



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ  
ΑΝΟΙΚΤΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ  
ΚΑΘΗΓΗΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ (ΚΦΕ)**

*Διπλωματική Εργασία*

# **Ιστορικά πειράματα Faraday**

*και η αξιοποίησή τους στη διδακτική της Φυσικής  
σε Γυμνάσιο και Λύκειο*

**Αναστάσιος Νέζης  
Α.Μ.: 81717**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΠΟΛΑΤΟΓΛΟΥ ΧΑΡΙΤΩΝ**

**Αθήνα 2017**





© ΕΑΠ, 2017

Η παρούσα διατριβή, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ΘΕ ΚΦΕ.51, και τα λοιπά αποτελέσματα της αντίστοιχης Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης και αναπαραγωγής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα και το ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε η ΔΕ καθώς και τον επιβλέποντα και την επιτροπή κρίσης.

Εξώφυλλο: «Ο Δακτύλιος του Faraday», μουσείο Faraday (Βασιλικό Ινστιτούτο, Λονδίνο)





Αναστάσιος Νέζης “Ιστορικά πειράματα Faraday και η αξιοποίησή τους στη διδακτική της Φυσικής σε Γυμνάσιο και Λύκειο”



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ  
ΑΝΟΙΚΤΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ  
ΚΑΘΗΓΗΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ (ΚΦΕ)**

**Διπλωματική Εργασία**

**Ιστορικά πειράματα Faraday  
και η αξιοποίησή τους στη διδακτική της  
Φυσικής σε Γυμνάσιο και Λύκειο**

**Αναστάσιος Νέζης  
Α.Μ.: 81717**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΠΟΛΑΤΟΓΛΟΥ ΧΑΡΙΤΩΝ**

**1<sup>ος</sup> Αξιολογητής Καθηγητής: ΣΑΜΨΩΝΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**Αθήνα 2017**





## Περίληψη

Η ζωή και το έργο του Michael Faraday αποτελούν το κύριο θέμα αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Ως άνθρωπος, αλλά κυρίως ως ερευνητής – επιστήμονας, ο Faraday αποτελεί ένα πρότυπο που κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει. Κατά τη διάρκεια της ζωής του έκανε ένα (!) μόνο πράγμα: πειράματα. Εν πολλοίς, ο σύγχρονος τεχνολογικός μας πολιτισμός στηρίζεται στο ηλεκτρικό ρεύμα και αυτό έχει τις απαρχές του στο δεύτερο μισό του 1831 και στα ιστορικά πειράματα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, που εκείνος διεξήγαγε.

Η Διπλωματική Εργασία δομείται σε τρία κεφάλαια. Στο πρώτο βλέπουμε μια εκτενή βιογραφία του Faraday που περιλαμβάνει τα πρώτα χρόνια (πριν γίνει ερευνητής), τη συνεργασία του με τον Davy και τη μονιμοποίησή του στο Βασιλικό Ινστιτούτο, την επιστημονική διαμάχη του με τον Davy και την ανεξαρτητοποίησή του από αυτόν. Βλέπουμε επίσης τα πρώτα του επιστημονικά επιτεύγματα και σιγά – σιγά όλη του την επιστημονική δραστηριότητα, από την ηλεκτροχημεία και τον κινητήρα μέχρι τη επαγωγή, την θεμελίωση της έννοιας του πεδίου, τον διαμαγνητισμό και το φαινόμενο που φέρει το όνομά του. Αναφερόμαστε στη σχέση του με τον Maxwell και τέλος, επισημαίνουμε την ταπεινότητα, τη μετριοφροσύνη και την βαθειά θρησκευτική πίστη που χαρακτήρισαν όλη του τη ζωή μέχρι και τον θάνατό του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ασχολούμαστε αναλυτικότερα με τα πειράματα του ηλεκτρομαγνητισμού και της επαγωγής. Αρχικά, αναφερόμαστε στο τι προηγήθηκε και συγκεκριμένα στα πειράματα των Ørsted, Ampère και Arago. Στη συνέχεια, αναλύουμε το περίφημο πείραμα του *μονοπολικού κινητήρα* (του πρώτου ηλεκτροκινητήρα στην ανθρώπινη ιστορία). Ακολουθεί εκτενής αναφορά στα πειράματα της περιόδου *Αύγουστος – Νοέμβριος 1831*, που οδήγησαν στην δημοσίευση *Experimental Researches in Electricity* (1832). Εκεί, βλέπουμε μεταξύ άλλων το ιστορικό πείραμα του *δακτυλίου*, τη *γεννήτρια* και τέλος τη *δυναμογεννήτρια* (την πρώτη συσκευή ηλεκτροπαραγωγής στην ανθρώπινη ιστορία).

Στο τρίτο κεφάλαιο κάνουμε μια προσπάθεια μεταφοράς των ιστορικών πειραμάτων του Faraday στην τάξη, με υλικά και όργανα από το σχολικό εργαστήριο Φυσικών Επιστημών. Βλέπουμε δύο σενάρια, με αντίστοιχα φύλλα εργασίας: στο

πρώτο σενάριο ασχολούμαστε με το πείραμα του Ørsted και την προσπάθεια εξήγησής του από τον Faraday, ενώ στο δεύτερο με τα ιστορικά πειράματα του 1831 και την εισαγωγή του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η Διπλωματική Εργασία κλείνει με αναλυτική αναφορά σε δέκα βίντεο που δημιουργήθηκαν για να υποστηρίξουν τα προαναφερθέντα σενάρια. Τα βίντεο (που έχουν αναρτηθεί στο διαδίκτυο) παρουσιάζουν όλες τις πειραματικές διαδικασίες των σεναρίων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε επικουρικά είτε ανεξάρτητα από τον εκπαιδευτικό που θα διδάξει την αντίστοιχη ύλη στο σχολείο.

**Λέξεις κλειδιά:**

ηλεκτρομαγνητισμός, επαγωγή, κινητήρας, γεννήτρια, δακτύλιος, ηλεκτρικό ρεύμα



Αναστάσιος Νέζης “Ιστορικά πειράματα Faraday και η αξιοποίησή τους στη  
διδασκτική της Φυσικής σε Γυμνάσιο και Λύκειο”



**HELLENIC  
OPEN  
UNIVERSITY**

**POSTGRADUATE STUDY PROGRAM:  
MASTER’S IN TEACHING NATURAL SCIENCES**

**Thesis**

# **Faraday’s historical experiments**

*and their utilization in Physics Education in  
high school and senior high school*

**Anastasios Nezis  
R.N.: 81717**

**Supervisor Professor: Polatoglou Chariton**

**1<sup>st</sup> Jury Member: Sampsonidis Dimitrios**

**Athens 2017**







## Abstract

Michael Faraday's life and work is the main subject of this Diploma Thesis. As a person, but above all as a researcher – scientist, Faraday is a model you do not question. During his life, he did one (!) thing only: experiments. Our modern technological culture is, fundamentally, based on electric current and this has its origins in the second half of 1831 and in the historical experiments of electromagnetic induction, which he conducted.

This Diploma Thesis is structured in three chapters. In the first one, we see an extensive Faraday's biography that includes his early years (before becoming a researcher), his collaboration with Davy and his permanent establishment at the Royal Institute, his scientific controversy with Davy and his independence from him. We also see his first scientific achievements and, slowly, all his scientific activity, from electrochemistry and the motor to induction, the foundation of the field concept, the diamagnetism and the phenomenon that bears his name. We refer to his relationship with Maxwell and lastly, we point out the humility, modesty and profoundly religious faith that characterized his entire life.

In the second chapter, we deal more closely with the experiments of electromagnetism and induction. First of all, we are referring to what was preceded and specifically to the experiments of Ørsted, Ampère and Arago. We then analyze the famous experiment of the homopolar motor (the first electric motor in human history). An extensive reference is made to the *August - November 1831* experiments, which led to the publication of *Experimental Researches in Electricity (1832)*. Here we see, among other things, the historical experiment of the *ring*, the *generator* and finally the *dynamo* (the first power generator in human history).

In the third chapter, we attempt to transfer Faraday's historical experiments to the classroom, with materials and instruments from the school's Science Lab. We see two scenarios with corresponding worksheets: in the first scenario, we deal with the Ørsted experiment and Faraday's attempt to explain it, while in the second we see the historical experiments of 1831 and the introduction of the phenomenon of electromagnetic induction. This Diploma Thesis closes with a detailed reference to ten videos created to support the aforementioned scenarios. The videos (posted on the internet) present all the experimental scenario processes and can be used either as an

adjunct or independently of the teacher who will teach the respective subject matter at school.

**Keywords:**

Electromagnetism, induction, motor, generator, ring, electric current



## Ευχαριστίες

Η διαδικασία συγγραφής μιας διπλωματικής εργασίας ήταν, τελικά, πιο δύσκολη απ’ ότι θυμόμουν από τα φοιτητικά μου χρόνια. Από αυτή τη θέση θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν στη συγγραφή της με συμβουλές, βιβλιογραφία, υποδείξεις και ανοχή!

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Πολάτογλου Χαρίτων για την επικοινωνία, τις συμβουλές και το κάλο κλίμα που υπήρξε ανάμεσά μας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές μου στην ΚΦΕ κ. Μπαχάρη Κ., Καπόλο Ι., Κολιόπουλο Δ. και Σκορίλα Α. για τις γνώσεις, τις εμπειρίες και τα εφόδια που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ επίσης τους συναδέλφους και φίλους κα. Κουτσούκου Σοφία, κ. Μουρατίδη Μάριο, Δρ. Πολυζώη Γιώργο, κ. Λαϊβερά Γιώργο, κ. Λάζο Τάκη, κ. Ζέρβα Αντώνη, κα. Κυριάκου Σταυρούλα και τον σχολικό σύμβουλο Δρ. Στεφανίδη Κωνσταντίνο για όλη τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Γιάννη (†) και τον θείο μου Τάκη για τις πολύτιμες τεχνικές τους συμβουλές πάνω στις κατασκευές των πειραματικών διατάξεων και πάνω απ’ όλους τη σύζυγό μου, Φανή και την κόρη μου, Μαριτίνα για τη συμπαράσταση και την υπομονή που έδειξαν όλα αυτά τα (δύσκολα) χρόνια της ΚΦΕ. Η εργασία αυτή τους αφιερώνεται.





## **Περιεχόμενα**

Εξώφυλλο .....	1
Δήλωση συνιδιοκτησίας με ΕΑΠ .....	3
Τίτλος στα Ελληνικά .....	5
Περίληψη .....	7
Τίτλος στα Αγγλικά .....	9
Abstract .....	11
Ευχαριστίες .....	13
Περιεχόμενα .....	15
Πίνακας Εικόνων και Σχημάτων .....	19
Εισαγωγή .....	23

## **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Η ζωή και το έργο του Michael Faraday** .....

Τα πρώτα χρόνια .....	25
Στο Βασιλικό Ινστιτούτο με τον Davy .....	28
Ο Ηλεκτρομαγνητισμός .....	34
Τα χρόνια που ακολούθησαν το 1832 .....	38
Οι πυκνωτές .....	39
Οι φάρροι .....	40
Οι Χριστουγεννιάτικες διαλέξεις .....	40
Οι τελευταίες ανακαλύψεις, από το 1845 μέχρι το τέλος .....	42
Το ημερολόγιο του Faraday .....	45
Η σχέση του Faraday με τον Maxwell .....	47
Ο άνθρωπος Faraday .....	50
Εν ζωή και μετά θάνατον αναγνωρίσεις .....	50
Η ζωή του Faraday σε τίτλους .....	53

## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Τα ιστορικά πειράματα του Michael Faraday** .....

Η προϊστορία: Ørsted – Ampère – Arago .....	57
Το πείραμα του Ørsted .....	58
Ampère – Sturgeon – Arago .....	61
Ο μονοπολικός κινητήρας .....	63

Η εξήγηση σήμερα .....	69
Οι επίγονοι .....	70
Ο Δακτύλιος .....	73
Πριν τον δακτύλιο .....	73
29 <sup>η</sup> Αυγούστου 1831 .....	76
Μετά τον δακτύλιο .....	80
Η δυναμογεννήτρια .....	87
Η φορά του επαγωγικού ρεύματος .....	90
Παλιά πειράματα σε νέο φως .....	94
Η εξήγηση σήμερα .....	95
Οι επίγονοι .....	97
<b><u>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup></u>: Τα ιστορικά πειράματα στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση .....</b>	<b>101</b>
Το πείραμα του Ørsted και το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού. Σχέδιο μαθήματος .....	105
Υλικά και όργανα .....	105
Σενάριο .....	107
Φύλο Εργασίας: <i>Το πείραμα του Ørsted</i> .....	115
Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή. Σχέδιο μαθήματος .....	121
Υλικά και όργανα .....	122
Σενάριο .....	122
Φύλλο Εργασίας: <i>Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή</i> .....	143
Κατασκευή εκπαιδευτικών ταινιών μικρής διάρκειας και ανάρτησή τους στο διαδίκτυο .....	163
1. Ørsted's Experiment (το πείραμα του Ørsted) .....	163
2. FARADAY 1831 (part 1) .....	164
3. FARADAY 1831 (part 2) .....	165
4. FARADAY 1831 UPDATE .....	167
5. FARADAY 1831 (part 3) .....	168
6. FARADAY 1831 (part 4) .....	169
7. FARADAY 1831 (part 5) .....	170
8. FARADAY 1831 (part 6) .....	172
9. Ηλεκτρομηχανική Αρμονική Ταλάντωση – Electromechanical Harmonic Oscillation .....	173



10. Electromagnetic Induction – Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή .....	174
ΑΝΤΙ ΕΠΙΛΟΓΟΥ .....	177
Βιβλιογραφία .....	179
Βιβλιογραφία Εικόνων, Φωτογραφιών και Σχημάτων .....	185
Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων .....	187







## Πίνακας Εικόνων και Σχημάτων

Εικόνα 1. Michael Faraday (1861) .....	23
Εικόνα 2. Sir Humphrey Davy (1778-1829) .....	27
Εικόνα 3. Το αυθεντικό τομίδιο 300 σελίδων, που έφτιαξε ο Faraday και παρέδωσε στον Davy .....	27
Εικόνα 4. Michael Faraday.....	29
Εικόνα 5. Sarah & Michael.....	31
Εικόνα 6. "You see George?..." από το ντοκιμαντέρ της NOVA "Einstein's big idea" .....	33
Εικόνα 7. Σχήματα Chladni .....	34
Εικόνα 8. Ο Δακτύλιος .....	35
Εικόνα 9. Η Δυναμογεννήτρια του Faraday .....	36
Εικόνα 10. Η πρώτη σελίδα του ιστορικού άρθρου .....	37
Εικόνα 11. Michael Faraday (1842) .....	39
Εικόνα 12. 27/12/1855 Χριστουγεννιάτικη Διάλεξη. Στα πρώτα έδρανα βλέπουμε τον διάδοχο του θρόνου Πρίγκιπα Αλβέρτο καθώς και τον Πρίγκιπα Αλφρέδο (να μην παρακολουθεί και τόσο φανατικά...).....	41
Εικόνα 13. Μαγνητικά Πεδία σχεδιασμένα από τον ίδιο τον Faraday στο <i>Experimental Researches in Electricity</i> , Vol.3, Table III .....	44
Εικόνα 14. Το Ημερολόγιο.....	46
Εικόνα 15. James Clerk Maxwell (1831-1879).....	48
Εικόνα 16. Hampton Court .....	51
Εικόνα 17. Η πλακέτα στο Westminster Abbey .....	52
Εικόνα 18. Το χαρτονόμισμα των 20 λιρών .....	52
Εικόνα 19. Το άγαλμα στο Savoy Palace .....	55
Εικόνα 20. Όργανα πειραμάτων του Faraday: 1. γαλβανόμετρο, 2. πηνίο δείκτης, 3. πηνίο για επαγωγή με μαγνήτη, 4. ο δακτύλιος, 5. συζευγμένα πηνία επαγωγής, 6. συσκευή σπινθήρων.....	57
Εικόνα 21. H.C. Ørsted (1777-1851) & Το πείραμα απόκλισης της μαγνητικής βελόνας... 58	
Εικόνα 22. Η τοποθέτηση πυξίδων γύρω από ρευματοφόρο σύρμα & Το μαγνητικό πεδίο του σύρματος με ρινίσματα σιδήρου .....	60
Εικόνα 23. Francois Arago (1786-1853) & Ο τροχός Arago .....	62
Εικόνα 24. Καταχώρηση Ημερολογίου 3 & 4 Σεπτεμβρίου 1821 .....	63
Εικόνα 25. «Πολύ ικανοποιητικό, αλλά να φτιάξω μια πιο κατανοητή συσκευή».....	65
Εικόνα 26. Σκίτσο του Κινητήρα (4-9-1821) .....	65
Εικόνα 27. Πίνακας IV, σελ. 311, <i>Experimental Researches in Electricity</i> , Vol.2, 1844.....	67
Εικόνα 28. Η Συσκευή σήμερα (μουσείο Faraday, Royal Institute) .....	68
Εικόνα 29. ο τροχός του Barlow .....	70
Εικόνα 30. Ο διπολικός κινητήρας του A. Jedlik .....	71
Εικόνα 31. Ο επαγωγικός κινητήρας του N. Tesla.....	71
Εικόνα 32. Από το σημειωματάριο του Faraday (29-8-1831) .....	77
Εικόνα 33. Το "επίσημο" σχέδιο του Δακτυλίου, από τη δημοσίευση του 1832 .....	78
Εικόνα 34. Ο Δακτύλιος Σήμερα (Μουσείο Faraday, Royal Institute).....	79

Εικόνα 35. Αριστερά: Αρχικό σχέδιο του Faraday από το Experimental Researches in Electricity (1832).....	81
Εικόνα 36. Μισή σπείρα στον "μεγάλο" μαγνήτη (από την δημοσίευση του 1832).....	82
Εικόνα 37. Αριστερά: αρχικό σχήμα από το ημερολόγιό του (17-10-1831).....	82
Εικόνα 38. Η "γεννήτρια" σήμερα (μουσείο Faraday, Royal Institute).....	83
Εικόνα 39. Πείραμα Επαγωγής: ηλεκτρομαγνήτης μέσα σε πηνίο.....	84
Εικόνα 40. Ο "μεγάλος" μαγνήτης με τους πόλους του, οι ράβδοι από σίδηρο και ο χάλκινος δίσκος.....	87
Εικόνα 41. Αριστερά: Ο αυθεντικός δίσκος που χρησιμοποίησε ο Faraday (μουσείο Faraday, Royal Institute).....	88
Εικόνα 42. Διάφορες θέσεις των ψηκτρών στον δίσκο (από την δημοσίευση του 1832).....	90
Εικόνα 43. Νότιος πόλος κάτω από το <i>a</i> , θετικό φορτίο στο <i>b</i> (από την δημοσίευση του 1832).....	91
Εικόνα 44. Επιβεβαίωση φοράς επαγωγικού ρεύματος (από την δημοσίευση του 1832)...	91
Εικόνα 45. Τέσσερις περιπτώσεις επιβεβαίωσης της φοράς του επαγωγικού ρεύματος...	92
Εικόνα 46. Καταχώρηση #403, στο ημερολόγιο (26-3-1832).....	93
Εικόνα 47. Εξηγήσεις του ηλεκτρομαγνητικού στροφέα και του δίσκου του Arago.....	95
Εικόνα 48. Η γεννήτρια Pixii (1832).....	97
Εικόνα 49. Ο φάρος στο Bow Creek σήμερα.....	98
Εικόνα 50. Ο Granville Woods (1856-1910) και τα σχέδια της πατέντας του Επαγωγικού Τηλέγραφου.....	99
Εικόνα 51. Ιδιοκατασκευή και Εργαστηριακή συσκευή πειράματος Ørsted.....	106
Εικόνα 52. Πολλαπλή μπαταρία 9...45 Volt.....	106
Εικόνα 53. Συσκευή επίδειξης της μορφής του πεδίου ευθ. ρευμ. αγωγού.....	107
Εικόνα 54. Στάδια περιστροφής της συσκευής Ørsted, χωρίς σύνδεση στο ρεύμα.....	108
Εικόνα 55. Εκτροπή της βελόνας στο πείραμα του Ørsted. Ορθή (2η φωτό) και ανάστροφη (3η φωτό).....	108
Εικόνα 56. Προσανατολισμός πυξίδων γύρω από ρευματοφόρο σύρμα.....	110
Εικόνα 57. Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού (με ρινίσματα σιδήρου).....	112
Εικόνα 58. Αυτοσχέδιο Γαλβανόμετρο.....	113
Εικόνα 59. Τα όργανα της Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης.....	123
Εικόνα 60. Κυκλώματα Δακτυλίου με δύο αμπερόμετρα - γαλβανόμετρα.....	129
Εικόνα 61. Πυρήνες - Γέφυρες από χαλκό και αλουμίνιο.....	134
Εικόνα 62. Τρόπος κατασκευής μακρόστενου μαγνήτη από τρεις μικρότερους.....	135
Εικόνα 63. Η σύγχρονη "Τριγωνική Διάταξη".....	135
Εικόνα 64. Απλή επίδειξη έλξης μαγνήτη σε συνδετήρες.....	137
Εικόνα 65. Τρία πηνία (300-600-1200) σε σειρά.....	140
Εικόνα 66. Πηνίο σε Πηνίο.....	141
Εικόνα 67. Η Δυναμογεννήτρια (ιδιοκατασκευή).....	173
Σχήμα 1. Πρώτη & Δεύτερη Απόπειρα Η/Μ κίνησης (3-9-1821).....	64
Σχήμα 2. Μονοπολικός κινητήρας (4-9-1821).....	65
Σχήμα 3. Η σημερινή εξήγηση του ηλεκτρομαγνητικού στροφέα.....	69
Σχήμα 4. Σύγχρονη εξήγηση του δίσκου του Faraday.....	96



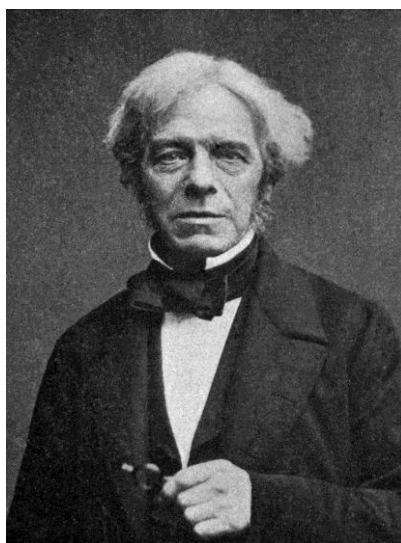
Σχήμα 5. Διάγραμμα πολλαπλής μπαταρίας .....	106
Σχήμα 6. Φορές επαγόντων και επαγωγικών ρευμάτων στον Δακτύλιο .....	130
Σχήμα 7. Έξοδος νότιου (μπλε) από αριστερά ισοδυναμεί με έξοδο βόρειου (κόκκινου) από δεξιά .....	139
Σχήμα 8. Διάγραμμα σύνδεσης του διπλού LED και της λειτουργίας του στο πείραμα του Δακτυλίου.....	167





## Εισαγωγή

Λονδίνο. Τέλη 18<sup>ου</sup> αιώνα. Ένα βροχερό, φθινοπωρινό απόγευμα σε ένα φτωχικό σπίτι θα γεννηθεί ένα αγόρι. Θα μεγαλώσει στις λασπερές γειτονιές της πόλης με το χλωμό φως των κεριών και του φωταερίου να κυριαρχεί στα βράδια του. Όμως το αγόρι γεννήθηκε αποφασισμένο... Μεγάλωσε, έγινε άντρας και κατάφερε όχι μόνο να ξεφύγει από το, σχεδόν, προδιαγεγραμμένο μέλλον του –να γίνει σιδεράς σαν τον πατέρα του– αλλά να ανέλθει στα ανώτερα κοινωνικά στρώματα της λονδρέζικης Βικτωριανής Εποχής. Όχι με τα χρήματα ή με έναν “έξυπνο” γάμο, αλλά με την σκληρή δουλειά και την αξία του. Μέσα από την επιστήμη κατάφερε να γίνει γνωστός σε όλους, κατάφερε να γεμίζει αμφιθέατρα στις διαλέξεις που έδινε, και προς το τέλος της καριέρας του, να έχει ως ακροατήριο ακόμη και μέλη της βασιλικής οικογένειας. Όμως, δεν θα ξεχάσει ποτέ την ταπεινή του καταγωγή. Δεν θα αποκτήσει υπερηφάνεια ή έπαρση. Μέχρι το τέλος της ζωής του θα παραμείνει σεμνός, βαθειά θρησκευόμενος και πιστός υπηρέτης της αναζήτησης της γνώσης και συνεπώς της επιστήμης. Ήταν ο Michael Faraday και χάρις σ’ αυτόν έχουμε τη μετάβαση από την εποχή του ατμού σε αυτό που σήμερα αποκαλούμε σύγχρονο τεχνολογικό πολιτισμό. Έναν πολιτισμό, που στη βάση όλων των σπουδαίων και μη επιτευγμάτων του, έχει το ηλεκτρικό ρεύμα. Και ο Faraday κατάφερε να μας διδάξει πώς να το παράγουμε!...



Εικόνα 1. Michael Faraday (1861)





## 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο *Η ζωή και το έργο του Michael Faraday*

### **Τα πρώτα χρόνια**

Ο Michael Faraday γεννήθηκε στις 22 Σεπτεμβρίου του 1791 στο Newington Butts, που τώρα ανήκει στο νότιο Λονδίνο, αλλά τότε ήταν ένα μικρό χωριό στις αγροτικές περιοχές του Surrey. Ο πατέρας του, James, ήταν σιδεράς και είχε έρθει μαζί με την οικογένειά του στο Λονδίνο από το Yorkshire λίγα χρόνια πριν γεννηθεί ο μικρός Michael. Τα παιδικά του χρόνια ήταν δύσκολα. Η οικογένειά του ήταν φτωχή. Όταν ήταν πέντε ετών μετακομίζουν στη οδό Charles, στο Wells Muse της πλατείας Manchester, όπου και πηγαίνει σχολείο. Η σχολική του εκπαίδευση ήταν αυτή της εργατικής τάξης της εποχής και όπως αναφέρει ο ίδιος, αργότερα, για την μόρφωσή του: *«ήταν λίγο περισσότερη από την απλή ανάγνωση, την εκμάθηση της γραφής και της αριθμητικής, όπως γίνεται στα δημόσια σχολεία. Τις εξωσχολικές μου ώρες τις περνούσα είτε στο σπίτι, είτε στους δρόμους»* (1). Αντισταθμίζει, έτσι, τις ελλείψεις διαβάζοντας ό,τι (!) έπεφτε στα χέρια του. Τελειώνει την τυπική του εκπαίδευση στα 13 (το σημερινό δημοτικό σχολείο) και στα 14 το πάθος για το διάβασμα (σε συνδυασμό με την οικονομική δυσχέρεια της οικογένειάς του) τον οδηγούν στην Blandford Str. στο βιβλιοπωλείο/βιβλιοδετείο του κ. G. Riebau, όπου και πιάνει δουλειά (2), (3). Το πρωί δουλεύει σκληρά και το απόγευμα διαβάζει όποιο επιστημονικό άρθρο ή βιβλίο βρίσκει. Του αρέσουν ιδιαίτερα τα “Συζητήσεις περί Χημείας” της Jane Marcet, “Η Βελτίωση του Νου” του Isaac Watch (του οποίου τις αρχές εφάρμοσε με ενθουσιασμό) και η εγκυκλοπαίδεια Britannica (4). Αναπτύσσει μια ακαταμάχητη επιθυμία να καταλάβει “γιατί τα πράγματα δουλεύουν έτσι όπως δουλεύουν” και θέλει πολύ να δει από κοντά τα πειράματα για τα οποία διαβάζει (5). Όμως αυτό θα αργήσει λίγο...

Σε αυτή την τρυφερή ηλικία είναι που κάνει τα πρώτα του πειράματα. Αρχικά, από παλιές φιάλες και κομμάτια ξύλου φτιάχνει μια αυτοσχέδια ηλεκτροστατική μηχανή<sup>1</sup>, με την οποία εκτελεί απλά πειράματα. Στη συνέχεια κατασκευάζει μια βολταϊκή στήλη με 7 χάλκινα νομίσματα της μισής πέννας, 7 δίσκους ψευδαργύρου και 6 δίσκους χαρτιού βουτηγμένο σε αλατόνερο. Με αυτή την απλή κατασκευή (μοντέλο

<sup>1</sup> Υπάρχει ακόμα! Μπορείτε να την δείτε [εδώ](#)



που πριν λίγα χρόνια είχε προτείνει ο Volta) καταφέρνει να αποσυνθέσει θεϊκό μαγνήσιο (6).

Η εποχή ήταν δύσκολη και ένα από τα χαρακτηριστικά της ήταν πως η αγορά μιας εφημερίδας ήταν απαγορευτική από οικονομικής απόψεως για τους περισσότερους. Συνηθιζόταν, λοιπόν, να ενοικιάζονται εφημερίδες και ο μικρός Faraday είχε ως δουλειά τη μεταφορά τους από τον ένα ενοικιαστή στον άλλο. Ήταν τόσο καλός και ευσυνείδητος στη δουλειά του, που ο Riebau τον “αναβαθμίζει” την επόμενη χρονιά. Το 1805, ο Faraday γίνεται μαθητευόμενος βιβλιοδέτης (χωρίς μισθό!) (1). Βλέποντας την αγάπη του για την επιστήμη, ο Riebau τον παροτρύνει να παρακολουθήσει διαλέξεις φυσικής φιλοσοφίας, μια “μόδα” της εποχής, μέσω της οποίας οι επιστήμονες “επικοινωνούσαν” την επιστήμη τους στο ευρύ κοινό. Με αντίτιμο ένα σελίνι που πλήρωνε ο (σιδεράς!) αδελφός του, Robert, για το εισιτήριο, ο νεαρός Michael αρχίζει να παρακολουθεί διαλέξεις. Το επιστημονικό του ενδιαφέρον αυξάνεται κατακόρυφα. Κρατάει πάντα αναλυτικές σημειώσεις, τις οποίες και καθαρογράφει το βράδυ στο σπίτι.

Ήθελε να λαμβάνει μέρος και στις συζητήσεις που γίνονταν συνήθως μετά τις διαλέξεις, όμως, ήξερε πως η ελλιπής του μόρφωση θα αποτελούσε εμπόδιο. Με τη βοήθεια των φίλων του, B. Abbot και E. Magrath, βελτίωσε τις επικοινωνιακές του ικανότητες καθώς και τη γραμματική, ορθογραφία και στικτική του. Απέκτησε, έτσι, αρκετή αυτοπεποίθηση για να κάνει και αυτό το βήμα.

Το 1812 συμβαίνουν μια σειρά από γεγονότα που θ’ αλλάξουν τη ζωή του μια για πάντα. Αρχικά, δένει σε τέσσερεις τόμους τις σημειώσεις που έχει κρατήσει από τις διαλέξεις που παρακολουθεί στη “Φιλοσοφική Εταιρεία”.

Ο κ. Riebau είναι τόσο περήφανος για τους τόμους αυτούς, που τους δείχνει σε κάθε πελάτη που μπαίνει στο βιβλιοπωλείο του. Κάποιος κ. Dance ενθουσιάζεται τόσο, ώστε δανείζεται τους τόμους για να τους δείξει στον πατέρα του, μέλος του Βασιλικού Ινστιτούτου. Ο πατέρας Dance στέλνει, τότε, τέσσερα εισιτήρια στον νεαρό βιβλιοδέτη, για να παρακολουθήσει τις διαλέξεις του πιο διάσημου, εκείνη την εποχή, χημικού της Αγγλίας, του Sir Humphrey Davy (4).

Σύμφωνα με το ημερολόγιο του Faraday, οι διαλέξεις έγιναν στις 29/2, 14/3, 8/4 και 10/4/1812. Γράφει: *«κράτησα σημειώσεις και ύστερα τις έγραψα πιο ανεπτυγμένες, βάζοντας και όσα σχέδια μπορούσα να κάνω. Η επιθυμία μου να μπορέσω να εργαστώ για επιστημονικούς σκοπούς, ακόμα και τους κατώτερους, με παρακίνησε, σαν ήμουν ακόμα μαθητευόμενος, να γράψω μέσα στην άγνοιά μου του κόσμου και στην αφέλεια*

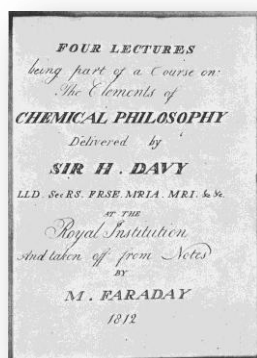


του μυαλού μου στον Sir J. Banks, που ήταν πρόεδρος της Βασιλικής Εταιρίας. Όπως ήταν φυσικό, “ουδεμία απάντηση” ήταν η απάντηση, που μου άφησε ο γραμματοκομιστής» (1).



Εικόνα 2. Sir Humphrey Davy (1778-1829)

Έτσι συνέχισε ως βιβλιοδέτης (όχι πια ως μαθητευόμενος) σε ένα άλλο βιβλιοδετείο (του κ. De La Roche). Όμως ήθελε διακαώς να αφήσει τη βιβλιοδεσία για την επιστήμη. Στέλνει, λοιπόν, ένα γράμμα στον ίδιο τον Davy ζητώντας του δουλεία (έστω και την πιο ταπεινή) στο Βασιλικό Ινστιτούτο. Μαζί με το γράμμα στέλνει και τις δεμένες σημειώσεις από τις τέσσερεις διαλέξεις. Ήταν ένα θαυμάσιο βιβλίο τόσο ως προς το περιεχόμενο (με σχέδια και αναλύσεις) όσο και ως προς την δουλειά του δεσίματος. Ο Faraday είχε χρησιμοποιήσει δέρμα, βελόνες και εργαλεία εγχάραξης, είχε βάλει δηλαδή όλη του την τέχνη (7 σ. 29).



Εικόνα 3. Το αυθεντικό τομίδιο 300 σελίδων, που έφτιαξε ο Faraday και παρέδωσε στον Davy

Ο Davy ενθουσιάστηκε τόσο από την άμεση προσέγγιση του νεαρού Faraday (ας μην ξεχνάμε τη μορφωτική και ταξική διαφορά που είχαν) όσο και από τις ίδιες τις

σημειώσεις των διαλέξεών του. Του γράφει τότε ένα ευγενικό γράμμα ενημερώνοντάς τον για την πρόθεσή του να τον βοηθήσει και προτείνοντάς του υπομονή. Φαίνεται ότι ο Davy ήθελε πραγματικά να βοηθήσει το Faraday, όχι δίνοντάς του μια “οποιαδήποτε” δουλειά στο Ινστιτούτο. Του συνιστά, λοιπόν, να κάνει λίγες μέρες υπομονή, να μείνει στη δουλειά του και να περιμένει. Του στέλνει επιπλέον αρκετά βιβλία από το Ινστιτούτο για βιβλιοδεσία (4).

### **Στο Βασιλικό Ινστιτούτο με τον Davy**

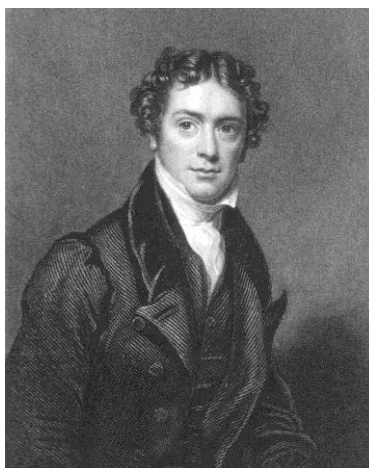
Στις αρχές του 1813 ο Davy μετά από ένα ατύχημα που έχει με τριχλωρίδιο του αζώτου χάνει μερικώς την όρασή του. Λίγες μέρες μετά καλεί τον Faraday, ως προσωρινό βοηθό του, με μισθό 25 σελίνια την εβδομάδα και δύο δωμάτια μέσα στο Ινστιτούτο για να διαμείνει. Η δουλειά είναι απλή: βοηθός σε διάφορους Καθηγητές κατά την προετοιμασία και κατά την διεξαγωγή των διαλέξεών τους, καθαριότητα και τακτοποίηση του εργαστηρίου και διατήρηση ημερολογίου οργάνων του εργαστηρίου. Όμως, ο Faraday μπαίνει στη δουλειά με πολύ μεγάλο ζήλο. Στην πραγματικότητα, κάνει περισσότερα απ’ ό,τι του ζητάνε. Πολύ σύντομα αρχίζει να βοηθά τον Davy στα πειράματά του και αυτός με τη σειρά του αρχίζει να αναγνωρίζει τις ικανότητες του νεαρού στην κατασκευή και τον χειρισμό συσκευών. Το επόμενο βήμα είναι να ζητηθεί στον Faraday να εκτελεί πειράματα ο ίδιος, κατά τη διάρκεια διαλέξεων άλλων, στο Ινστιτούτο (4).

Ο Faraday τελικά μονιμοποιείται στο Βασιλικό Ινστιτούτο. Την 1<sup>η</sup> Μαρτίου του 1813 διορίζεται (ύστερα από πρόταση του Davy προς το διοικητικό συμβούλιο) ως *βοηθός Χημικού*. Και εδώ όμως η τύχη έπαιξε τον ρόλο της. Η θέση (την οποία κατέλαβε ο Faraday) ανήκε στον William Payne, ο οποίος και απολύθηκε, εξαιτίας ενός έντονου καυγά με κάποιον συνάδελφό του κατά τη διάρκεια κάποιας διάλεξης (3) (8).

