο πρωταγωνιστές τους σε δύο αντιδιαμετρικά αντίθετες κατευθύνσεις, τον έναν στη επιτυχία και το βραβείο Nobel και τον άλλον στην αποτυχία και την αφάνεια. Πρόκειται για τον Αμερικάνο R. Millikan άγνωστο καθηγητή σε ένα νέο πανεπιστήμιο, το πανεπιστήμιο του Chicago, έναν άντρα 50 χρόνων περίπου, με λίγες επιστημονικές δημοσιεύσεις και για τον Ευρωπαίο F. Ehrenhaft διάσημο φυσικό και καθηγητή σε ένα φημισμένο πανεπιστήμιο, το πανεπιστήμιο της Βιέννης, έντεκα χρόνια νεότερο από το Millikan.

Ο Millikan πίστευε στην υπόθεση ότι υπήρχε ένα ελάχιστο ηλεκτρικό φορτίο, αυτό του ηλεκτρονίου. Εξέφραζε την εκδοχή του ατομισμού για τον ηλεκτρισμό, την αντίληψη δηλαδή ότι υπήρχε στη φύση ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο από το οποίο αποτελούνταν όλα τα σώματα. Ο Millikan δούλευε πάνω σε μια ερευνητική παράδοση που ανέτρεχε στη διατύπωση του G. J. Stoney το 1881 για μια ατομική μονάδα ηλεκτρισμού, την οποία αργότερα ονόμασε 'ηλεκτρόνιο'. Ο J. J. Thomson συνέβαλε σημαντικά σε αυτή την ερευνητική παράδοση όταν το 1897 έδειξε ότι οι καθοδικές ακτίνες αποτελούνταν από ατομικές μονάδες, τις οποίες αποκάλεσε «corpuscles» και έπειτα συνέχισε για να προσδιορίσει την αναλογία e/m για αυτά.

Ο Ehrenhaft αντίθετα πίστευε ότι δεν υπήρχε κανένα παρόμοιο ελάχιστο φορτίο και ότι υπήρχαν μικρά σωματίδια που το φορτίο τους ήταν κλάσμα του φορτίου του ηλεκτρονίου. Εξέφραζε την εκδοχή της συνέχειας για τον ηλεκτρισμό. Ο Ehrenhaft ήταν επηρεασμένος από το φιλοσοφικό ρεύμα της συνέχειας για τη δομή της ύλης, που άνθιζε στην Ηπειρωτική Ευρώπη, κύριος εκφραστής του οποίου ήταν ο Mach. Οι οπαδοί αυτού του φιλοσοφικού ρεύματος ήθελαν μια φυσική απαλλαγμένη από άχρηστες μεταφυσικές υποθέσεις τέτοιες όπως ο ατομισμός (Holton, 1978, σελ.35) Συγκεκριμένα ο Mach απέρριπτε την ύπαρξη των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων και ισχυριζόταν ότι η επιστήμη θα έπρεπε να ασχολείται μόνο με οντότητες που θα μπορούσαν να είναι παρατηρήσιμες με εμπειρικά μέσα (Matthews, 1994, σελ.170-174).

Και οι δύο επιστήμονες αναγνώριζαν ότι το αντικείμενο της έρευνας τους όπως επίσης

και η ουσία της διαμάχης τους, άγγιζε τα θεμέλια της επιστήμης.

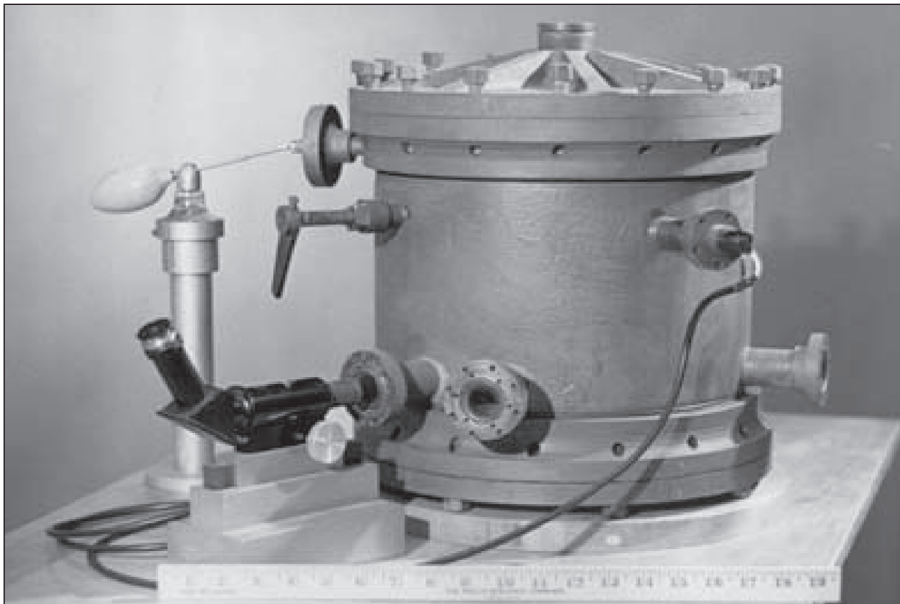
Πριν από το Millikan είχαν προσπαθήσει να μετρήσουν το φορτίο του ηλεκτρονίου ο Townsend και αργότερα ο Thomson και ο H. A. Wilson το 1903, όμως η μέθοδος που χρησιμοποιούσαν δεν έδινε μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, όταν ο Millikan το 1907 ενδιαφέρθηκε για το πρόβλημα, υπήρχε σαν υπόθεση η ύπαρξη μιας στοιχειώδους μονάδας του ηλεκτρικού φορτίου και η τιμή αυτής της πολύ σημαντικής σταθεράς δεν ήταν γνωστή με μεγάλη ακρίβεια.