Στις 13 Οκτωβρίου του 1813, αφού πρώτα παραιτείται από το Βασιλικό Ινστιτούτο (με την υπόσχεση της επαναπρόσληψης) ακολουθεί το ζεύγος Humphrey & Jane Davy σε ένα 18-μηνο ταξίδι στην Ευρώπη. Ο επίσημος τίτλος του είναι βοηθός του κ. Davy αλλά η κα. Davy του φέρεται περισσότερο σαν υπηρέτη παρά σαν επιστήμονα. Όμως, ο Faraday βλέπει μόνο τη θετική πλευρά του ταξιδιού, αυτή της συλλογής εμπειριών και της αυτομόρφωσης, ότι έκανε πάντα δηλαδή. Επισκέπτονται πολλά εργαστήρια, ιδρύματα και πανεπιστήμια. Το ταξίδι τους ξεκινά από την Αγγλία αλλά



σύντομα φτάνουν στην ηπειρωτική Ευρώπη και συγκεκριμένα στη Γαλλία, την Ελβετία και την Ιταλία. Συναντούν πολλούς σύγχρονους τους επιστήμονες μεταξύ των οποίων ο Ampère και ο Volta. Επιστρέφουν στο Λονδίνο το 1815 και στις 7 Μαΐου ο Faraday επαναπροσλαμβάνεται στο Βασιλικό Ινστιτούτο, στο οποίο και μένει μέχρι το τέλος της καριέρας του. Από εκεί και πέρα η ζωή του ήταν τα πειράματά του και τα πειράματα ήταν η ζωή του (1).



Εικόνα 4. Michael Faraday

Η δουλειά, πάντως, δεν ήταν πάντα τόσο ιδανική όσο νόμιζε. Άλλες φορές ο Davy του συμπεριφερόταν σαν θερμός μέντορας και άλλες (όπως γράφει ο ίδιος σε φίλους του) φαινόταν θυμωμένος και τον αποθάρρυνε. Ο Faraday, όμως, δεν απογοητευόταν.

Αρχικά, ασχολείται αποκλειστικά με τη Χημεία. Δίνει την πρώτη του διάλεξη σε ηλικία 24 ετών για τις *Ιδιότητες της Ύλης* στην City Philosophical Society και ένα χρόνο αργότερα, το 1816, δημοσιεύει το πρώτο του επιστημονικό άρθρο σχετικά με τις αναλύσεις του για το υδροξείδιο του ασβεστίου<sup>2</sup>.

Μαζί με τον Davy αποδεικνύουν ότι το χλώριο είναι χημικό στοιχείο και όχι οξυγονούχος ένωση, όπως πίστευαν οι περισσότεροι τότε (4). Συνεχίζοντας την έρευνα για το χλώριο ανακαλύπτει το 1820 δύο νέα χλωρίδια του άνθρακα, το  $C_2Cl_4$  και το  $C_2Cl_6$ .

Εκτελεί τα πρώτα πειράματα σχετικά με τη διάχυση των αερίων και ασχολείται ιδιαίτερα με την υγροποίηση διαφόρων *μόνιμων αερίων*, δηλαδή αερίων που οι μελετητές της εποχής πίστευαν ότι ήταν αδύνατον να υγροποιηθούν (9). Είναι

<sup>2</sup> Πρόκειται για το *Analysis of Native Caustic Lime of Tuscany* (ανάλυση της γηγενούς καυστικής άσβεστου της Τοσκάνης) που δημοσιεύτηκε στην Quarterly Journal of Science (65 p. 140).

χαρακτηριστικό το ακόλουθο περιστατικό από την εποχή αυτή. Μια μέρα κάποιος Dr. J.A. Paris έτυχε να μπει στο εργαστήριο και να δει ένα ελαιώδες υγρό σε έναν δοκιμαστικό σωλήνα. Επέπληξε, τότε, τον Faraday για την απροσεξία του να χρησιμοποιεί βρώμικους σωλήνες. Μετά από μια έκρηξη το ελαιώδες υγρό εξαφανίστηκε. Νωρίς το επόμενο πρωί ο Dr. Paris έλαβε ένα σημείωμα (10 p. 74):

*Αγαπητέ κύριε,*

*το λάδι που παρατηρήσατε εχτές, αποδείχτηκε ότι ήταν υγρό χλώριο.*

*Υμέτερος,*

*M. Faraday*

Ασχολείται επίσης με τη μελέτη κραμάτων του χάλυβα και για πολλά έτη με τη δημιουργία και βελτίωση του ανοξειδωτού χάλυβα. Με ανάθεση της Βασιλικής Εταιρίας<sup>3</sup> ασχολείται με τη βελτίωση της ποιότητας των οπτικών γυαλιών που χρησιμοποιούνται στα τηλεσκόπια. Παράγει πολλούς νέους τύπους γυαλιών και ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει ένας με πολύ μεγάλο δείκτη διάθλασης. Με το γυαλί αυτό, πολλά χρόνια αργότερα (το 1845), θα ανακαλύψει το *φαινόμενο Faraday*, όπως θα δούμε αργότερα (9). Επίσης κατασκευάζει μια πρόιμη μορφή του λύχνου του Bunsen και το 1825, στα πλαίσια μιας εργασίας του για το φωταέριο, ανακαλύπτει το *βενζόλιο*, το οποίο λαθεμένα ονομάζει *διτανθρακικό υδρογόνο (Bicarburet of hydrogen)*<sup>4</sup>.

Η ενασχόλησή του με τη Χημεία συνεχίζεται και μετά τον θάνατο του Davy αλλά και μετά τις επιτυχίες που είχε κατά την μελέτη του ηλεκτρομαγνητισμού. Επισοεί το σύστημα των αριθμών οξείδωσης και παρασκευάζει το πρώτο ένυδρο άλας. Το 1832 ασχολείται με το φαινόμενο της *ηλεκτροχημικής διάσπασης* και καταλήγει το 1833 να διατυπώσει τους δύο *νόμους της ηλεκτρόλυσης*: i) το μέγεθος της χημικής μεταβολής που παράγεται με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από την διεπιφάνεια ηλεκτροδίου – ηλεκτρολύτη είναι ανάλογο με τη διερχόμενη ποσότητα ηλεκτρισμού και ii) το μέγεθος της χημικής μεταβολής που προκαλείται από την ίδια ποσότητα ηλεκτρισμού σε διαφορετικές ουσίες είναι ανάλογο προς τα χημικά ισοδύναμα<sup>5</sup> των

<sup>3</sup> Πίσω απ' αυτή την ανάθεση βρίσκεται ο Davy, όπως θα δούμε παρακάτω, και ο Faraday απομακρύνεται από τον ηλεκτρομαγνητισμό για κάποια χρόνια. Φυσικά δεν είναι ευχαριστημένος αλλά κάνει και αυτή τη δουλειά με τρομερό ζήλο και επιμέλεια, κρατώντας, όπως πάντα, αναλυτικό καθημερινό ημερολόγιο των πειραμάτων του (3).

<sup>4</sup> Είναι εντυπωσιακό, αλλά το αρχικό δείγμα βενζολίου που παρασκεύασε υπάρχει ακόμη! Μπορείτε να το δείτε [εδώ](#)

<sup>5</sup> Κατά τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, το χημικό ισοδύναμο μιας ουσίας είναι ίσο με τον λόγο του τυπικού βάρους προς τον αριθμό των ηλεκτρονίων που δέχεται ή προσφέρει. Η ποσότητα του



ουσιών (6). Καθιστά δημοφιλείς τους όρους *άνοδος*, *κάθοδος*, *ηλεκτρόδιο*, *ίοντα*, οι οποίοι είχαν επινοηθεί από τον William Whewell (11). Έτσι, το 1833 διορίζεται ισόβιος Καθηγητής Χημείας<sup>6</sup> στο Βασιλικό Ινστιτούτο.

Αλλά ας γυρίσουμε λίγα χρόνια πίσω και ας δούμε τα πειράματα που πραγματικά τοποθέτησαν τον Faraday στο πάνθεον των μεγαλύτερων επιστημόνων όλων των εποχών, τα πειράματα του ηλεκτρομαγνητισμού. Όπως είπαμε ο Faraday πάντα δούλευε σκληρά και επιμελώς και με τα χρόνια ο σκληρός Davy “μαλάκωσε” και “χαλάρωσε”. Αυτή η αλλαγή στη στάση του Davy ήταν που τον οδήγησε να ζητήσει τη γνώμη του Faraday για το πείραμα του Ørsted, που εκείνη την εποχή αναπαρήγαγε στο εργαστήριό του. Βρισκόμαστε, λοιπόν, στα 1821, ο Faraday κοντεύει τα 30 και του ζητείται να εργαστεί και να βρει τη διασύνδεση του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού που διαφαινόταν στο πείραμα. Η ζωή του άλλαζε μέρα με την ημέρα! Γινόταν όλο και πιο χαρούμενος. Άρχισε μάλιστα να φλερτάρει και με ένα κορίτσι, τη Sarah Barnard (7/1/1800 - 6/1/1879), κόρη του πρεσβύτερου της εκκλησίας των Σάντεμαν<sup>7</sup>, (7 σ. 30).



Εικόνα 5. Sarah & Michael

---

ηλεκτρισμού που μπορεί να προκαλέσει χημική μεταβολή ενός γραμμοισοδύναμου ουσίας συνιστά τη μονάδα faraday, ίση με 96.485,33289 C/mol (6), (66).

<sup>6</sup> χωρίς την υποχρέωση να δίνει διαλέξεις (1).

<sup>7</sup> Χριστιανική αίρεση που ιδρύθηκε από τον John Glas (εκτός από Σαντεμανίτες, ονομάζονται και Γλασίτες), ιερέα της Σκωτικής Εκκλησίας. Ο Robert Sandeman, από τον οποίο πήραν το επίσημο όνομά τους, ήταν γαμπρός του Glas και αναγνωρίστηκε ως αρχηγός της αίρεσης σε Αμερική και Αγγλία. Βασική ιδέα της αιρέσεως ήταν η αλληλοβοήθεια και η υποχρέωση που ο ένας άνθρωπος πρέπει να νιώθει προς τον άλλο. Έλεγαν: «θα σε βοηθήσω, εσύ θα βοηθήσεις κάποιον άλλο, αυτός κάποιον τρίτο κ.ο.κ., μέχρις ότου ολοκληρωθεί ο κύκλος»... ο κύκλος που θα κατέληγε με την επιστροφή της βοήθειας στον αρχικό άνθρωπο. Αυτός ο κύκλος δεν ήταν απλώς μια αφηρημένη ιδέα. Ο Faraday είχε ξοδέψει πολύ χρόνο είτε στην εκκλησία κηρύττοντας γι' αυτήν την κυκλική σχέση, είτε ασκώντας φιλανθρωπία και αμοιβαία βοήθεια (7 σ. 32). Μάλιστα λέγεται ότι σε μεγαλύτερη ηλικία αρνείται δύο φορές την προεδρία της Βασιλικής Εταιρίας γιατί έπρεπε να ορκιστεί, πράγμα που δεν το επέτρεπε η θρησκεία του (3).

Στις 21 Ιουνίου του 1821, παντρεύονται και ένα μήνα μετά ορκίζεται και ο ίδιος πίστη στην εκκλησία αυτή, στην οποία άλλωστε ανήκε και η δική του οικογένεια από χρόνια. Με τη Sarah μένει παντρεμένος μέχρι το τέλος της ζωής του χωρίς να αποκτήσουν παιδιά (1).

Επιστρέφουμε στο πείραμα του Ørsted: πρόκειται για την εκτροπή μιας μαγνητικής βελόνας από την αρχική της διεύθυνση, όταν αυτή βρεθεί κοντά σε ένα καλώδιο που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Η εξήγηση που έδωσε ο Faraday ήταν απλή. Το καλώδιο, όταν διαρρέεται από ρεύμα, “εκπέμπει” δυνάμεις και αυτές επηρεάζουν την μαγνητική βελόνα. Αυτό, όμως, δεν άρεσε ούτε στους παρευρισκόμενους επιστήμονες ούτε φυσικά και στον Davy. Ο Faraday δεν εγκαταλείπει την ιδέα (άλλωστε συμφωνούσε με αυτό που συνέβαινε μπροστά στα μάτια του) και συνεχίζει μόνος του την έρευνα. Μάλιστα ο επιστημονικός επιμελητής του περιοδικού *Annals of Philosophy* ζητάει από τον Faraday να συντάξει μια επισκόπηση των πειραμάτων και των θεωριών του ηλεκτρομαγνητισμού που ακολούθησαν το πείραμα του Ørsted (12). Τον Σεπτέμβριο ανακαλύπτει την ιδιότητα πως η μαγνητική δύναμη αναπτυσσόταν (πάνω στις μαγνητικές βελόνες) γύρω από το καλώδιο σε μορφές ομόκεντρων κύκλων. Εδώ είναι που εισάγει για πρώτη φορά την έννοια *μαγνητικό πεδίο* (13).

Στο απόηχο του πειράματος του Ørsted, ο Davy μαζί με τον William Hyde Wollaston προσπαθούν να σχεδιάσουν έναν ηλεκτρικό κινητήρα (11). Ο Faraday συζητάει με τους δύο άντρες το πρόβλημα και εργάζεται, ανεξάρτητα, για την παραγωγή εκείνου που ονόμαζε *ηλεκτρομαγνητική περιστροφή*, δηλαδή μιας συνεχούς κυκλικής κίνησης λόγω της μαγνητικής δύναμης γύρω από το καλώδιο. Και τελικά τα καταφέρνει! Στις 3 Σεπτεμβρίου του 1821 φτιάχνει τον πρώτο ηλεκτρικό κινητήρα στην ιστορία, με τη βοήθεια ενός μαγνήτη, μιας μπαταρίας, καλωδίων και λίγου υδραργύρου. Σήμερα τον ονομάζουμε *μονοπολικό κινητήρα* (14 p. 63).

Ο κουνιάδος του, George Barnard, αναφέρει το περιστατικό της πρώτης φοράς που ο Faraday του δείχνει τον κινητήρα: «*Βλέπεις, βλέπεις, βλέπεις Τζωρτζ; Άρχισε να ξεφωνίζει καθώς το σύρμα άρχισε να περιστρέφεται... δεν θα ξεχάσω τον ενθουσιασμό που υπήρχε στο πρόσωπό του και τη λάμψη στα μάτια του*» (7 σ. 35).

Δημοσιεύει βιαστικά τ' αποτελέσματά του χωρίς να αναγνωρίσει το χρέος του προς τους Davy και Wollaston. Ο Davy κατηγορεί τον Faraday για κλοπή της ιδέας από τον Wollaston και στις κατηγορίες αυτές φαίνεται η εμπάθεια του Davy μέσω της προβολής της ταξικής και μορφωτικής διαφοράς των δύο αντρών. Παρά τις εκκλήσεις



του Faraday (χάριν της παλιάς τους φιλίας) για συμβιβασμό ο Davy δεν υποχωρεί. Ο Faraday αναφέρει πως ο Wollaston του έγραψε πληροφορώντας τον ότι δεν προσβλήθηκε από τη δημοσίευση και πως αναγνωρίζει ότι αυτά που δημοσιεύτηκαν είναι αποκλειστική δουλειά του Faraday (15). Ο Davy χρησιμοποιεί, επίσης, το γεγονός ότι ο Faraday δεν ήταν εκλεγμένο μέλος της Βασιλικής Εταιρίας (θα εκλεγόταν, παρά τις αντιρρήσεις του Davy, σε δύο χρόνια<sup>8</sup>). Έχαιρε, όμως της εμπιστοσύνης αρκετών μελών της και φυσικά του ίδιου του Wollaston (7 σ. 36).



Εικόνα 6. "You see George?..." από το ντοκιμαντέρ της NOVA "Einstein's big idea"

Η διαμάχη που ακολούθησε, προκάλεσε την απόσυρση του Faraday από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία για αρκετά χρόνια με τον Davy προσπαθεί να επιβραδύνει, έκτοτε, την επιστημονική άνοδό του. Για παράδειγμα το 1825 ξεκινάει τη σειρά πειραμάτων για τα οπτικά γυαλιά, τα οποία καθυστερούν σημαντικά το έργο του Faraday στον ηλεκτρομαγνητισμό. Όμως ο Faraday δεν θα μιλήσει πότε ανοιχτά κατά του Davy. Μόνο μετά το 1829, που πεθαίνει<sup>9</sup> ο Davy (θύμα του χρόνιου εθισμού του στην εισπνοή αερίων) ο Faraday διακόπτει τις έρευνές του πάνω στα γυαλιά και ξαναγυρνάει στον αγαπημένο του ηλεκτρομαγνητισμό (8).

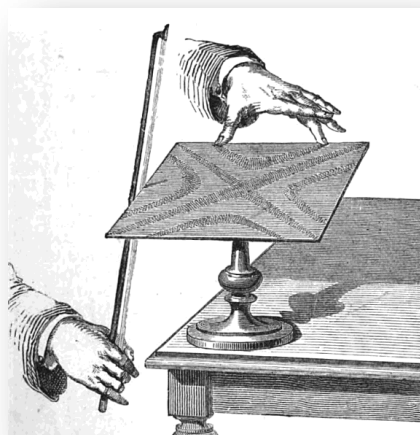
<sup>8</sup> Το 1823 εκλέγεται έτερος (μέλος) της Βασιλικής Εταιρίας. Το 1825 γίνεται διευθυντής του Εργαστηρίου του Βασιλικού Ινστιτούτου και όπως έχουμε ξαναπεί, το 1833 διορίζεται Καθηγητής Χημείας στο Βασιλικό Ινστιτούτο (1).

<sup>9</sup> Λίγο πριν πεθάνει, ο Davy παραδέχεται ότι η μεγαλύτερη από τις ανακαλύψεις του ήταν ο ίδιος ο Faraday (1) (6).



## Ο Ηλεκτρομαγνητισμός

Την Άνοιξη του 1831 συνεργάζεται με τον Sir Charles Wheatstone μελετώντας τον ήχο. Έχει ιδιαίτερα εντυπωσιαστεί από τα σχήματα Chladni που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα της δόνησης μιας χορδής βιολιού πάνω σε μια οριζόντια μεταλλική πλάκα, στην οποία έχει σκορπιστεί άμμος<sup>10</sup>.



Εικόνα 7. Σχήματα Chladni

Το θεώρησε ως φαινόμενο *ακουστικής επαγωγής* (τα σχήματα της άμμου επάγοντο από τον ήχο), το οποίο αποτέλεσε προάγγελο της σημαντικής ανακάλυψης της *ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής* λίγους μήνες αργότερα (9).

Λίγες μέρες πριν τελειώσει ο Αύγουστος, εκτελεί δύο σειρές πειραμάτων<sup>11</sup>, που αποτέλεσαν την απαρχή μιας μεγάλης ανακάλυψης. Αρχικά πειραματίζεται με δύο πηνία, το ένα μέσα στο άλλο, συνδέοντας το ένα με μια μπαταρία και το άλλο με ένα γαλβανόμετρο. Ανοιγοκλείνοντας το κύκλωμα της μπαταρίας, παρατηρεί ρεύμα στο κύκλωμα του γαλβανόμετρου. Στη συνέχεια, εκτελεί ένα παρόμοιο πείραμα με δύο μεγάλα σύρματα («σε σχήμα ζικ – ζακ» όπως αναφέρει ο ίδιος). Πάλι το ένα είναι σε μπαταρία και το άλλο σε γαλβανόμετρο και βρίσκονται το ένα πάνω από το άλλο με ένα χοντρό χαρτί ανάμεσά τους για μόνωση. Η σχετική κίνηση των δύο συρμάτων παράγει (επάγει θα λέγαμε καλύτερα) ρεύμα που ανιχνεύεται στο γαλβανόμετρο (2).

Τελικά στις 29 Αυγούστου του 1831 καταγράφει στο ημερολόγιό του το περίφημο *πείραμα του δακτυλίου*, κατά το οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο της

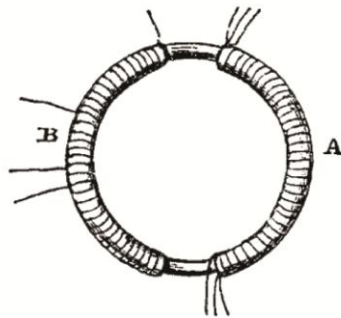
<sup>10</sup> Ενδιαφέροντα video σύγχρονων αναπαραστάσεων σχημάτων Chladni μπορείτε να δείτε [εδώ](#) & [εδώ](#)

<sup>11</sup> Ποτέ ο Faraday, δεν εκτελούσε ένα πείραμα. Πάντα ξεκινούσε με μια αρχική ιδέα και την επέκτεινε σε πάρα πολλούς συνδυασμούς και παραλλαγές. Αυτή του η επιμέλεια (στα όρια της εμμονής) είναι που τον τοποθετεί στην κορυφή των πειραματιστών όλων των εποχών, σύμφωνα με τους περισσότερους μελετητές της ιστορίας της επιστήμης.



ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής<sup>12</sup>, φαινόμενο το οποίο είχε προαναγγελθεί από τον Ιταλό Francesco Zantedeschi.

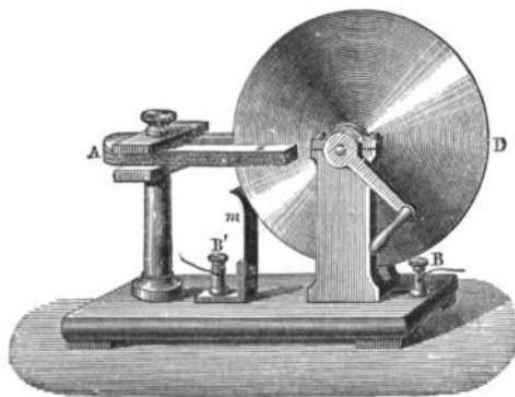
Σε αυτό έχει τυλίξει πολλές φορές δύο μονωμένα σύρματα στις απέναντι πλευρές ενός κλειστού σιδερένιου δακτυλίου. Στο ένα σύρμα συνδέει μια μπαταρία και στο άλλο ένα γαλβανόμετρο (συσκευή μέτρησης ηλεκτρικού ρεύματος, στηριζόμενη στο πείραμα του Ørsted). Κατά τη σύνδεση ή την αποσύνδεση της μπαταρίας στο ένα καλώδιο, επάγεται ρεύμα στο άλλο και καταγράφεται από το γαλβανόμετρο.



Εικόνα 8. Ο Δακτύλιος (χειρόγραφο του Faraday)

Ο Faraday συνεχίζει τα πειράματά του και στις 17 Οκτωβρίου μετακινεί έναν μόνιμο μαγνήτη μέσα – έξω σε έναν κλειστό βρόγχο (σωληνοειδές πηνίο), το οποίο έχει συνδέσει με γαλβανόμετρο. Παρατηρεί επαγωγή ρεύματος και εκτελεί στη συνέχεια το πείραμα ανάποδα: μετακινεί το πηνίο μπρος – πίσω ως προς τον ακίνητο μαγνήτη. Και πάλι παρατηρεί ρεύμα (5). Κατανοεί, μέσω αυτών των πειραμάτων, ότι το ηλεκτρικό ρεύμα επάγεται από μεταβολή του μαγνητικού πεδίου και το επόμενο βήμα έρχεται να κορυφώσει την συνεισφορά του στο τεράστιο οικοδόμημα του ηλεκτρομαγνητισμού, του οποίου δίκαια κατέχει την πατρότητα. Μετασχηματίζοντας και εξελίσσοντας ένα παλιό πείραμα του Arago τελικά φτιάχνει την *δυναμογεννήτρια*, την πρώτη συσκευή που μπορούσε να παράγει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, χωρίς τη χρήση (βολταϊκής) μπαταρίας.

<sup>12</sup> Ο Αμερικανός Joseph Henry (φτωχός και ταπεινός καταγωγής, όπως και ο Faraday), εργαζόταν επίσης πάνω στον ηλεκτρομαγνητισμό. Είναι καταγεγραμμένο ότι λίγους μήνες πριν, ανακαλύπτει πρώτος το φαινόμενο της επαγωγής. Όμως η δημοσίευση του Faraday προηγήθηκε και έτσι το φαινόμενο έμεινε στην ιστορία με το όνομά του (2).



Εικόνα 9. Η Δυναμογεννήτρια του Faraday

Πρόκειται για τον πρόγονο των σημερινών γεννητριών ηλεκτρικού ρεύματος και αποτελείται από ένα χάλκινο δίσκο που περιστρεφόταν από χειροστρόφαλο ανάμεσα στους πόλους ενός μόνιμου πεταλοειδούς μαγνήτη. Δύο σύρματα πάνω σε ψήκτρες ήταν σε επαφή το πρώτο με την περιφέρεια του δίσκου και το δεύτερο με τον μπρούτζινο άξονά του. Τα καλώδια συνδέονταν σε γαλβανόμετρο απ' όπου και γινόταν φανερή η επαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (2). Έχοντας κάνει “το μισό”, δηλαδή να παράγει κίνηση μέσω του ηλεκτρικού ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου με τον *μονοπολικό κινητήρα* του 1821, καταφέρνει τώρα και το “άλλο μισό” του αρχικού του στόχου: να «μετατρέψει τον Μαγνητισμό [και την κίνηση] σε Ηλεκτρισμό» όπως ο ίδιος γράφει στις 14 Ιανουαρίου του 1832 σε ένα γράμμα του προς τον Peter Mark Roget (2).

Στην αρχή η σημασία της ανακάλυψής του δεν κατανοήθηκε σε βάθος. Πολύ σύντομα, λένε οι φήμες, ο Βρετανός Πρωθυπουργός Sir Robert Peel στην ερώτηση προς τον Faraday περί της χρησιμότητας της ανακάλυψης πήρε την εξής απάντηση: «Κύριε, δεν γνωρίζω τη χρησιμότητά της. Για ένα πράγμα είμαι βέβαιος: κάποια μέρα θα την φορολογήσετε» (16 p. 243) (7 p. 34) (14 p. 90).

Η ανακάλυψη, επομένως, του φαινομένου της επαγωγής σήμανε την αυγή μιας νέας εποχής. Ο ηλεκτρικός κινητήρας του 1821 και η ηλεκτρογεννήτρια, που ανακαλύφθηκε 10 χρόνια αργότερα ήταν η αρχή μιας σειράς εφευρέσεων από μεταγενέστερους επιστήμονες που οδήγησαν στον *τηλέγραφο*, στον *ασύρματο*, στο *τηλέφωνο* και στους *ηλεκτρικούς λαμπτήρες*. Η μαζική χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος έγινε εφικτή χάρις σε αυτές τις αρχικές ανακαλύψεις του Faraday, στον οποίο τελικά χρωστάμε την σύγχρονη μορφή του κόσμου μας, ενός κόσμου που πολύ πια απέχει από τον κόσμο της εποχής του ατμού, στον οποίο ο ίδιος γεννήθηκε και μεγάλωσε (1).

Το σύνολο αυτής της έρευνας δημοσιεύεται στις αρχές του 1832 στο περίφημο άρθρο του “*Experimental Researches in Electricity*” (17). Είναι το 1<sup>ο</sup> από μια σειρά



30 άρθρων με τον ίδιο τίτλο που καλύπτουν την περίοδο 1832 – 1856. Καθένα από τα άρθρα παρουσίαζε νέο υλικό πάνω στην έρευνα του ηλεκτρομαγνητισμού και ξεκινούσε από εκεί που τελείωνε το προηγούμενο. Το αρχικό άρθρο (μετά την κατάθεσή του στην Βασιλική Εταιρία στα τέλη του 1831) διαβάζεται στις 24/11/1831, έχει εσωτερική ημερομηνία στο τέλος του, 21/12/1831 και εκδίδεται την 1/1/1831. Όμως, οι έρευνες έχουν δείξει ότι το νωρίτερο που έχουμε απόδειξη ότι τυπώθηκε είναι στις 9/4/1832. Η όλη καθυστέρηση αναφέρεται ότι δυσaráεστησε αρκετά τον Faraday (2).

V. *Experimental Researches in Electricity.* By MICHAEL FARADAY, F.R.S., M.R.I., Corr. Mem. Royal Acad. of Sciences of Paris, Petersburg, &c. &c.

Read November 24, 1831.

§ 1. *On the Induction of Electric Currents.* § 2. *On the Evolution of Electricity from Magnetism.* § 3. *On a new Electrical Condition of Matter.* § 4. *On ARAGO'S Magnetic Phenomena.*

1. **THE** power which electricity of tension possesses of causing an opposite electrical state in its vicinity has been expressed by the general term Induction; which, as it has been received into scientific language, may also, with propriety, be used in the same general sense to express the power which electrical currents may possess of inducing any particular state upon matter in their

Εικόνα 10. Η πρώτη σελίδα του ιστορικού άρθρου

Μεταξύ των επιστημονικών συγγραμμάτων, που έχουν εκδοθεί στη διάρκεια της ιστορίας των επιστημών, υπάρχουν ορισμένα που θα διέκρινε κανείς τη θεμελιώδη σπουδαιότητά τους από έναν και μόνο παράγοντα: ολόκληροι ξεχωριστοί κλάδοι επιστημών έχουν ως αφετηρία τους αυτά τα συγγράμματα. Τέτοια μπορούν να χαρακτηριστούν το *De Revolutionibus* του Κοπέρνικου (1543), τα *Principia* του Νεύτωνα (1687) και οι εργασίες του Αϊνστάϊν για την *Σχετικότητα* (1905 & 1916). Η εργασία του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή μπορεί να σταθεί ισότιμα ανάμεσά τους και για έναν επιπλέον λόγο. Ο κόσμος, όπως τον ξέρουμε σήμερα, μετασχηματίστηκε στην κυριολεξία, χάρις σ' αυτήν την εργασία. Ο σύγχρονος τεχνολογικός πολιτισμός στηρίζεται κατά βάσει στο ηλεκτρικό ρεύμα, η μαζική

παραγωγή του οποίου οφείλεται αρχικά στη μελέτη του Faraday. Καμιά από τις προαναφερθείσες εργασίες δεν είχε τόσο άμεσα αποτελέσματα στην αλλαγή του κόσμου μας, όσο η εργασία αυτή (2).

## Τα χρόνια που ακολούθησαν το 1832

Την εποχή εκείνη ο Faraday, όπως και άλλοι επιστήμονες, δεν είχε κατανοήσει πλήρως τη φύση του ηλεκτρισμού και συγκεκριμένα του ηλεκτρικού ρεύματος. Αναφέρεται στον ηλεκτρισμό που ρέει μέσα σε ένα σύρμα λόγω μιας (βολταϊκής) μπαταρίας, ως *βολταϊκό ηλεκτρισμό*. Για το επαγόμενο ρεύμα (στα πειράματά του) αναφέρεται ως *βολτο-ηλεκτρική επαγωγή (volta-electric induction)*. Ξεχωρίζει τα παραπάνω ρεύματα από αυτό που δημιουργείται από την εκφόρτιση μιας φιάλης Leyden<sup>13</sup>, αναφερόμενος σε αυτό ως *ηλεκτρισμός υπό τάση (tension)* ή *κοινός ηλεκτρισμός*. Γίνεται, επίσης, αναφορά και σε ένα ακόμα είδος ηλεκτρισμού, το *ζωικό ηλεκτρισμό*, που παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς, όπως ηλεκτρικά χέλια και μουδιάστρες<sup>14</sup>. Το ερώτημα που θέτει, λοιπόν, αυτή την περίοδο ο Faraday είναι αν το “ηλεκτρικό ρευστό”, που παράγεται στις παραπάνω περιπτώσεις, είναι το ίδιο ή διαφορετικό (2).

Προχωρά με την έρευνα του φαινομένου της *στατικής ηλεκτρικής επαγωγής* αποδεικνύοντας πως το ποσό του ηλεκτρισμού που μπαίνει σε έναν μονωτή εξαρτάται από τη φύση του. Ότι, δηλαδή, κάθε υλικό έχει τη δική του επαγωγική ικανότητα (σημερινή *διηλεκτρική σταθερά*). Επεξεργάζεται την ιδέα της *ηλεκτρο-τονικής κατάστασης*, περιγράφοντάς την ως πόλωση των μορίων της ύλης (κάθε μόριο αποκτά αντίθετες ηλεκτρικές “δυνάμεις” σε διάφορα μέρη του). Μάλιστα ερμηνεύει και την ηλεκτρόλυση<sup>15</sup> ως μετάδοση των “δυνάμεων” αυτών ανάμεσα στα σωματίδια της ύλης. Υποθέτει ότι η ηλεκτροστατική επαγωγή οφείλεται σε μετάδοση δύναμης ανάμεσα στα σωματίδια του μονωτή. Αρχίζει να θεωρεί τον ηλεκτρισμό ως δύναμη και όχι ως ρευστό μετά το 1836, γι’ αυτό και κατασκευάζει τον πρώτο του *κλωβό*. Τέλος, το 1837, αποδεικνύει μέσω του πειράματος της *ηλεκτρικής επιδεκτικότητας* ότι διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικές ικανότητες διάδοσης των ηλεκτροστατικών δυνάμεων (18 σ. 113) (6).

<sup>13</sup> Η αλλιώς Λουγδουνική Λάγηνος, υπήρξε ο πρώτος πυκνωτής, μια συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου, αποτελούμενη από ένα μπουκάλι με δύο μεταλλικές επιστρώσεις (34).

<sup>14</sup> common [torpedo](#), ένα είδος ηλεκτροφόρου σαλαχιού

<sup>15</sup> Την ίδια εποχή, όπως έχουμε ήδη πει, ασχολείται αρκετά με την *Ηλεκτροχημεία*, όπου το 1833 διατυπώνει του δύο νόμους της.



Εικόνα 11. Michael Faraday (1842)

Μέχρι το 1839 είχε ολοκληρώσει τα πειράματα για τη διερεύνηση της φύσης του ηλεκτρισμού κάνοντας χρήση όλων των δυνατών οργάνων που μπορούσε να έχει στην κατοχή του. Συνδυάζει πειράματα με μπαταρίες, ηλεκτροστατικές μηχανές, ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, ηλεκτροχημεία, ακόμη και πειράματα με τον λεγόμενο ζωικό ηλεκτρισμό και τελικά καταλήγει στο ότι οι διαχωρισμοί μεταξύ των διαφόρων ειδών ηλεκτρισμού είναι παραπλανητικοί. Παρουσιάζει μια γενική θεωρία σχετικά με την *ηλεκτρική δράση* και περιγραφεί έτσι την ηλεκτρική συμπεριφορά αγωγών και μονωτών. Συμπεραίνει ότι ο ηλεκτρισμός είναι ενιαίος και αδιαχώριστος και ότι πεύθυνες για τις διάφορες ομαδοποιήσεις των φαινομένων είναι η ποσότητα (σημερινό *φορτίο*) και η ένταση (σημερινό *δυναμικό*) του ηλεκτρισμού (11).

### Οι Πυκνωτές

Ο Faraday πάντα έκανε πολλά πράγματα ταυτόχρονα. Γι' αυτό και πολλές από τις ανακαλύψεις που αναφέρονται εδώ αλληλεπικαλύπτονται χρονολογικά ή εμφανίζονται σε περισσότερες, της μιας, χρονολογίες. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι και η ενασχόλησή του με τους πυκνωτές. Στην προσπάθειά του να αποθηκεύσει τα “περισσευόμενα” ηλεκτρόνια από τα πειράματα που έκανε, κατάφερε να κατασκευάσει τους πρώτους πυκνωτές κλειστού τύπου, που μπορούσαν να βρουν πρακτική εφαρμογή (practical fixed capacitors), και τους πρώτους μεταβλητούς

πυκνωτές (variable capacitors). Μετά από δικές του προσπάθειες φτιάχτηκε ο πρώτος πυκνωτής που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (usable capacitor) από μεγάλα βαρέλια λαδιού. Επίσης, στον Faraday οφείλουμε την έννοια *διηλεκτρική σταθερά*, που σχετίζεται με την αύξηση της χωρητικότητας ενός πυκνωτή, αν μέσα του υπάρχει κάποιο μονωτικό υλικό (19).

Προς τιμήν της συνεισφοράς του στην τεχνολογία των πυκνωτών, στο *Διεθνές Συνέδριο Ηλεκτρολόγων* στο Παρίσι το 1881, αποφασίστηκε να δοθεί στην μονάδα χωρητικότητας πυκνωτή στο S.I. το όνομα farad<sup>16 17</sup> (20).

### **Οι Φάρου**

Μια ενδιαφέρουσα πτυχή της ζωής του Faraday ήταν η ενασχόλησή του με τους φάρους. Από το 1836 και για περίπου 30 χρόνια διατελεί επιστημονικός σύμβουλος στην *Υπηρεσία Ναυτιλίας και Φάρων* της Μ. Βρετανίας με την ονομασία *Trinity House*. Η σχέση του με τους φάρους, βέβαια, ξεκινάει από πολύ νωρίτερα, όταν στα μέσα της δεκαετίας του '20 ασχολείται με τις βελτιώσεις στα οπτικά γυαλιά των φακών των φάρων, και συνεχίζεται με τις εργασίες του πάνω στον εξαιρεισμό των φανών των φάρων. Μάλιστα η μοναδική εφεύρεσή του, που κατοχυρώθηκε ως πατέντα, ήταν μια νέα καμινάδα που απέτρεπε στα προϊόντα της καύσης μέσα στον φανό να επικάθονται στους φακούς. Τέλος, η εγκατάσταση της πρώτης ατμοκίνητης ηλεκτρογεννήτριας γίνεται το 1857 στον φάρο του Bow Creek υπό την επίβλεψη του ίδιου του Faraday (21).

### **Οι Χριστουγεννιάτικες Διαλέξεις**

Μια άλλη, παράλληλη ασχολία του ήταν οι διαλέξεις στο Βασιλικό Ινστιτούτο. Η αγάπη του για την επιστήμη τον οδήγησε στις πρώτες του διαλέξεις, οι οποίες υπήρξαν και το εφελτήριο όλης της υπόλοιπης επιστημονικής του καριέρας. Έτσι, με δική του πρωτοβουλία και σε συνέχεια των εβδομαδιαίων απογευματινών διαλέξεων, που δίνονταν στο Ινστιτούτο από παλιά διοργανώνονται, από το 1825 οι περίφημες *Χριστουγεννιάτικες Διαλέξεις*.

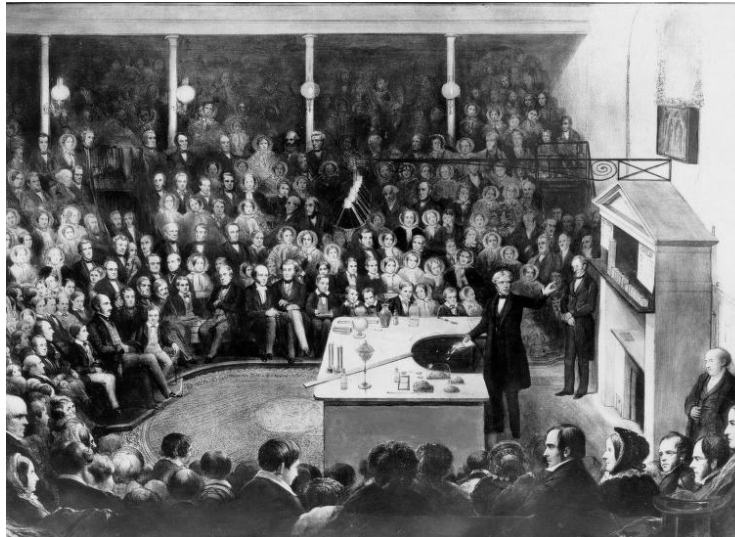
Αρχικά ξεκίνησαν ως διαλέξεις για τους νέους (με στόχο τα παιδιά 15-20 ετών και με προοπτική τη μείωση της ηλικίας του ακροατηρίου) στις περιόδους των διακοπών

<sup>16</sup> 1 farad = 1 coulomb/volt (1 F= 1C/V= 1 A's/V)

<sup>17</sup> Αρχικά το 1 farad είχε προταθεί ως μονάδα φορτίου (από τους L. Clark και C. Bright, το 1861), αλλά από το 1873 άρχισε να χρησιμοποιείται ως μονάδα χωρητικότητας (20).



των Χριστουγέννων, του Πάσχα και της εβδομάδας μετά την Πεντηκοστή. Τελικά, οι διαλέξεις δίνονταν μόνο κατά τη διάρκεια των Χριστουγεννιάτικων διακοπών με τον Faraday να δίνει την 3<sup>η</sup> κατά σειρά (1827) και 18 ακόμη μέχρι το 1860. Είναι ένας θεσμός που υπάρχει στο Λονδίνο από τότε μέχρι σήμερα με πολύ μεγάλη αποδοχή από το κοινό και τεράστια συμμετοχή και προβολή.



Εικόνα 12. 27/12/1855 Χριστουγεννιάτικη Διάλεξη. Στα πρώτα έδρανα βλέπουμε τον διάδοχο του θρόνου Πρίγκιπα Αλβέρτο καθώς και τον Πρίγκιπα Αλφρέδο (να μην παρακολουθεί και τόσο φανατικά...)

*Η Χημική Ιστορία ενός Κεριού*, ένα από τα διασημότερα επιστημονικά βιβλία όλων των εποχών, στηρίχτηκε σε δύο από τις Χριστουγεννιάτικες διαλέξεις του Faraday, αυτές του 1848 και 1860 (22 p. xvi).

Ένα χαρακτηριστικό παραλειπόμενο των Χριστουγεννιάτικων Διαλέξεων και της αναγνώρισης που έχαιρε ο Faraday με την πάροδο των χρόνων είναι το παρακάτω γράμμα, ένα από τα πολλά που λάμβανε (7 σ. 38):

*Αγαπητέ κύριε,*

*Θεωρώ ότι θα ήταν εξαιρετικά ευεργετικό για μια μεγάλη κατηγορία του κοινού να έχει μια περιγραφή των τελευταίων σας διαλέξεων στο πρωινό του τραπέζι... Θα ήμουν εξαιρετικά ευτυχής να μπορέσω... να τις δημοσιεύσω στην καινούρια μου εφημερίδα...*

*Με μεγάλο σεβασμό και εκτίμηση,*

*Ο πιστός σας υπηρέτης,*

*Κάρολος Ντίκενς*



## Οι τελευταίες ανακαλύψεις, από το 1845 μέχρι το τέλος

Το ίδιο τριχλωρίδιο του Αζώτου, που κάποτε τύφλωσε προσωρινά τον Davy και υπήρξε η αιτία να μπει για πρώτη φορά ο Faraday στο Βασιλικό Ινστιτούτο, ήταν αυτό που πολλά χρόνια αργότερα, και πάλι με έκρηξη, θα τον τραυματίσει και θα τον κάνει να αποσυρθεί από το επιστημονικό προσκήνιο για περίπου μια πενταετία. Στην περίοδο 1839 – 1844, λοιπόν, δεν παρουσιάζει καμία επιστημονική δραστηριότητα, και μάλιστα η υγεία του επιδεινώνεται ακόμη περισσότερο το 1841, όπου ένας νευρικός κλονισμός τον καταβάλλει τελείως. Σταματάει ακόμα και το αγαπημένο του διάβασμα! Πάει για ανάρρωση στην Ελβετία μαζί με την γυναίκα του και τον κουνιάδο του. Επιστρέφει το 1844 στις έρευνες χωρίς όμως να “αποχωριστεί” ποτέ, μέχρι τον θάνατό του, τα συμπτώματα της χρόνιας δηλητηρίασης από το τριχλωρίδιο του Αζώτου (23) (1).

Η πρώτη δημοσίευση μετά την επάνοδό του το 1844, ήταν θεωρητικής φύσεως και είχε τον τίτλο “*Μια εικασία σχετικά με την ηλεκτρική αγωγή και τη φύση της ύλης*”. Εκεί διαμορφώνει μια θεωρία για τον τρόπο της δράσης των δυνάμεων στην ύλη και της διάδοσής τους στο χώρο. Αποκηρύττει την ατομική θεωρία με το εξής σκεπτικό: αν ισχύει η ατομική θεωρία τότε τα άτομα δεν βρίσκονται σε επαφή. Έτσι για να δικαιολογηθεί η μετάδοση δυνάμεων θα πρέπει ο (κενός) χώρος να κατέχει αιτιακές ιδιότητες ή δυνατότητες ανάλογες με αυτές ενός υλικού σώματος. Όμως «ο κενός χώρος δεν μπορεί να δράσει όπως δρα η ύλη». Έτσι αποφεύγει το πρόβλημα της εξήγησης του μηχανισμού διάδοσης των δυνάμεων ανάμεσα στα γειτονικά σωματίδια λέγοντας ότι «η ύλη είναι συνεχής παντού, και για να θεωρήσουμε κάποια μάζα ύλης δεν χρειάζεται να κάνουμε διάκριση ανάμεσα στα άτομά της και στον περιβάλλοντα χώρο» (18 σ. 115).

Το 1845, μετά από πρόταση του William Thomson (μετέπειτα γνωστός ως Λόρδος Kelvin), μελετά την επίδραση του μαγνητισμού σε πολωμένο φως. Συγκεκριμένα ανακαλύπτει ότι το γραμμικά πολωμένο φως αλλάζει τη γωνία στροφής του όταν βρεθεί σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο, ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση διάδοσης του φωτός. Το φαινόμενο στη συνέχεια παίρνει το όνομά του και είναι γνωστό ως *φαινόμενο Faraday* (18 σ. 118). Γι’ αυτή του την ανακάλυψη θα πει<sup>18</sup>: «*Στο τέλος κατάφερα να φωταγωγήσω μια μαγνητική καμπύλη [επαγωγικό φαινόμενο] και να μαγνητίσω μια ακτίνα φωτός [φαινόμενο Faraday]*» (11).

<sup>18</sup> Ίσως από τις ελάχιστες φορές που ακούμε τον Faraday να λέει κάτι βαρύγδουπο για τον εαυτό του. Ήταν, και θα παρέμενε έως το τέλος, ένας πραγματικά ταπεινός άνθρωπος.



Συνέχεια αυτής της ανακάλυψης ήταν, την ίδια χρονιά, η ανακάλυψη του προσανατολισμού κρυστάλλων υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Η όλη του συλλογιστική κινούταν με γνώμονα την ενότητα των δυνάμεων. Θεωρούσε ότι όλες οι μορφές της ύλης οφείλουν να ανταποκρίνονται σε δράσεις μαγνητικών δυνάμεων. Έτσι, πειραματιζόμενος διαπιστώνει τον κρυσταλλικό ή μοριακό προσανατολισμό σε μαγνητικό πεδίο, υλικών όπως ο Σίδηρος, το Νικέλιο, το Κοβάλτιο και το Οξυγόνο. Ονομάζει αυτά τα υλικά *Παραμαγνητικά*. Μελετά, όμως, και άλλα υλικά, οι κρύσταλλοι των οποίων τείνουν να προσανατολιστούν κάθετα στο μαγνητικό πεδίο, και άρα να εξασθενήσουν το συνολικό μαγνητικό αποτέλεσμα. Τα ονομάζει *Διαμαγνητικά* και το φαινόμενο ονομάζεται *Διαμαγνητισμός*. Τα παραμαγνητικά τείνουν να κινηθούν προς μεγάλο μαγνητικό πεδίο (έλκονται από μαγνήτες), ενώ τα διαμαγνητικά τείνουν να κινηθούν προς την πλευρά που το μαγνητικό πεδίο εξασθενεί (φαίνεται να απωθούνται από μαγνήτες<sup>19</sup>). Επίσης, τα παραμαγνητικά υλικά συγκεντρώνουν τις μαγνητικές δυναμικές μέσα τους (τις πυκνώνουν), ενώ τα διαμαγνητικά τις αραιώνουν, εξασθενώντας το πεδίο. Οδηγείται, έτσι, στην εξήγηση των φαινομένων με βάση την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών. Εξηγεί τις διαφορές στη μαγνητική συμπεριφορά των υλικών, σαν αποτέλεσμα της ικανότητας των δυναμικών γραμμών να διαπερνούν τα διαφορετικά υλικά. Τελικά, εισάγει την έννοια της *μαγνητικής διαπερατότητας* (18 σ. 118) (6).

Τέλος, το 1845 είναι η χρονιά που ο Faraday εισάγει για πρώτη φορά τον όρο *μαγνητικό πεδίο*, τον οποίο στα επόμενα χρόνια θα υιοθετήσουν στις εργασίες τους ο Thomson (το 1849) και ο Maxwell (το 1854) (18 σ. 109).

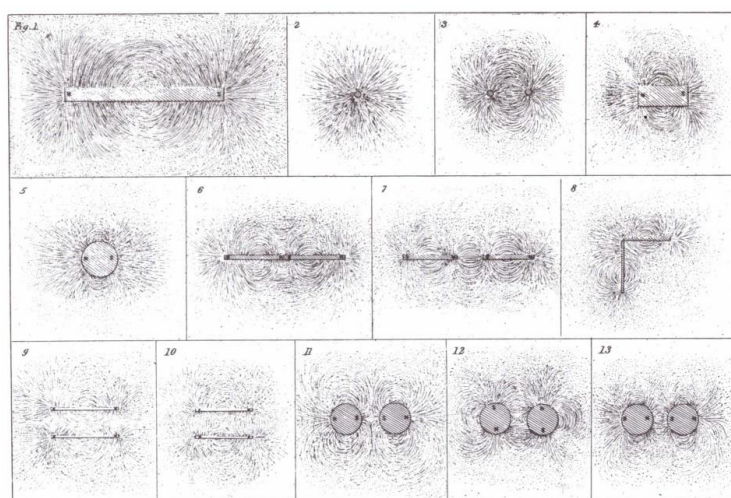
Το 1846 στο άρθρο του “*Σκέψεις σχετικά με τις ταλαντώσεις των ακτινών*” αναφέρει την υπόθεση της διάδοσης των δυνάμεων ως αποτέλεσμα ταλαντώσεων των δυναμικών γραμμών. Οι δυναμικές γραμμές που διαπερνούν τον χώρο, αρκούν για την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων των υλικών σωμάτων. Οι δυναμικές γραμμές δεν περιγράφουν μόνο τις αλληλεπιδράσεις των σωμάτων αλλά και τη δομή τους. Έτσι, εγκαταλείπει την ιδέα της πόλωσης των σωματιδίων της ύλης (που αναπαριστούσε την ηλεκτρο-τονική κατάσταση) και φέρνει σε “πρώτο πλάνο” τις δυναμικές γραμμές. Τέλος, χρησιμοποιεί τον όρο *πολικότητα* για να δώσει την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών στο πεδίο (18 σ. 117).

<sup>19</sup> Ένα πολύ καλό video για τη διαμαγνητικότητα του νερού και του πυρολυτικού γραφίτη μπορούμε να δούμε [εδώ](#) (από το κανάλι NurdRage, με πολύ ενδιαφέροντα πειράματα χημείας).

Το 1852 κατασκευάζει διαγράμματα μαγνητικών δυναμικών γραμμών στηριζόμενος σε πειράματα με ρινίσματα σιδήρου<sup>20</sup>. Δημοσιεύει το άρθρο με τίτλο “Ο φυσικός χαρακτήρας των μαγνητικών δυναμικών γραμμών”, στο οποίο περιγράφει τον σχηματισμό μαγνητικών πεδίων με δυναμικές γραμμές. Είναι εντυπωσιακό πως, ακόμα και σε αυτήν την ηλικία, ο τρόπος εκτέλεσης των πειραμάτων του και η περιγραφή αυτών είναι υπερβολικά λεπτομερειακός. Αναφέρει μέχρι και την υφή του χαρτιού πάνω στο οποίο έπεφταν τα ρινίσματα, την καθαρότητα των ρινισμάτων καθώς και την χρήση λεπτού κόσκινου για τον σωστό διασκορπισμό τους.

Πριν το 1852 ο όρος *δυναμικές γραμμές* ήταν για τον Faraday απλά η περιγραφή της κατανομής των δυνάμεων στον χώρο. Τώρα, όμως, υποστηρίζει ότι οι δυναμικές γραμμές έχουν “πραγματική υπόσταση” και μέσω αυτών των καμπυλών οι δυνάμεις μπορούν να συσχετίζονται μεταξύ τους.

Τελικά, προτείνει δύο διακριτές αναπαραστάσεις του πεδίου, μια με τη μεσολάβηση γειτονικών σωματιδίων του περιβάλλοντος μέσου και μια με δυναμικές γραμμές. Καμία από τις δύο αναπαραστάσεις, όμως, δεν εξηγεί τον μηχανισμό διάδοσης των δυνάμεων, γεγονός που αναφέρει αργότερα στο έργο του και ο Thomson (18 σ. 119).



Εικόνα 13. Μαγνητικά Πεδία σχεδιασμένα από τον ίδιο τον Faraday στο *Experimental Researches in Electricity*, Vol.3, Table III

Προς το τέλος της καριέρας του αναφέρει ότι οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις διαχέονται στο κενό γύρω από έναν αγωγό. Η ιδέα απορρίφθηκε αρχικά από την επιστημονική κοινότητα. Δυστυχώς, ο Faraday δεν έζησε αρκετά για να δει τη

<sup>20</sup> Πάνω σε κυρμένο χαρτί, τοποθετημένο πάνω από μαγνήτες, έριχνε ρινίσματα σιδήρου. Στη συνέχεια ζέσταινε με προσοχή το χαρτί, το κερί έλιωνε και τα ρινίσματα ενσωματώνονταν. Έτσι μπορούσε να κρατά τα δείγματα για πολύ καιρό και να τα μελετά. Πόσο καιρό; Ένα από αυτά τα χαρτιά υπάρχει ακόμα και εκτίθεται στο *μουσείο Faraday* στο Βασιλικό Ινστιτούτο. Μπορείτε να το δείτε [εδώ](#)



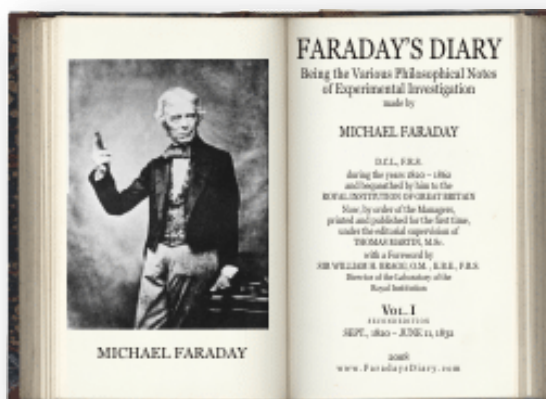
“διαίσθησή” του να μαθηματικοποιείται από τον Maxwell και να επιβεβαιώνεται πειραματικά από τον Hertz (8).

Τα τελευταία χρόνια της ζωής του ο Faraday ασχολείται κυρίως με τις διαλέξεις στο Ινστιτούτο, με εκδόσεις των εργασιών του σε μορφή βιβλίων και πειραματίζεται πάνω στην επίδραση του μαγνητισμού στο φάσμα της φωτιάς. Τα τελευταία αυτά πειράματα δεν έδωσαν αποτελέσματα, αν και σε κάποιες περιπτώσεις το σφάλμα ήταν στο όργανο και όχι στο πείραμα.

### Το ημερολόγιο του Faraday

Ο Faraday είχε την καλή συνήθεια να καταγράφει όλες του τις καθημερινές δραστηριότητες σε ένα ημερολόγιο. Με τα χρόνια, το ημερολόγιο αυτό μεγάλωνε και αποτύπωνε όλη του την εξέλιξη. Κάποιος είπε ότι, αν θέλεις να μελετήσεις τον Faraday, δεν χρειάζεται να διαβάσεις βιβλία ή άρθρα γι’ αυτόν... αρκεί μόνο να διαβάσεις το ημερολόγιό του. Ο William Henry Bragg, μετέπειτα διευθυντής του ερευνητικού εργαστηρίου *Davy – Faraday* του Βασιλικού Ινστιτούτου, γράφει για το ημερολόγιο: «Ο Faraday είχε τη συνήθεια να περιγράφει κάθε του πείραμα, με πλήρεις και προσεκτικά διατυπωμένες λεπτομέρειες, την ημέρα που το διεξήγαγε ...σε κάποιες περιπτώσεις ανέφερε τις επιπτώσεις αυτών που παρατηρούσε ...σε άλλες περιπτώσεις, έκανε προβλέψεις αυτών που επρόκειτο να ανακαλυφθούν. Έτσι το “Ημερολόγιο” είναι κάτι παραπάνω από ένας κατάλογος αποτελεσμάτων. Ο αναγνώστης είναι σε θέση να παρακολουθήσει βήμα – βήμα όλη την εξέλιξη [μιας θεωρίας ή ενός πειράματος] μέχρι το τελικό συμπέρασμα. Μπορεί να δει την ιδέα να σχηματίζεται, να πραγματοποιείται πειραματικά και τα αποτελέσματά της να λειτουργούν ως τροχοπέδη για την επόμενη ιδέα» (2).

Το ημερολόγιο εκδόθηκε από το Βασιλικό Ινστιτούτο ως ένα επτάτομο έργο υπό την επιμέλεια του γραμματέα του, Thomas Martin. Αναφέρεται όλη η δουλειά του Faraday μεταξύ των ετών 1820 και 1862, περίοδο κατά την οποία εργαζόταν στο Ινστιτούτο. Τα περιεχόμενα κάθε τόμου είναι τα εξής (9) (24):



Εικόνα 14. Το Ημερολόγιο

**1<sup>ος</sup> τόμος** (Σεπτέμβριος 1820 – Ιούνιος 1832). Αναφέρονται οι υδροποιήσεις αερίων, η απομόνωση του βενζολίου και τα πρώτα πειράματα για τον ηλεκτρομαγνητισμό και την επαγωγή.

**2<sup>ος</sup> τόμος** (Αύγουστος 1832 – Φεβρουάριος 1836). Καταγράφονται πειράματα σχετικά με την ταυτότητα της φύσεως των διαφόρων ειδών ηλεκτρισμού. Διατυπώνονται οι νόμοι της ηλεκτρόλυσης και οι ορισμοί των ηλεκτροχημικών ισοδυνάμων. Αναφέρονται και άλλα χημικά πειράματα.

**3<sup>ος</sup> τόμος** (Μάιος 1836 – Νοέμβριος 1839). Γίνεται μελέτη εκφορτώσεων σε αραιά αέρια, δίνονται τα μέτρα των διηλεκτρικών σταθερών και παρατίθενται πειράματα που προορίζονταν να αποδείξουν την χημική θεωρία της ηλεκτρικής στήλης και να ανατρέψουν τη θεωρία του Volta.

**4<sup>ος</sup> τόμος** (Νοέμβριος 1839 – Ιούνιος 1847). Περιγράφονται πειράματα για τις ηλεκτρικές στήλες, τα επαγωγικά ρεύματα, τα βολταϊκά ρεύματα και πειράματα για τη μαγνητική περιστροφική πόλωση και τον διαμαγνητισμό.

**5<sup>ος</sup> τόμος** (Σεπτέμβριος 1847 – Οκτώβριος 1851). Αναφορές σε πειράματα για τον μαγνητισμό του οξυγόνου και του βισμούθιου.

**6<sup>ος</sup> τόμος** (Νοέμβριος 1851 – Νοέμβριος 1855). Αναφορές σε πειράματα σχετικά με τα μαγνητικά φάσματα μονίμων μαγνητών και ρευματοφόρων αγωγών. Θεωρίες περί δυναμικών γραμμών.

**7<sup>ος</sup> τόμος** (Νοέμβριος 1855 – Μάρτιος 1862). Καταγραφή πειραμάτων για τα χρώματα τα οποία επιτυγχάνονται με μια χρυσή ταινία (*“επί των πειραματικών σχέσεων του χρυσού μετά του φωτός”*). Τα πειράματα αυτά δεν έδωσαν αποτέλεσμα. Είχαν σκοπό να δείξουν την πιθανή περιορισμένη ταχύτητα της ηλεκτρομαγνητικής κινήσεως και στη συνέχεια να καθοριστούν οι σχέσεις μεταξύ θερμότητας, ηλεκτρισμού και βαρύτητας. Το τελευταίο πείραμα (με αρνητικό



αποτέλεσμα λόγω ατέλειας του χρησιμοποιηθέντος φασματοσκοπίου) σχετίζεται με αυτό που σήμερα ονομάζουμε *φαινόμενο Zeeman*.

## Η σχέση του Faraday με τον Maxwell

Ο James Clerk Maxwell υπήρξε ένας από τους σπουδαιότερους θεωρητικούς φυσικούς όλων των εποχών. Έγινε γνωστός για την ενοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας μέσω τεσσάρων εξισώσεων<sup>21</sup>, μια εκ των οποίων στηρίζεται στη θεωρία του Faraday. Ο νεαρός Maxwell παρακολουθούσε τακτικά τις διαλέξεις του Faraday στο Βασιλικό Ινστιτούτο (2). Η αλληλογραφία των δύο αντρών ξεκινάει στα τέλη του 1850. Ήταν μια δύσκολη εποχή για τον Faraday. Η μνήμη του είχε εξασθενήσει. Χρησιμοποιούσε σημειώσεις κάθε πρωί που του υπενθύμιζαν τι έπρεπε να κάνει την υπόλοιπη μέρα. Είχε πια αποδεχθεί την άρνηση όλων των “μεγάλων” φυσικών της εποχής του, η οποία είχε ως κύρια πηγή τη διαφορά στο μορφωτικό επίπεδο μεταξύ τους.

Θα αποδέχονταν τα εργαστηριακά του ευρήματα, αλλά μέχρι εκεί. Γι’ αυτούς ο Faraday παρέμενε πάντα ένα *βοηθός* εργαστηρίου, στην πιο αναβαθμισμένη εκδοχή του... Όσον αφορά στον ηλεκτρισμό εξακολουθούσαν και δέχονταν την άποψη της ροής διαμέσου του σύρματος (σαν νερό σε σωλήνα). Η μαθηματική επεξεργασία έδειχνε ότι το φαινόμενο ακολουθούσε τη Νευτώνεια λογική. Η εμμονή του Faraday σε κύκλους και περιστρεφόμενες γραμμές, ήταν γι’ αυτούς απλά μια εμμονή. Όμως, ο Faraday μίλαγε συνεχώς για κύκλους, γραμμές της δύναμης και ένα μυστηριώδες “πεδίο”, που γέμιζε το χώρο γύρω από ένα ηλεκτρομαγνητικό γεγονός. Και ερμήνευε το ρεύμα ως αποτέλεσμα των εντάσεων αυτού του πεδίου.

Ο νεαρός Maxwell ήταν ο πρώτος που πείστηκε για τα λεγόμενα του Faraday. Ως ένα από τα καλύτερα μαθηματικά μυαλά της εποχής του ο Maxwell άρχισε να βλέπει κάτω από την επιφανειακή απλότητα των σχεδίων του Faraday. Δεν τα θεώρησε παιδαριώδη (όπως άλλοι) και μάλιστα έλεγε: «*Καθώς προχωρούσα στη μελέτη του Faraday, αντιλήφθηκα ότι η μέθοδός του... ήταν επίσης μια μαθηματική μέθοδος, αν και δεν την εξέθετε με τη συμβατική μορφή των μαθηματικών συμβόλων*» (7 σ. 76). Η προσέγγισή του στο έργο του Faraday γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να καταφέρει να

<sup>21</sup> Οι τέσσερις εξισώσεις (από τις οποίες η 3<sup>η</sup> «είναι» του Faraday) σε διαφορική μορφή είναι:

$$I. \nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \quad II. \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad III. \nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad IV. c^2 \cdot \nabla \times \vec{B} = \partial \vec{E} / \partial t + \vec{j} / \epsilon_0$$

μπει στη θέση του μεγάλου πειραματιστή. Στο έργο του *Πραγματεία στον Ηλεκτρισμό και τον Μαγνητισμό* του 1873 (25) γράφει: «πριν ξεκινήσω τη μελέτη του ηλεκτρισμού, αποφάσισα να μην διαβάσω καθόλου μαθηματικά επί του θέματος, προτού διαβάσω τις “Πειραματικές Έρευνες για τον Ηλεκτρισμό” του Faraday» (26).



Εικόνα 15. James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

Ας δούμε, τώρα, λίγο πιο αναλυτικά πως ο Maxwell αντιμετωπίζει τη θεωρία του Faraday, πως την εξελίσσει και τελικά πως την εντάσσει στην ενοποιημένη ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Το 1856 δημοσιεύει την εργασία του “*Πάνω στις δυναμικές γραμμές*” του Faraday και προσπαθεί να φέρει τα μαθηματικά κοντά στις ιδέες του Faraday για το πεδίο (2). Ενώ, λοιπόν, αρχικά υιοθετεί τη θεωρία του Faraday περί του “πρωτείου των δυναμικών γραμμών”, τονίζει ότι η ιδέα είναι χρήσιμη πιο πολύ ως γεωμετρική αναπαράσταση της χωρικής κατανομής της δύναμης στο πεδίο παρά ως φυσική αναπαράσταση του ίδιου του πεδίου. Με άλλα λόγια δέχεται τη γεωμετρική περιγραφή του χώρου μέσω των δυναμικών γραμμών (χωρική κατανομή, κατεύθυνση και ένταση δυνάμεων) αλλά απορρίπτει την αναπαράσταση της φυσικής δομής του πεδίου από έναν χώρο, πλήρη δυνάμεων. Μάλιστα, σε ένα γράμμα του προς τον ίδιο τον Faraday, το 1857, συζητά την πιθανότητα επέκτασης της ιδέας των δυναμικών γραμμών στη βαρύτητα αναφερόμενος σε δυναμικές γραμμές που εξαπλώνονται από τον Ήλιο προς τους πλανήτες και που υποκαθίστανται από τις δυναμικές γραμμές των ίδιων των πλανητών κοντά στην περιοχή τους. Καταλήγει λέγοντας: «...εάν μάλιστα ήταν ορατές οι δυναμικές γραμμές, τότε [ο πλανήτης] θα έμοιαζε με κομήτη» (18 σ. 131).

Στην εργασία του “*Πραγματεία για τον Ηλεκτρισμό και τον Μαγνητισμό*” (1873) αναφέρει ότι έχει μεταγράψει τις ιδέες του Faraday σε μαθηματική μορφή. Η μελέτη



όμως του έργου του Maxwell δείχνει κάτι ακόμα βαθύτερο: μαθηματοποιώντας τις ιδέες αυτές, τις μετασχηματίζει διατυπώνοντας φυσικά και μαθηματικά μοντέλα για το πεδίο με μια πιο προσεκτική φυσική θεωρία. Προχωράει ένα βήμα παραπέρα, εξετάζοντας λεπτομερειακά τους δύο εναλλακτικούς τρόπους αναπαράστασης του πεδίου από τον Faraday (δάση γειτονικών σωματιδίων περιβάλλοντος μέσου και θεωρία των φυσικών δυναμικών γραμμών). Δίνει έμφαση στις γεωμετρικές συνέπειες της ιδέας των δυναμικών γραμμών. Προτείνει σειρά θεωριών στηριζόμενος κυρίως στην ιδέα της περιστροφής των μοριακών στροβίλων του Thomson. Δείχνει, τέλος, ότι η ιδέα των δυναμικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια καθαρά γεωμετρική αναπαράσταση της δομής του πεδίου (18 σ. 127).

Όπως είπαμε, ο ηλικιωμένος Λονδρέζος και ο νεαρός Σκωτσέζος αλληλογραφούσαν. Όταν στη συνέχεια συναντήθηκαν, δημιουργήθηκε μεταξύ τους μια επαφή που μέχρι τότε δεν είχε ούτε ο ένας ούτε ο άλλος, ποτέ με άλλον άνθρωπο. Τα δύσκολα παιδικά χρόνια στις φτωχογειτονίες της μεγαλούπολης και τα μετέπειτα, επίσης, δύσκολα χρόνια κοντά στον Davy, ήρθαν και συνδυάστηκαν με τα αντίστοιχα δύσκολα παιδικά χρόνια του Maxwell στο οικοτροφείο στο Εδιμβούργο, όπου ο νεαρός James είχε να αντιμετωπίσει τους ατίθασους, σωματώδεις συμμαθητές του με τις παρενοχλήσεις τους. Οι βαθιές θρησκευτικές πεποιθήσεις και των δύο ήταν, επίσης, ένα κοινό σημείο αναφοράς.

Από το 1821 με την εξήγηση του πειράματος του Ørsted ολοκληρώνεται μια πορεία, μεταφραζόμενη σε μαθηματικές εξισώσεις, στα τέλη της δεκαετίας του 1850. Οι τέσσερις εξισώσεις περιγραφής του φωτός ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα ήταν γεγονός και αποτέλεσαν ένα από τα υψηλότερα σημεία της επιστήμης του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Και μια απ’ αυτές – η τρίτη – ήταν η *πειραματική σκέψη* του Faraday γραμμένη απ’ τα χέρια του Maxwell<sup>22</sup>. Οι αόρατες γραμμές του Faraday παίρνουν επιστημονική υπόσταση και η επιστημονική κοινότητα “αναγκάζεται” να τις κάνει αποδεκτές (7 σ. 76). Στο

<sup>22</sup> Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday, διατυπώνεται για πρώτη φορά με μαθηματική μορφή:  $E = -\partial\Phi / \partial t$  από τον Neumann, το 1845. Αργότερα, το 1865, ο Maxwell στο “*A dynamical theory of the electromagnetic field*” τον εντάσσει στο σύνολο των περιφημων τεσσάρων εξισώσεων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, διατυπώνοντας την άποψη ότι το κύριο αποτέλεσμα των μεταβολών της μαγνητικής ροής είναι η ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού πεδίου όχι μόνο στο εσωτερικό του αγωγού (όπου δύναται, λόγω των ηλεκτρονίων, να δημιουργηθεί ρεύμα) αλλά και στον περιβάλλοντα χώρο, έστω και παρά την απουσία φορέων ηλεκτρισμού. Η μαθηματική σχέση του Neumann επαναδιατυπώνεται ώστε να συνδέει τη μεταβολή στο μαγνητικό πεδίο (μαγνητική ροή) με την επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη:  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial\vec{B} / \partial t$  (26), (6).



μυαλό και την καρδιά του Maxwell, ο Faraday θα κατέχει πάντα την πρώτη θέση: «...είναι και θα πρέπει να παραμείνει ο πατέρας της τεράστιας επιστήμης του ηλεκτρομαγνητισμού» (27).

## Ο άνθρωπος Faraday

Υπήρξε άνθρωπος γενναιόδωρος, θεοσεβούμενος, με αγάπη προς τους φτωχούς. Περνούσε αρκετό από τον χρόνο του στην εκκλησία των Σάντεμαν ως πρεσβύτερος, όπου έκανε κήρυγμα. Σύγχρονοί του αναφέρουν ότι υπήρξε άνθρωπος ειλικρινής, ευθύς, με φυσική λεπτότητα και πραότητα. Επίσης τον χαρακτήριζε ένα πλούσιο και καλόκαρδο γέλιο και μια φυσική ζωηράδα (1).

Δεν ξέχασε ποτέ την ταπεινή του καταγωγή. Αναφερόταν συχνά στα παιδικά του χρόνια και στον πατέρα του. Γράφει στο ημερολόγιό του στις 2 Αυγούστου του 1841 από το Interlaken της Ελβετίας: «*η κονσερβοβιομηχανία εδώ είναι μάλλον σημαντική. Είναι μια πολύ όμορφη και ενδιαφέρουσα δουλειά, όταν την παρακολουθείς. Αγαπάω τα σιδηρικά και κάθε τι που έχει σχέση με τα σιδηρικά. Ο πατέρας μου ήταν σιδεράς*». Σε κάποια άλλη στιγμή της ζωής του ποζάροντας σε κάποιον γλύπτη για την προτομή του του λέει ακούγοντας έναν οξύ θόρυβο από τη σμίλη του: «*ο θόρυβος μου θύμισε το αμόνι του πατέρα μου και με έφερε πίσω στα παιδικά μου χρόνια*» (1).

Προσπαθώντας να σκιαγραφήσουμε περεταίρω τον άνθρωπο Faraday αξίζει να αναφερθούμε σε δύο περιστατικά της ζωής του. Σύμφωνα με το πρώτο, ως αναγνώριση των υπηρεσιών του στην επιστήμη του προσφέρθηκε ο τίτλος του *Ιππότη*. Όμως ο Faraday τον αρνήθηκε για θρησκευτικούς λόγους, μιας και πίστευε πως το να αποκτά κανείς πλούτο και κοσμικά αξιώματα ήταν ενάντια στον Λόγο της Αγίας Γραφής. Χαρακτηριστικά δήλωνε: «*I must remain plain Mr. Faraday to the last*» (θα πρέπει να παραμείνω απλά κος Faraday μέχρι το τέλος) (28 σ. 81). Το δεύτερο περιστατικό αφορά στην άρνησή του να συμβουλέψει τον Βρετανικό στρατό στην παραγωγή χημικών όπλων κατά τον Κριμαϊκό Πόλεμο (1853-1856), λέγοντας ότι δεν θα ήθελε να χρησιμοποιηθεί η επιστημονική γνώση ενάντια στην ανθρώπινη ζωή (29 p. 277). Πόσο αυτονόητο ακούγεται αυτό, την σημερινή εποχή;...

## Εν ζωή και μετά θάνατον αναγνωρίσεις

Ως αναγνώριση της προσφοράς του στην επιστήμη το Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης απονέμει το 1832 στον Faraday τον τιμητικό τίτλο του *Διδάκτορα Αστικού Δικαίου*.



Το 1838 εκλέγεται αλλοδαπό μέλος της Βασιλικής Σουηδικής Ακαδημίας Επιστημών και το 1844 γίνεται ένα από τα οκτώ αλλοδαπά μέλη που εκλέγονται στη Γαλλική Ακαδημία Επιστημών (30).

Το 1848 μετά από πρόταση του βασιλικού συζύγου, πρίγκιπα Αλβέρτου, η βασίλισσα Βικτωρία παραχωρεί στον Faraday ένα εξοχικό σπίτι στο Hampton Court του Middlesex. Ήταν η κατοικία του Διδασκάλου Μασόνου που στη συνέχεια μετονομάστηκε σε οικία Faraday. Σήμερα βρίσκεται στο Ν<sup>ο</sup> 37 της ομώνυμης οδού. Ο Faraday έμεινε εκεί για τα επόμενα 19 χρόνια, μέχρι τον θάνατό του στις 25 Αυγούστου του 1867 (31).



Εικόνα 16. Hampton Court

Ετάφη στο (μη Αγγλικανικό) τμήμα των διαφωνούντων του κοιμητηρίου Highgate, αφού είχε απορρίψει πρώτα την ταφή του στο περίφημο Αβαείο του Westminster. Ωστόσο μια αναμνηστική πλακέτα τοποθετήθηκε εκεί, δίπλα στον τάφο του Ισαάκ Νεύτωνα. Ένα άγαλμά του (στο οποίο φαίνεται χαρακτηριστικά να κρατάει τον δακτύλιο του πειράματος της επαγωγής) βρίσκεται έξω από το Ινστιτούτο Μηχανολογίας και Τεχνολογίας, στο Savoy Palace. Η φωτογραφία του μαζί με μια σκηνή από διάλεξή του στο Βασιλικό Ινστιτούτο κοσμούσε για δέκα χρόνια (1991-2001) την πίσω πλευρά του Βρετανικού χαρτονομίσματος των £20. Πολλοί δρόμοι σε διάφορα μέρη της Αγγλίας και όχι μόνο έχουν το όνομά του, καθώς και πολλές πτέρυγες και τμήματα σε διάφορα Πανεπιστήμια, Πολυτεχνεία και ερευνητικά κέντρα σε όλον τον κόσμο (30).