Το πείραμα της σταγόνας λαδιού του Millikan

Ο Αμερικάνος φυσικός Robert Andrews Millikan ήταν ο πρώτος που υπολόγισε με ακρίβεια το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η πειραματική του συσκευή (εικόνα 1) αποτελούνταν από δύο παράλληλους οριζόντιους μεταλλικούς δίσκους, που ήταν τοποθετημένοι κοντά ο ένας στον άλλο και οι οποίοι μέσω ενός διακόπτη συνδέονταν με τους πόλους μιας πηγής υψηλής τάσης. Ο αέρας μεταξύ των πλακών ιονιζόταν από μια πηγή ακτίνων-Χ.

Στη μέση του πάνω δίσκου υπήρχε μια λεπτή οπή (σαν την κεφαλή μιας καρφίτσας) που μέσα από αυτή με ψεκασμό περνούσαν σταγονίδια λαδιού. Το λάδι είχε το πλεονέκτημα να μπορεί να παραμένει στον αέρα αρκετό χρόνο χωρίς να εξατμίζεται. Οι σταγόνες αποκτούσαν ηλεκτρικό φορτίο:

- α) κατά τον ψεκασμό εξαιτίας της τριβής και
- β) μέσω των ακτίνων $-X$, οι οποίες αύξαναν τα ιόντα που υπήρχαν στο χώρο ανάμεσα στις πλάκες.



Εικόνα 1. Η συσκευή του Millikan: λεπτομέρεια.

Ο χώρος ανάμεσα στους παράλληλους δίσκους ήταν φωτισμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο Millikan να μπορεί να παρατηρήσει την κίνηση των σταγόνων με ένα ειδικό τηλεσκόπιο. Οι σταγόνες λαδιού φαινόταν σαν λαμπερά αστέρια σε μαύρο φόντο. Για τη μέτρηση της απόστασης που διάνυε η σταγόνα ακριβώς στο χώρο που φαινόταν από το τηλεσκόπιο υπήρχαν διαγραμμίσεις που απείχαν 0,01mm.

Όταν ο διακόπτης ήταν στο off, δηλαδή δεν υπήρχε ηλεκτρικό πεδίο, οι σταγόνες κινούνταν προς τα κάτω (προς την κάτω πλάκα) με την επίδραση του βάρους τους και της αντίστασης του αέρα και γρήγορα αποκτούσαν οριακή ταχύτητα. Από την οριακή ταχύτητα πτώσης ο Millikan υπολόγιζε την ακτίνα της σταγόνας και μετά μέσω της πυκνότητας τη μάζα της.

Καθώς η σταγόνα έπεφτε υπό την επίδραση του βάρους της προς την κάτω πλάκα, και πριν φτάσει σε αυτήν, ένα ηλεκτρικό πεδίο υψηλής έντασης (ανάμεσα στα 3000V έως και 8000V ανά cm) δημιουργούνταν ανάμεσα στις πλάκες με τη βοήθεια της μπαταρίας. Το ηλεκτρικό πεδίο ρυθμιζόταν ανάλογα με το πρόσημο του φορτίου που είχε αποκτήσει η σταγόνα από τη συσκευή προώθησης ή και από τα ιόντα που είχαν 'κάτσει' πάνω της ώστε η σταγόνα να ανεβαίνει προς την πάνω πλάκα. Πριν χτυπήσει στην πάνω πλάκα διακοπτόταν η παροχή ρεύματος, καταργούνταν το ηλεκτρικό πεδίο και η σταγόνα έπεφτε με την επίδραση του βάρους της. Ο Millikan μετρούσε το χρόνο που έκανε η σταγόνα να διανύσει την ίδια απόσταση που αντιστοιχούσε στο διάστημα ανάμεσα στις διαγραμμίσεις που φαινόταν από το μικροσκόπιο με και χωρίς ηλεκτρικό πεδίο, χωρίς ιόν ή με ιόν. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνονταν και οι ταχύτητες μετρούνταν για ένα μη καθορισμένο αριθμό φορών. Η παρατήρηση μιας και μόνο σταγόνας είχε διαρκέσει τεσσεράμισι ώρες (Shamos, 1987, σελ.245). Το πρόσημο και η ακριβής τιμή του φορτίου που έφερε η σταγόνα καθοριζόταν από αυτές τις ταχύτητες και τη μάζα της σταγόνας. Το λάθος στην παρατήρηση δεν ξεπερνούσε το 3% (Shamos, 1987, σελ.242-244).

Η «μάχη για το ηλεκτρόνιο»

Είναι το ηλεκτρικό φορτίο κβαντισμένο ή συνεχές; Υπάρχει ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σωματίδιο, το ηλεκτρόνιο, το οποίο είναι αδιαίρετο και κομμάτι (δομικό στοιχείο) των σωμάτων που μας περιβάλλουν; Ήταν ερωτήματα που απασχολούσαν την επιστημονική κοινότητα των φυσικών στις αρχές του 20^{ου} αιώνα.

Ο Millikan στην αρχή (1908), προσπαθώντας να δώσει απάντηση στα ερωτήματα, χρησιμοποίησε τη μέθοδο του Wilson, η οποία βασιζόταν στη μελέτη νέφωσης υδρατμών, που κινούνταν υπό την επίδραση βαρυτικού και ηλεκτρικού πεδίου. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο ο Millikan και ο μαθητής του Louis Begeman βρήκαν μια μέση τιμή του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου που ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη¹ και με μεγάλη δια-

¹ 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 σωμάτων a ίσο με $93 \cdot 10^{-10}$ 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.