Εικόνα 17. Η πλακέτα στο Westminster Abbey



Εικόνα 18. Το χαρτονόμισμα των 20 λιρών



## Η ζωή του Faraday σε τίτλους

Θα δούμε τώρα ένα χρονοδιάγραμμα με όλη τη ζωή του Faraday και τους σημαντικούς σταθμούς της, ανά χρονιά (32):

- 1791:** γεννιέται στις 22 Σεπτεμβρίου στο Newington Butts
- 1805:** δουλεύει ως μαθητευόμενος βιβλιοδέτης
- 1810:** παρακολουθεί την πρώτη του διάλεξη στην City Philosophical Society
- 1812:** παρευρίσκεται στις διαλέξεις του Davy στο Βασιλικό Ινστιτούτο. Τελειώνει η μαθητεία του ως βιβλιοδέτης
- 1813:** πιάνει δουλειά στο Βασιλικό Ινστιτούτο. Ξεκινάει ευρωπαϊκή περιοδεία με το ζεύγος Davy. Βοηθά τον Davy στην έρευνά του για το νεοανακαλυφθέν Ιώδιο
- 1814:** περιοδεύει (με τον Davy) σε Ιταλία, Ελβετία, Βαυαρία και Γαλλία
- 1815:** επιστρέφει στην Αγγλία. Προάγεται σε βοηθό και επιστάτη του εργαστηρίου του Βασιλικού Ινστιτούτου. Βοηθά τον Davy στην εφεύρεση της λάμπας ασφαλείας
- 1816:** δημοσιεύει την πρώτη του εργασία πάνω στην *Εγχώρια Καυστική Άσβεστο*
- 1818:** ξεκινά μια παρατεταμένη εργασία μαζί με τον Stodart για τον χάλυβα και τα κράματά του
- 1820:** ανακαλύπτει τα  $C_2Cl_6$  και  $C_2Cl_4$
- 1821:** παντρεύεται την Sarah Barnard. Παρουσιάζει την *Ηλεκτρομαγνητική Περιστροφή* (μονοπολικός κινητήρας)
- 1822:** τον επισκέπτεται ο Ørsted
- 1823:** υγροποιεί χλώριο και άλλα αέρια
- 1824:** εκλέγεται μέλος στην Βασιλική Εταιρεία
- 1825:** απομονώνει το  $C_6H_6$ . Ξεκινάει πενταετή έρευνα για τα οπτικά γυαλιά
- 1826:** εγκαινιάζει τις Χριστουγεννιάτικες διαλέξεις, προσαρμοσμένες για νεανικό κοινό. Δίνει την πρώτη του απογευματινή διάλεξη με θέμα το *Καουτσούκ*
- 1827:** δημοσιεύει τη *Χημική Χειραγώγηση*
- 1829:** διορίζεται Καθηγητής στη Βασιλική Στρατιωτική Ακαδημία
- 1831:** ανακαλύπτει την *Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή*. Δημοσιεύει τις *Πειραματικές Έρευνες στον Ηλεκτρισμό* (πρώτη σειρά)

**1833:** δημοσιεύει το *Σχετικά με την Ταυτότητα του Ηλεκτρισμού, προερχόμενου από Διάφορες Πηγές*

**1834:** δημοσιεύει τους νόμους της Ηλεκτρόλυσης. Αλληλογραφεί με τον William Whewell σχετικά με την ονοματολογία της ηλεκτροχημείας. Μελετά την κατάλυση. Διορίζεται Καθηγητής Χημείας στην έδρα Fuller, στο Βασιλικό Ινστιτούτο

**1835:** μελετά την ηλεκτρική αγωγιμότητα των αερίων

**1836:** εισάγει τον όρο *Διηλεκτρική σταθερά*. Εκτελεί το πείραμα με τον κλωβό *Faraday*

**1837:** δίνει διαλέξεις πάνω στην *Επαγωγή*. Εισάγει την έννοια των *Δυναμικών Γραμμών*

**1838:** αρχίζει να παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα υγείας και απώλεια μνήμης

**1839:** δημοσιεύει τον πρώτο τόμο των *Πειραματικών Ερευνών στον Ηλεκτρισμό*

**1841:** πηγαίνει στην Ελβετία για (εκτεταμένη) ανάρρωση

**1844:** δημοσιεύει τον δεύτερο τόμο των *Πειραματικών Ερευνών στον Ηλεκτρισμό*

**1845:** δημοσιεύει το *Σχετικά με την Υγροποίηση και την Στερεοποίηση των Αερίων*. Μελετά το *Φαινόμενο Faraday*. Μελετά τον *Διαμαγνητισμό*

**1846:** δημοσιεύει τις *Σκέψεις πάνω στις Ταλαντώσεις των Ακτινών*

**1848:** μελετά την *Μαγνητική Ανισοτροπία*

**1849:** αποτυγχάνει να συνδέσει την βαρύτητα με τον ηλεκτρισμό

**1851:** παρουσιάζει τον Παραμαγνητισμό του αερίου Οξυγόνου στο κοινό του Βασιλικού Ινστιτούτου

**1853:** δημοσιεύει τις *Διαλέξεις σχετικά με τα μη-Μεταλλικά Στοιχεία*

**1854:** δημοσιεύει τις *Παρατηρήσεις πάνω στην Διανοητική Εκπαίδευση*

**1855:** δημοσιεύει τον τρίτο τόμο των *Πειραματικών Ερευνών στον Ηλεκτρισμό*

**1857:** κάνει την τελευταία του σημαντική δημοσίευση σχετικά με τα *Συστήματα Κολλοειδών Μετάλλων*. Αυτό ήταν επίσης και το θέμα της τελευταίας του διάλεξης Bakerian (*Πειραματικές Σχέσεις του Χρυσού, και άλλων μετάλλων, με το Φως*) στο Βασιλικό Ινστιτούτο

**1858:** δέχεται από την Βασίλισσα το οίκημα Hampton Court Palace, εφ' όρου ζωής

**1859:** δημοσιεύει τις *Πειραματικές Έρευνες στη Χημεία και την Φυσική*

**1860:** δημοσιεύει τις *Διάφορες Δυνάμεις της Φύσης*

**1861:** δημοσιεύει την *Χημική Ιστορία ενός Κεριού*. Προσφέρει την παραίτησή του στους διευθυντές του Βασιλικού Ινστιτούτου



Αναστάσιος Νέζης “Ιστορικά πειράματα Faraday και η αξιοποίησή τους στη διδακτική της Φυσικής σε Γυμνάσιο και Λύκειο”

**1862:** εκτελεί το τελευταίο του πείραμα αναζητώντας επιδράσεις μαγνητικού πεδίου σε φάσματα φωτιάς. Δίνει την τελευταία του απογευματινή διάλεξη. Μετακομίζει μόνιμα στο Hampton Court

**1867:** πεθαίνει στις 25 Αυγούστου



Εικόνα 19. Το άγαλμα στο Savoy Palace





## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> *Τα ιστορικά πειράματα του Michael Faraday*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα σκιαγραφήσουμε ορισμένα από τα πιο σπουδαία πειράματα που διεξήγαγε ο Faraday, την περίοδο 1821 – 1831, μέσω των οποίων μπήκαν τα θεμέλια του κλάδου του ηλεκτρομαγνητισμού. Θα δούμε τις λεπτομέρειες που σχετίζονται με τα πειράματα αυτά, καθώς και τις αρχικές προσπάθειές του μέχρι την ολοκλήρωσή τους. Επίσης, θα δούμε την “προϊστορία” του ηλεκτρομαγνητισμού, δηλαδή τα πειράματα που προηγήθηκαν αυτών του Faraday και το πως αυτά λειτούργησαν ως εφαλτήριο για τις δικές του μελέτες.



Εικόνα 20. Όργανα πειραμάτων του Faraday: 1. γαλβανόμετρο, 2. πηνίο δείκτης, 3. πηνίο για επαγωγή με μαγνήτη, 4. ο δακτύλιος, 5. συζευγμένα πηνία επαγωγής, 6. συσκευή σπινθήρων

### **Η προϊστορία: Ørsted – Ampère – Arago**

Από τον 18<sup>ο</sup> αιώνα κάποιοι επιστήμονες άρχισαν να υποψιάζονται πως υπήρχε κάποια σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών και των μαγνητικών φαινομένων. Κάποιοι άλλοι, αρχικά, ήταν εντελώς αντίθετοι, όπως ο Ampère, ο Young κ.α. Με αυτούς ήταν και ο William Gilbert, ο οποίος, όμως, μελέτησε ταυτόχρονα τον ηλεκτρισμό<sup>23</sup> και τον μαγνητισμό και συμπεριέλαβε τον ηλεκτρισμό στο περίφημο βιβλίο του *De Magnete* (33). Τα έτη 1776 και 1777 η Ακαδημία Επιστημών της Βαυαρίας ζητάει την υποβολή δοκιμίων για τη σχέση ηλεκτρισμού και μαγνητισμού (16 σ. 240).

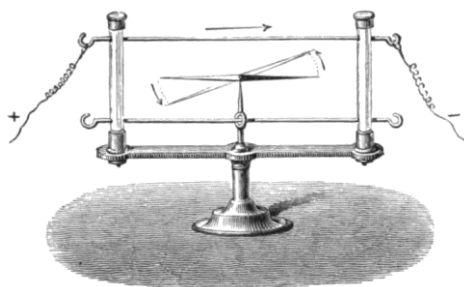
<sup>23</sup> Φυσικά μιλάμε για μια εποχή που “ηλεκτρισμός” σήμαινε φορτία που παράγονταν από ηλεκτροστατικές μηχανές. Η μπαταρία ανακαλύφθηκε μόλις το 1800, από τον Volta.



Φυσικά υπήρχαν ενδείξεις ότι κάτι υπήρχε... Είχε παρατηρηθεί η απόκλιση μαγνητικών πυξίδων κατά τις εκκενώσεις κεραυνών. Επίσης ο Benjamin Franklin είχε προκαλέσει μαγνήτιση βελονών κατά την εκφόρτιση φιαλών Leyden (34).

### Το πείραμα του Ørsted

Ίσως είναι η μοναδική φορά στην ιστορία της επιστήμης που μια τέτοια (τεράστιας σημασίας) ανακάλυψη γίνεται μπροστά σε φοιτητές, κατά τη διάρκεια μιας διάλεξης<sup>24</sup>, μας λέει ο ιστορικός Frederick Gregory. Στις 21 Απριλίου του 1820 ο Δανός φυσικός Hans Christian Ørsted παρατηρεί ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρρεε ένα σύρμα, εξέτρεπε μια παρακείμενη μαγνητική βελόνα. Η εκτροπή ήταν τέτοια ώστε η βελόνα άλλαζε προσανατολισμό (σε σχέση με τον αρχικό της, βορρά – νότου) και έτεινε να γίνει κάθετη στο σύρμα. Περεταίρω μελέτη έδειξε πως, όταν το σύρμα



Εικόνα 21. Η.Κ. Ørsted (1777-1851) & Το πείραμα απόκλισης της μαγνητικής βελόνας

διαρρέοταν από ρεύμα αντίθετης φοράς, η βελόνα γυρνούσε κατά 180° (και πάλι προσανατολιζόμενη κάθετα στο σύρμα). Τα παραπάνω, αναφέρονται σε ένα γράμμα του συναδέλφου του Ørsted, C. Hansteen, προς τον Faraday το 1857 (2). Επίσης, παρατηρεί ότι η βελόνα εκτρεπόταν αντίθετα, αν τοποθετούνταν πάνω ή κάτω από το σύρμα, και συμπεραίνει ότι οι *ταλαντούμενες ηλεκτρικές δυνάμεις* μέσα στον αγωγό (αυτή ήταν η άποψή του για το τι είναι ηλεκτρικό ρεύμα) προκαλούσαν “κυκλική

<sup>24</sup> Δεν είναι σαφές αν ο Ørsted, έχοντας παρατηρήσει το φαινόμενο νωρίτερα, σκόπιμα ή τυχαία έκανε το πείραμα μπροστά στους φοιτητές του. Και οι δύο εκδοχές αναφέρονται από τον ίδιο, σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (2). Κατά άλλους η ιστορία διαφοροποιείται λίγο: το αρχικό σχέδιο ήταν να περάσει ρεύμα, από μια μπαταρία, σε ένα πολύ λεπτό σύρμα από πλατίνα και να το τοποθετήσει κοντά σε μια μαγνητική βελόνα, που την περιέβαλε με γυάλινο κάλυμμα. Όμως ένα ατύχημα συνέβη κατά την προετοιμασία της διάλεξης και αποφάσισε να το αναβάλλει για μια άλλη φορά. Κατά τη διάρκεια της διάλεξης, η πιθανότητα της επιτυχίας “εμφανίστηκε ισχυρή” και, τελικά, αποφάσισε να κάνει το πείραμα για πρώτη φορά, μπροστά στους φοιτητές. Η μαγνητική βελόνα, αν και μέσα σε γυαλί, εξετράπη. Το αποτέλεσμα ήταν πολύ αδύναμο, λόγω του χαμηλού ρεύματος, και έτσι το πείραμα δεν έκανε καμία σοβαρή εντύπωση στο κοινό του (65 σ. 140). Τυχαίο ή σκόπιμο δεν έχει και πολύ μεγάλη σημασία, μιας και μιλάμε για ένα πείραμα που, δίκαια, συγκαταλέγεται στο top-10 των πειραμάτων όλων των εποχών.



κίνηση” στον χώρο που τον περιβάλλει. Με άλλα λόγια, ο Ørsted λέει πως οι δυνάμεις αυτές δρουν κυκλικά και είναι κατανοημένες στον χώρο (35) (18 p. 48).

Η εμπλοκή του Faraday στα επόμενα έντεκα χρόνια ήταν καθοριστική, όπως θα δούμε παρακάτω, με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικής κίνησης και την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η συμβολή μεταγενέστερων επιστημόνων και εφευρετών έδωσε τελικά τον σύγχρονο τεχνολογικό πολιτισμό που απολαμβάνουμε όλοι μας σήμερα (5).

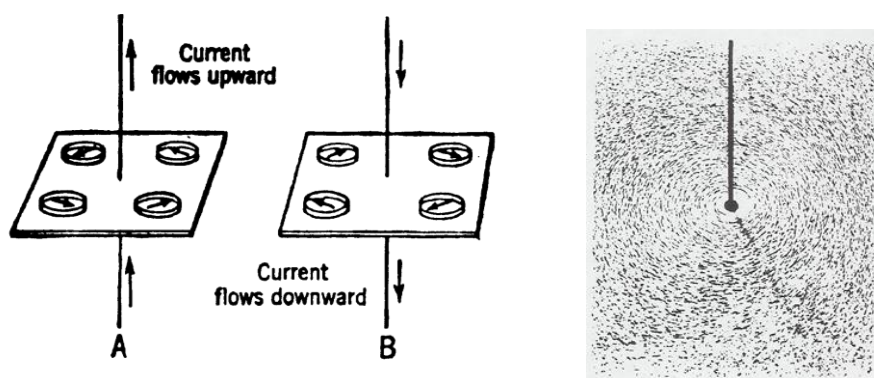
Η τυπική – περιορισμένη εκπαίδευση του Faraday φάνηκε τελικά χρήσιμη στην εξήγηση του φαινομένου. Αυτό είναι σπάνιο, μιας και, όταν ένα επιστημονικό αντικείμενο φτάνει σε υψηλό επίπεδο, η ελλιπής εκπαίδευση συνήθως εμποδίζει τους μη γνώστες να ασχοληθούν με αυτό. Όχι, όμως, και τον Faraday. Οι σύγχρονοί του είχαν εκπαιδευτεί να αποδεικνύουν πως οποιαδήποτε πολύπλοκη κίνηση μπορούσε να αναλυθεί σε μια γραμμική επαλληλία έλξεων και απώσεων. Έτσι, προσπαθούσαν να βρουν γραμμικές έλξεις μεταξύ μαγνητών και ηλεκτρισμού, πράγμα που αποτύγχανε να εξηγήσει τη διοχέτευση της *ηλεκτρικής δύναμης* στο χώρο (έξω από το σύρμα) και το αποτέλεσμά της, δηλαδή την απόκλιση της βελόνας.

Ο Faraday δεν είχε τέτοιες “προκαταλήψεις” (άλλωστε δεν τις είδε διδαχθεί ποτέ!). Αντίθετα είχε βαθιά ριζωμένη μέσα του τη θρησκεία και με βάση τον “κύκλο” της αίρεσης των Σάντεμαν, στην οποία ανήκε, άρχισε να φαντάζεται αόρατες κυκλικές γραμμές γύρω από το σύρμα. Να σημειώσουμε εδώ ότι η παραπάνω εικασία (σχετικά με τον “κύκλο” των Σάντεμαν και το κυκλικό μαγνητικό πεδίο), αποτελεί απλώς μια εικασία –συναγόμενη από τις διάφορες πτυχές της μέχρι τότε ζωής του– και δεν καταγράφεται πουθενά επίσημα, ούτε στο *ημερολόγιό* του, ούτε σε καμία δημοσίευση (7 σ. 32).

Στο δραματοποιημένο ντοκιμαντέρ της NOVA: “*Einstein’s Big Idea*” βλέπουμε μια πιθανή εκδοχή για τα γεγονότα που διαδραματίστηκαν εκείνη την ημέρα: στο εργαστήριο του Βασιλικού Ινστιτούτου, ο Davy και κάποιοι άλλοι συνάδελφοί του αναπαράγουν το πείραμα του Ørsted. Ζητούν τη γνώμη του νεαρού Faraday (που σκούπιζε λίγο παραπέρα!) και αυτός αναφέρεται σε μια (πιθανή) δύναμη που προέρχεται από το σύρμα και διοχετεύεται προς τα έξω αλληλεπιδρώντας με την μαγνητική βελόνα. Ένας από τους παρευρισκόμενους διακόπτει τον Faraday λέγοντάς του ότι σύμφωνα με το Πανεπιστήμιο του Cambridge ο ηλεκτρισμός ρέει μέσα στο

σύρμα (through a wire...) και όχι περιφερειακά του (...and not sideways). Ο Faraday αντιδρά λέγοντας: «...ναι αλλά αυτό δεν εξηγεί αυτό που συμβαίνει μπροστά στα μάτια μας». Και είχε δίκιο. Η παρατήρηση κατέρριπτε την υπόθεση. Είχε έρθει η ώρα για μια νέα υπόθεση και ένα ή περισσότερα πειράματα που θα την στήριζαν ή θα την απέρριπταν. Είχε έρθει η ώρα να εφαρμοστεί η παλιά καλή επιστημονική μέθοδος του Γαλιλαίου (7 p. 33) (15).

Με μεθοδικό τρόπο τοποθετεί πυξίδες γύρω από έναν κατακόρυφο ρευματοφόρο αγωγό και βλέπει ότι αυτές προσανατολίζονται κυκλικά γύρω από αυτό. Φαντάζεται “αόρατες” δυνάμεις να διοχετεύονται κυκλικά γύρω από το σύρμα («ηλεκτρικές δυνάμεις» όπως τις ονόμαζε) και να επηρεάζουν τις πυξίδες, κάτι σαν σημαίες στον άνεμο. Είχε μόλις σχηματίσει στο μυαλό του το (μετέπειτα) μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού, το οποίο και θα δείξει με ρινίσματα σιδήρου πολλά χρόνια αργότερα (7 p. 34). Κατά άλλους, ήταν ο Davy αυτός που διασκορπίζει ρινίσματα σιδήρου σε χαρτόνι, κάθετο στο σύρμα, τα οποία και διατάσσονται κυκλικά (36).



Εικόνα 22. Η τοποθέτηση πυξίδων γύρω από ρευματοφόρο σύρμα & Το μαγνητικό πεδίο του σύρματος με ρινίσματα σιδήρου

Το επόμενο βήμα ήταν να αντιστρέψει τη διαδικασία και να καταφέρει να κάνει το καλώδιο να κινηθεί γύρω από σταθερό μαγνήτη. Και το κάνει... είναι ο περίφημος μονοπολικός κινητήρας με τον υδράργυρο. Όμως, πριν δούμε αυτό το πείραμα, ας μείνουμε λίγο ακόμα στην “προϊστορία” του ηλεκτρομαγνητισμού και σε μερικούς ακόμα σπουδαίους επιστήμονες της εποχής.



### Ampère – Sturgeon – Arago

Λίγους μήνες μετά την δημοσιοποίηση του πειράματος του Ørsted ο Ampère στη Γαλλία δείχνει την αλληλεπίδραση δύο παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών, με έλξη όταν τα ρεύματα ήταν ομόρροπα και άπωση όταν ήταν αντίρροπα. Διατυπώνει την άποψη πως ο μαγνητισμός μπορεί να εξηγηθεί με ηλεκτρικά ρεύματα και για την εξήγηση της ηλεκτρομαγνητικής δράσης χρησιμοποιεί την ιδέα του *φωτοφόρου αιθέρα* του Fresnel (18 p. 48). Παράλληλα οι J.B. Biot και F. Savart διατυπώνουν τον νόμο που περιγράφει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένα στοιχειώδες τμήμα ρευματοφόρου σύρματος και τέλος ο Ampère, το 1826, διατυπώνει τον νόμο που περιγράφει το μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού<sup>25</sup>.

Στο ενδιάμεσο<sup>26</sup>, το 1825, ο Άγγλος ηλεκτρολόγος William Sturgeon κατασκευάζει τον πρώτο ηλεκτρομαγνήτη που μπορούσε να σηκώσει το βάρος του. Το κάνει με γυμνό σύρμα που περιελίσσει σε πυρήνα μαλακού σιδήρου μονωμένου με βερνίκι. Στη συνέχεια ο J. Henry στις ΗΠΑ κατασκευάζει τον πρώτο “βαρέως τύπου” ηλεκτρομαγνήτη με μονωμένο σύρμα σε γυμνό πεταλοειδή πυρήνα, που είχε δυνατότητα να σηκώσει βάρος άνω του ενός τόνου (37 p. 80).

Ένα χρόνο πριν, το 1824, ο διάσημος τότε (αλλά όχι πια...) Γάλλος φυσικός François Arago εκτελεί ένα πείραμα που θα φέρει σε αμηχανία αρκετούς από τους σύγχρονούς του επιστήμονες. Θα λειτουργήσει, όμως, και ως ένα ισχυρό κίνητρο για τον Faraday. Ο Arago δείχνει ότι μια μαγνητική βελόνα, η οποία κρέμεται με νήμα πάνω από έναν οριζόντιο χάλκινο περιστρεφόμενο δίσκο, περιστρέφεται και η ίδια. Για δύο λόγους το πείραμα είναι εντυπωσιακό: δεν υπάρχει εξωτερικό ρεύμα που να εφαρμόζεται στον δίσκο και, επίσης, ο δίσκος, αν και αγωγίμος, δεν είναι μαγνητικός (όντας από χαλκό). Και, όμως, πρέπει να υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με τη βελόνα, και δημιουργείται από την περιστροφή

<sup>25</sup> Ο νόμος του Ampère είναι:  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$  και αργότερα με μια προσθήκη αποτέλεσε την 4<sup>η</sup> εξίσωση του Maxwell.

<sup>26</sup> Είχε προηγηθεί η κατασκευή ενός πολλαπλασιαστή του φαινομένου του Ørsted, από τον Γερμανό Schweigger, το 1820. Ήταν μερικές σπειρές τυλιγμένες σε μορφή παραλληλογράμμου, που στη μέση τους βρισκόταν η μαγνητική πυξίδα. Το όργανο ονομάστηκε (προς τιμή του L. Galvani) *γαλθανόμετρο*. Επίσης ο Arago είχε διαπιστώσει έλξη ρινισμάτων σιδήρου από ρευματοφόρο χάλκινο σύρμα. Ο συνδυασμός του οργάνου του Schweigger με την παρατήρηση του Arago οδήγησε τον Sturgeon (και στη συνέχεια τον Henry) στην ανακάλυψή του (67) (68).

του δίσκου<sup>27</sup>. Με τις σημερινές μας γνώσεις βλέπουμε την αρχή ενός επαγωγικού κινητήρα, κάτι που, τότε, δεν είδε ο Arago. Θα χρειαζόταν η εξυπνάδα, η ευρηματικότητα και η σκληρή και προσεκτική δουλειά του M. Faraday, ώστε να εξηγηθεί το φαινόμενο και να φτιαχτούν νέα πειράματα που θα άλλαζαν το πρόσωπο του πλανήτη για πάντα (38) (2).



Εικόνα 23. Francois Arago (1786-1853) & Ο τροχός Arago

Ας πάρουμε όμως τα πράγματα με τη σειρά και ας δούμε το πρώτο *μεγάλο* πείραμα του Faraday στον ηλεκτρομαγνητισμό, απόρροια των ραγδαίων εξελίξεων που ακολούθησαν το 1820 και το πείραμα του Ørsted. Ας δούμε, λοιπόν, πως ο Faraday, τον Σεπτέμβριο του 1821, μας έδωσε την ηλεκτρομαγνητική περιστροφική κίνηση...

---

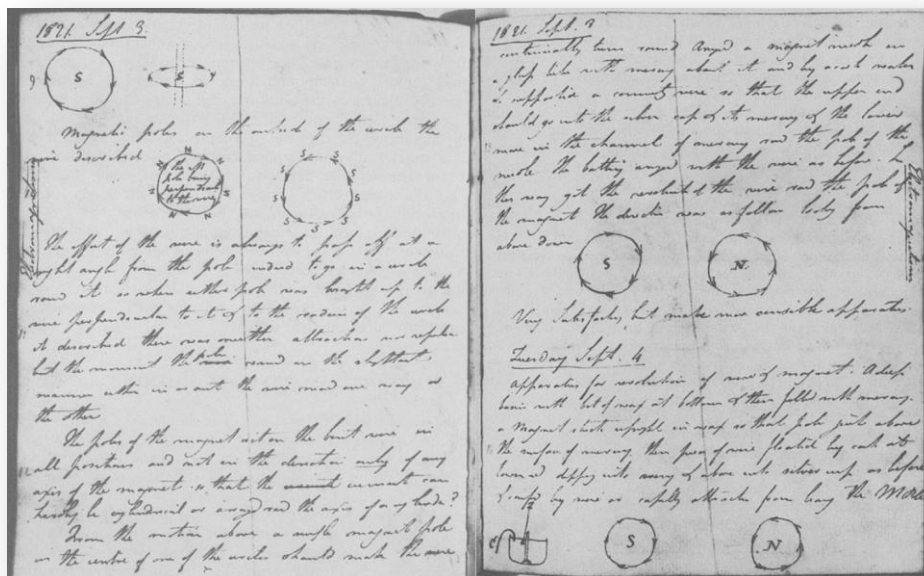
<sup>27</sup> Ενδιαφέροντα βίντεο με το φαινόμενο μπορεί κανείς να δει [εδώ](#), [εδώ](#) και [εδώ](#).



## Ο μονοπολικός Κινητήρας

Η κατασκευή αυτή καταγράφεται στην ιστορία ως η πρώτη μηχανή που λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα και παράγει κίνηση. Είναι ο “πατέρας” όλων των κινητήρων που ακολούθησαν και μαζί με την δυναμογεννήτρια (τη “μητέρα” όλων των γεννητριών ηλεκτρικού ρεύματος) αποτελούν τους “γονείς” του σύγχρονου τεχνολογικού πολιτισμού (5). Ας δούμε, λοιπόν, όλες της λεπτομέρειες από τη σύλληψη της ιδέας έως την κατασκευή και λειτουργία του.

Μετά το πείραμα του Ørsted και τα πειράματα του Ampère με τα παράλληλα ρευματοφόρα σύρματα<sup>28</sup> ο William Hyde Wollaston (1766-1828) άρχισε να αναπτύσσει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το θέμα του ηλεκτρομαγνητισμού. Υποστηρίζει ότι το ρεύμα διατρέχει ένα σύρμα με ελικοειδή τρόπο (κάπως σαν τιρμπουρόν) και με βάση αυτή την υπόθεση προβλέπει ότι ένα ρευματοφόρο σύρμα θα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, εφόσον βρίσκεται παρουσία μαγνητικού πεδίου κάποιου μόνιμου μαγνήτη. Παρά τις προσπάθειές του δεν καταφέρνει να το πραγματοποιήσει πειραματικά.



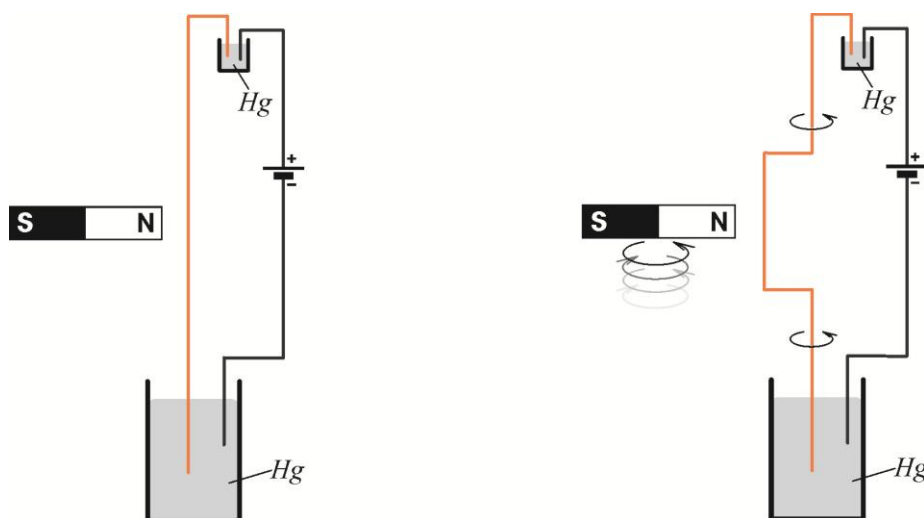
Εικόνα 24. Καταχώρηση Ημερολογίου 3 & 4 Σεπτεμβρίου 1821

Ωστόσο ο Faraday, την ίδια περίοδο, τείνει να συμπεράνει πως η επίδραση μαγνήτη στο σύρμα, θα το αναγκάσει να κινηθεί πλαγίως και όχι κυκλικά. Αυτό προκύπτει από

<sup>28</sup> ...που έλκονταν όταν τα ρεύματα ήταν αντίρροπα και απωθούνταν όταν τα ρεύματα ήταν ομόρροπα (ενδιαφέρον video μπορείτε να δείτε [εδώ](#))

την εξής παρατήρηση: ο κάθε πόλος μιας μαγνητικής βελόνας αλληλεπιδρά με το ρευματοφόρο σύρμα σε τέσσερις θέσεις, δύο θέσεις έλξης και δύο θέσεις άπωσης. Το καταγράφει στο ημερολόγιό του στην ημερομηνία «1821, Sept 3». Μαζί με την υπόλοιπη δραστηριότητα της ημέρας, καθώς και της επόμενης, 4 Σεπτεμβρίου, αποτελούν το ιστορικό αρχείο, το οποίο θα γίνει η καταγραφή του πρώτου στην ιστορία κινητήρα (14 σ. 62).

Αποδεικνύει τα λεγόμενά του με ένα ευφάνταστο πείραμα (βλέπε Σχήμα 1Α): τοποθετεί ένα κατακόρυφο σύρμα σε δύο μικρά δοχεία με υδράργυρο, το ένα ψηλά και το άλλο χαμηλά. Κλείνει το κύκλωμα με μια μπαταρία μέσω του υδραργύρου. Φέροντας έναν μαγνήτη κοντά στο σύρμα (που λόγω του υδραργύρου ήταν ελεύθερο να κινηθεί), το παρατηρεί να έλκεται ή να απωθείται ανάλογα με την πολικότητα του μαγνήτη<sup>29</sup>.



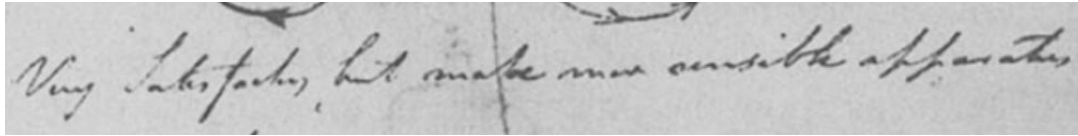
Σχήμα 1. Πρώτη & Δεύτερη Απόπειρα Η/Μ κίνησης (3-9-1821)

Στη συνέχεια τροποποιεί το σύρμα (βλέπε Σχήμα 1B), λυγίζοντάς το σε μορφή μανιβέλας (crank). Πλησιάζει τον ένα πόλο του μαγνήτη στο κέντρο του σύρματος και το σύρμα απωθείται. Μόλις φτάσει στην αντιδιαμετρική πλευρά, αμέσως αντιστρέφει τον μαγνήτη και τότε το σύρμα έλκεται. Κάνοντάς το συνέχεια και συντονισμένα καταφέρει την πρώτη συνεχή περιστροφική κίνηση. Πριν κλείσει το ημερολόγιό του για αυτήν τη μέρα, φαίνεται ότι η ιδέα αρχίζει να ωριμάζει στο μυαλό του. Σημειώνει: «... αυτά καταδεικνύουν κυκλικές κινήσεις γύρω από κάθε πόλο» και

<sup>29</sup> ...και όχι, φυσικά, να περιστρέφεται (όπως υποστήριζε ο Wollaston).

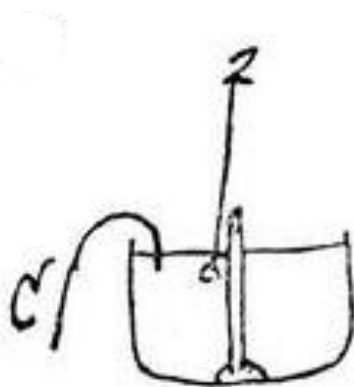


κάνει τα δύο σχήματα με κύκλους και βέλη γύρω από τα γράμματα N (north) και S (south). Η τελευταία του φράση, γι’ αυτή τη μέρα, δείχνει πολλά:

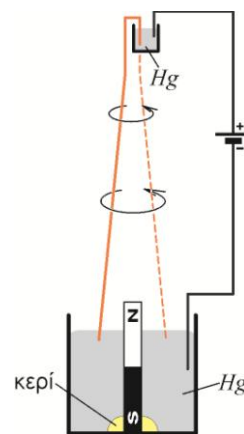


Εικόνα 25. «Πολύ ικανοποιητικό, αλλά να φτιάξω μια πιο κατανοητή συσκευή»

Την επόμενη μέρα, 4 Σεπτεμβρίου του 1821, φτιάχνει τη συσκευή που θα χαρακτηριστεί ως πρώτος ηλεκτρικός κινητήρας: τον *μονοπολικό κινητήρα* ή *ηλεκτρομαγνητικό στροφέα*. Τοποθετεί σε ένα δοχείο (ασημένιο όπως αναφέρει ο ίδιος) λίγο κερί και κολλάει στον πάτο του έναν κατακόρυφο μαγνήτη (βλέπε Σχήμα 2). Γεμίζει το δοχείο με υδράργυρο, μέχρι σχεδόν το χείλος του και κρεμάει ένα σύρμα, το πάνω άκρο του οποίου (δεν φαίνεται στο σχέδιό του) ήταν και πάλι βυθισμένο σε μικρό δοχείο με υδράργυρο. Το κάτω μέρος του σύρματος επιπλέει στον υδράργυρο με τη βοήθεια ενός μικρού φελλού. Κλείνει το κύκλωμα με μια μπαταρία και παρατηρεί την πρώτη συνεχή περιστροφή σύρματος που οφείλεται σε ηλεκτρομαγνητική δύναμη (39 p. 88).



Εικόνα 26. Σκίτσο του Κινητήρα (4-9-1821)



Σχήμα 2. Μονοπολικός κινητήρας (4-9-1821)

Μέσα σε μια εβδομάδα, ολοκληρώνει την εργασία του, την οποία και στέλνει για δημοσίευση με τίτλο “*On some new Electro-Magnetic Motions and on the Theory of*



*Magnetism*” (40), χωρίς να τη δείξει πρώτα στον Wollaston, όπως συνηθίζονταν την εποχή αυτή<sup>30</sup>.

Τις επόμενες εβδομάδες φτιάχνει μια πιο “συμπαγή” συσκευή, την οποία και στέλνει σε διάφορους σύγχρονούς του, προκειμένου να μοιραστεί μαζί τους αυτή τη νέα επιστημονική γνώση. Οι μελέτες του πάνω στον ηλεκτρομαγνητικό στροφέα συνεχίζονται και τα επόμενα χρόνια, παράλληλα με την υπόλοιπη ερευνητική του δραστηριότητα, και η συνολική δουλειά δημοσιεύεται στον 2<sup>ο</sup> τόμο των “*Πειραματικών Ερευνών στον Ηλεκτρισμό*”, το 1844.

Εδώ βλέπουμε ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο του κινητήρα, με δύο δοχεία υδραργύρου και αντίστροφες λειτουργίες. Η περιγραφή του Faraday είναι υπέρ αναλυτική και μια σύντομη εκδοχή της θα δώσουμε παρακάτω.

Η συσκευή κατασκευάστηκε από κάποιον κ. Newman, στην οδό Lisle (πάνω σε σχέδια και οδηγίες του Faraday) και επιδεικνύει την περιστροφή ενός μαγνήτη γύρω από σταθερό σύρμα και ενός σύρματος γύρω από σταθερό μαγνήτη. Σχετικά με την απόδοση της συσκευής, αναφέρει ότι το σύρμα γύριζε τόσο γρήγορα, που το μάτι δεν μπορούσε να το ακολουθήσει, όταν συνδέονταν με ένα *θερμιδόμετρο του Hare* (ένα είδος μπαταρίας<sup>31</sup>). Όταν πάλι συνδέονταν με ένα *γαλβανικό στοιχείο* δέκα πλακών (κατασκευής Wollaston), και το σύρμα και ο μαγνήτης περιστρέφονταν με αρκετή ταχύτητα.

Τα κατασκευαστικά στοιχεία που δίνει είναι τα εξής: η συσκευή εδράζεται σε ξύλινη βάση 3×6 inc. Ο κεντρικός ορθοστάτης είναι από μπρούτζο και έχει ύψος 6 inc, ενώ ο οριζόντιος βραχίονας είναι χάλκινος. Δύο χάλκινες πλάκες είναι τοποθετημένες πάνω στη βάση εκατέρωθεν του κεντρικού ορθοστάτη και έχουν σύρματα κολλημένα πάνω τους (για το κύκλωμα). Πάνω σε αυτές τοποθετούνται τα ποτήρια.