σοπρά των μετρήσεων. Αυτή η μεγάλη διασπορά θα μπορούσε να ιδωθεί σαν απόδειξη ότι τα φορτία θα μπορούσαν να πάρουν μια οποιαδήποτε τιμή και όχι μόνο το ακέραιο πολλαπλάσιο μιας ελάχιστης ποσότητας. Ο ίδιος ο Millikan σημειώνει ότι : «Πράγματι η ασάθεια, η παραμόρφωση και η απροσδιοριστία της κορυφής της νέφωσης ήταν κάπως απογοητευτικά και τα αποτελέσματα δεν θεωρήθηκαν άξια να δημοσιευθούν» (Millikan, 1947, σελ. 55-57)

Το πειραματικό αυτό αποτέλεσμα αντί να οδηγήσει το Millikan στο συμπέρασμα ότι η υπόθεσή του για την κβάντωση του φορτίου ήταν εσφαλμένη τον οδηγεί στη ανάγκη βελτίωσης της πειραματικής μεθόδου που χρησιμοποιούσε. Πράγματι, το 1908, ο Millikan και ο μαθητής του Begeban, κάνοντας μια σημαντική βελτίωση της μεθόδου που ήταν η χρήση μιας μπαταρίας 4000V για να περιορίσουν το σφάλμα που οφειλόταν στην εξάτμιση του νερού, υπολογίζουν μια μέση τιμή που ήταν πιο κοντά στην αναμενόμενη (μέση τιμή του $e=4,06 \cdot 10^{-10} \text{esu}^2$) και τα αποτελέσματα κρίνονται άξια να δημοσιευθούν.

Την άνοιξη και το καλοκαίρι του 1909, ο Millikan, προκειμένου να μειώσει ακόμη πιο πολύ το λάθος που οφειλόταν στην εξάτμιση χρησιμοποιεί μια μπαταρία των 10000V αντί των 4000V που χρησιμοποιούσε στα προηγούμενα πειράματά του. Τότε συνέβη ένα αναπάντεχο γεγονός. Η δημιουργία ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου από την υψηλή τάση της μπαταρίας διασκορπίσε το σύννεφο ακαριαία και άφησε λίγες σταγόνες οι οποίες φαινόταν σαν διακριτά λαμπέρα σημεία. Ο Millikan αργότερα θυμάται στην αυτοβιογραφία του: “Ο διασκορπισμός φάνηκε στην αρχή να καταστρέφει το πείραμα 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 θέση για χρονικό διάστημα που μεταβαλλόταν από 30 ως 60 δευτερόλεπτα” (Millikan, 1950, σελ. 73). Η ύπαρξη σταγόνων νερού που απομένανε θα έδινε τη δυνατότητα σ’ αυτόν για μετρήσεις σε μεμονωμένες σταγόνες με φορτίο που θα οφείλετο 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 υποτιθέμενη ασυνέχεια στην αντίληψη της ποσότητας 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, σελ.38).

Η τιμή που βρήκε ο Millikan για το ελάχιστο ηλεκτρικό φορτίο ήταν πολύ κοντά στην αναμενόμενη τιμή. Σε ένα άρθρο του το 1910, όπου δημοσίευσε τα αποτελέσματά του, εξηγούσε τον τρόπο με τον οποίο αξιολογούσε τις μετρήσεις του. «Οι παρατηρήσεις που ήταν σημειωμένες με ένα τριπλό αστέρι ήταν αυτές οι οποίες ήταν σημειωμένες ως οι ‘καλύτερες’ στο σημειωματάριο μου...Οι παρατηρήσεις με διπλό αστέρι ήταν σημειωμένες ως ‘πολύ καλές’. Αυτές που σημειώνονται με ένα αστέρι ήταν σημειωμένες ως ‘καλές’ και οι άλλες ‘μέτριες’» (Millikan, 1910. σελ.220). Και επίσης «... δεν έλαβα υπόψη μου τρεις μετρήσεις

² esu: Ηλεκτροστατικές μονάδες

που πήρα σε σταγόνες που δεν ισορροπούσαν» (στο Holton, 1978, σελ.38).

Η διαμάχη αρχίζει όταν στο άρθρο του αυτό ο Millikan κάνει κριτική για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που είχε δημοσιεύσει ο Ehrenhaft παρ' όλο που και τα αποτελέσματα και η μέθοδος³ που χρησιμοποιούσε έμοιαζαν με τα δικά του. Ο Ehrenhaft απάντησε στην κριτική του Millikan με ένα επόμενο άρθρο στο οποίο υπολόγισε το φορτίο της κάθε σταγόνας για κάθε παρατήρηση του Millikan χωριστά. Το αποτέλεσμα ήταν ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών του φορτίου της σταγόνας, που δεν ήταν όλες ακέραιο πολλαπλάσιο του στοιχειώδους. Αυτό το αποτέλεσμα εξασθενούσε τον ισχυρισμό για την ύπαρξη του ελάχιστου ηλεκτρικού φορτίου.

Ο Ehrenhaft, κατόπιν, χρησιμοποιώντας τη δική του μέθοδο, βρήκε σταγόνες υγρού και μεταλλικά σωματίδια να έχουν φορτίο ίσο με το $1/2$, το $1/5$, το $1/10$, το $1/100$ ακόμη και το $1/1000$, αυτού του φορτίου του ηλεκτρονίου. Συμπέρανε τότε ότι αδιαίρετη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου δεν υπήρχε στο επίπεδο που βρέθηκε από το Millikan.