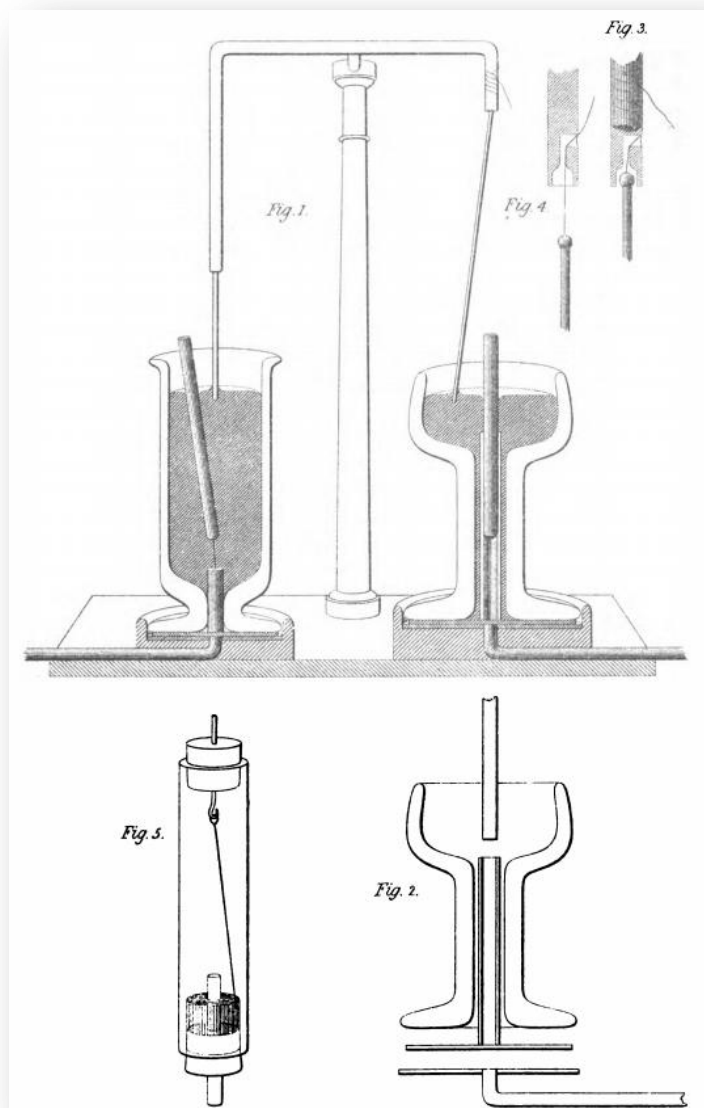
Στο δεξιό μέρος υπάρχει μικρό γυάλινο ποτήρι το οποίο έχει μακρόστενο διάτρητο λαιμό και πλατιά βάση. Η βάση του ποτηριού έχει κολλημένη πάνω της μικρή χάλκινη πλάκα, η οποία συνδέεται με σύρμα με τον μόνιμο μαγνήτη, που είναι

<sup>30</sup> Προσπάθησε να τη δείξει στον Wollaston, αλλά έλειπε εκτός πόλης. Έτσι ο Faraday πιστεύοντας στο ρητό: “*Δούλεψε – Τελείωσε – Δημοσίευσε*” προχώρησε στην αποστολή της εργασίας του. Στη συνέχεια ακολούθησαν τα γεγονότα των κατηγοριών του Davy, περί λογοκλοπής και ασέβειας προς τον Wollaston, τα οποία όμως δεν επηρέασαν σημαντικά την επιστημονική εξέλιξη του Faraday (14 σ. 63).

<sup>31</sup> Το θερμιδόμετρο του Hare αποτελείται από δύο φύλλα χαλκού και ψευδαργύρου, τα οποία χωρίζονται με πολλά μακρόστενα κομμάτια ξύλου και έχουν τυλιχτεί έτσι ώστε να σχηματίζουν κύλινδρο. Εικόνα του θερμιδομέτρου μπορείτε να δείτε [εδώ](#).



τοποθετημένος στην εσωτερική κοιλότητα του λαιμού του ποτηριού και μόλις εξέρχεται από το χείλος του. Η χάλκινη πλάκα της βάσης του ποτηριού έρχεται σε άμεση αγωγή με την χάλκινη πλάκα της ξύλινης βάσης της συσκευής (βλέπε Fig.2, στην Εικόνα 27). Το ποτήρι γεμίζεται με υδράργυρο σχεδόν μέχρι απάνω. Μια μεταλλική ράβδος κρέμεται από τον χάλκινο οριζόντιο βραχίονα κάθετα στο ποτήρι και λίγο μέσα στον υδράργυρο. Ο τρόπος κρέμασης (με μεταλλικό λεπτό σύρμα) φαίνεται αναλυτικά αρχικά στο Fig.4 και μετά στο Fig.3 στην Εικόνα 27. Στο κάτω άκρο της ράβδου είναι κολλημένος μικρός κύλινδρος (δεν φαίνεται στο σχήμα).



Εικόνα 27. Πίνακας IV, σελ. 311, Experimental Researches in Electricity, Vol.2, 1844

Στο αριστερό μέρος υπάρχει ένα άλλο γυάλινο ποτήρι γεμισμένο με υδράργυρο. Η βάση του ποτηριού έχει τρυπηθεί, ώστε από μέσα να περνάει λεπτό σύρμα. Το σύρμα συνδέεται με μικρή χάλκινη πλάκα κολλημένη στη βάση του ποτηριού και η άλλη άκρη του είναι συνδεδεμένη χαλαρά σε ραβδόμορφο μαγνήτη, ο οποίος (λόγω άνωσης) επιπλέει με το άκρο του μόλις έξω από την επιφάνεια. Και πάλι η χάλκινη πλάκα του ποτηριού είναι σε αγώγιμη επαφή με την αντίστοιχη πλάκα της ξύλινης βάσης. Σε αυτή την πλευρά ο χάλκινος οριζόντιος βραχίονας σχηματίζει Γ προς τα κάτω και καταλήγει σε χονδρό σταθερό σύρμα μέσα στον υδράργυρο.

Το κύκλωμα κλείνει όταν μια μπαταρία συνδεθεί με τον έναν πόλο στον μπρούτζινο κεντρικό ορθοστάτη και τον άλλο στο ένα ή και στα δύο (παράλληλα) σύρματα των πλακών της ξύλινης βάσης (41 pp. 147-150, 311).

Στην Fig.5 της Εικόνα 27 παρατηρούμε μια πιο μικρή και εύκολα μεταφερόμενη εκδοχή της συσκευής. Αποτελείται από έναν ανοικτό, και από τις δύο πλευρές, γυάλινο σωλήνα, ο οποίος κλείνεται με φελλούς πάνω – κάτω. Από τον κάτω φελλό περνάει ραβδόμορφος μαγνήτης και από τον πάνω ένα σύρμα από λευκόχρυσο, που καταλήγει σε γάντζο. Ένα άλλο σύρμα, με θηλιά στο άκρο του, κρέμεται από τον γάντζο και καταλήγει σε μικρή ποσότητα υδραργύρου που φτάνει μέχρι σχεδόν το άκρο του μαγνήτη. Η συσκευή λειτουργεί με μεγάλη ταχύτητα, ακόμα και με εφαρμογή μικρής τάσης στα δύο άκρα της. Αλλάζοντας την πολικότητα της μπαταρίας ή τον προσανατολισμό του μαγνήτη, αλλάζει η φορά περιστροφής του σύρματος (14 σ. 63) (41 σσ. 151, 311).



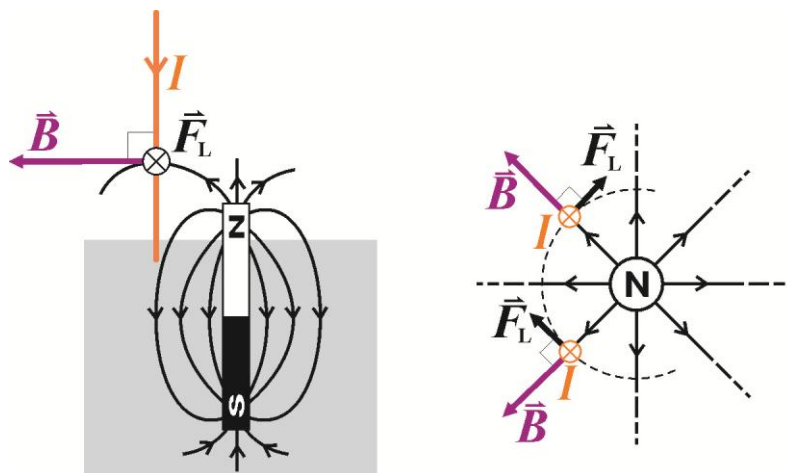
Εικόνα 28. Η Συσκευή σήμερα (μουσείο Faraday, Royal Institute)



## Η εξήγηση σήμερα

Ο μονοπολικός κινητήρας αποτέλεσε, όπως είπαμε, την πρώτη μηχανή που έφτιαξε ο άνθρωπος, η οποία έδινε κίνηση χρησιμοποιώντας την ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος και του μαγνητισμού. Ο ίδιος ο Faraday, δέκα χρόνια μετά, θα επιχειρήσει να δώσει μια εξήγηση που, εν πολλοίς, τη θεωρούμε σωστή, αν και χωρίς μαθηματική υποστήριξη. Ο αναγνώστης μπορεί να τη δει στην υποπαράγραφο “Παλιά πειράματα σε νέο φως” της παραγράφου “Η Δυναμογεννήτρια” του παρόντος κεφαλαίου.

Σε αυτό το σημείο θα δώσουμε την σημερινή εξήγηση του φαινομένου υπό το πρίσμα των δυνάμεων του ηλεκτρομαγνητισμού, που οριστικοποιήθηκαν αργότερα από τους Lorentz και Ampère. Στο αριστερό μέρος του Σχήμα 3 βλέπουμε τον μαγνήτη βυθισμένο μέσα στον υδράργυρο (γκρι χρώμα) και το μαγνητικό του πεδίο σχηματισμένο με δυναμικές γραμμές. Το σύρμα (πορτοκαλί χρώμα), που διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$  (συμβατική φορά), τέμνει μια δυναμική γραμμή του πεδίου. Η ένταση  $B$  (μωβ βέλος), ως εφαπτόμενη στη δυναμική γραμμή, είναι κάθετη στο ρεύμα στο σημείο τομής. Τότε εμφανίζεται δύναμη Laplace, κάθετη στο  $I$  και στο  $B$ , με φορά που δίνεται από τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού<sup>32</sup>. Τη σημειώνουμε με στο σύμβολο  $\otimes$  που δηλώνει ότι είναι κάθετη στο επίπεδο του χαρτιού με φορά προς τα μέσα.



Σχήμα 3. Η σημερινή εξήγηση του ηλεκτρομαγνητικού στροφέα

Η δύναμη αυτή τείνει να απομακρύνει το σύρμα εφαπτομενικά σε σχέση με τον νοητό κύκλο του δεξιού μέρους του σχήματος. Εκεί, επεμβαίνει και το βάρος του

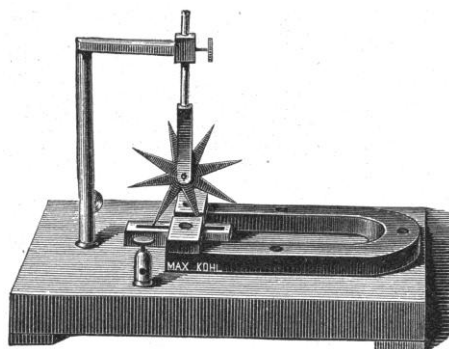
<sup>32</sup> Αντίχειρας: ρεύμα  $I$ , Δείκτης: μαγνητικό πεδίο  $B$ , μέσος: δύναμη Laplace  $F_L$  (με  $\vec{F}_L = I\vec{\ell} \times \vec{B}$ )

σύρματος<sup>33</sup>. Έτσι το σύρμα επανέρχεται στον νοητό κύκλο σε άλλο σημείο και εκεί μια νέα δύναμη Laplace, κάθετη στη νέα δυναμική γραμμή, το ωθεί στην επόμενη αντίστοιχη θέση, κ.ο.κ. Έτσι έχουμε μια συνεχή σταθερή κυκλική κίνηση του σύρματος.

## Οι Επίγονοι

Πριν προχωρήσουμε στα επόμενα πειράματα του Faraday για τον ηλεκτρομαγνητισμό, αξίζει να δούμε τι έγινε μετά το 1821 στο θέμα των κινητήρων. Η διάδοση των νέων για την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής κίνησης ήταν ταχύτατη και σε αυτό συνέβαλε και ο ίδιος ο Faraday μοιράζοντας αρκετές από τις νέες συσκευές του, όπως έχουμε πει.

Η πρώτη σημαντική εξέλιξη ήταν ο κινητήρας που κατασκεύασε ο Peter Barlow (1776 – 1862) το 1823, όπου ένας τροχός σε σχήμα άστρου περιστρέφεται ανάμεσα στους πόλους ενός πεταλοειδούς μαγνήτη, εν μέρει, βυθισμένος σε υδράργυρο<sup>34</sup>. Το κύκλωμα κλείνει με μια μπαταρία συνδεδεμένη στον μεταλλικό ορθοστάτη και στον υδράργυρο (42 σ. 38).



Εικόνα 29. ο τροχός του Barlow

Μια λεπτομέρεια που πρέπει να ξεκαθαρίσουμε είναι γιατί ο κινητήρας του Faraday ονομάζεται *μονοπολικός*. Η ονομασία οφείλεται στο ότι το ρεύμα ακολουθεί μόνο μια φορά, δηλαδή πάντα από τον έναν πόλο της μπαταρίας στον άλλο. Και εδώ είναι που έχουμε την επόμενη ιστορική εξέλιξη στο θέμα των κινητήρων. Το 1827 ο Ούγγρος φυσικός Ányos Jedlik (1800 – 1895) εφευρίσκει τον εναλλάκτη, μια απλή συσκευή, που αντέστρεφε το ρεύμα σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο χωρίς να μπερδεύονται τα καλώδιά του. Έτσι, κατασκευάζει τον πρώτο κινητήρα χωρίς σταθερό μαγνήτη. Το

<sup>33</sup> ...μιας και στην πραγματικότητα δεν είναι κατακόρυφο, αλλά κεκλιμένο, όπως έχουμε δει στο Σχήμα 2 και στην Εικόνα 27

<sup>34</sup> Ωραία video με σημερινές ανακατασκευές του “τροχού του Barlow” μπορείτε να δείτε [εδώ](#) και [εδώ](#)

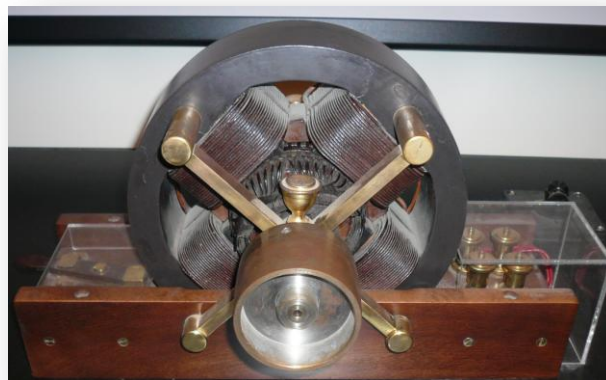


1828 παρουσιάζει τον *διπολικό κινητήρα* (όπου το ρεύμα άλλαζε φορά κάθε μισή στροφή), στον οποίο ο στάτορας και ο ρότορας ήταν πηνία<sup>35</sup>. Ο εναλλάκτης ήταν το τρίτο βασικό συστατικό αυτού του κινητήρα (43 p. 36). Σχεδόν όλοι οι σύγχρονοι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο.



Εικόνα 30. Ο διπολικός κινητήρας του A. Jedlik

Μετά από αυτή την ανακάλυψη, η ανάπτυξη και εξέλιξη του ηλεκτρικού κινητήρα ακολουθεί μια αυτόνομη πορεία, που όμως είναι πάντα συνδεδεμένη με την εξέλιξη της γεννήτριας, η οποία εφευρίσκεται (και αυτή) από τον Faraday το 1831. Επόμενος σημαντικός σταθμός στην ιστορία του κινητήρα είναι ο *επαγωγικός κινητήρας* εναλλασσόμενου ρεύματος, που ανακάλυψε ο Nikola Tesla (1856 – 1943) το 1888, και αποτελεί το ευρύτερα διαδεδομένο κινητήρα στη σημερινή εποχή (42 σ. 41).



Εικόνα 31. Ο επαγωγικός κινητήρας του N. Tesla

<sup>35</sup> Αυτός ο πρώτος κινητήρας του Jedlik, υπάρχει και λειτουργεί ακόμα (!). Μπορείτε να τον δείτε [εδώ](#) στο 01'50''.





## Ο Δακτύλιος

Το 1831, δύο χρόνια μετά τον θάνατο του Davy, ο Faraday καταπιάνεται και πάλι με τα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού. Με μια σειρά καλοσχεδιασμένων πειραμάτων θα καταλήξει στην ανακάλυψη του φαινομένου της επαγωγής και θα οδηγηθεί τελικά στην κατασκευή της γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος. Αλλά ας πάρουμε τα πράγματα με τη σειρά...

### Πριν τον Δακτύλιο

Στα τέλη του Αυγούστου, εκτελεί δύο πολύ διαφορετικά πειράματα, με τα οποία αρχίζει να συνειδητοποιεί τον μηχανισμό πίσω από το φαινόμενο. Αρχικά, τυλίγει 26 ft χάλκινο σύρμα, διαμέτρου 1/20 inc, γύρω από έναν ξύλινο κύλινδρο. Επειδή την εποχή εκείνη δεν υπήρχε τρόπος να μονώσει κανείς ένα σύρμα<sup>36</sup>, ο Faraday απομονώνει την κάθε σπείρα από την διπλανή της τυλίγοντας ανάμεσα τους λεπτό νήμα. Φτιάχνει έτσι ένα πηνίο. Καλύπτει το πηνίο αυτό με μουσελίνα<sup>37</sup> και τυλίγει από πάνω του ένα δεύτερο χάλκινο σύρμα (και πάλι με νήμα ανάμεσα στις σπείρες) δημιουργώντας ένα δεύτερο πηνίο ίδιας φοράς περιέλιξης. Επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία άλλες δέκα φορές δημιουργώντας τελικά 12 πηνία, το ένα πάνω από το άλλο. Στη συνέχεια ενώνει σε σειρά το 1°, 3°, 5°, 7°, 9° και 11° δημιουργώντας ένα μεγάλο πηνίο με μήκος περίπου 155 ft και κάνει το ίδιο με το 2°, 4°, 6°, 8° και 10° πηνίο. Με την κατασκευή αυτή καταφέρνει να έχει δύο πολύ μεγάλα πηνία πλήρως απομονωμένα ηλεκτρικά το ένα από το άλλο και ουσιαστικά το ένα μέσα στο άλλο. Στο ένα πηνίο συνδέει γαλβανόμετρο ενώ το άλλο το ενώνει με (καλά φορτισμένη) βολταϊκή μπαταρία. Κλείνει το κύκλωμα αλλά δεν παρατηρεί καμία ένδειξη στο γαλβανόμετρο: «...ούτε η παραμικρή λογική απόκλιση της βελόνας του γαλβανομέτρου δεν παρατηρήθηκε» αναφέρει στην εργασία του (17 σ. 126). Όμως, συνεχίζει τις προσπάθειες.

Ξαναφτιάχνει την ίδια συσκευή με δύο διαφορετικά σύρματα, ένα 214 ft από σίδηρο, και ένα 208 ft από χαλκό. Και πάλι δεν παρατηρεί καμία απόκλιση στο γαλβανόμετρο, εκτελώντας μάλιστα το πείραμα και με την μπαταρία στο χάλκινο σύρμα και το γαλβανόμετρο στο σιδερένιο και το αντίθετο. Εκτελεί και άλλα

<sup>36</sup> Αν και ο Henry, στην Αμερική, το έκανε με βερνίκι, για να κατασκευάσει ηλεκτρομαγνήτες

<sup>37</sup> Μουσελίνα: χοντρό βαμβακερό ύφασμα, γνωστό την εποχή εκείνη ως τσίτι (calico). Μάλιστα ως τσίτι, το αναφέρει ο Faraday στην εργασία του



πειράματα τέτοιου είδους, με άλλα υλικά και αριθμό σπειρών, αλλά το αποτέλεσμα είναι πάντα το ίδιο: τίποτα. Τελικά, όμως, τα καταφέρνει. Με 203 ft χάλκινο σύρμα τυλιγμένο σε ένα «μεγάλο κομμάτι ξύλο» και ένα δεύτερο, ίδιου μήκους, τυλιγμένο “μέσα” στο πρώτο (όπως στα προηγούμενα πειράματα), ηλεκτρικά μονωμένα τόσο ανάμεσα στις σπείρες όσο και μεταξύ τους, παρατηρεί απόκλιση της βελόνας του γαλβανομέτρου. Πως το κατάφερε; Απλά άλλαξε την μπαταρία με μια πολύ μεγαλύτερη<sup>38</sup>... τόσο απλό!

Αναφέρει αναλυτικά ότι παρατηρεί απόκλιση της βελόνας του γαλβανομέτρου μόνο όταν κλείνει το κύκλωμα ή όταν το ανοίγει και όχι όταν το πηνίο που συνδέεται στην μπαταρία είναι σε συνεχή λειτουργία. Δίνει μάλιστα και μια επιπλέον πληροφορία: η μπαταρία συνεχίζει να είναι καλά φορτισμένη και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πηνίου (όταν η βελόνα έχει επανέλθει στην αρχική της θέση) και αυτό φαίνεται από την θερμότητα που συνεχίζει να παράγεται και από την μπαταρία και από το σύρμα του πηνίου. Άρα, η βελόνα σταματά να εκτρέπεται από άλλη αιτία και όχι από τυχούσα δυσλειτουργία της μπαταρίας. Για να βεβαιωθεί πλήρως για την ακεραιότητα της μπαταρίας, μετά το πείραμα, τη δοκιμάζει με ράβδους άνθρακα και βλέπει ότι παράγεται το γνωστό βολταϊκό τόξο.

Επαναλαμβάνει τα πειράματα με μια ακόμα μεγαλύτερη μπαταρία και τα αρχικά πηνία (πάνω στον ξύλινο κύλινδρο) και βλέπει το ίδιο φαινόμενο. Παρατηρεί ότι πάντα η βελόνα εκτρέπεται στιγμιαία προς μια κατεύθυνση, όταν κλείνει το κύκλωμα, και προς την άλλη, όταν το ανοίγει. Επίσης, παρατηρεί αντιστροφή των αποκλίσεων, όταν οι πόλοι της μπαταρίας συνδέονται ανάποδα (17 σ. 127).

Αρχίζει να καταλαβαίνει τι γίνεται. Η αύξηση (από το μηδέν) του ρεύματος, όταν συνδέει την μπαταρία στο ένα πηνίο, έδινε ρεύμα στο άλλο πηνίο. Αναφέρεται σε «κύματα ηλεκτρισμού» που πηγαίνουν από το ένα πηνίο στο άλλο. Αντίθετα, η μείωση του ρεύματος (από την τιμή που είχε, στο μηδέν) κατά την αποσύνδεση της μπαταρίας δίνει ρεύμα αντίθετης φοράς στο πηνίο και η βελόνα εκτρέπεται αντίθετα (2). Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είχε γεννηθεί!

Το δεύτερο πείραμα που κάνει, λίγες μέρες αργότερα, είναι τελείως διαφορετικό στην φιλοσοφία του. Ωστόσο θα δείξει το ίδιο φαινόμενο, της επαγωγής, από μια άλλη οπτική γωνία. Τεντώνει, λοιπόν, ένα κομμάτι σύρμα «αρκετών ποδών» πάνω σε

---

<sup>38</sup> Για την μπαταρία που χρησιμοποιούσε μέχρι τότε αναφέρει: «10 ζεύγη τετραγωνικών πλακών, 4 inc με διπλό χαλκό», ενώ για την μπαταρία που χρησιμοποιεί στο τελευταίο, επιτυχημένο, πείραμα αναφέρει: «100 ζεύγη τετραγωνικών πλακών, 4 inc με διπλό χαλκό» (17 σ. 127).



μια σανίδα σε σχήμα W. Κάνει το ίδιο με ένα δεύτερο σύρμα, το οποίο το φτιάχνει πανομοιότυπο με το πρώτο. Τοποθετεί το ένα πάνω στο άλλο, έτσι ώστε να ταυτίζονται τα σχήματά τους και τα διαχωρίζει με ένα χοντρό κομμάτι χαρτί. Συνδέει το ένα με μπαταρία και το άλλο με γαλβανόμετρο. Όταν αρχίζει να μετακινεί το ένα σε σχέση με το άλλο, το γαλβανόμετρο καταγράφει ρεύμα. Και η καταγραφή γίνεται ανεξάρτητα από το ποιο κινείται σε σχέση με ποιο. Όταν μάλιστα παλινδρομεί το ένα καλώδιο προσπαθώντας να συντονιστεί με την απόκλιση της βελόνας, αυτή ταλαντώνεται σε μέγιστο πλάτος. Όταν σταματάει τις μετακινήσεις, η βελόνα μετά από λίγο ηρεμεί, στη αρχική της θέση. Συνεχίζει τις παρατηρήσεις του αναφέροντας ένα ακόμα σημαντικό δεδομένο: «καθώς τα σύρματα ζύγωναν, το επαγόμενο ρεύμα είχε αντίθετη φορά από το επάγων. Όταν, όμως, τα σύρματα απομακρύνονταν το επαγόμενο ρεύμα είχε ίδια φορά με το επάγων» (17 σ. 129). Στην επόμενη σελίδα της εργασίας του αναφέρει: «βρέθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το επαγόμενο ρεύμα που παράγονταν από την αύξηση του επάγοντος ρεύματος, ήταν σε αντίθετη κατεύθυνση με το τελευταίο, ενώ το ρεύμα που παράγονταν από την παύση του επάγοντος ρεύματος ήταν στην ίδια κατεύθυνση». Βλέπουμε, στις δύο αυτές φράσεις, την διατύπωση αυτού που λίγα χρόνια αργότερα θα καταγραφεί ως ο κανόνας του Lenz και θα εμφανιστεί ως το περιβόητο (μεταξύ των μαθητών μας...) “μείον” στον νόμο της επαγωγής του Faraday<sup>39</sup>.

---

<sup>39</sup> Ο Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804 – 1865) υπήρξε ρώσος φυσικός που το 1833 διατυπώνει τον “κανόνα του Lenz”, σύμφωνα με τον οποίο “το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά ώστε να αντιστέκεται στην αιτία που το προκαλεί” (δημιουργώντας αντίθετα με αυτήν αποτελέσματα). Πρόκειται, όπως θα δούμε πολλές φορές από εδώ και πέρα, για μαθηματικοποίηση των συμπερασμάτων του Faraday από τα πειράματα που έκανε και δημοσίευσε στο “*Experimental Researches in Electricity*”. Το πρόσημο “-” στον τύπο – νόμο της επαγωγής του Faraday ( $E_{επ.} = -d\Phi/dt$ ) είναι απόρροια του κανόνα του Lenz. Προς τιμήν του, δόθηκε το σύμβολο L στον συντελεστή αυτεπαγωγής των πηνίων (69).

## 29<sup>η</sup> Αυγούστου, 1831

Εκείνη την ημέρα ο Faraday καταγράφει στο ημερολόγιό του τα κατασκευαστικά στοιχεία του πειράματος του δακτυλίου, για το οποίο έμεινε (περισσότερο από κάθε άλλο του πείραμα) στην ιστορία. Ίσως σε αυτό να συνέβαλε και η απεικόνισή του σε δύο αγάλματα<sup>40</sup>, να κρατάει τον δακτύλιο. Ας δούμε λοιπόν τις πέντε παρατηρήσεις που καταγράφονται στο χειρόγραφο (44):

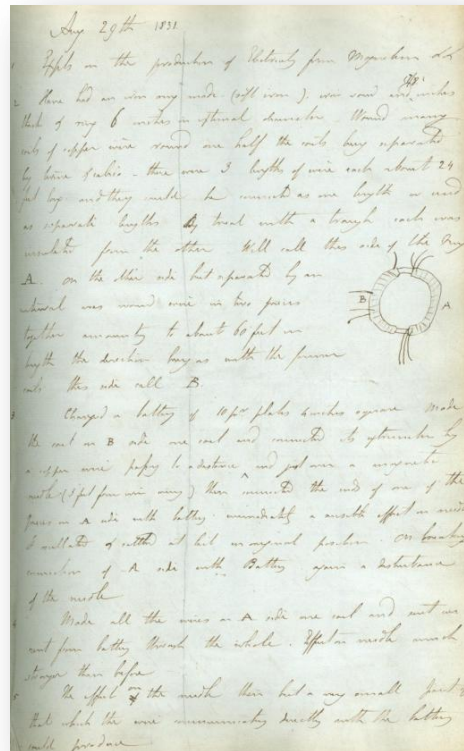
1. Πειράματα για την παραγωγή Ηλεκτρισμού από Μαγνητισμό κλπ κλπ
2. Μου φτιάξανε ένα σιδερένιο δακτύλιο (μαλακός σίδηρος), στρογγυλό και με πάχος 7/8 inc και εξωτερική διάμετρο 6 inc. Τύλιξα πολλές σπείρες από χάλκινο σύρμα γύρω από τον μισό, οι σπείρες διαχωρίζονται με νήμα και τσίτι – υπάρχουν 3 μήκη σύρματος το καθένα 24 ft σε μήκος και μπορούν να συνδέονται σαν ένα μήκος ή να χρησιμοποιούνται ως ξεχωριστά μήκη. Με δοκιμή σε αύλακα το καθένα είναι μονωμένο από τα άλλα. Θα ονομάσω αυτή την πλευρά του δακτυλίου A. Από την άλλη πλευρά αλλά διαχωρισμένο από ένα διάστημα είναι τυλιγμένο σύρμα σε δύο κομμάτια που μαζί είναι περίπου 60 ft σε μήκος, η κατεύθυνση είναι όπως και στις προηγούμενες σπείρες · αυτή τη πλευρά θα την ονομάσω B.
3. Φορτισμένη μπαταρία από 10 ζεύγη τετραγωνικών πλακών 4 inc. Κάνω τα πηνία στην πλευρά B ένα πηνίο και συνδέω τα άκρα του με χάλκινο σύρμα που περνάει σε απόσταση λίγο πάνω από μια μαγνητική βελόνα (3 ft από τον δακτύλιο). Τότε συνδέω τις άκρες ενός από τα τμήματα στην πλευρά A με την μπαταρία · αμέσως μια λογική επίδραση στη βελόνα. Ταλαντώθηκε και τελικά σταθεροποιήθηκε στην αρχική της θέση. Κατά την παύση της σύνδεσης της πλευράς A με την Μπαταρία πάλι διαταραχή της βελόνας.
4. Έκανα όλα τα σύρματα στην πλευρά A ένα πηνίο και έστειλα ρεύμα από την μπαταρία μέσα από αυτό. Η επίδραση στη βελόνα πολύ πιο ισχυρή από πριν.
5. Μπορεί να παραχθεί επίδραση στη βελόνα στη συνέχεια αλλά κατά πολύ μικρό μέρος όταν το σύρμα επικοινωνεί απ' ευθείας με την μπαταρία.

Σύμφωνα με το Μουσείο Faraday στο Βασιλικό Ινστιτούτο η κατασκευή πιθανώς να του πήρε περισσότερο από μια μέρα (εκτιμάται ότι μια σημερινή ανακατασκευή

<sup>40</sup> Το [ένα](#) στο Savoy Palace και το [άλλο](#) μέσα στο Βασιλικό Ινστιτούτο



της διάταξης θα χρειαζόταν περίπου δέκα εργάσιμες μέρες). Το ύφος γραφής δείχνει ότι αν και προσεκτικές, οι καταγραφές γίνονταν επί τόπου. Δηλαδή βλέπουμε την ιστορία γραμμένη την ημέρα που δημιουργήθηκε!



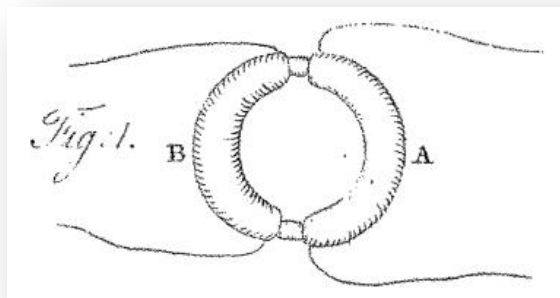
Εικόνα 32. Από το σημειωματάριο του Faraday (29-8-1831)

Στο επίσημο κείμενο<sup>41</sup>, βέβαια, λίγους μήνες μετά, ο Faraday είναι πολύ πιο ακριβής και αναλυτικός στις περιγραφές του, αν και η ουσία είναι πρακτικά η ίδια με την καταχώρηση του σημειωματάριού του, όπως την είδαμε πριν λίγο.

Γράφει: [αμέσως μετά τη σύνδεση της μπαταρίας] «το γαλβανόμετρο αμέσως επηρεάστηκε και σε βαθμό πολύ μεγαλύτερο απ’ ό,τι είχε μέχρι τώρα περιγραφεί». Αντίστροφη, εξ ίσου ισχυρή απόκλιση, παρατηρεί και με την αποσύνδεση της μπαταρίας. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η επαγωγή ρεύματος στο πηνίο B συμβαίνει κάθε φορά που μεταβάλλεται (αυξάνεται ή μειώνεται) το ρεύμα στο πηνίο A. Γράφει: «η ώθηση στο γαλβανόμετρο, όταν ολοκληρώνονταν ή διακόπτονταν η σύνδεση [με την μπαταρία], ήταν τόσο μεγάλη που η βελόνα έφερνε 4 ή 5 γύρους μέχρι ο αέρας και ο

<sup>41</sup> στη δημοσίευση *Experimental Researches in Electricity*, Ιανουάριος του 1832

γήινος μαγνητισμός να μειώσουν την κίνησή της, σε απλές ταλαντώσεις» (17 σσ. 131-132).



Εικόνα 33. Το "επίσημο" σχέδιο του Δακτυλίου, από τη δημοσίευση του 1832

Κάνει και σε αυτό το πείραμα παραλλαγές και μελετάει την φορά του επαγωγικού ρεύματος μέσω της φοράς εκτροπής της βελόνας του γαλβανόμετρου. Παρατηρεί ότι, αν αλλάξει την πολικότητα στη μπαταρία, οι εκτροπές αντιστρέφονται. Επιπρόσθετα, παρατηρεί ότι το ρεύμα στο πηνίο B έχει πάντα αντίθετη φορά από το ρεύμα στο A, όταν η μπαταρία συνδέεται, ενώ, όταν αποσυνδέεται, το ρεύμα στο B είναι πάντα ομόρροπο με αυτό του πηνίου A. Μην ξεχνάμε ότι είχε περιελίξει τα πηνία A και B με την ίδια φορά. Έχουμε και εδώ εμφάνιση του κανόνα του Lenz. Αναφέρει, επίσης, ότι καμία επίδραση δεν παρατηρήθηκε όταν το ρεύμα στο πηνίο A έρρεε συνεχώς (παρά μόνο στην αποκατάσταση και στην παύση του κυκλώματος) και επίσης καμία επίδραση όταν διακόπτονταν το κύκλωμα στο πηνίο B με το γαλβανόμετρο. Και καταδεικνύει, στο σημείο αυτό, ότι αυτές οι ιδιότητες είναι κοινές σε όλα τα πειράματα αυτού του είδους, όπως και σε αυτά με τους κοινούς μαγνήτες.

Είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι ο Faraday δεν μένει σε αυτά (τα σπουδαία) που βρίσκει αλλά πάντα πάει τα πειράματά του ένα βήμα παραπέρα. Η φράση που αναφέραμε πριν (με την βελόνα να «φέρνει 4-5 γύρους») αφορά την σύνδεση του δακτυλίου με την άλλη, τη μεγάλη, μπαταρία. Με αυτή τη μπαταρία κάνει και κάτι ακόμα. Αντί για γαλβανόμετρο συνδέει στα άκρα του πηνίου B δύο ράβδους άνθρακα και παρατηρεί μικρό βολταϊκό τόξο (spark) ανάμεσά τους κατά την σύνδεση ή την αποσύνδεση της μπαταρίας. Και πάλι δεν υπάρχει τίποτα κατά την ομαλή ροή ρεύματος στο A. Λέει πως η συσκευή δεν μπορούσε να αναφλέξει ένα λεπτό νήμα λευκόχρυσου αλλά κάνει τη λογική υπόθεση ότι αυτό θα μπορούσε να συμβεί, αν η μπαταρία ήταν ακόμα μεγαλύτερη ή το σύστημα των σπειρών ήταν διαφορετικό.

Συνεχίζοντας τα "επιπλέον" πειράματα και προσπαθώντας να αποδείξει ότι το επαγωγικό φαινόμενο στο πηνίο B δεν ήταν μόνιμο (παρά μόνο όταν άνοιγε ή έκλεινε



το κύκλωμα πηνίο *A* – μπαταρία) κάνει ένα ακόμα πείραμα με τον δακτύλιο: διοχετεύει ένα ασθενές βολταϊκό<sup>42</sup> ρεύμα στο κύκλωμα πηνίο *B* – γαλβανόμετρο, ώστε να πετύχει μόνιμη εκτροπή της βελόνας κατά 30° ή 40°. Στη συνέχεια, συνδέει τη μπαταρία στο πηνίο *A* και το γαλβανόμετρο εκτρέπεται στιγμιαία. Μετά από λίγο, αφού έχει αποκατασταθεί σταθερό ρεύμα στο πηνίο *A*, η βελόνα επανέρχεται στην αρχική της εκτροπή των 30° ή 40°. Με την αποσύνδεση της μπαταρίας έχουμε τα ίδια, με αντίθετη φυσικά εκτροπή της βελόνας και στη συνέχεια αποκατάσταση της αρχικής απόκλισης λόγω του ασθενούς ρεύματος στο *B* (17 p. 132).

Στη συνέχεια, αντικαθιστά τον σιδερένιο δακτύλιο με χάλκινο και δεν παρατηρεί κανένα από τα προηγούμενα φαινόμενα ή ίσως κάποια πολύ ασθενή. Επίσης κάνει τα ίδια χωρίς καθόλου δακτύλιο και πάλι δεν παρατηρεί φαινόμενα. Είναι πλέον φανερό ότι ο σίδηρος κάνει τη διαφορά, δημιουργώντας έναν πολύ ισχυρότερο ηλεκτρομαγνήτη σε σχέση με τον μη μαγνητικό χαλκό. Το επόμενο βήμα ήταν να σκεφτεί τον λόγο που συνέβαινε αυτό το φαινόμενο. Φαντάστηκε, λοιπόν, ότι το επαγόμενο ρεύμα έπρεπε να είχε βαθύτερη αιτία που σχετιζόνταν με τον σχηματισμό του μαγνήτη (κλείνοντας το κύκλωμα) και όχι απλά με τη δημιουργία ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο. Έτσι, προχώρησε σε μια νέα σειρά πειραμάτων, αυτή τη φορά με σωληνοειδή πηνία (2).