Εν τω μεταξύ, ο Millikan συνέχισε να βελτιώνει τη μέθοδο του και να χρησιμοποιεί λάδι αντί για νερό. Με αυτή τη βελτιωμένη μέθοδο, ο Millikan, μαζί με το βοηθό του Harvey Fletcher, δημοσίευσε νέα και πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα. Αυτοί αναφέρουν ότι έχουν «βρει σε όλες τις περιπτώσεις το φορτίο της σταγόνας να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μικρότερου φορτίου που βρήκαμε ότι έπιασε από τον αέρα» (Millikan, 1911, σελ. 360).

Πάλι ο Millikan ειλικρινά εξηγεί ότι δεν έλαβε υπόψη του κάποιες μετρήσεις οι οποίες έδιναν τιμές του ελάχιστου ηλεκτρικού φορτίου πολύ μικρότερες από τις άλλες τιμές που είχε βρει.

Η άποψη του Ehrenhaft ήταν ότι η ισχυρή αντίληψη του Millikan για την ύπαρξη του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου τον οδηγούσε να παρουσιάζει ένα υψηλό ποσοστό λάθους στις τιμές. Αντίθετα, η άποψη του Millikan για τον τρόπο με τον οποίο ο Ehrenhaft χειρίστηκε τα δεδομένα ήταν ότι «[ο Ehrenhaft] επιθυμούσε με όλη του τη δύναμη να γυρίσει την πλάτη του σε ένα βασικό γεγονός της φύσης – τον αδιαίρετο χαρακτήρα του e [του φορτίου του ηλεκτρονίου]» (Holton, 1978, σελ. 69).

Στο τρίτο του άρθρο, ο Millikan (1913) συνόψισε τη νέα του μέθοδο ως εξής: «Το ουσιαστικό χαρακτηριστικό της μεθόδου συνίσταται στην επαναλαμβανόμενη αλλαγή του φορτίου μιας δοσμένης σταγόνας από το πιάσιμο ιόντων από τον αέρα και έτσι με κάθε σταγόνα επιτυγχάνεται μια σειρά από φορτία. Αυτά τα φορτία είχαν μια πολύ ακριβή πολλαπλασιαστική σχέση κάτω από όλες τις συνθήκες, γεγονός που αποδεικνύει με σαφή τρόπο *την ατομική δομή του ηλεκτρικού φορτίου*». Στο ίδιο άρθρο ανακοίνωσε ότι η αβεβαιότητα στην τιμή του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου σύμφωνα με τις μετρήσεις του ήταν 0,03%. Αυτό ήταν πράγματι ένα πολύ ακριβές αποτέλεσμα.

Η ανυπαράθεση ανάμεσα στις δύο πλευρές ήταν ισχυρή. Ο Ehrenhaft έγραψε 12 περίπου άρθρα μέσα σε τέσσερα χρόνια, όλα εντελώς στοχευμένα στην αμφισβήτηση των μετρήσεων του Millikan. Ο Millikan επίσης έγραψε πολύ και αντίκρουσε τις κριτικές του Ehrenhaft.

Μια νέα διάσταση στη διαμάχη Millikan-Ehrenhaft προστέθηκε όταν ο Holton ανακά-

³ Η μέθοδος υπολογισμού του ηλεκτρικού φορτίου που χρησιμοποιούσε ο Ehrenhaft βασιζόταν στην παρασκευή των κολλοειδών και στην παρατήρηση με μικροσκόπιο της κίνησης Brown των μεμονωμένων θραυσμάτων των μετάλλων όπως αυτά από τον ατμό ενός τήξου αργύρου (Ehrenhaft, 1902).

λυψε δύο εργαστηριακά τετράδια σημειώσεων του Millikan στα Αρχεία στο Ινστιτούτο της Τεχνολογίας στην Καλιφόρνια. Οι σημειώσεις αυτές (28 Οκτωβρίου, 1911, ως 16 Απριλίου, 1912, περίπου 175 σελίδες) δίνουν μια σπάνια ευκαιρία να δει κανείς τη δουλειά ενός επιστήμονα στο εργαστήριό του. Αυτές οι σημειώσεις είχαν ανεπεξέργαστα δεδομένα και από αυτά φάνηκαν κάποιες από τις διαδικασίες επιλογής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο άρθρο που δημοσιεύθηκε στο *Physical Review* (Millikan, 1913). Από την άλλη μεριά, οι σημειώσεις του Ehrenhaft χάθηκαν στο δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, όταν αυτός μετανάστευσε στις Ηνωμένες Πολιτείες μετά την κατάκτηση της Αυστρίας από τους Nazi.

Στις εργαστηριακές σημειώσεις του Millikan υπήρχαν μετρήσεις για 140 σταγόνες και τα δημοσιευμένα αποτελέσματα το 1913 αναφέρουν με έμφαση ότι υπήρχαν μετρήσεις για 58 σταγόνες. Τι συνέβη με τις άλλες 82 σταγόνες; Ο Millikan δεν χρησιμοποίησε τις τιμές του φορτίου του ηλεκτρονίου που ήταν ενάντια στην αρχική του αντίληψη.

Στις σημειώσεις από τα πειράματα του Millikan που βρέθηκαν, υπάρχουν αξιολογήσεις της ποιότητας των μετρήσεων του. Αυτός συχνά έγραφε: «έπεσε η τάση της μπαταρίας», «υπάρχει λάθος στο χρονόμετρο» και «η απόσταση πρέπει να κρατηθεί περισσότερο σταθερή» (Holton, 1978, σελ.69). Σε άλλο σημείο σχολίαζε: «μεγάλο λάθος, δεν θα χρησιμοποιηθεί», ή «πολύ μικρή [τιμή], κάτι φταίει» ή σε άλλες περιπτώσεις «αυτή είναι οχεδόν απόλυτα σωστή... πιθανόν διπλή σταγόνα... να δημοσιευτεί αυτό το όμορφο αποτέλεσμα... όχι, κάτι δεν πάει καλά με το θερμόμετρο...» (Σταθοπούλου & Πατάπης, 1998).