Εικόνα 34. Ο Δακτύλιος Σήμερα (Μουσείο Faraday, Royal Institute)

<sup>42</sup> Πάντα ο Faraday όταν αναφερόταν σε βολταϊκό ρεύμα, εννοούσε ρεύμα από μπαταρία

## Μετά τον Δακτύλιο

Ο Faraday συνέχισε τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, μετά τον *δακτύλιο*, στην προσπάθειά του να σιγουρευτεί για το φαινόμενο και τις προεκτάσεις του. Εκτελεί μια σειρά από πειράματα, τρία από τα οποία είναι τα σπουδαιότερα, και μάλιστα, μετά το τρίτο του γεννάται η ιδέα της κατασκευής της *δυναμογεννήτριας* (5).

Στο πρώτο του πείραμα χρησιμοποιεί ένα χαρτονένιο κοίλο κύλινδρο. Τυλίγει γύρω του οκτώ σειρές από χάλκινο σύρμα με συνολικό μήκος 220 ft. Συνδέει τις τέσσερις σε σειρά φτιάχνοντας ένα μεγάλο πηνίο, το οποίο ενώνει σε γαλβανόμετρο, και τις άλλες τέσσερις (και πάλι συνδεδεμένες σε σειρά) τις ενώνει στην (μεγάλη) μπαταρία. Οι μονώσεις των συρμάτων γίνονται πάντα με τους τρόπους που έχουμε προαναφέρει (λεπτό νήμα ανάμεσα στις σπείρες και τσίτι ανάμεσα στα πηνία). Όταν κλείνει το κύκλωμα, παρατηρεί μια οριακά αισθητή απόκλιση της βελόνας του γαλβανόμετρου. Μέχρι εδώ θα έλεγε κανείς ότι επαναλαμβάνει το πρώτο –πριν τον *δακτύλιο*– πείραμα, με τη διαφορά πως αντί για ξύλινο κύλινδρο χρησιμοποιεί κοίλο κύλινδρο από χαρτόνι. Εδώ, όμως, είναι που κάνει τη διαφορά. Συνδυάζει τις γνώσεις του πρώτου αυτού πειράματος με την εμπειρία του *δακτυλίου*. Και πάει το πείραμα ένα βήμα παραπέρα...

Εισάγει μέσα στην κοιλότητα του χαρτονιού έναν κύλινδρο από μαλακό σίδηρο με πάχος 7/8 inc και μήκος 12 inc. Το επαγόμενο ρεύμα είναι τώρα πολύ μεγαλύτερο και η επίδρασή του στο γαλβανόμετρο πολύ ισχυρότερη. Όλα τα φαινόμενα που περιγράφονται στα προηγούμενα πειράματα (σχετικά με τον τρόπο απόκλισης της μαγνητικής βελόνας) ισχύουν και εδώ. Η ένταση των φαινομένων μετά την εισαγωγή του “*πυρήνα*” μαλακού σιδήρου είναι αρκετά ισχυρή, όχι όμως τόσο ισχυρή όσο στα πειράματα με τον *δακτύλιο*. Πριν προχωρήσει στο επόμενο πείραμα, κάνει μια ακόμα δοκιμή. Αντικαθιστά τον σιδερένιο κύλινδρο με έναν πανομοιότυπο χάλκινο κύλινδρο και δεν παρατηρεί κανένα φαινόμενο επαγωγής, πέρα από αυτά που παρατηρούσε στην αρχική εκδοχή με τον χαρτονένιο κύλινδρο χωρίς τον “*πυρήνα*”. Άρα, ο σίδηρος (όπως και στον *δακτύλιο*) έκανε τη διαφορά (17 σ. 133).

Στο δεύτερο πείραμα όλες οι σειρές σπειρών του προηγούμενου ενώνονται σε σειρά φτιάχνοντας ένα μεγάλο πηνίο γύρω από τον χαρτονένιο κύλινδρο. Συνδέει το πηνίο με χάλκινα σύρματα, μήκους 5 ft, με το γαλβανόμετρο, ώστε να αποφύγει τυχόν ανεπιθύμητες, τυχαίες παρεμβολές στο γαλβανόμετρο, μιας και τώρα θα χρησιμοποιήσει μαγνήτες. Εισάγει στην κοιλότητα του χαρτονιού, έναν κύλινδρο από μαλακό σίδηρο. Τοποθετεί δύο ραβδόμορφους μαγνήτες, μήκους 24 inc, έτσι ώστε



αντίθετοι πόλοι να ακουμπούν τις βάσεις του σιδερένιου κυλίνδρου. Τα άλλα δύο άκρα των μαγνητών ενώνονται «ώστε να μοιάζουν με πεταλοειδή μαγνήτη» (βλέπε Εικόνα 35).



Εικόνα 35. Αριστερά: Αρχικό σχέδιο του Faraday από το *Experimental Researches in Electricity* (1832). Δεξιά: σύγχρονο επεξηγηματικό σχέδιο.

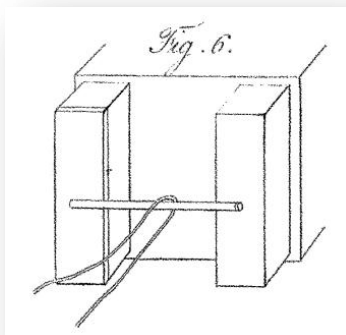
Η επαφή των μαγνητών με τη ράβδο την μετατρέπει σε παροδικό μαγνήτη επάγοντας ρεύμα στο πηνίο, το οποίο φυσικά ανιχνεύεται με απόκλιση της βελόνας του γαλβανόμετρου. Η βελόνα επανέρχεται στην αρχική της θέση, αφού αποκατασταθεί η επαφή των μαγνητών στον σιδερένιο κύλινδρο. Επομένως, το επαγωγικό φαινόμενο εμφανίζεται μόνο κατά το χρονικό διάστημα της μετατροπής του σιδερένιου κυλίνδρου σε μαγνήτη και στη συνέχεια χάνεται. Επανεμφανίζεται κατά την απομάκρυνση των μαγνητών από τον κύλινδρο, όπου η βελόνα εκτρέπεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, και στη συνέχεια χάνεται και πάλι. Και οι δύο εκτροπές της βελόνας αντιστρέφονται, όταν αντιστραφούν οι πόλοι των μαγνητών, που έρχονται σε επαφή με τα άκρα του σιδερένιου κυλίνδρου.

Στο σημείο αυτό ο Faraday δίνει μια ακόμη καταπληκτική λεπτομέρεια για το πείραμά του. Αναφέρει πως η εκτροπή της βελόνας του γαλβανόμετρου υποδεικνύει ότι το ρεύμα που επάγεται έχει τέτοια φορά που μετατρέπει το πηνίο του χαρτονένιου κυλίνδρου σε μαγνήτη, ίδιας πολικότητας με τους πόλους των μαγνητών, όταν το ακουμπάνε (άρα υπάρχει άπωση), και αντίθετης πολικότητας (άρα έλξη), όταν οι μαγνήτες απομακρύνονται. Άλλη μια εφαρμογή του κανόνα του Lenz! (17 σ. 133).

Κάνει μια ακόμη παραλλαγή του πειράματος, αυτή τη φορά αλλάζοντας τους μαγνήτες και το πηνίο ως εξής: χρησιμοποιεί τον μεγάλο μαγνήτη του Βασιλικού Ινστιτούτου (θα μιλήσουμε γι' αυτόν αργότερα) και τυλίγει μόλις μισή σπείρα σύρματος (βλέπε Εικόνα 36) γύρω από μια ράβδο μαλακού σιδήρου. Αν και μόνο μισή σπείρα, μετά την αποκατάσταση ή την διακοπή της μαγνητικής επαφής, η

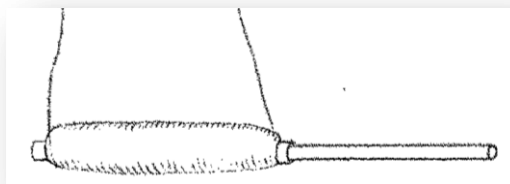
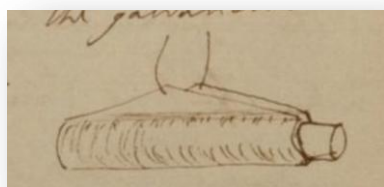


απόκλιση του γαλβανόμετρου ήταν σημαντική. Αυτό, φυσικά, οφείλονταν την τεράστια ισχύ του μαγνήτη (17 σ. 136).



Εικόνα 36. Μισή σπείρα στον "μεγάλο" μαγνήτη (από την δημοσίευση του 1832)

Στις 17 και 18 Οκτωβρίου του 1831 ο Faraday προχωράει στο τρίτο σημαντικό πείραμά του μετά τον δακτύλιο. Σε συνέχεια με τα δύο προηγούμενα κάνει τα εξής: χρησιμοποιεί τον ίδιο χαρτονένιο κοίλο κύλινδρο και όλες τις σπείρες ενωμένες, σε σειρά, σε ένα μεγάλο πηνίο συνδεδεμένο με το γαλβανόμετρο σε απόσταση και πάλι 5 ft. Αντικαθιστά, όμως, τώρα τον σιδερένιο κύλινδρο (πυρήνα) με έναν κυλινδρικό μαγνήτη πάχους 3/4 inc και μήκους 8,5 inc.



Εικόνα 37. Αριστερά: αρχικό σχήμα από το ημερολόγιό του (17-10-1831)  
Δεξιά: Επίσημο σχέδιο από το Experimental Researches in Electricity (1832)

Μετακινώντας απότομα τον μαγνήτη προς το πηνίο παρατηρεί εκτροπή της βελόνας του γαλβανόμετρου προς μια κατεύθυνση. Όταν ο μαγνήτης ακινητοποιείται μέσα στο πηνίο, η βελόνα επανέρχεται στον αρχικό της προσανατολισμό. Αντίθετη εκτροπή της βελόνας βλέπει, όταν απομακρύνει απότομα τον μαγνήτη. Και πάλι έχουμε επαναπροσανατολισμό της βελόνας στην αρχική της διεύθυνση (βορράς – νότος), όταν ολοκληρωθεί και σταματήσει η έξοδος του μαγνήτη.

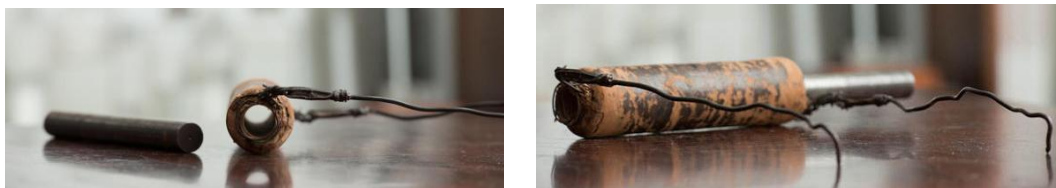
Τα φαινόμενα δεν είναι και τόσο έντονα, όμως, παλινδρομώντας τον μαγνήτη “μέσα – έξω” καταφέρνει να κάνει την βελόνα να ταλαντώνεται σε φάση με την κίνηση του μαγνήτη και σε τόξο 180° ή και παραπάνω. Επαναλαμβάνει τα πειράματα με ακίνητο μαγνήτη και κινούμενο πηνίο και παρατηρεί τα ίδια ακριβώς



αποτελέσματα. Επομένως, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα φαινόμενα οφείλονται στην σχετική κίνηση πηνίου – μαγνήτη και όχι στην απόλυτη κίνηση του ενός από τα δύο (2) (5).

Επειδή ο χαρτονένιος κύλινδρος ήταν ανοιχτός και από τις δύο πλευρές, ο μαγνήτης μπορούσε να κινηθεί σε ολοκληρωμένη διαδρομή μέχρι να βγει από την άλλη. Έτσι, ο Faraday παρατηρεί ακόμη μια έκφανση του *κανόνα του Lenz*: όταν ο μαγνήτης μπει μέσα στον κύλινδρο, η βελόνα εκτρέπεται προς τη μία πλευρά. Στη συνέχεια είτε τραβηχτεί προς τα έξω είτε σπρωχτεί, ώστε να βγει από την άλλη, η βελόνα εκτρέπεται προς την αντίθετη πλευρά. Μάλιστα αναφέρει ότι, αν ο μαγνήτης ωθηθεί σε μια συνεχόμενη κίνηση, διαμέσου του χαρτονένιου κυλίνδρου η βελόνα εκτρέπεται αρχικά προς μια κατεύθυνση, στη συνέχεια «ζαφνικά σταματά» και τελικά εκτρέπεται από την άλλη. Και πάλι αναφέρεται στη φορά του επαγόμενου ρεύματος, όπως και στα προηγούμενα πειράματα (17 p. 134).

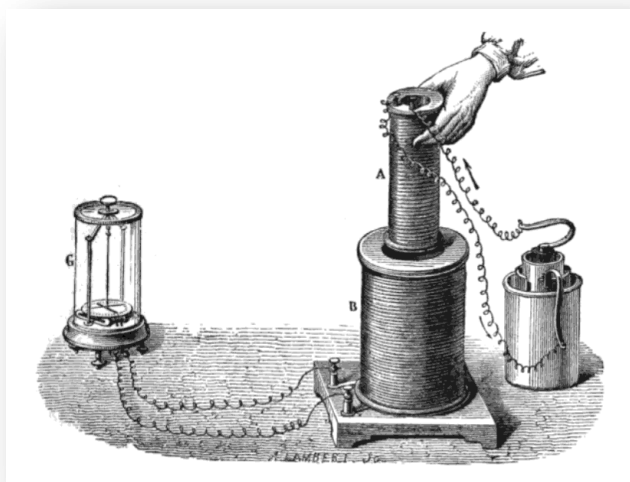
Η συσκευή που περιγράφεται εδώ είναι ουσιαστικά η πρώτη *γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος*, αν και όχι με την σύγχρονή της μορφή. Είναι, όμως, η πρώτη συσκευή που καταφέρνει να μετατρέψει την κίνηση (ενός μαγνήτη) σε ρεύμα. Ως “γεννήτρια” αναφέρεται και στο επίσημο site του Βασιλικού Ινστιτούτου και εκτίθεται στο *μουσείο Faraday* (45). Θα αποτελέσει τον προάγγελο της *δυναμογεννήτριας* που θα είναι και το τελευταίο μεγάλο επίτευγμα του Faraday για την περίοδο αυτή. Και φυσικά αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα, στη σχολική τάξη, πειράματα σε όλο τον κόσμο.



Εικόνα 38. Η “γεννήτρια” σήμερα (μουσείο Faraday, Royal Institute)

Συνεχίζει, όμως, τους πειραματισμούς του με ισχυρότερους μαγνήτες και ηλεκτρομαγνήτες και παίρνει πάντα τα ίδια αποτελέσματα. Κάνει πειράματα και με απλά (μονά) σύρματα και πάλι με τα αντίστοιχα αποτελέσματα, αν και πολύ πιο ισχνά. Προσπαθεί να εξαντλήσει όλες τις πιθανές περιπτώσεις πάνω στη μελέτη του παραγόμενου επαγωγικού ρεύματος και ουσιαστικά το καταφέρνει. Μελετά τα

χημικά του αποτελέσματα και καταλήγει σε αρνητικό αποτέλεσμα, μιας και το ρεύμα αυτό εμφανίζεται μόνο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, όσο δηλαδή διαρκεί η εκάστοτε μεταβολή. Για τον ίδιο λόγο δεν παρατηρεί αίσθηση στη γλώσσα ούτε κίνηση σε βατραχοπόδαρα (ναι, έκανε και αυτό!). Δεν παρατηρεί σπινθήρες σε ηλεκτρόδια άνθρακα (όπως σε προηγούμενο πείραμα), ούτε ανάφλεξη λεπτού μεταλλικού νήματος.



Εικόνα 39. Πείραμα Επαγωγής: ηλεκτρομαγνήτης μέσα σε πηνίο

Έχοντας όμως πειστεί ότι το ρεύμα που παράγει με την “γεννήτρια” είναι ίδιο με αυτό των προηγούμενων πειραμάτων, προσπαθεί να επιτύχει αντίστοιχα αποτελέσματα. Χρησιμοποιώντας (αντί για μόνιμο μαγνήτη) έναν πολύ ισχυρότερο ηλεκτρομαγνήτη, ιδιοκτησίας του Καθηγητού Daniell, καταφέρνει τελικά να “κινήσει” βατραχοπόδαρα, να δει σπινθήρα και να νιώσει αίσθηση ρεύματος στη γλώσσα. Όχι, όμως, και να πραγματοποιήσει χημική αποσύνθεση (ηλεκτρόλυση) (17 σσ. 137,138).

Αποδεικνύει τελικά ότι ο ηλεκτρισμός μπορεί να παραχθεί από τον απλό μαγνητισμό. Διαχωρίζει όμως δύο διαφορετικές επαγωγές: την «μαγνητο-ηλεκτρική επαγωγή» (που παράγεται από απλούς μαγνήτες) και την «βολτα-ηλεκτρική επαγωγή» (που παράγεται από το πεδίο ηλεκτροφόρου σύρματος). Έχει όμως την υποψία πως «ακόμα και σε αυτό το πρώιμο στάδιο της έρευνας, υπάρχουν περιπτώσεις που υποδεικνύουν ότι στο μέλλον αυτή η διαφορά, ως φιλοσοφική διάκριση, θα εκλείψει» (17 σσ. 138,139). Όσο για το πηνίο στο επάγεται το ρεύμα; Αναφέρεται σε αυτό, ως να βρίσκεται σε μια “ιδιόμορφη κατάσταση” κατά την οποία αντιστέκεται στον σχηματισμό του ηλεκτρικού ρεύματος και την οποία ονομάζει «ηλεκτροτονική



κατάσταση». Εδώ παραδέχεται ότι ακόμα του μένει να καταλάβει τις ιδιότητες της ύλης, ενώ είναι σε αυτή την ηλεκτροτονική κατάσταση και μάλιστα αφού πειραματίζεται και με μη μαγνητικά υλικά, όπως ο χαλκός και ο άργυρος. Πολλά χρόνια αργότερα θα συνεχίσει αυτές τις σκέψεις με νέα πειράματα και τελικά θα καταλήξει στη θεωρία του *διαμαγνητισμού* (2).

Τελικά, εκφράζει αντίστοιχες απόψεις και για το επαγωγικό ρεύμα στον *δακτύλιο*. Υποθέτει ότι η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το πρωτεύων πηνίο προκαλεί μια κατάσταση ηλεκτρικής “έντασης” στα σωματίδια του σιδήρου του δακτυλίου και φέρνει το δευτερεύον πηνίο σε *ηλεκτροτονική κατάσταση*. Αυτή η ηλεκτροτονική κατάσταση, θεωρεί ότι προκαλεί το ρεύμα σε αυτό το πηνίο. Υποστηρίζει ότι το φαινόμενο οφείλεται στη διάδοση ενός «κύματος ηλεκτρισμού» το οποίο δεν διαδίδεται ακαριαία αλλά μέσω ηλεκτρικών δράσεων μεταφορικής κίνησης. Συγκρίνει τη διάδοση των μαγνητικών δυνάμεων με τη διάδοση των φωτεινών και των ηχητικών κυμάτων στο χώρο. Γνωρίζοντας τις υποθέσεις των Ørsted και Ampère για τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων και, πιθανώς, τις παλαιότερες υποθέσεις περί διαμεσολάβησης του (ηλεκτρικού) αιθέρα, ως φορέα της ηλεκτρικής δράσης, θέτει το εννοιολογικό πλαίσιο μέσα στο ποίο ερμηνεύει το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Στα επόμενα χρόνια δίνει έμφαση στη χωρική κατανομή των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων και καταλήγει στη θεωρία του *πεδίου* (18 σσ. 49, 111).

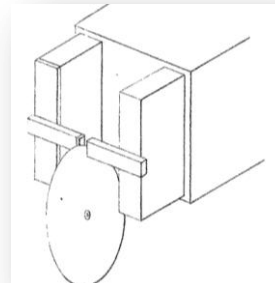
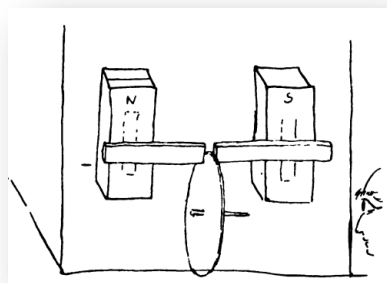




## Η Δυναμογεννήτρια

Λίγες μέρες μετά τα πειράματα με την γεννήτρια που περιγράψαμε πριν, ο Faraday πειραματίζεται με το παλιό πείραμα του δίσκου του Arago προσπαθώντας να επιτύχει συνεχή ροή ηλεκτρικού ρεύματος (46 p. 43). Και το καταφέρνει!

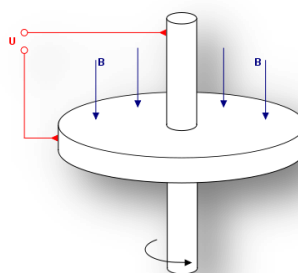
Έχει στη διάθεσή του έναν μεγάλο μαγνήτη. Έναν πολύ μεγάλο μαγνήτη, για την ακρίβεια, που αρχικά ανήκε στον G. Knight, και την εποχή εκείνη βρίσκεται στο σπίτι του S.H. Christie, στο Woolwich. Ο Christie επιτρέπει στον Faraday να τον χρησιμοποιήσει στα πειράματά του και μάλιστα τον βοηθάει σε αρκετά από αυτά. Ο μαγνήτης αποτελείται από 450 ραβδόμορφους μαγνήτες, διαστάσεων  $15 \times 1 \times 0,5$  inc, τοποθετημένους μέσα σε ένα κιβώτιο, έτσι ώστε να εξέχουν από την μια του πλευρά δύο πόλοι. Οι πόλοι είχαν ορθογώνια διατομή,  $3 \times 12$  inc και εξείχαν 6 inc από το κιβώτιο. Απείχαν μεταξύ τους 9 inc. Η ισχύς του μαγνήτη ήταν τέτοια που, όπως αναφέρει ο Faraday, απαιτούσε δύναμη περίπου 100 rounds, για να αποκολληθεί από αυτόν ένα κύλινδρος από μαλακό σίδηρο με διάμετρο  $3/4$  inc και μήκος 12 inc. Όταν χρησιμοποιούσε αυτόν τον μαγνήτη, τοποθετούσε το γαλβανόμετρο 8 ft μακριά του και ποτέ στην ευθεία με τους πόλους (σε γωνία  $16^\circ - 17^\circ$  στο πλάι), ώστε να αποφύγει ανεπιθύμητες τυχαίες παρεμβολές στη βελόνα (17 σ. 135). Για να φέρει τους πόλους πιο κοντά και να συγκεντρώσει τη μαγνητική δύναμη σε μικρότερη περιοχή, τοποθετεί δύο σιδερένιες ή ατσάλινες ράβδους (με μήκος 6-7 inc, πλάτος 1 inc και πάχος 0,5 inc), μια σε κάθε πόλο. Τις φέρνει τόσο κοντά, όσο επιθυμεί κάθε φορά, και τις συγκρατεί, ώστε να μην γλιστρήσουν, με νήματα. Ανάμεσα τους θα τοποθετήσει τον χάλκινο δίσκο (17 σ. 148) (39 σ. 121).



Εικόνα 40. Ο "μεγάλος" μαγνήτης με τους πόλους του, οι ράβδοι από σίδηρο και ο χάλκινος δίσκος (Αριστερά: χειρόγραφο σχέδιο από το ημερολόγιο εργαστηρίου. Δεξιά: σχέδιο από τη δημοσίευση του 1832)

Πρόκειται για δίσκο με πάχος περίπου  $1/5$  inc και διάμετρο 12 inc, τοποθετημένο με μπρούτζινο άξονα σε ένα πλαίσιο, ώστε να μπορεί να περιστρέφεται κατακόρυφα

ή οριζόντια. Ο δίσκος ήταν έτσι τοποθετημένος, ώστε η ακμή του να βρίσκεται μέχρι το μισό του πάχους των σιδερένιων ράβδων του μαγνήτη, που απείχαν περίπου 0,5 inc. Ήταν καλά αμαλγαμωμένη, ώστε να πετυχαίνεται από τη μια καλή επαφή (με την ψήκτρα) και από την άλλη εύκολη περιστροφή. Για τους ίδιους λόγους, ένα τμήμα του μπρούτζινου άξονα είναι επίσης καλά αμαλγαμωμένο. Επαφή από χαλκό ή μόλυβδο (ψήκτρα), με διαστάσεις  $4 \times 1/3 \times 1/5$  inc, ήταν τοποθετημένη έτσι ώστε να βρίσκεται σε συνεχή επαφή με την ακμή του δίσκου, ακριβώς κάτω από τους πόλους του μαγνήτη. Μάλιστα είχε δημιουργηθεί μικρή αύλακα, ώστε να είναι σε καλύτερη επαφή με την ακμή του δίσκου, και στη συνέχεια είχε και αυτή αμαλγαματωθεί. Δύο χάλκινα σύρματα, πάχους  $1/16$  inc, έκλειναν το κύκλωμα με το γαλβανόμετρο: το ένα σε επαφή με την ψήκτρα και το άλλο τυλιγμένο χαλαρά δύο ή τρεις φορές γύρω από το αμαλγαμωμένο τμήμα του μπρούτζινου άξονα.



**Εικόνα 41.** Αριστερά: Ο αυθεντικός δίσκος που χρησιμοποίησε ο Faraday (μουσείο Faraday, Royal Institute)  
Δεξιά: Επεξηγηματικό σχέδιο των επαφών, του μαγνητικού πεδίου και του τρόπου περιστροφής

«Μόλις ο δίσκος άρχισε να κουνιέται, το γαλβανόμετρο επηρεάστηκε και περιστρέφοντας τον δίσκο γρήγορα η βελόνα μπορούσε να αποκλίνει  $90^\circ$  ή και περισσότερο». Αρχικά υπήρξαν δύο δυσκολίες: ήταν δύσκολο να διατηρηθεί συνεχής και καλή επαφή της ψήκτρας και της ακμής του δίσκου και επίσης ήταν δύσκολο να διατηρηθεί σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Για τους δύο αυτούς λόγους η βελόνα του γαλβανόμετρου βρισκόταν σε μια «συνεχή κατάσταση ταλάντωσης». Σε επόμενα πειράματα, όμως, όταν αυτά τα προβλήματα ξεπεράστηκαν, η βελόνα απέκτησε μια συνεχή και σταθερή απόκλιση περίπου  $45^\circ$ .

Σε αυτό το σημείο έχουμε την κορύφωση της συνεχούς, δεκαετούς προσπάθειας του Faraday πάνω στον κλάδο του ηλεκτρομαγνητισμού. Αναφέρει ο ίδιος «Εδώ επομένως παρουσιάζεται η παραγωγή μόνιμου ηλεκτρικού ρεύματος από συνηθισμένους μαγνήτες» (17 σ. 149).



Στη συνέχεια ξεκινάει τις, γνωστές πια, παραλλαγές του πειράματος, ώστε να εξαντλήσει κάθε πιθανότητα. Αρχικά κάνει το πιο απλό: αντιστρέφει τη φορά περιστροφής του δίσκου και φυσικά βλέπει αντιστροφή της απόκλισης του γαλβανόμετρου, άρα αντιστροφή του ρεύματος.

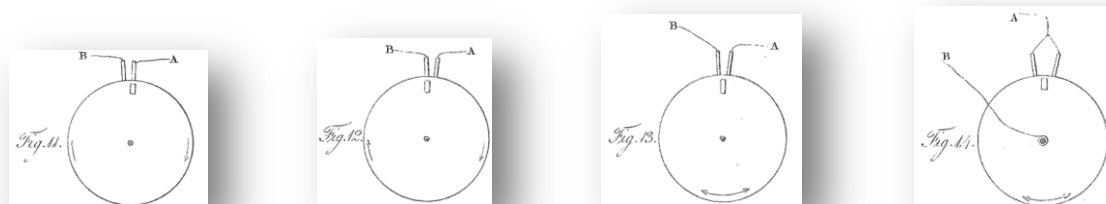
Ακολουθώντας, μεταβάλλει τη θέση επαφής της ψήκτρας πάνω στην ακμή του δίσκου. Για μικρές αλλαγές στη θέση, εκατέρωθεν της αρχικής, δεν παρατηρεί διαφορά. Όμως, καθώς μεταβάλλει τη θέση αρκετά ( $50^\circ$  έως  $60^\circ$ ) το ρεύμα εξασθενεί σημαντικά. Είναι, όμως, πάντα προς την ίδια φορά όσο η περιστροφή του δίσκου δεν αλλάζει. Μάλιστα, για ίσες μετατοπίσεις της ψήκτρας δεξιά ή αριστερά του αρχικού της σημείου (το οποίο αναφέρει ως σημείο «μέγιστης έντασης») το ρεύμα είναι ίδιο. Τα συμπεράσματα αυτά επαναλαμβάνονται και με αντιστροφή στην περιστροφή του δίσκου.

Στο επόμενο πείραμα μετακινεί το δίσκο προς τα πάνω, ώστε οι πόλοι του μαγνήτη (τα άκρα των σιδερένιων ράβδων στην Εικόνα 40) να βρίσκονται ολόκληροι πάνω από την επιφάνεια του δίσκου, και τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια. Συνεχίζει την μετακίνηση ακτινικά και φτάνει τους πόλους πολύ κοντά στον άξονα. Και πάλι, παίρνει τα ίδια αποτελέσματα.

Στην τέταρτη παραλλαγή αφαιρεί την επαφή του άξονα και την αντικαθιστά με μια χάλκινη επαφή – ψήκτρα, όμοια με την επαφή της ακμής του δίσκου. Έχει τώρα δύο ψήκτρες (A και B στην Εικόνα 42) στην ακμή του δίσκου. Έχοντας την ψήκτρα A στο σημείο της ακμής, πάνω από τους πόλους του μαγνήτη και την ψήκτρα B λίγο αριστερότερα (Fig.11 στην Εικόνα 42) παίρνει ρεύμα. Μετακινώντας και τις δύο ψήκτρες λίγο δεξιά, ώστε να αλλάξουν θέση σε σχέση με τους πόλους του μαγνήτη (Fig.12 στην Εικόνα 42) παίρνει ρεύμα αντίθετης φοράς, χωρίς να αλλάξει την φορά περιστροφής του δίσκου. Τέλος, φέρνοντας τις ψήκτρες σε ίσες αποστάσεις από τους πόλους (Fig.13 στην Εικόνα 42) δεν παρατηρεί καθόλου ρεύμα. Εδώ ο Faraday κάνει λάθος εκτίμηση του φαινομένου εξηγώντας την αλλαγή της φοράς του ρεύματος και τον μηδενισμό του ως εξής: λέει πως στην πρώτη περίπτωση ένα ισχυρό ρεύμα περνά από την A (που είναι κοντά στους πόλους) και ένα ασθενές από την B. Έτσι, “κερδίζει” το ρεύμα από την A. Στην δεύτερη περίπτωση, το ισχυρό ρεύμα είναι από την B και το ασθενές από την A, και στην τρίτη περίπτωση έχουμε ίσα ρεύματα από



τις A και B και τελικά το συνολικό ρεύμα είναι μηδέν<sup>43</sup>. Συνεχίζει, όμως, και κάνει κάτι ακόμα: συνδέει τις δύο ψήκτρες μαζί (τις ονομάζει A) και ξαναενώνει το σύρμα (B) στον μπρούτζινο άξονα (βλέπε Fig.14 στην Εικόνα 42). Τώρα το γαλβανόμετρο ξαναδείχνει ένδειξη, όπως και στα προηγούμενα πειράματα (24 σ. 384).



Εικόνα 42. Διάφορες θέσεις των ψηκτρών στον δίσκο (από την δημοσίευση του 1832)

Η επιμονή του Faraday στη λεπτομέρεια συνεχίζεται: εκτελεί πάλι όλα τα πειράματα μόνο με τον έναν πόλο του μαγνήτη και καταγράφει τα ίδια (αν και σημαντικά εξασθενημένα) αποτελέσματα. Επίσης, προσέχει ώστε όλα του πειράματα να μην επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης, και σιγουρεύεται για αυτό, όταν έχοντας αφαιρέσει τον δίσκο ή τον μαγνήτη το γαλβανόμετρο δεν καταγράφει καμία ένδειξη (αν υπήρχε παρεμβολή του γήινου μαγνητικού πεδίου θα εμφανίζονταν και σε αυτήν την περίπτωση) (17 σ. 150).

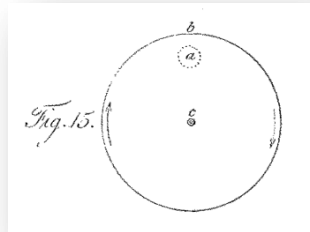
### Η φορά του επαγωγικού ρεύματος

Το επόμενο βήμα είναι να ξεκαθαρίσει το ζήτημα της φοράς του επαγωγικού ρεύματος. Αναφέρεται στα πρόσημα των φορτίων που “μαζεύουν” οι ψήκτρες, ανάλογα με τη φορά του μαγνητικού πεδίου και τη φορά περιστροφής του δίσκου: όταν ο νότιος πόλος του μαγνήτη είναι κάτω από την ακμή του δίσκου και αυτός περιστρέφεται δεξιόστροφα («*screw fashion*»), το φορτίο που συσσωρεύεται στην ακμή είναι θετικό. Στην Εικόνα 43 (Fig.15) βλέπουμε με μικρό διακεκομμένο κύκλο και γράμμα *a* τον νότιο πόλο του μαγνήτη κάτω από τον δίσκο, και με γράμμα *b* την ακμή του δίσκου, όπου η ψήκτρα μαζεύει το θετικό φορτίο. Αντίστοιχα, το φορτίο που μαζεύεται στον άξονα (*c*) είναι αρνητικό. Έτσι το ρεύμα στον δίσκο έχει φορά από το κέντρο (άξονας) προς την περιφέρεια (ΣτΣ: συμβατική φορά, πάντα). Αν τώρα

<sup>43</sup> Σήμερα γνωρίζουμε, όπως θα δούμε και αργότερα, ότι το ρεύμα είναι ένα και προέρχεται από την διαφορά δυναμικού (ΗΕΔ από επαγωγή) που προκαλείται από την συσσώρευση ηλεκτρονίων σε μια πλευρά, λόγω της δύναμης Lorentz που αυτά δέχονται καθώς κινούνται, λόγω της περιστροφής του δίσκου, μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

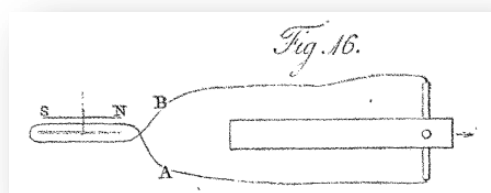


τοποθετηθεί βόρειος πόλος μαγνήτη από πάνω και η φορά περιστροφής δεν αλλάξει, τότε και πάλι η ψήκτρα  $b$  θα συλλέξει θετικό φορτίο. Αν αντιστραφεί η θέση των πόλων, το ρεύμα αντιστρέφεται. Επίσης και αν αντιστραφεί η φορά περιστροφής.



Εικόνα 43. Νότιος πόλος κάτω από το  $a$ , θετικό φορτίο στο  $b$  (από την δημοσίευση του 1832)

Καταλήγει στο συμπέρασμα πως το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει κάθετα στην κίνηση του δίσκου και κάθετα στο μαγνητικό πεδίο. Αργότερα, προκειμένου να σιγουρευτεί για τα παραπάνω, εκτελεί ακόμη μια σειρά πειραμάτων, αυτή τη φορά με μια ορθογώνια χάλκινη πλάκα, διαστάσεων  $12 \times 1,5 \times 0,2$  inc, με αμαλαγωμένα άκρα. Τοποθετεί την πλάκα ανάμεσα στους πόλους του μαγνήτη και τις ψήκτρες σε επαφή με τις μεγάλες της πλευρές. Έχοντας τον βόρειο πόλο από πάνω και τον νότιο από κάτω και τραβώντας την πλάκα προς τα δεξιά (βλέπε βέλος στην Εικόνα 44) παίρνει τέτοιο ρεύμα, που φαίνεται ότι το θετικό φορτίο συλλέγεται από την ψήκτρα που συνδέεται από το σύρμα B. Σε αντίθετη κίνηση της πλάκας, το γαλβανόμετρο δείχνει, με την απόκλισή του, αντίστροφα αποτελέσματα.

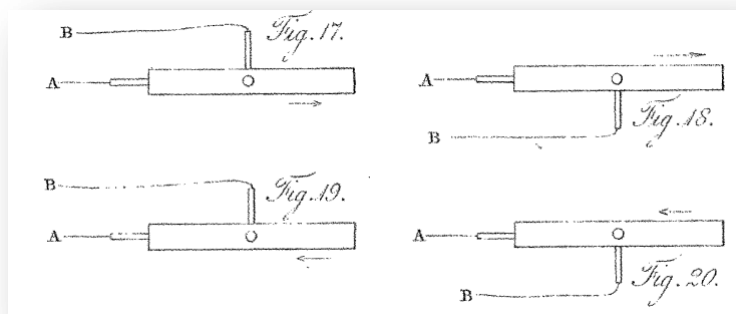


Εικόνα 44. Επιβεβαίωση φοράς επαγωγικού ρεύματος (από την δημοσίευση του 1832)

Στη συνέχεια μεταφέρει τη μια ψήκτρα (την A) στη μικρή πλευρά της ορθογώνιας πλάκας και την άλλη (την B) την αφήνει σε επαφή με την μεγάλη πλευρά. Εκτελεί τέσσερα πειράματα με τα οποία επιβεβαιώνει τη φορά της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης που δέχονται τα θετικά και τα αρνητικά φορτία<sup>44</sup>. Βλέπουμε στην Εικόνα 45

<sup>44</sup> Πρόκειται, βέβαια, για τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού, που δίνει την δύναμη Lorentz  $\vec{F}_{Lo} = q\vec{v} \times \vec{B}$  την οποία δέχεται ένα κινούμενο φορτίο σε μαγνητικό πεδίο: ο αντίχειρας

τις τέσσερις περιπτώσεις κίνησης της χάλκινης πλάκας (βόρειος πόλος από πάνω) με την ψήκτρα B να συλλέγει τα εξής φορτία: Fig.17 – θετικό, Fig.18 – αρνητικό, Fig.19 – αρνητικό και Fig.20 – θετικό. Τα αποτελέσματα είναι, φυσικά, σε πλήρη συμφωνία με τα αντίστοιχα του περιστρεφόμενου δίσκου (17 σ. 151).