Εκ των υστέρων γνωρίζουμε ότι στο τέλος τα αποτελέσματα του Millikan έγιναν αποδεκτά από τους άλλους φυσικούς, ενώ τα αποτελέσματα του Ehrenhaft ξεχάστηκαν, παρ' όλο που κανένα λάθος δεν αναγνωρίστηκε. Ο Holton (1978, σελ.79) συμπεραίνει ότι οι φυσικοί συζητώντας τα πειράματα του Ehrenhaft δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν ότι υπήρχε κάποιο λάθος στη μέθοδό του. Στα αποτελέσματά του δεν φάνηκε καθόλου να υπάρχει κάποιο λάθος. Επίσης ισχυρίζεται ότι το πρόβλημα φάνηκε να είναι ότι ο Ehrenhaft και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν όλες τις μετρήσεις που συνέλλεξαν, 'καλές', 'κακές' και 'αδιάφορες'.

Η διαμάχη των Millikan-Ehrenhaft κράτησε από το 1910 έως το 1923. Βέβαια ο ίδιος ο Ehrenhaft δημοσίευσε άρθρα με το ίδιο θέμα μέχρι τη δεκαετία του 1940, όταν πια κανείς δεν ενδιαφερόταν γι' αυτό (Holton, 1978, σελ. 79). Τα αποτελέσματα του Millikan αποτέλεσαν ένα σημαντικό βήμα στην εγκαθίδρυση της θεωρίας του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου. Το 1923 απονεμήθηκε στο Millikan το βραβείο Nobel φυσικής κυρίως για τη δουλειά του πάνω στο φορτίο του ηλεκτρονίου.

Η διαμάχη Millikan-Ehrenhaft και η φύση της επιστήμης

Σύμφωνα με το McComas (2008) μία από τις κοινά αποδεκτές αρχές της φύσης της επιστήμης είναι ότι *οι φυσικές επιστήμες αναζητούν, παράγουν και εξαρτώνται από εμπειρικά δεδομένα*. Στη «μάχη για το ηλεκτρόνιο» η όλη συζήτηση ανάμεσα στους δύο πρωταγωνιστές και την επιστημονική κοινότητα γίνεται στη βάση των εμπειρικών δεδομένων που έχουν προκύψει από αντίστοιχα πειράματα. Η ύπαρξη των εμπειρικών δεδομένων είναι

απαραίτητη για να αρχίσει η συζήτηση κατά πόσο αυτά είναι ακριβή ή όχι, πώς είναι δυνατόν να βελτιωθούν, πώς γίνεται κριτική αξιολόγησή τους και πώς είναι δυνατόν τελικά να ερμηνευτούν. Σε όλη αυτή τη διαδικασία, τόσο ο Millikan όσο και ο Ehrenhaft προσπαθούν να βελτιώσουν τη μέθοδο τους, εξαλείφοντας τις πιθανές πηγές σφαλμάτων, ώστε να παράγουν πιο ακριβή δεδομένα. Η αξιοπιστία της υποθέσης ότι υπάρχει τελικά το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο θα κριθεί στη βάση των εμπειρικών δεδομένων, αλλά δεν θα προκύψει άμεσα από αυτά. Ο Millikan, σε ένα άρθρο του που δημοσίευσε το 1916, ασχολείται με ζητήματα, που πηγάζουν από μια νέα δημοσίευση του Ehrenhaft (1914) στην οποία είχε καταφέρει να πάρει αρκετά μικρότερες τιμές βασισμένες στην κίνηση Brown των σταγόνων υδραργύρου και χρυσού. Ο Millikan στην προσπάθειά του να αντικρούσει τους ισχυρισμούς του Ehrenhaft λέει: «Είναι εντελώς παράλογο να υποθέσουμε ότι αυτά τα ιόντα έχουν ένα είδος φορτίου όταν «συλλαμβάνονται» από μια μεγάλη σταγόνα και ένα άλλο είδος όταν «συλλαμβάνονται» από μια μικρή. Αν δεν είναι το ίδιο είδος ιόντων τα οποία «συλλαμβάνονται» και στις δύο περιπτώσεις, τότε με σκοπό να εναρμονίσουμε τα αποτελέσματα με την ύπαρξη των ακέραιων πολλαπλασίων θα ήταν απαραίτητο να υποθέσουμε ότι υπάρχει στον αέρα ένας απροσδιόριστος αριθμός από διαφορετικά είδη από ιοντικά φορτία που αντιστοιχούν σε ένα απροσδιόριστο αριθμό από πιθανές ακτίνες των σταγόνων, και ότι, όταν ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο οδηγεί όλα αυτά τα ιόντα προς μια δοσμένη σταγόνα, αυτή η σταγόνα επιλέγει σε κάθε περίπτωση ακριβώς το φορτίο που αντιστοιχεί στις συγκεκριμένες ακτίνες. Μια τέτοια υπόθεση δεν είναι μόνο πολύ περίεργη για σοβαρή εξέταση αλλά διαψεύδεται ευθέως από τα πειράματά μου» (Millikan, 1916, σελ. 617).

Σύμφωνα επίσης με το McComas (2008), το ιστορικό παράδειγμα της «μάχης για το ηλεκτρόνιο» είναι ιδιαίτερα κατάλληλο (χαρακτηριστικό) για να διδάξει κανείς στους μαθητές μία ακόμη αρχή της ΦιΕ, που είναι ότι *η επιστήμη έχει ένα υποκειμενικό περιεχόμενο*. Πιο συγκεκριμένα ότι οι ιδέες, οι παρατηρήσεις και οι ερμηνείες στις φυσικές επιστήμες είναι «καθοδηγούμενες από τη θεωρία». Οι δύο επιστήμονες χρησιμοποίησαν περίπου την ίδια πειραματική διάταξη και συνέλλεξαν παρόμοια πειραματικά δεδομένα, όμως εξαιτίας των διαφορετικών καθοδηγητικών τους υποθέσεων τα ερμήνευσαν εντελώς διαφορετικά. Σύμφωνα με το Holton (1978, σελ.58) φαίνεται ότι τα ίδια πειραματικά δεδομένα θα μπορούσαν να στηρίξουν την αληθοφάνεια και των δύο διαμετρικά αντίθετων καθοδηγητικών υποθέσεων, τις οποίες με μεγάλη πίστη υποστήριζαν οι δύο πρωταγωνιστές.

Ο μεν Millikan υποστήριξε ότι υπάρχει μια ελάχιστη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται από ένα σωματίδιο, το ηλεκτρόνιο, και οποιαδήποτε άλλη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο αυτής, ενώ ο Ehrenhaft ότι υπάρχουν κλασματικά ηλεκτρικά φορτία («υποηλεκτρόνια») και ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι συνεχές.

Ο Ehrenhaft χρησιμοποίησε όλα τα δεδομένα αφού έτσι επιβεβαιωνόταν η καθοδηγητική του υπόθεση, ενώ ο Millikan παρουσίασε έτσι τα δεδομένα του ώστε να επιβεβαιώνουν την αρχική του υπόθεση. Η «μάχη για το ηλεκτρόνιο» δείχνει ότι η ιδέα ότι το φορτίο είναι κβαντισμένο, δηλαδή ότι αποτελείται από αδιαίρετες μονάδες, δεν προέρχεται από τα εμπειρικά δεδομένα (αφού αυτά φαίνεται ότι μπορούσαν να υποστηρίξουν και τις δύο καθοδηγητικές υποθέσεις) και, επομένως, ότι οι επιστημονικές θεωρίες δεν προκύπτουν μέσω επαγωγής απευ-

θείας από τα εμπειρικά δεδομένα αλλά εφευρίσκονται, επινοούνται από τους επιστήμονες.

Ο Ehrenhaft ερμηνεύει τα πειραματικά του δεδομένα στη βάση της αρχικής του υπόθεσης, ότι δεν υπάρχει στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Όπως αναφέρεται και παραπάνω ο Ehrenhaft ήταν οπαδός της άποψης της συνέχειας για τη δομή της ύλης και όχι του ατομισμού. Αντίθετα ο Millikan προσπαθούσε να παράγει όσο το δυνατόν πιο ακριβή πειραματικά αποτελέσματα που θα επιβεβαίωναν την αρχική του υπόθεση περί ατομισμού για τη φύση του ηλεκτρισμού. Συνεπώς δεν υποστηρίζεται η ιδέα ότι μια υπόθεση απορρίπτεται αν δεν ταιριάζει με τα πειραματικά δεδομένα (Matthews, 1994). Αντίθετα, ο Millikan αντί να απορρίψει την αρχική του υπόθεση εξέταζε πιθανές πηγές σφαλμάτων στη μέθοδο του.

Επίσης η «μάχη για το ηλεκτρόνιο» δείχνει παραδειγματικά ότι οι καθοδηγητικές υποθέσεις οδηγούν το σχεδιασμό του πειράματος, καθορίζουν τη συλλογή των δεδομένων και τέλος την ερμηνεία αυτών. Ο Millikan στεκόταν περισσότερο κριτικά στα δεδομένα εκείνα που δεν ταιριάζαν με την αρχική του υπόθεση παρά σε εκείνα που ήταν αναμενόμενα με βάση αυτή. Επιπρόσθετα βλέπουμε πως οι παρατηρήσεις επιδρούν στην αποδοχή της μιας και μόνο μιας από τις θεωρίες. Έτσι, παραδείγματα από την ιστορία της επιστήμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δείξουν την σύνθετη αλληλεπίδραση θεωρίας και παρατήρησης. Ο Clough (2006) υποστηρίζει ότι θα έπρεπε να προσπαθούμε να δείξουμε στους μαθητές ότι «τα δεδομένα δεν λένε στους επιστήμονες τι να σκεφτούν. Αντί αυτού οι επιστήμονες πρέπει να αναπτύξουν ιδέες που θα εξηγήσουν τα δεδομένα» (σελ. 478).

Το τελευταίο κομμάτι έρχεται να υποστηρίξει μια άλλη αρχή της φύσης της επιστήμης με βάση το McComas (2008), ότι *η επιστήμη έχει ένα δημιουργικό περιεχόμενο*. Πράγματι, το συγκεκριμένο πείραμα του Millikan μπόρεσε να συμβάλει στην υπάρχουσα γνώση μας εξαιτίας της ύπαρξης της ηλεκτρονικής θεωρίας η οποία υπέθετε την ύπαρξη του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου και υπέβαλε την αναγκαιότητα του πειραματικού του καθορισμού. Σύμφωνα με τον Nagel (1961) «είναι απίθανο ότι ο Millikan θα είχε επινοήσει το πείραμα της σταγόνας λαδιού εάν κάποια ατομική θεωρία του ηλεκτρισμού δεν είχε και' αρχήν υποστηρίξει ένα ζήτημα που φάνηκε σημαντικό για τη θεωρία και αν το πείραμα δεν στόχευε στην καθιέρωση αυτής» (σελ.90).

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι χρειάζεται η φαντασία και η δημιουργικότητα του επιστήμονα στη φάση της διατύπωσης των υποθέσεων, του σχεδιασμού ενός πειράματος όπως και στην ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων.