**Εικόνα 45. Τέσσερις περιπτώσεις επιβεβαίωσης της φοράς του επαγωγικού ρεύματος (από την δημοσίευση του 1832)**

Επαναλαμβάνει όλα τα πειράματα με πιο ασθενείς μαγνήτες (αλλά με πιο ευαίσθητο γαλβανόμετρο), καθώς και με ισχυρούς ηλεκτρομαγνήτες (όπως αυτούς που είχαν κατασκευάσει οι Moll, Henry, κ.α.), και τα αποτελέσματα είναι πάντα τα ίδια. Βλέπουμε εδώ πως, σε αυτό το αρχικό στάδιο της έρευνας, ο Faraday δεν είχε σκοπό την συνεχή παραγωγή ρεύματος από κίνηση αλλά απλά τη συνεχή παραγωγή ρεύματος και την διερεύνηση του νέου αυτού φαινομένου. Έτσι, δεν τον ένοιαζε να “ξοδέψει” ρεύμα (για τη λειτουργία των ηλεκτρομαγνητών) για να “παράξει” ρεύμα. Πολλά χρόνια αργότερα, και φυσικά με τη συνεισφορά πολλών άλλων εφευρετών και επιστημόνων, ο σπόρος, που έσπειρε ο Faraday το 1831, θα δώσει τον καρπό που ονομάζουμε *ηλεκτροπαραγωγή*.

Κάνει στη συνέχεια μια προσπάθεια να δώσει έναν γενικό κανόνα. Αναφέρει πως, αν ένα κομμάτι μετάλλου (ή οποιασδήποτε αγωγίμης ουσίας) περάσει πάνω από έναν μαγνητικό πόλο ή ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη<sup>45</sup> ή ενός ηλεκτρομαγνήτη, επάγεται ρεύμα μέσα του σε διεύθυνση κάθετη στην κίνησή του (17 σ. 154). Προσπαθεί να εξηγήσει τι συμβαίνει και κάνει την πολύ σωστή υπόθεση ότι ο δίσκος αποτελείται από “άπειρα” ακτινικά σύρματα, ώστε να θεωρήσει πως το κύκλωμα κλείνει διαμέσου μιας ακτίνας από το κέντρο στην περιφέρεια. «*Αν ένα πεπερασμένο σύρμα κινείται, έτσι ώστε να κόβει μια μαγνητική καμπύλη, μια δύναμη καλείται να*

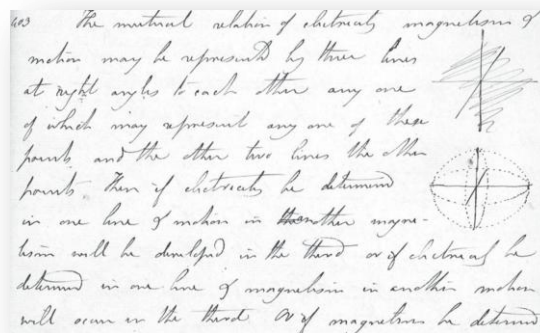
δείχνει τη φορά κίνηση του θετικού φορτίου, ο δείκτης τη φορά του μαγνητικού πεδίου (από τον βόρειο στον νότιο πόλο) και ο μέσος τη δύναμη που δέχεται το φορτίο.

<sup>45</sup> ...ανάμεσα στους πόλους ενός πεταλοειδούς μαγνήτη ή ανάμεσα σε ετερόνυμους πόλους δύο μαγνητών



δράσει, η οποία τείνει να ωθήσει ένα ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από αυτό [το σύρμα]» (17 σ. 156) (47 p. 193). Παρατηρούμε ότι η υπόθεσή του είναι σωστή (με τα σημερινά δεδομένα) και πως καταλαβαίνει ότι η περιστροφή του δίσκου είναι μια συνεχής κίνηση συρμάτων – ακτινών μέσα από το μαγνητικό πεδίο του πεταλοειδούς μαγνήτη. Καταλαβαίνει, λοιπόν, τι δημιουργεί το αρχικό ρεύμα στον δίσκο, το οποίο στη συνέχεια διαμέσου του κυκλώματος ανιχνεύεται από το γαλβανόμετρο.

Η σχέση ορθογωνιότητας μεταξύ μαγνητικού πεδίου, κίνησης και ρεύματος τον απασχολεί και μετά την δημοσίευση της εργασίας του. Στην καταχώρηση #403 του ημερολογίου του, με ημερομηνία 26 Μαρτίου 1832, βλέπουμε (εκτός από μια μουτζούρα!) ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων και στο κείμενο αναφέρεται ότι μπορούμε να δούμε το *μαγνητικό πεδίο*, την *κίνηση* και το *ηλεκτρικό ρεύμα* ως τους τρεις άξονες του συστήματος. Αναφέρει, επίσης, πως όχι μόνο υπάρχει η γεωμετρική σχέση της τριπλής καθετότητας αλλά και μια αμοιβαία σχέση μεταξύ των τριών, τέτοια ώστε ανά δύο να παράγουν το τρίτο. Δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα και κίνηση παράγουν μαγνητικό πεδίο, ηλεκτρικό ρεύμα και μαγνητικό πεδίο παράγουν κίνηση (κινητήρας) και μαγνητικό πεδίο και κίνηση παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα (γεννήτρια) (2).



Εικόνα 46. Καταχώρηση #403, στο ημερολόγιο (26-3-1832)

Προσπαθώντας να εξηγήσει τι συμβαίνει σε μικροσκοπικό επίπεδο κατά τη δημιουργία του επαγωγικού ρεύματος, σε προηγούμενη παράγραφο της εργασίας του, γράφει: «στην ηλεκτρο-τονική κατάσταση τα ομογενή σωματίδια της ύλης φαίνεται να έχουν αποκτήσει μια τακτική αλλά εξαναγκασμένη ηλεκτρική διευσθέτηση στην διεύθυνση του ρεύματος... αυτή η εξαναγκασμένη κατάσταση μπορεί να είναι αρκετή, ώστε να αναγκαστεί ένα στοιχειώδες σωματίδιο να αφήσει τον σύντροφό του, με τον οποίο είναι σε μια περιορισμένη κατάσταση, και να συνδεθεί με το γειτονικό, παρόμοιο

σωματίδιο, σε σχέση με το οποίο βρίσκεται σε πιο φυσική κατάσταση» (17 σ. 144). Αν και στη συνέχεια λέει πως, «αν και σε πειρασμό», δεν θα προβεί σε περεταίρω υποθέσεις, βλέπουμε την καταπληκτική του διόραση: υιοθετώντας τις απόψεις του Ampère για το ηλεκτρικό ρεύμα (υπό το πρίσμα μιας πιο σύγχρονης, για την εποχή, φυσικής) περιγράφει τον μικρόκοσμο ως ροή σωματιδίων<sup>46</sup>. Και να φανταστεί κανείς ότι είμαστε περίπου μισό αιώνα πριν τη διατύπωση της ατομικής θεωρίας από τον L. Boltzmann και την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου από τον J.J. Thomson.

Να επισημάνουμε ένα ακόμη στοιχείο: όλες του οι εργασίες (και εδώ το βλέπουμε ακόμη μια φορά) είχαν τον παράγοντα της αμφισβήτησης. Οι προβλέψεις του είχαν πάντα τις λέξεις *ίσως, μπορεί, φαίνεται να*. Μπορεί τα πειράματά του να ήταν τόσο καλοδουλεμένα και λεπτομερή, ώστε κανείς (ούτε ο ίδιος!) να μην μπορούσε να αμφισβητήσει, όμως, όταν επρόκειτο για προβλέψεις ή υποθέσεις, εμφανιζόταν ο ταπεινός του χαρακτήρας σε όλο του το μεγαλείο. Αυτός ο χαρακτήρας που τον άφησε έως το τέλος της ζωής του Mr. Faraday (2).

### Παλιά πειράματα σε νέο φως

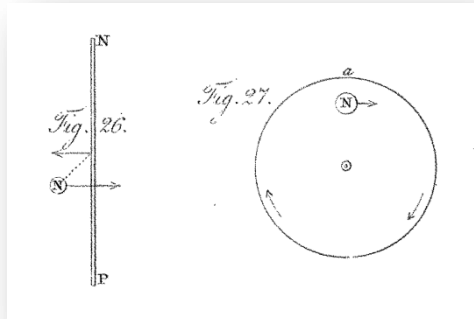
Έχοντας βρει τον τρόπο που επάγεται το ρεύμα, σε αυτά τα φαινόμενα που μελετά, κάνει στη συνέχεια απόπειρα να εξηγήσει δύο παλαιότερα πειράματα: τον ηλεκτρομαγνητικό στροφέα του 1821 και το πείραμα του τροχού Arago του 1824. Για τον στροφέα αναφέρει πως, αν το ρεύμα ρέει από το P στο N σε ένα σύρμα (βλέπε Εικόνα 47, Fig.26) και ένας μαγνήτης βρίσκεται αριστερά του με τον βόρειο πόλο του από πάνω, τότε, σύμφωνα με τους κανόνες του ασκείται δύναμη προς τ' αριστερά (και αντίστοιχα στον μαγνήτη προς τα δεξιά). Πρόκειται για την ίδια δύναμη που ασκούσαν στα προηγούμενα πειράματά του στα θετικά φορτία, η συσσώρευση των οποίων στις ψήκτρες δημιουργούσε τα επαγωγικά ρεύματα. Έτσι, εξηγεί την περιστροφή του σύρματος στον στροφέα.

Για τον δίσκο του Arago λέει κάτι αντίστοιχο: περιστρέφοντας τον δίσκο δεξιόστροφα (βλέπε Εικόνα 47, Fig.27) και έχοντας τον βόρειο πόλο ενός μαγνήτη από πάνω, επάγεται ρεύμα (θετικών φορτίων) από το κέντρο του δίσκου προς την

<sup>46</sup> Φυσικά απείχε πολύ (όπως και οι σύγχρονοί του) από την πλήρη κατανόηση της φύσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Αρκεί να θυμίσουμε ότι διέκρινε πέντε (!) διαφορετικούς τύπους ηλεκτρικού ρεύματος: “βολταϊκός ηλεκτρισμός” (που παράγεται από μπαταρίες), “κοινός ηλεκτρισμός” (που παράγεται από εκφορτίσεις αντικειμένων, όπως οι φιάλες Leyden, “μαγνητο-ηλεκτρισμός” (ρεύμα επαγόμενο από μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, “θερμο-ηλεκτρισμός” και “ζωικός ηλεκτρισμός” (από ζώα όπως το ηλεκτρικό χέλι ή η μουδιάστρα).



περιφέρεια (τα φορτία κινούνται κάθετα στις περιστρεφόμενες ακτίνες, άρα τους ασκείται δύναμη κάθετα στην κίνησή τους, άρα ακτινική).



Εικόνα 47. Εξηγήσεις του ηλεκτρομαγνητικού στροφέα και του δίσκου του Arago (από την δημοσίευση του 1832)

Για τον ίδιο λόγο, όπως και στον ηλεκτρομαγνητικό στροφέα, ο βόρειος πόλος του μαγνήτη δέχεται δύναμη προς τα δεξιά<sup>47</sup>. Η αλλαγή στην φορά περιστροφής του δίσκου ή στην πολικότητα του μαγνήτη δίνει τα αντίστροφα αποτελέσματα, ενώ, όσον αφορά τη μαγνητική βελόνα στο αρχικό πείραμα του Arago, αυτή δέχεται στους δύο πόλους της δύο αντίθετες δυνάμεις που δημιουργούν ροπή ζεύγους και τελικά την στρέφουν (17 σ. 156).

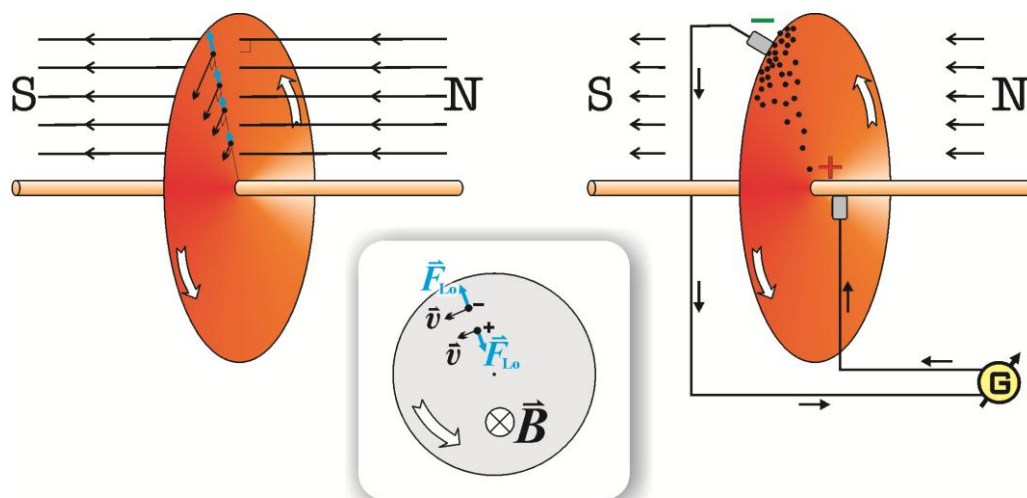
### Η εξήγηση σήμερα

Μπορεί ο Faraday να μην ήξερε τότε αυτό που ακριβώς συμβαίνει, όμως, οι περιγραφές του ήταν, όπως είδαμε, τόσο λεπτομερείς και οι παραλλαγές των πειραμάτων το πολλές, που οδήγησαν εύκολα μεταγενέστερους επιστήμονες να δώσουν την τελική εξήγηση. Η μαθηματοποίηση των παρατηρήσεων ήλθε με τον ορισμό μιας δύναμης, γνωστής ως *δύναμης Lorentz*<sup>48</sup>, που ασκείται σε κινούμενα φορτία κάθετα στην κίνησή τους και κάθετα στην ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η κατεύθυνση της δύναμης αυτής δίνεται από τον *κανόνα των τριών δακτύλων του*

<sup>47</sup> Με τα σημερινά δεδομένα η δύναμη αυτή είναι η αντίδραση της δύναμης Laplace  $\vec{F}_L = i\vec{\ell} \times \vec{B}$  που δέχεται το ακτινικό ρεύμα (με φορά από το κέντρο προς την περιφέρεια) από τον μαγνήτη.

<sup>48</sup> Αρχικά η πατρότητα της εξίσωσης αποδίδεται στον Oliver Heaviside (1889) ενώ κάποιοι υποστηρίζουν ότι η αρχική της μορφή δόθηκε από τον J.C. Maxwell (1865). Ο Hendrik Lorentz πρότεινε τον τύπο λίγα χρόνια μετά τον Heaviside. Η πλήρης εξίσωση περιλαμβάνει και την ηλεκτρική δύναμη (δύναμη που δέχεται ένα φορτίο από ηλεκτρικό πεδίο) και την μαγνητική δύναμη, και διατυπώνεται ως:  $\vec{F}_{Lo} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$ . Η συνολική (μαγνητική) δύναμη Lorentz που ασκείται στα φορτία που αποτελούν το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα σύρμα, συχνά ονομάζεται δύναμη Laplace και ο τύπος  $\vec{F}_{Lo} = q\vec{v} \times \vec{B}$  μετασχηματίζεται σε  $\vec{F}_L = i\vec{\ell} \times \vec{B}$  (70).

δεξιού χεριού (για θετικό φορτίο: αντίχειρας = ταχύτητα, δείκτης = ένταση μαγνητικού πεδίου και μέσος = δύναμη Lorentz).



Σχήμα 4. Σύγχρονη εξήγηση του δίσκου του Faraday

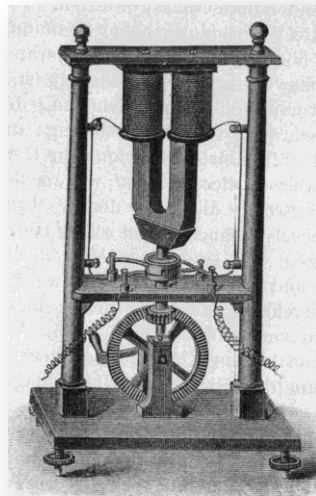
Παρατηρούμε, λοιπόν, στο αριστερό κομμάτι του Σχήμα 4 τον περιστρεφόμενο δίσκο, ορισμένα ηλεκτρόνια (μαύροι κύκλοι), τις ταχύτητές τους (μαύρα βέλη, κάθετα στην ακτίνα) και τις δυνάμεις Lorentz (μπλε βέλη) που αυτά δέχονται, και τα ωθούν προς την περιφέρεια. Να σημειώσουμε, βέβαια, πως αναφερόμαστε σε αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια), άρα ο κανόνας του δεξιού χεριού μετατρέπεται σε κανόνα του αριστερού χεριού (με την ίδια κατανομή “αρμοδιοτήτων” στα τρία δάκτυλα). Στο δεξί κομμάτι του σχήματος βλέπουμε τη συσσώρευση των ηλεκτρονίων στην ακμή του δίσκου<sup>49</sup> και την ροή τους μέσω του κυκλώματος που δημιουργούν οι ψήκτρες, τα σύρματα και το γαλβανόμετρο (G). Το ρεύμα του σχήματος αυτού έχει την πραγματική φορά, αν και ο ίδιος ο Faraday, όπως όλοι εκείνη την εποχή, νόμιζε το αντίθετο. Στο μεσαίο ένθετο του Σχήμα 4 βλέπουμε μια εγκάρσια τομή του δίσκου και τις δυνάμεις Lorentz που δέχονται τα ηλεκτρόνια (-) καθώς και αυτές που δέχονται τα θετικά σωματίδια (+) που αναφέρει ο Faraday (5 σ. 1:08:08).

<sup>49</sup> Η επαγωγική ΗΕΔ που αναπτύσσεται μεταξύ ακμής και άξονα αποδεικνύεται ότι είναι  $E_{επ.} = \frac{1}{2} B \omega R^2$ , όπου  $\omega$ : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και R: η ακτίνα του δίσκου (71).



### Οι Επίγονοι

Η πιο γνωστή μορφή της δυναμογεννήτριας του Faraday είναι αυτή της Εικόνα 9, από το 1<sup>ο</sup> μέρος αυτής της εργασίας. Να σημειώσουμε, όμως, πως αυτή δεν είναι κατασκευή του ίδιου του Faraday. Αναφέρεται ως συσκευή *Foucault & Le Roux* και ανήκει στον σύγχρονο του Faraday, Γάλλο φυσικό Leon Foucault (1819-1868) (48). Η συσκευή αυτή, καθώς και η αρχική του ίδιου του Faraday (βλέπε Εικόνα 40 και Εικόνα 41) δεν υπήρξαν αρκετά αποδοτικές, κυρίως λόγω της αυτοαναίρεσης των αντίθετης ροής ρευμάτων. Με άλλα λόγια, τα ηλεκτρόνια από περιοχές του δίσκου που ήταν εκτός του πεδίου του πεταλοειδούς μαγνήτη, έτειναν να κινούνται αντίθετα από τα “επαγωγικά” ηλεκτρόνια και έτσι η επαγωγική ΗΕΔ μειωνόταν σημαντικά. Επιπλέον, δημιουργούταν (άχρηστη) θερμότητα στον δίσκο. Η εξέλιξη έδωσε, αργότερα, διατάξεις με σειρά μαγνητών γύρω από τον δίσκο που έλυναν το συγκεκριμένο πρόβλημα (49).



Εικόνα 48. Η γεννήτρια Pixii (1832)

Η πρόοδος που έγινε σχετικά με τις γεννήτριες, μετά τον Faraday, ήταν άμεση και καταγιστική. Πολλοί επιστήμονες, ερευνητές και εφευρέτες ξεκίνησαν την κατασκευή διαφόρων τύπων γεννητριών. Αξίζει να αναφέρουμε τον Hyppolite Pixii (1808 – 1835), ο οποίος μέσα σε λίγους μήνες μετά τη δημοσίευση του Faraday, έφτιαξε βασισμένος σε αυτήν μια δικιά του γεννήτρια. Ένας πεταλοειδής μαγνήτης γύριζε (με τη βοήθεια ενός γραναζιού και μιας μανιβέλας) κάτω από ένα πηνίο με σιδερένιο πυρήνα. Όμως, ο πηνίο έδινε ρεύμα που ήταν εναλλασσόμενο. Ήταν το



πρώτο εναλλασσόμενο ρεύμα στη ιστορία. Στη συνέχεια εμπλέκεται ο Ampère, ο οποίος προτείνει την ιδέα και ο Pixii κατασκευάζει τον “συλλέκτη”, έναν περιστροφικό διακόπτη που άλλαζε πίσω την φορά του ρεύματος κάθε φορά που αυτή αντιστρεφόταν μετατρέποντας το ρεύμα σε συνεχές. Έτσι δημιουργείται η γεννήτρια Pixii, η πρώτη εξέλιξη της δυναμογεννήτριας του Faraday.

Αμέσως μετά τον Pixii, άλλοι άρχισαν να κατασκευάζουν αντίστοιχες “μηχανές”. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1830 μια σειρά από γεννήτριες είχαν κάνει την εμφάνισή τους, όλες στηριζόμενες στο φαινόμενο της επαγωγής και με κύριο χαρακτηριστικό την παραγωγή ρεύματος από το γύρισμα (με χερούλι) ενός μαγνήτη (2). Το 1844 έχουμε την πρώτη, μεγάλης κλίμακας, εμπορική χρήση της ανακάλυψης του Faraday. Τουλάχιστον δύο εργοστάσια ηλεκτροαπόθεσης (επιμετάλλωσης με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος) στο Birmingham χρησιμοποιούσαν μεθόδους παραγωγής ρεύματος από μαγνητισμό. Η πρώτη ηλεκτρομαγνητική μηχανή, που παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα κινούμενη με ατμό, κατασκευάζεται στον φάρο Bow Creek στον ποταμό Τάμεση τον Μάιο του 1857. Υπεύθυνος για την κατασκευή είναι ο F.H. Holmes και επιβλέπων είναι ο ίδιος ο Faraday. Και γιατί σε φάρο; Μα γιατί την εποχή αυτή είχε ξεκινήσει να χρησιμοποιείται το ρεύμα για τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου ανάμεσα σε ηλεκτρόδια άνθρακα ως πηγή φωτός (50).



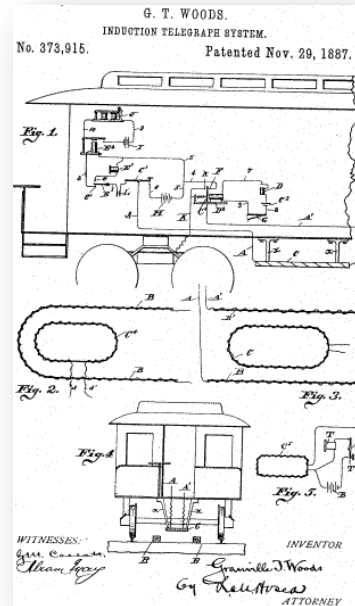
Εικόνα 49. Ο φάρος στο Bow Creek σήμερα

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, ίσως αξίζει να αναφερθούμε σε μια ακόμα μεταγενέστερη εφεύρεση. Πρόκειται για τον *επαγωγικό τηλέγραφο* που πατεντάρισε ο, αποκαλούμενος “Μαύρος Edison”, αφροαμερικανός εφευρέτης Granville Woods, το 1887. Η συσκευή συνδύαζε τον τηλέγραφο, όπως τον γνωρίζανε μέχρι εκείνη τη στιγμή, με το φαινόμενο της *αμοιβαίας επαγωγής* μεταξύ του τρένου και των ραγών. Επέτρεψε, έτσι, την ασύρματη επικοινωνία των τρένων επιταχύνοντας σημαντικά τις



Αναστάσιος Νέζης “Ιστορικά πειράματα Faraday και η αξιοποίησή τους στη διδακτική της Φυσικής σε Γυμνάσιο και Λύκειο”

συγκοινωνίες αλλά και αποτρέποντας ατυχήματα, που μέχρι τότε ήταν αρκετά συχνά (51).



Εικόνα 50. Ο Granville Woods (1856-1910) και τα σχέδια της πατέντας του Επαγωγικού Τηλέγραφου





## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> **Τα ιστορικά πειράματα στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση**

Όπως όλοι γνωρίζουμε η εποπτεία στο μάθημα της φυσικής είναι πρωταρχικό στοιχείο. Ο μαθητής πάντα αντιλαμβάνεται καλύτερα όταν “βλέπει”, και φυσικά ακόμα καλύτερα, όταν “κάνει”. Η πειραματική διαδικασία θα έπρεπε να ήταν αναπόσπαστο τμήμα κάθε διδασκαλίας και όχι απαραίτητα μόνο από την πλευρά του εκπαιδευτικού. Με λίγο χρόνο προετοιμασίας ο διδάσκων θα μπορούσε να οργανώσει το κάθε του μάθημα, έτσι ώστε να περιλαμβάνει πειράματα επίδειξης μικρής διάρκειας, ποιοτικές πειραματικές δραστηριότητες από τους ίδιους τους μαθητές και σε πιο αραιά χρονικά διαστήματα, πειράματα μεγάλης έκτασης με μετρήσεις, σφάλματα κλπ, από τον ίδιο ή από ομάδες μαθητών.

Σε αυτό το μέρος της εργασίας θα αναφερθούμε στη μεταφορά ορισμένων από τα ιστορικά πειράματα του Faraday μέσα στην σχολική τάξη, με απλά υλικά ή με υλικά που μπορεί ο εκπαιδευτικός να βρει στο σχολικό εργαστήριο. Θα παρουσιάσουμε επίσης και ορισμένες ιδιοκατασκευές που θα μας βοηθήσουν στη διδασκαλία. Για ορισμένα πειράματα θα δώσουμε ολοκληρωμένο σχέδιο μαθήματος με φύλλο εργασίας και για άλλα θα κάνουμε απλά προτάσεις για αξιοποίησή τους την ώρα του μαθήματος.

Η σχεδίαση των σεναρίων (και των φύλλων εργασίας) έγινε με βάση το *διδακτικό μοντέλο* του Gagné και της *ανακαλυπτικής μάθησης* του Bruner. Σύμφωνα με τον Gagné η διδασκαλία πρέπει να περιλαμβάνει εννέα στάδια με τις αντίστοιχες γνωστικές διαδικασίες (52 σ. 59). Αυτά είναι:

- I. Προσέλκυση προσοχής (με κάποια φωτογραφία, βίντεο, πείραμα μικρής διάρκειας κλπ) για τη δημιουργία καλού κλίματος και των κατάλληλων συνθηκών για μάθηση.
- II. Πληροφόρηση των μαθητών για τον στόχο μάθησης με πληροφορίες για το αντικείμενο.
- III. Ανάκληση γνώσεων από προηγούμενες τάξεις ή από προγενέστερο χρόνο. Αυτές οι γνώσεις θα αποτελέσουν τη βάση πάνω στην οποία θα οικοδομηθεί η νέα γνώση.
- IV. Παρουσίαση του υλικού που θα διδαχθεί.

- V. Οδηγίες μάθησης προς τους μαθητές. Αυτές περιλαμβάνουν εργαστήρια, παραδείγματα, εποπτικό υλικό, ερωτήσεις διαφόρων τύπων με άξονα την ανακαλυπτική μάθηση και στόχο την κωδικοποίηση της γνώσης.
- VI. Οι μαθητές ενεργούν εκτελώντας κάποια δραστηριότητα ή συμπληρώνοντας ένα φύλλο εργασίας ή απλά συζητώντας μεταξύ τους σε ομάδες ή ενώπιον όλης της τάξης και του καθηγητή. Στόχος, εδώ, είναι η ενίσχυση και η συγκράτηση της γνώσης.
- VII. Ανατροφοδότηση του μαθήματος, συνήθως, μέσω της συμπλήρωσης κάποιου ερωτηματολογίου μικρής έκτασης.
- VIII. Αξιολόγηση της διδασκαλίας από τον εκπαιδευτικό με σκοπό τη διαπίστωση της επίτευξης ή μη των αρχικών στόχων του μαθήματος.
- IX. Ενίσχυση της συγκράτησης της γνώσης. Αυτό γίνεται με διασύνδεση της νεοαποκτηθείσας γνώσης με καταστάσεις της καθημερινής ζωής ή με αντικείμενα που άπτονται στο άμεσο ενδιαφέρον των μαθητών. Έτσι η γνώση περνάει στην μακροπρόθεσμη μνήμη τους.

Σύμφωνα με την ανακαλυπτική – διερευνητική διδασκαλία του Bruner διακρίνουμε δύο κατηγορίες (53 σ. 109):

- Μη καθοδηγούμενη ανακάλυψη: οι μαθητές αυτενεργούν έχοντας “στα χέρια τους” μόνο το αρχικό πρόβλημα χωρίς την αρχή εφαρμογής και χωρίς τη λύση του
- Καθοδηγούμενη ανακάλυψη: ο εκπαιδευτικός παρέχει στους μαθητές τις βασικές αρχές και κάποια βοηθητικά στοιχεία για την επίλυση του προβλήματος. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να δοθούν όλα μαζί στην αρχή ή σταδιακά κατά την εξέλιξη του μαθήματος.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να κάνουμε τρεις παρατηρήσεις: ο ηλεκτρομαγνητισμός, όπως τον ξέραμε τόσα χρόνια από τα σχολικά εγχειρίδια, είναι πλέον εκτός ύλης στο Λύκειο. Στο Γυμνάσιο, το αντίστοιχο κομμάτι της φυσικής της Γ΄ τάξης είναι εδώ και χρόνια εκτός ύλης. Αναντίρρητα αυτό αποτελεί μια (όχι τη μόνη...) στρέβλωση του εκπαιδευτικού μας συστήματος, μιας και ο ηλεκτρομαγνητισμός αποτελεί όχι μόνο έναν από τους βασικούς πυλώνες του οικοδομήματος που λέγεται φυσική, αλλά και έναν κλάδο με πάρα πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή. Ας μην ξεχνάμε, άλλωστε, ότι αποτελεί τον θεμέλιο λίθο



του σύγχρονου τεχνολογικού πολιτισμού. Η πρότασή μας, επομένως, είναι και ξαναμπούν στην ύλη αυτά τα κομμάτια και η συγκεκριμένη εργασία να λειτουργήσει ως βοήθημα στον εκπαιδευτικό, που θέλει να εμπλουτίσει το μάθημά του με ιστορικά στοιχεία και πειραματικές διαδικασίες.

Η δεύτερη παρατήρηση, που θα πρέπει να κάνουμε, είναι πως οι προτάσεις που θα ακολουθήσουν αποτελούν απόσταγμα δουλειάς πολλών χρόνων και ως τέτοιες πρέπει να εκληφθούν από τους αναγνώστες εκπαιδευτικούς της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Υπό το πρίσμα των δυσκολιών που αντιμετωπίζουμε στα ελληνικά σχολεία θα ήταν παράλογο να υποστηρίξουμε πως θα μπορούσε κάποιος να προετοιμάσει και εφαρμόσει όλες τις διαδικασίες που θα περιγράψουμε παρακάτω σε μια χρονιά. Όμως, αν κάποιος αρχίσει σιγά – σιγά και κάνει από κάτι κάθε χρονιά, θα μαζέψει με τα χρόνια ένα αρκετό αξιόλογο υλικό, για να κάνει το μάθημά του πιο ελκυστικό ακόμα και προς τους “αδιάφορους” μαθητές.

Το τελευταίο που θα θέλαμε να αναφέρουμε σε αυτή τη φάση, είναι πως ο Faraday και οι άλλοι σύγχρονοί του επιστήμονες έκαναν τα πειράματά τους μη γνωρίζοντας που θα κατέληγαν τις περισσότερες φορές. Η σκέψη τους τότε λίγο έως πολύ μοιάζει με την σκέψη των μαθητών μας σήμερα. Μη έχοντας κανένα υπόβαθρο ως προς το ερευνητικό τους αντικείμενο έμοιαζαν με τους σύγχρονους μαθητές και την αντίδρασή τους όταν εμείς ως εκπαιδευτικοί ξεκινάμε να τους παραδώσουμε τις καινούριες έννοιες και φαινόμενα. Είναι, λοιπόν, μια καλή ευκαιρία να εισάγουμε αυτές τις έννοιες και τα φαινόμενα μέσω της ιστορικής οδού και να επαναλάβουμε (ορισμένα από) τα πειράματα που οι αρχικοί πρωταγωνιστές διεξήγαγαν. Θα βρούμε πολλές ομοιότητες στη σκέψη, στους προβληματισμούς και στα λάθη των επιστημόνων της εποχής και των μαθητών του σήμερα. Μια ακόμη παράμετρος που αξίζει να αναφερθεί είναι πως ο Faraday δεν χρησιμοποίησε καθόλου μαθηματικά στα πειράματά του. Τα αποτελέσματα που μας έδωσε στην ιστορική για την επιστήμη περίοδο 1821 – 1831 ήταν λεπτομερή, πλήρη αλλά χωρίς καθόλου μαθηματικούς τύπους. Έτσι, οι μαθητές μπορούν να νιώσουν αρχικά πολύ οικεία, αφού η εξαγωγή συμπερασμάτων θα βγει ποιοτικά και χωρίς τους “εκφοβιστικούς” τύπους (οι οποίοι, φυσικά, θα ακολουθήσουν αργότερα).





## **Το πείραμα του Ørsted και το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού. Σχέδιο μαθήματος.**

Το πείραμα του Ørsted αποτελεί την απαρχή του κλάδου του ηλεκτρομαγνητισμού. Υπήρξε ιστορικά η πρώτη διαπίστωση εξάρτησης των μαγνητικών φαινομένων από το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (αν και προγενέστερα είχαν διαπιστωθεί συσχετίσεις όπως η μαγνήτιση βελονών από εκφορτίσεις φιαλών Leyden ή η αντιστροφή της πολικότητας των πυξίδων κατά την ηλεκτρική εκκένωση κεραυνών).

Το συγκεκριμένο σχέδιο μαθήματος αποτελείται από το *σενάριο* και το *φύλλο εργασίας*. Αφορά την εισαγωγή στον ηλεκτρομαγνητισμό για το μάθημα της φυσικής Β΄ Λυκείου γενικής παιδείας και έχει ως πυρήνα πειράματα που θα εκτελέσει ο καθηγητής στον πάγκο του και πειράματα που θα εκτελέσουν οι μαθητές με υλικά που τους παρέχονται στους δικούς τους πάγκους. Η πορεία του μαθήματος θα καθοριστεί από το φύλλο εργασίας που ακολουθεί στη συνέχεια. Κεντρική ιδέα του σεναρίου είναι η **εναλλάξ πειραματική δραστηριότητα καθηγητή – μαθητών**, έτσι ώστε οι μαθητές να βγάζουν και να καταγράφουν συμπεράσματα τόσο από την παρακολούθηση πειραμάτων όσο και από πειράματα που πραγματοποιούν οι ίδιοι. Ο εκτιμώμενος χρόνος διεξαγωγής είναι 2 – 3 διδακτικές ώρες.

Η σχέση του Faraday στην όλη διαδικασία ξεκινάει από το τρίτο μέρος, όπου τα πειράματα που περιγράφονται προτάθηκαν για πρώτη φορά από αυτόν στην προσπάθειά του να εξηγήσει το φαινόμενο που είχε προκύψει από το πείραμα του Ørsted. Μετά από αυτά τα πειράματα, ο Faraday κατασκεύασε τον ηλεκτρομαγνητικό στροφέα, τον πρώτο ηλεκτρικό κινητήρα.

### **Υλικά & Όργανα**

Για τις δραστηριότητες που θα περιγραφούν στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε:

**A.** Για κάθε ομάδα μαθητών (προτείνεται να οριστούν ομάδες των δύο ατόμων) τρία απλά υλικά: μια μικρή πυξίδα, μια μπαταρία των 1,5 V και ένα κομμάτι καλώδιο (περίπου 20 – 30 cm) με ελεύθερα μόνωσης άκρα. Τα υλικά μπορούμε να τα προμηθευτούμε από το εμπόριο με κόστος όχι μεγαλύτερο των 2 €.



**Β.** Μια ιδιοκατασκευή για την επίδειξη του πειράματος του Ørsted ή εναλλακτικά μια κατασκευή με υλικά του εργαστηρίου, όπως αυτές που φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



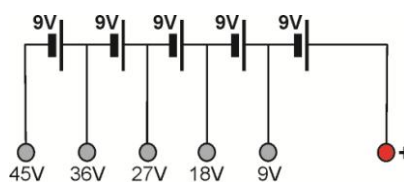
**Εικόνα 51.** Ιδιοκατασκευή και Εργαστηριακή συσκευή πειράματος Ørsted

**Γ.** Μια πολλαπλή μπαταρία (9, 18, 27, 36, 45 Volt) κατασκευασμένη από μια συστοιχία πέντε 9-βολτων μπαταριών στη σειρά.



**Εικόνα 52.** Πολλαπλή μπαταρία 9...45 Volt

Ο τρόπος σύνδεσης των μπαταριών φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα, ενώ εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια μπαταρία αυτοκινήτου. Αυτή η λύση έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης διάρκειας και της μικρής θέρμανσης και τα μειονεκτήματα του μεγάλου βάρους και των περιορισμένων Volt.