Η διδακτική παρέμβαση

Έχουν επισημανθεί διάφοροι τρόποι εισαγωγής στοιχείων της ιστορίας των φυσικών επιστημών στη διδασκαλία τους (Stinner, et al., 2003, Κολιόπουλος, κ.ά., 2005, Σιαμούλης, 2007). Ένας από αυτούς είναι η χρήση επιστημονικών διαμαχών.

Μια σε βάθος συζήτηση σχετική με επιστημονικές διαμάχες μέσα στην τάξη μπορεί να βελτιώσει την κατανόηση των μαθητών για τις εσωτερικές διεργασίες της επιστήμης και συγκεκριμένα την εισαγωγή μιας νέας θεωρίας και τη σχέση της με το πείραμα (Κίρνης,

2001). Οι Clough & Olson (2004⁴) δημιούργησαν μικρές ιστορίες (short stories), μέσω των οποίων θα μπορούσε να παρουσιαστεί μια διαμάχη πάνω σε ένα επιστημονικό θέμα π.χ. για τον προσδιορισμό της δομής του DNA. Κάθε ιστορία είχε σαν στόχο να διδάξει επιστημονικό περιεχόμενο και να βοηθήσει τους μαθητές να κατανοήσουν καλύτερα την προσωπική και επαγγελματική ζωή του επιστήμονα και το πώς αυτός 'κάνει αυθεντική' επιστήμη. Σύμφωνα με τους ερευνητές οι μαθητές εξετάζοντας τα στοιχεία και τα επιχειρήματα που εκφράζονται από τους επιστήμονες είναι περισσότερο πιθανό να καταλάβουν μια θεμελιώδη επιστημονική ιδέα και το πώς η επιστήμη 'δουλεύει'. Οι Stinner & Teichmann, (2003) έχουν χρησιμοποιήσει θεατρικές διασκευές για να παρουσιάσουν διαμάχες όπως 'Κοπέρνικος και Αριστοτελικό', 'ο Newton συζητά τη φύση του φωτός με τον Robert Hooke'. Αυτοί πιστεύουν ότι οι νέες επιστημονικές ιδέες γίνονται περισσότερο προσιτές μέσω ενός θεατρικού έργου.

Με βάση το διδακτικό μοντέλο που προτείνουν οι Monk & Osborne (1997), αποφασίσαμε να μετασχηματίσουμε τις βασικές ιδέες για τη σχέση του ιστορικού γεγονότος της διαμάχης Millikan-Ehrenhaft με την ανάδειξη χαρακτηριστικών της φύσης της επιστήμης σε μια διδακτική ακολουθία η οποία θα αποτελείται από τις ακόλουθες φάσεις.

Πρώτη φάση: Παρουσίαση από τον εκπαιδευτικό του επιστημονικού προβλήματος της κβάντωσης του ηλεκτρικού φορτίου με τρόπο που να ενδιαφέρει τους μαθητές και με στόχο να οικειοποιηθούν το πρόβλημα.

Δεύτερη φάση: Διατύπωση εκ μέρους των μαθητών υποθέσεων σχετικά με την επίλυση του προβλήματος και καταγραφή τους από τον εκπαιδευτικό. Έμφαση δίδεται στις επιστημονικές διαδικασίες στις οποίες αναφέρονται οι μαθητές όταν προσπαθούν να διατυπώσουν αντιλήψεις σχετικές με το εννοιολογικό πλαίσιο του προβλήματος.

Τρίτη φάση: Εισαγωγή από τον εκπαιδευτικό της ιστορικής διάστασης του επιστημονικού προβλήματος (προσέγγιση Millikan, προσέγγιση Ehrenhaft, πείραμα, περιγραφικά στοιχεία διαμάχης). Συζήτηση των διαφορών ανάμεσα στις διαδικασίες που πρότειναν οι μαθητές και οι ερευνητές. Διάφοροι ερευνητές (Holton, 1978, σελ. 28, Niaz, 1999) υποστηρίζουν ότι το πείραμα της σταγόνας λαδιού του Millikan είναι ακόμη και σήμερα ένα από τα δυσκολότερα πειράματα που γίνονται σε επίπεδο προπτυχιακών φοιτητών. Η δυσκολία του έγκειται στο ότι υπεισέρχονται πάρα πολλοί αστάθμητοι παράγοντες με αποτέλεσμα οι μετρήσεις που παίρνονται να μην είναι ακριβείς. Για τους παραπάνω λόγους οι μαθητές δεν θα πραγματοποιήσουν το πείραμα, αλλά θα γίνει σε αυτούς η παρουσίασή του.

Τέταρτη φάση: Επεξεργασία εκ μέρους ομάδων μαθητών πειραματικών δεδομένων που ελήφθησαν από τους δύο ερευνητές και ερμηνειών τους. Θα αναδειχθούν έτσι οι δύο διαφορετικοί τρόποι ανάγνωσης των δεδομένων αυτών και θα αναδειχθούν τα επιχειρήματα υπέρ της μιας ή της άλλης ανάγνωσης. Η μορφή της παρέμβασης για την ανάδειξη των επιχειρημάτων μπορεί να έχει τη μορφή ανταλλαγής επιχειρημάτων ανάμεσα σε ομάδες μαθητών, παιχνιδιού ρόλων ή μέσω μικρών ιστοριών (short stories) που θα ακολουθούνται από ερωτήσεις.

⁴ Το κείμενο αυτό δημοσιεύεται στον παρόντα τόμο με τίτλο «Η φύση της επιστήμης: πάντοτε στον περίγυρο της επιστήμης».

Πέμπτη φάση. Συζήτηση σχετικά με τη φύση της διαμάχης Millikan – Ehrenhaft και την κατάληξή της (αποδοχή της άποψης Millikan). Η συζήτηση θα επικεντρωθεί κυρίως στις τρεις θέσεις για τη φύση της επιστήμης που επισημάνθηκαν στην προηγούμενη ενότητα:

- οι φυσικές επιστήμες αναζητούν, παράγουν και εξαρτώνται από εμπειρικά δεδομένα
- η επιστήμη έχει ένα υποκειμενικό περιεχόμενο
- η επιστήμη έχει ένα δημιουργικό περιεχόμενο

Έκτη φάση. Αξιολόγηση των μαθητών τόσο στο εννοιολογικό επίπεδο (σχετικό με το επιστημονικό πρόβλημα) όσο και για τις ιδέες τους σχετικά με τα χαρακτηριστικά της φύσης της επιστήμης.

Ο μετασχηματισμός των φάσεων αυτών σε λειτουργική ακολουθία διδακτικών εννοιών, η εφαρμογή της ακολουθίας αυτής σε μαθητές της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης και η αξιολόγηση της γνωστικής προόδου των μαθητών αποτελούν μέρος ευρύτερης έρευνας η οποία βρίσκεται σε εξέλιξη.

Βιβλιογραφία

- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N.G. (2000). Improving science teachers' conceptions of the nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 22, 665-701.
- Clough, M.P. (2003). Explicit but insufficient: Additional considerations for successful NOS Instruction. Paper presented at the annual meeting of the Association for the Education of Teachers, St. Louis, MO.
- Clough, M.P. (2006). Learners' responses to the demands of conceptual change considerations for effective nature of science instruction. *Science & Education* 15(5), 463-494.
- Clough, M.P., & Olson, J.K. (2004). The nature of science: always part of the science story. *The Science Teacher* 71(9), 28-31.
- Ehrenhaft, F. (1902). Kolloidale metalle. *Anzeiger Akad. Wiss. (Vienna)*, 18, 241-243.
- Holton, G. (1978). *The scientific imagination: case studies*, Cambridge University Press, Cambridge
- Irwin AR (2000) Historical case studies: teaching the nature of science in context. *Science Education*, 84(1), 5-26
- Kipnis, N. (2001). Scientific Controversies in Teaching Science: The Case of Volta. *Science & Education*, 10, 33-49
- Klopfer, L.E. (1969). The teaching of science and the history of science. *Journal of Research in Science teaching*, 6, 87-97
- Kolstø, S.D. (2008). Science education for democratic citizenship through the use of the history of science. *Science & Education*, υπό δημοσίευση.
- Κολιόπουλος, Δ., Δόσης, Σ. & Σταμούλης, Ε. (2005). Η χρήση κειμένων από την ιστορία των φυσικών επιστημών στη διδασκαλία: εφαρμογές στα πλαίσια της “καινοτομικής” και της “εποικοδομητικής” αντίληψης για το αναλυτικό πρόγραμμα φυσικών

- επιστημών, στο Σκορδούλης, Κ., & Νικολαΐδης, Ε., (Επιμ.) *Ιστορία, Φιλοσοφία και Διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών*, πρακτικά 3^{ου} Παν. Συνεδρίου, Αθήνα, 192-198.
- Matthews, M.R. (1994). *Science teaching, The role of history and philosophy of science*. Routledge, New York
- McComas, W.F. (2008). Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. *Science & Education*, 17(2).
- Millikan, R.A. (1910). A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge. *Philosophical Magazine*, 19, 209-228.
- 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. (1913). On the elementary electrical charge and the Avogadro constant. *Physical Review (ser. 2)*, 2, 109-143.
- Millikan, R.A. (1916). The existence of a subelectron? *Physical Review*, 8, 595-625.
- 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 Prentice-Hall, Inc.
- 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
- Nagel, E. (1961). *The structure of science*. New York: Harcourt, Brace & World.
- Niaz, M. (2000). The oil Drop Experiment: A rational Reconstruction of the Millikan Ehrenhaft Controversy and Its Implications for Chemistry Textbooks. *Journal of Research in Science teaching*, 37(5), 480-508.
- Ryder, J., Leach, J., & Driver, R. (1999). Undergraduate science students' images of science. *Journal of Research in Science teaching*, 36, 201-220.
- Shamos, M.H. (1987). *Great experiment in physics*. Dover Publications, Inc., New York.
- Stinner, A. & Teichmann, J. (2003). Lord Kelvin and the Age-of-the-Earth Debate: A Dramatization. *Science & Education*, 12, 213-228.
- Stinner, A., McMillan, B., Metz, D., Jilek, J. & Klassen, S. (2003). The Renewal of Case Studies in Science Education. *Science & Education*, 12(7), 617-643.
- Σταθοπούλου, Χ. Β. & Πατάπης Σ.Κ. (1998). Διδάσκοντας Φυσική και περί της Φυσικής μέσα από το σημειωματάριο του Millikan. Στο Π. Κουμαράς, Π. Καρυωτογλου, Β. Τσελέφης, & Δ. Ψύλλος, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο: Διδακτική των φυσικών επιστημών και των νέων τεχνολογιών στην εκπαίδευση. Πρακτικά (σ. 447-455). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Επιστημονικών Βιβλίων Κ. Χριστοδουλίδη.
- Σταμούλης, Ε. (2007). Στρατηγικές για τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών με την εισαγωγή στοιχείων από την ιστορία και φιλοσοφία των φυσικών επιστημών, στο Κολιόπουλος, Δ. (Επιμ.) *Ιστορία, Φιλοσοφία και Διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών*, πρακτικά 4^{ου} Παν. Συνεδρίου, Πάτρα, 265-278.