**Σχήμα 5.** Διάγραμμα πολλαπλής μπαταρίας

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε μια τέτοια κατασκευή (ή γενικά που χρησιμοποιούμε μπαταρία) είναι απλός, αφού για να έχουμε ισχυρά αποτελέσματα στο πείραμα του Ørsted, χρειαζόμαστε ρεύμα μεγάλης έντασης. Τέτοιο ρεύμα μπορούμε να επιτύχουμε στη συσκευή επίδειξης, αφού αποτελείται από ένα απλό χάλκινο σύρμα με, πρακτικά, αμελητέα αντίσταση. Όμως, τα τροφοδοτικά μηχανήματα (0 – 20 V) που διαθέτουμε στα σχολικά εργαστήρια, έχουν εσωτερική ασφάλεια, η οποία σχεδόν αμέσως “πέφτει”, όταν συνδέσουμε γυμνό σύρμα, δηλαδή σύρμα χωρίς καμία άλλη συσκευή (πρακτικά είναι σαν να



βραχυκυκλώνουμε το τροφοδοτικό). Επομένως, χρειαζόμαστε μπαταρία και όχι τροφοδοτικό για την παροχή της απαιτούμενης τάσης.

Δ. Μια συσκευή για την επίδειξη της κυκλικής μορφής του πεδίου του ρευματοφόρου αγωγού. Είναι φτιαγμένη έτσι ώστε να τοποθετείται με ράβδο των 30 cm πάνω σε βάση από χυτοσίδηρο, που υπάρχει στα σχολικά εργαστήρια. Αποτελείται από ένα επίπεδο κομμάτι ξύλο στο κέντρο του οποίου περνάει κάθετα ένα ευθύγραμμο χάλκινο σύρμα. Περιμετρικά του σύρματος τοποθετούνται τέσσερις πυξίδες, οι οποίες προσανατολίζονται κυκλικά γύρω από το σύρμα, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα. Εναλλακτικά, μπορούμε να αφαιρέσουμε τις πυξίδες και να ρίξουμε πάνω στο ξύλο ρινίσματα σιδήρου, τα οποία θα διαταχθούν κυκλικά σχηματοποιώντας το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.



Εικόνα 53. Συσκευή επίδειξης της μορφής του πεδίου ευθ. ρευμ. αγωγού

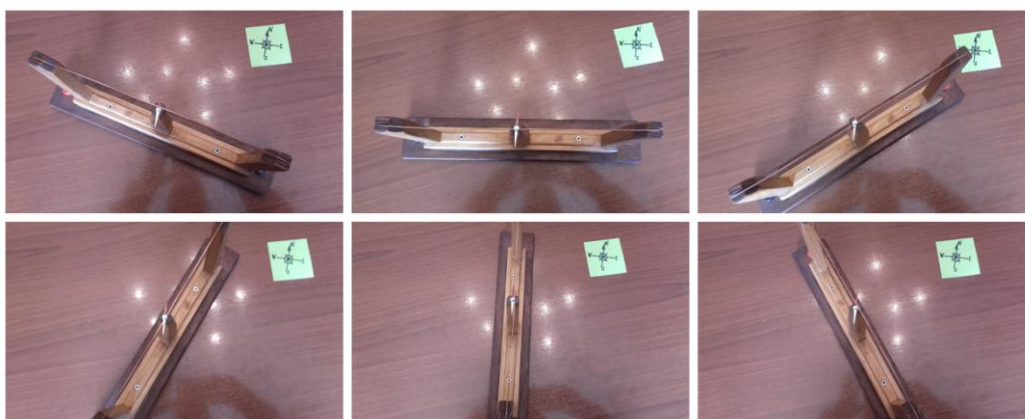
## Σενάριο

Το σενάριο που ακολουθεί αφορά βήμα – βήμα το φύλλο εργασίας και η κάθε παράγραφος – αριθμός αντιστοιχεί στη δραστηριότητα με τον ίδιο αριθμό. Προτείνουμε στον αναγνώστη να διαβάσει κάθε δραστηριότητα του φύλλου εργασίας και να επανέρχεται στο σενάριο διαβάζοντας τις αντίστοιχες παραγράφους.

1. Ενεργοποίηση ενδιαφέροντος των μαθητών με δραστηριότητα αυτενέργειας. Περιμένουμε κάποιοι μαθητές να παρατηρήσουν αλληλεπίδραση του ρεύματος με την πυξίδα. Επίσης, ίσως κάποιοι μπουν στη διαδικασία να τυλίξουν μερικές

στροφές το καλώδιο στην πυξίδα και να το συνδέσουν στη μπαταρία. Η συσκευή θα είναι πολύ πιο ισχυρή για την επίδειξη του φαινομένου και θα προσομοιώνει το γαλβανόμετρο του Schweigger (1820). Θεωρούμε, φυσικά, ότι οι μαθητές γνωρίζουν (ήδη από το Δημοτικό) πως γίνεται η σύνδεση ενός καλωδίου με μια μπαταρία για την επίτευξη κλειστού κυκλώματος.

**2.1** Περιστρέφουμε αργά τη συσκευή που εικονίζεται στο φύλλο εργασίας, ώστε να φανεί ότι η μαγνητική βελόνα δείχνει πάντα σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, δηλαδή τον Βορρά.



Εικόνα 54. Στάδια περιστροφής της συσκευής Ørsted, χωρίς σύνδεση στο ρεύμα

**2.2** Συνδέουμε τώρα τη συσκευή στη μπαταρία, στα 9 V, προσέχοντας να την έχουμε πρώτα τοποθετήσει έτσι ώστε το σύρμα να είναι στη διεύθυνση Βορράς – Νότος, άρα παράλληλο στη βελόνα. Έτσι, με την αποκατάσταση του ηλεκτρικού κυκλώματος η βελόνα αμέσως θα εκτραπεί.



Εικόνα 55. Εκτροπή της βελόνας στο πείραμα του Ørsted. Ορθή (2η φωτό) και ανάστροφη (3η φωτό) εκτροπή, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος

**2.3** Στη συνέχεια αποσυνδέουμε τη συσκευή, της αλλάζουμε προσανατολισμό και την επανασυνδέουμε. Έχουμε ενημερώσει τους μαθητές για τη διαδικασία και τους έχουμε επιστήσει την προσοχή στη αντίστοιχη ερώτηση (2.3) του φύλλου εργασίας. Επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω 4 – 5 φορές, μέχρι να φτάσουμε σε προσανατολισμό “Ανατολή – Δύση”, όπου η εκτροπή θα πρέπει να είναι μηδενική. Η εμπειρία έχει δείξει ότι αυτό, πρακτικά, είναι αδύνατον να το επιτύχει κανείς (να προσανατολίσει ακριβώς τη συσκευή κάθετα στη βελόνα, ώστε, όταν θα



διαρρέεται από ρεύμα, η βελόνα να παραμείνει κάθετη στο σύρμα). Έτσι, έχει μπει η δεύτερη ερώτηση στην ίδια δραστηριότητα σχετικά με την “ένταση” των εκτροπών (όλες οι εκτροπές είναι ίδιες;). Περιμένουμε από τους μαθητές να απαντήσουν ότι όσο πιο κοντά στην καθετότητα ξεκινάει το πείραμα τόσο πιο ασθενές είναι το φαινόμενο.

**2.4** Η ερώτηση 2.4 έρχεται να επιβεβαιώσει την προηγούμενη υπόθεση. Στη συνέχεια πάλι προτρέπουμε τους μαθητές να σιγουρευτούν ότι έχουν καταλήξει σε σωστά συμπεράσματα κάνοντας το πείραμα μόνοι τους με τα υλικά που διαθέτουν. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως η βελόνα τείνει να προσανατολιστεί κάθετα στο σύρμα, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα.

**2.5** Προσπαθώντας να λειτουργήσουμε ως εμψυχωτές, προτρέπουμε τους μαθητές να εξαντλήσουν τις περιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν στο πείραμα. Έτσι, χωρίς να το κάνουμε αρχικά εμείς, προτείνουμε στους μαθητές να αντιστρέψουν το ρεύμα (αντιστρέφοντας την πολικότητα της μπαταρίας). Περιμένουμε να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι η βελόνα τώρα εκτρέπεται αντίστροφα. Στη συνέχεια, το δείχνουμε και εμείς από τον πάγκο του καθηγητή με τη μεγάλη συσκευή.

Σε αυτό το σημείο και με την προϋπόθεση της άνεσης χρόνου (κάτι που σπανίζει στο Ελληνικό σχολείο λόγω των απίστευτα πολλών χαμένων διδακτικών ωρών για... κάθε λόγο) μπορούμε να επεκταθούμε σε άλλες δύο παραλλαγές του πειράματος: **α)** τοποθετούμε το σύρμα πάνω ή κάτω από την πυξίδα και βλέπουμε αντίθετες εκτροπές. Έτσι, μπορεί κάποιος μαθητής να σχηματίσει στο μυαλό του την εικόνα του πεδίου που προσπαθούμε να οικοδομήσουμε ως “κάτι” που ακολουθεί μια κυκλική πορεία γύρω από το σύρμα. Η εικόνα βέβαια θα ξεκαθαρίσει στις επόμενες δραστηριότητες. **β)** τοποθετούμε το σύρμα ακριβώς κάθετα στη μαγνητική βελόνα και στη συνέχεια συνδέουμε τη μπαταρία. Δεν παρατηρούμε (σχεδόν) καμία εκτροπή, μιας και η βελόνα, που θέλει να προσανατολιστεί κάθετα, είναι ήδη κάθετα. Στη συνέχεια αποσυνδέουμε τη μπαταρία και την επανασυνδέουμε με αντίθετη πολικότητα. Βλέπουμε τώρα τη βελόνα να εκτρέπεται κατά σχεδόν  $180^\circ$  και να γίνεται και πάλι κάθετη στο σύρμα αλλά από την αντίθετη πλευρά. Έτσι, μπορούν οι μαθητές να κάνουν το συμπέρασμά τους ακόμη πιο συγκεκριμένο: η βελόνα όχι απλά εκτρέπεται και

τείνει να γίνει κάθετη στο σύρμα αλλά το κάνει μόνο από τη μια πλευρά και όχι από την άλλη. Δηλαδή δεν έχουμε δύο ισοδύναμες καθετοποιήσεις της βελόνας. Αυτό θα έρθει να συνδυαστεί αργότερα (σε αυτό το στάδιο της διδασκαλίας είναι πολύ νωρίς) με τη δύναμη Laplace και τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού. Είναι, λοιπόν, ένα συμπέρασμα που μπορεί ο εκπαιδευτικός να “κρατήσει” και να το επαναφέρει στη διδασκαλία του όταν θα μιλήσει για την δύναμη Laplace.

**3.** Εδώ θα χρησιμοποιήσουμε τη δεύτερη συσκευή για να εξάγουμε τα τελικά μας συμπεράσματα για το σχήμα του πεδίου.

**3.1** Τοποθετούμε τις τέσσερις πυξίδες περιμετρικά του σύρματος και συνδέουμε στη μπαταρία (στα 9 V). Παρατηρούμε τις πυξίδες να εκτρέπονται, έτσι ώστε να ακολουθήσουν κυκλική πορεία γύρω από το σύρμα.



**Εικόνα 56.** Προσανατολισμός πυξίδων γύρω από ρευματοφόρο σύρμα

Προτρέπουμε τους μαθητές να σχεδιάσουν αυτό που βλέπουν επιστώντας τους την προσοχή πως κατά τον σχεδιασμό πρέπει να διακρίνεται ο κάθε πόλος των πυξίδων. Έτσι περιμένουμε να δούμε το βόρειο πόλο κάθε πυξίδας να δείχνει το νότιο της επόμενης και όλες μαζί να διατάσσονται γύρω από έναν νοητό κύκλο (τη μαγνητική δυναμική γραμμή) με κέντρο το σύρμα.

**3.2** Κάνουμε αλλαγή στη φορά του ρεύματος και περιμένουμε αντίθετο προσανατολισμό. Ζητάμε από τους μαθητές απλά να καταγράψουν το φαινόμενο και δεν μπαίνουμε σε περεταίρω συζήτηση. Όμως, η γνώση αυτή θα ανακληθεί στο τέλος, όταν θα μιλήσουμε για τη σχέση της διανυσματικότητας του πεδίου με τη φορά του ρεύματος.

**3.3** Εδώ κάνουμε για πρώτη φορά αναφορά στην έννοια *πεδίο*. Αφού μιλάμε σε μαθητές της Β΄ Λυκείου, είναι σίγουρο ότι η έννοια δεν τους είναι άγνωστη ούτε “χαλάσαμε κάποια έκπληξη”. Την έχουν ακούσει σίγουρα στο Δημοτικό αλλά και στο Γυμνάσιο (απ’ όπου και η αναφορά (54 σ. 73) στο φύλλο εργασίας). Ζητάμε, λοιπόν, τη σύνδεση της έννοιας του πεδίου με το πείραμά μας, με άλλα λόγια ζητάμε από τους μαθητές να μας πουν ότι το σύρμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο,



το οποίο αλληλεπιδρά με τις πυξίδες και αυτές προσανατολίζονται “πάνω του”. Στο σημείο αυτό ο εκπαιδευτικός θα πρέπει να περιμένει, ώστε όλες οι ομάδες των μαθητών να δώσουν μια απάντηση και να διορθωθούν οι τυχόν λανθασμένες, για να μπορέσει να προχωρήσει η συζήτηση. Στη συνέχεια, ζητάμε να επιβεβαιώσουν και οι ίδιοι τα συμπεράσματά τους με τα υλικά που διαθέτουν επισημαίνοντας ότι πρέπει να περιστρέψουν την *μια* πυξίδα που διαθέτει η κάθε ομάδα γύρω από το κατακόρυφο σύρμα και να δουν την αλλαγή στην κατεύθυνσή της.

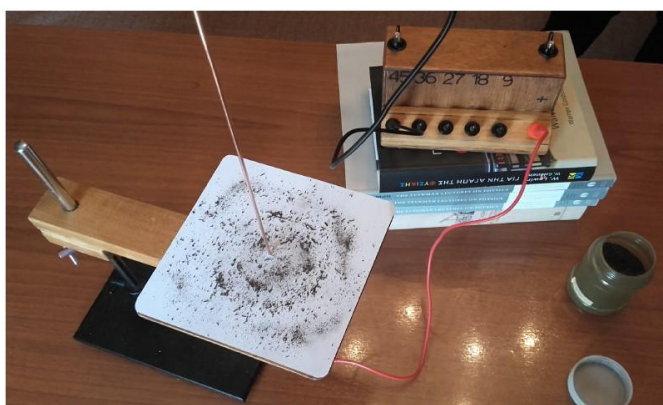
**3.4** Σε αυτό το σημείο ξαναδίνουμε την πρωτοβουλία στους μαθητές, ρωτώντας τους αν η απόσταση από το σύρμα επηρεάζει την εκτροπή. Θα καταλήξουν στο συμπέρασμά τους από πείραμα που θα κάνουν οι ίδιοι χωρίς να τους το περιγράψουμε. Περιμένουμε, φυσικά, να τοποθετήσουν την πυξίδα τους κοντά στο ρευματοφόρο καλώδιο και απομακρύνοντας την σιγά – σιγά να παρατηρήσουν ότι χάνει τον αρχικό προσανατολισμό της λόγω του πεδίου του σύρματος και ότι επανέρχεται στην γήινο προσανατολισμό της. Ακολούθως, ζητάμε ένα συμπέρασμα – ιδιότητα του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση με σκοπό να πάρουμε την απάντηση πως το πεδίο του σύρματος εξασθενεί όσο απομακρυνόμαστε από αυτό.

**3.5** Τώρα θέλουμε να διαπιστώσουμε την εξάρτηση της έντασης του πεδίου (που τη βλέπουμε από την “ένταση” της εκτροπής των πυξίδων) από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Θα το κάνουμε χρησιμοποιώντας την πολλαπλή μπαταρία που διαθέτουμε. Όμως, αντί να το κάνουμε απ’ ευθείας ζητάμε από τους μαθητές να μας το προτείνουν. Θεωρούμε ότι είναι ένα λογικό άλμα που είναι σε θέση να κάνουν σε αυτό το σημείο. Μπορούμε να τοποθετήσουμε *μία* πυξίδα σε τέτοια απόσταση, που οριακά να τείνει να εκτραπεί από το ρεύμα που προέρχεται από τα 9 V. Στη συνέχεια, αυξάνουμε την τάση στα 18 V και διαπιστώνουμε ότι η εκτροπή γίνεται εντονότερη. Μεταφέρουμε, τώρα, την πυξίδα πιο μακριά, ώστε το ρεύμα της τάσης των 18 V να την εκτρέπει οριακά και αλλάζουνε την τάση στα 27 V. Διαπιστώνουμε εντονότερη εκτροπή. Μπορούμε, αν θέλουμε, να συνεχίσουμε στα 36 και στα 45 V, αν και θεωρούμε, ότι το φαινόμενο έχει ήδη γίνει κατανοητό. Το τελικό συμπέρασμα που περιμένουμε να πάρουμε από τους μαθητές είναι πως η ένταση του μαγνητικού πεδίου του σύρματος εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει.

Να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο ότι όλη η δραστηριότητα είναι ποιοτική και σε καμία περίπτωση δεν περιμένουμε να βγάλουμε αριθμητικά αποτελέσματα (της ευθείας αναλογίας του  $B$  και του  $I$  και της αντίστροφης αναλογίας του  $B$  και του  $r$ , που μας δίνει ο τύπος του Ampère  $B=k_{\mu}2I/r$ ).

**4.1** Κλείνοντας το μάθημα θα καταλήξουμε σε ορισμένες διαπιστώσεις σχετικά με τις ιδιότητες του πεδίου ζητώντας από τους μαθητές να συμπληρώσουν κάποια κενά που θα συμπυκνώσουν τις μέχρι τώρα αποκτηθείσες γνώσεις τους.

**4.2** Στο τελικό πείραμα θα δείξουμε με ρινίσματα (ή σκόνη) σιδήρου την κυκλική μορφή του πεδίου και θα ζητήσουμε από τους μαθητές να το σχεδιάσουν ποιοτικά. Όταν σε επόμενο μάθημα θα δώσουμε τη μορφή του πεδίου (με τους ομόκεντρους κύκλους γύρω από το σύρμα να παριστάνουν τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές), θα επικαλεστούμε αυτή τη δραστηριότητα. Θεωρούμε πως οι μαθητές θα κατανοήσουν γρηγορότερα και καλύτερα τη δομή του πεδίου έχοντάς το ζωγραφίσει μόνοι τους, πιο πριν.



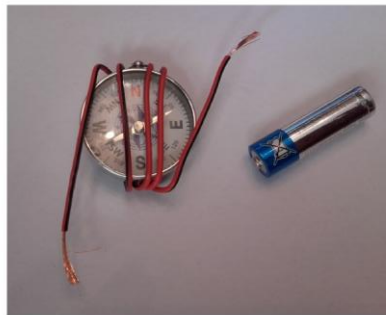
Εικόνα 57. Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού (με ρινίσματα σιδήρου)

**4.3** Στην τελική ερώτηση σχετικά με την κατεύθυνση – διανυσματικότητα του πεδίου θα χρησιμοποιήσουμε τη δραστηριότητα 3.2, κατά την οποία αντιστρέφοντας τη φορά του ρεύματος, αντιστράφηκε και ο προσανατολισμός των πυξίδων. Έτσι, ελπίζουμε πως οι μαθητές θα καταλήξουν στο λογικό συμπέρασμα ότι το πεδίο έχει κάποιου είδους κατευθυντικότητα, η οποία σαφώς εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος.

**5.** Ως ανατροφοδότηση ζητάμε από τους μαθητές να μελετήσουν τη σχηματική εικόνα του πρώτου γαλβανόμετρου, που κατασκευάστηκε λίγους μήνες μετά τη δημοσίευση του πειράματος του Ørsted. Θέτουμε δύο ερωτήσεις: η πρώτη σχετικά με τη λειτουργία του, στην οποία περιμένουμε να λάβουμε την απάντηση των



πολλαπλών συρμάτων, άρα της υπέρθεσης πολλών μαγνητικών πεδίων στον ίδιο χώρο (της βελόνας). Η δεύτερη σχετικά με τη χρησιμότητα της συσκευής. Εδώ, μάλλον, θα ήταν υπέρμετρη η προσδοκία μας για σωστή απάντηση (που είναι πως η συσκευή λειτουργεί ως ανιχνευτής ασθενών ρευμάτων), αλλά η κατάληξη “-μετρο” που παραπέμπει σε συσκευές, όπως το *αμπερόμετρο* ή το *βολτόμετρο*, ίσως οδηγήσει κάποιους μαθητές κοντά στο σωστό. Τέλος, κλείνοντας ζητάμε την κατασκευή ενός αυτοσχέδιου γαλβανόμετρου από τα υλικά που διαθέτουν και περιμένουμε κάτι σαν την εικόνα που ακολουθεί. Θα διαπιστώσουν έτσι και μόνοι τους την πολλαπλασιαστική ισχύ των πολλών σπειρών γύρω από την πυξίδα.



Εικόνα 58. Αυτοσχέδιο Γαλβανόμετρο

- Ακολουθεί το φύλλο εργασίας: «*Το Πείραμα του Ørsted & το Μαγνητικό Πεδίο του Ευθύγραμμου Ρευματοφόρου Αγωγού*».
- Όλα τα πειράματα που αναφέρονται στο συγκεκριμένο σενάριο δείχνονται σε [βίντεο](#) που περιγράφουμε στη συνέχεια της εργασίας.





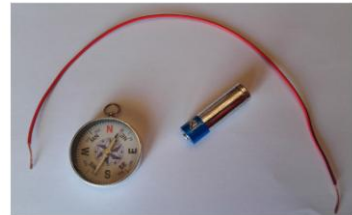


**Φυσική Β΄ Λυκείου**  
(γενικής παιδείας)

**ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**Το Πείραμα του Ørsted  
&  
το Μαγνητικό Πεδίο του Ευθύγραμμου Ρευματοφόρου Αγωγού**

1. Κάθε ομάδα διαθέτει μια μπαταρία (1,5 Volt), ένα καλώδιο με γυμνά άκρα και μια μικρή πυξίδα.  
“Παίξτε” όπως νομίζετε με αυτά τα τρία υλικά για 3 min και γράψτε τα συμπεράσματά σας με λίγα λόγια.

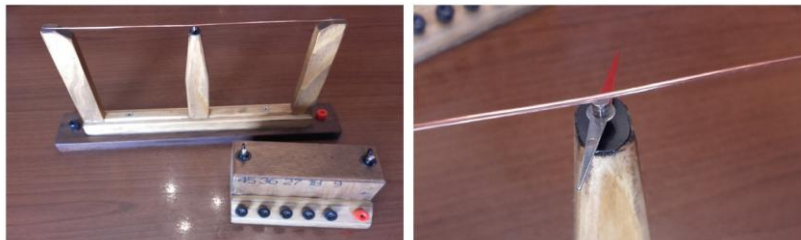


---

---

---

2. Παρακολουθήστε την επίδειξη στον πάγκο του καθηγητή και συμπληρώστε τα επόμενα:



- 2.1 Πριν συνδεθούν τα καλώδια της μπαταρίας στη συσκευή, η μαγνητική βελόνα:

---

---

- 2.2 Στη συνέχεια συνδέουμε τη συσκευή στη μπαταρία (στα 9 Volt). Τι παρατηρείται;

---

---

➤ *Επαναλάβετε τη διαδικασία με τα υλικά που έχετε μπροστά σας*

Επιβεβαιώνεται η ίδια παρατήρηση; ΝΑΙ  ΟΧΙ

**2.3** Θα επαναλάβουμε το πείραμα μερικές φορές, όμως κάθε φορά θα ξεκινάμε με την συσκευή προσανατολισμένη διαφορετικά. Σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε εκτροπή της βελόνας; Όλες οι εκτροπές είναι ίδιες;

---

---

---

**2.4** Τι φαντάζεστε ότι θα συμβεί, αν η συσκευή είναι αρχικά προσανατολισμένη ακριβώς κάθετα στη βελόνα;

---

---

► **Επιβεβαιώστε τα συμπεράσματά σας με τα υλικά που έχετε μπροστά σας**

Το γενικό συμπέρασμα που μπορούμε να διατυπώσουμε είναι: «η μαγνητική βελόνα τείνει να προσανατολιστεί \_\_\_\_\_ στη διεύθυνση του σύρματος, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα».

**2.5** Ο καλός πειραματιστής δεν αφήνει εκκρεμότητες!

► **Δοκιμάστε με τα υλικά που διαθέτετε τα προηγούμενα πειράματα με αντίστροφη σύνδεση της μπαταρίας.** Τι αλλάζει;

---

---

---

**3.** Προκειμένου να κατανοήσουμε ακόμα καλύτερα τους τρόπους προσανατολισμού της μαγνητικής βελόνας, θα εκτελέσουμε τώρα μια νέα σειρά πειραμάτων. Και πάλι θα παρακολουθήσετε την επίδειξη στον πάγκο του καθηγητή, θα συμπληρώσετε τα συμπεράσματά σας και θα τα επαναλάβετε με τα υλικά που διαθέτετε.





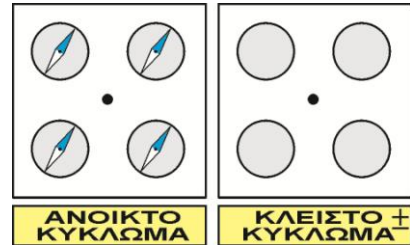
**3.1** Αρχικά, όλες οι πυξίδες της συσκευής έδειχναν τον Βορρά. Αφού συνδέουμε την πηγή στο κύκλωμα, οι πυξίδες άλλαξαν προσανατολισμό. Σχεδιάστε το νέο προσανατολισμό των πυξίδων και δώστε με λίγα λόγια μια περιγραφή του είδους του προσανατολισμού.

---

---

---

---



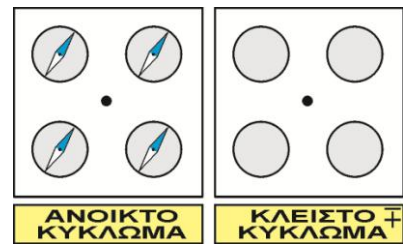
**3.2** Στη συνέχεια, αντιστρέφουμε την πολικότητα της μπαταρίας (άρα το ρεύμα διαρρέει το σύρμα με αντίθετη φορά). Τι συμβαίνει με τον προσανατολισμό των πυξίδων; (σχεδιάστε)

---

---

---

---



**3.3** Θυμηθείτε από τα γυμνασιακά σας χρόνια τον λόγο που προσανατολίζονται οι πυξίδες (η θέση τους είναι πάντα τέτοια, ώστε να ευθυγραμμίζονται με το μαγνητικό πεδίο της Γης, δείχνοντας τον Βορρά). Τώρα, συνδέστε το πείραμα που μόλις είδατε, με την παραπάνω γνώση και εκτιμήστε τον λόγο αλλαγής των θέσεων των πυξίδων, όταν συνδέουμε την μπαταρία.

---

---

---

---

► **Επιβεβαιώστε τα συμπεράσματά σας με τα υλικά που έχετε μπροστά σας** (σημείωση: αφού έχετε στη διάθεσή σας μόνο μια πυξίδα, θα πρέπει να την μεταφέρετε αργά γύρω από το κατακόρυφο καλώδιο, ώστε να διαπιστώσετε τον κυκλικό προσανατολισμό της, γύρω του).

**3.4** Εξαρτάται η εκτροπή των πυξίδων από την απόστασή τους από το σύρμα;

► *Πριν απαντήσετε κάντε μόνοι σας ένα πείραμα με τα υλικά που διαθέτετε.*

---

---

---

Πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω συμπέρασμα για να διατυπώσουμε μια ιδιότητα του μαγνητικού πεδίου του σύρματος;

---

---

**3.5** Λίγο πριν το τέλος, ας κάνουμε ακόμη μια ερώτηση: Εξαρτάται η εκτροπή των πυξίδων από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σύρμα; Προτείνετε στον καθηγητή σας (προφορικά) έναν τρόπο για να το επιβεβαιώσει χρησιμοποιώντας τα υλικά που υπάρχουν στον πάγκο του. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι:

---

---

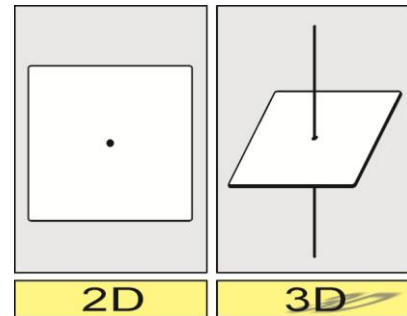
**4.** Τελικά συμπεράσματα – ολοκλήρωση:

**4.1** Έχουμε, επομένως, διαπιστώσει ότι ο ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτό φαίνεται από τον \_\_\_\_\_ των πυξίδων, όταν βρίσκονται κοντά του. Το “μέγεθος” του πεδίου (που το λέμε *μαγνητική ένταση*) εξαρτάται από την \_\_\_\_\_ του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το σύρμα και από την \_\_\_\_\_ από αυτό. Τέλος οι πυξίδες διατάσσονται \_\_\_\_\_ γύρω από το σύρμα και αυτό μας υποδηλώνει ότι το μαγνητικό πεδίο έχει \_\_\_\_\_ μορφή...

**4.2** ...Αλλά πως ακριβώς; Ας θυμηθούμε από προηγούμενες χρονιές πως διαπιστώνουμε τη μορφή του μαγνητικού πεδίου των μόνιμων μαγνητών: με \_\_\_\_\_ σιδήρου (τα πειράματα αυτά έκανε πρώτος ο M. Faraday το 1852).



Θα εκτελέσουμε τώρα το πείραμα αυτό ρίχνοντας σκόνη σιδήρου πάνω στο ξύλο γύρω από το ρευματοφόρο σύρμα. Η εικόνα που θα πάρουμε θα είναι, περίπου αυτή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από ευθύγραμμο αγωγό, όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα. Σχεδιάστε με απλές καμπύλες το πεδίο σε δύο (2D) ή σε τρεις διαστάσεις (3D).



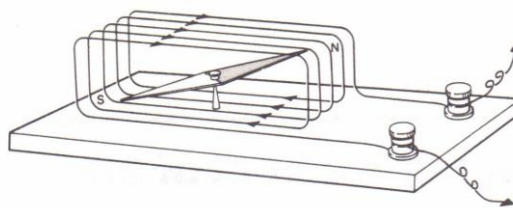
**4.3** Τελική ερώτηση: Έχει κατεύθυνση το πεδίο; Και αν ναι, από τι εξαρτάται αυτή; (για να απαντήσετε, ανατρέξτε στα συμπεράσματα της δραστηριότητας 3.2)

---

---

---

**5. ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ:** Λίγους μήνες μετά τη δημοσιοποίηση του πειράματος του Ørsted, το 1820 ο Γερμανός φυσικός, χημικός και μαθηματικός (!) J.S.C. Schweigger κατασκευάζει έναν πολλαπλασιαστή του φαινομένου και το ονομάζει γαλβανόμετρο (προς τιμήν του Luigi Galvani). Μια εικονική αναπαράστασή του βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα:



• Για ποιο λόγο νομίζετε ότι η συγκεκριμένη συσκευή πολλαπλασίαζε το φαινόμενο του πειράματος του Ørsted;

---

---

• Που πιστεύετε ότι έβρισκε χρησιμότητα πέραν της επίδειξης του φαινομένου;

---

---

➤ Μπορείτε να φτιάξετε ένα γαλβανόμετρο και εσείς, τώρα;





## Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή. Σχέδιο Μαθήματος.

Θα παρουσιάσουμε εδώ ένα σχέδιο μαθήματος που αφορά στο μάθημα της Φυσικής Θετικού Προσανατολισμού της Β΄ Λυκείου. Το σχέδιο θα αποτελείται από το *σενάριο* και το *φύλλο εργασίας* και θα είναι μια σειρά πειραματικών διαδικασιών που θα εναλλάσσονται μεταξύ των μαθητών και του καθηγητή. Ο εκπαιδευτικός του Γυμνασίου μπορεί εύκολα να το προσαρμόσει στις ανάγκες του αφαιρώντας ή απλοποιώντας ορισμένες από τις δραστηριότητες που προτείνονται. Ο εκτιμώμενος χρόνος διεξαγωγής των δραστηριοτήτων που θα παρουσιαστούν είναι 4 – 5 διδακτικές ώρες, ανάλογα με την οργάνωση του εκπαιδευτικού και το επίπεδο των μαθητών.

Η πορεία που ακολουθείται είναι σχεδόν ιστορική. Ακολουθούμε, δηλαδή, βήμα – βήμα τα πειράματα που περιγράφει ο Michael Faraday στην περίφημη δημοσίευσή του *Experimental Researches in Electricity* του 1832. Αν και η κορυφαία στιγμή της δημοσίευσής<sup>50</sup> είναι το *πείραμα του δακτυλίου*, στο οποίο και εμείς επιμένουμε αρκετά, είναι σημαντικό να δούμε και τι προηγήθηκε αλλά κυρίως τι ακολούθησε. Και αυτό που ακολούθησε ήταν η πρώτη *γεννήτρια* ηλεκτρικού ρεύματος. Η ιστορική συνέχεια θα μας δώσει την *δυναμογεννήτρια*, την πρώτη συσκευή συνεχούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από μηχανική κίνηση, αλλά αυτό θα το αφήσουμε για ένα άλλο σχέδιο μαθήματος.

Στο σενάριο που ακολουθεί θα παρουσιαστούν μόνο τα πειράματα που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο σχολικό εργαστήριο. Η ερευνά μας έδειξε ότι υπάρχουν πειράματα (όπως το πείραμα των παραλλήλων συρμάτων σχήματος “W”) που δεν δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα και, επομένως, προκαλούν περισσότερη σύγχυση στους μαθητές, παρά τους διασαφηνίζουν τις έννοιες που διαχειρίζονται. Αυτό, βέβαια, δεν σημαίνει ότι κάποιος άλλος εκπαιδευτικός στο μέλλον δεν θα μπορέσει να τα πραγματοποιήσει με επιτυχία και να τα προσθέσει στη διδασκαλία του. Άλλωστε, αυτή είναι και η ουσία της εκπαιδευτικής έρευνας: να προστίθενται συνεχώς νέα δεδομένα και τρόποι στη διδασκαλία μας και μέσω της δημοσιοποίησής τους στην εκπαιδευτική κοινότητα να αναπτύσσεται και να εξελίσσεται το έργο μας.

<sup>50</sup> ...ή τουλάχιστον ως τέτοια έχει μείνει στο ευρύ κοινό.



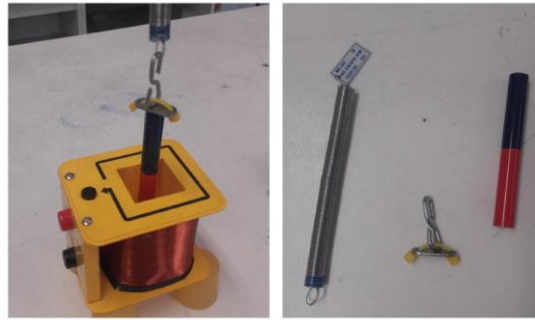
## Υλικά & Όργανα

Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, βρίσκονται σε όλα τα εργαστήρια φυσικών επιστημών των Λυκείων και συγκεκριμένα στο “βαλιτσάκι” της *σειράς πηνίων, πυρήνων και μαγνητών* (της “Ν. Ατματζίδης ΑΤΕΒΕ”). Επίσης, θα χρησιμοποιηθεί ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης (0-20 V), δύο ψηφιακά πολύμετρα (FT-591 Faithful) και δύο αναλογικά γαλβανόμετρα επιδείξεως (CONEL, DAVA-320). Τέλος, θα χρησιμοποιηθούν μικρά πηνία από έναν παλιό ηλεκτρομαγνήτη, με τον πυρήνα τους, τα οποία χωράνε μέσα στα μεγάλα. Άλλα μικρο-υλικά που θα χρησιμοποιηθούν κατά τις πειραματικές διαδικασίες περιγράφονται στο σενάριο ή στο φύλλο εργασίας στην εκάστοτε περίπτωση.

## Σενάριο

1. Ξεκινάμε με μια δραστηριότητα ενεργοποίησης του ενδιαφέροντος των μαθητών μας έχοντας συναρμολογήσει τη διάταξη που φαίνεται στο φύλλο εργασίας. Πρόκειται για ένα πείραμα *ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης* και αποτελείται από τα εξής τμήματα:
  - i. μια βάση χυτοσίδηρου με μια κατακόρυφη ράβδο 80 cm και μια οριζόντια 30 cm σε διάταξη “Γ”.
  - ii. ένα ελατήριο με μπλε σήμανση (max.load: 2N, max.elongation: 40cm) το οποίο κρέμεται από την οριζόντια ράβδο με γάντζο.
  - iii. ένας κυλινδρικός μαγνήτης (από το “βαλιτσάκι” των πηνίων) που είναι στερεωμένος στο ελατήριο με έναν αυτοσχέδιο γάντζο από σύρμα και έναν από του οβάλ οπλισμούς των μαγνητών (υπάρχουν μέσα στο κουτί τους) τρυπημένο στις άκρες του.
  - iv. ένα πηνίο από το “βαλιτσάκι” (κίτρινο πηνίο με στοιχεία: 1200 σπείρες,  $I_{\max}= 1 \text{ A}$ ,  $R_{\max}= 15 \text{ } \Omega$ ,  $L_{\min}= 36 \text{ mH}$ ) στερεωμένο σε τέσσερα πόματα σιλικόνης από τα όργανα Χημείας.

Τα παραπάνω τοποθετούνται στον πάγκο του καθηγητή και επαναλαμβάνονται με ένα δεύτερο σετ, σε διπλανό πάγκο. Φροντίζουμε έτσι ώστε οι πάγκοι να είναι σε απόσταση 30 – 40 cm μεταξύ τους, για να είναι εμφανές ότι το φαινόμενο που θα ακολουθήσει οφείλεται στον ηλεκτρομαγνητισμό και όχι σε πιθανές δονήσεις του τραπέζιού. Προς το παρόν δεν ενώνουμε τα πηνία με καλώδια.



Εικόνα 59. Τα όργανα της Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης

Πριν την εκτέλεση του πειράματος, ζητάμε από τους μαθητές μια σύντομη περιγραφή της διάταξης. Αν και η διάταξη είναι απλή και η φωτογραφία της υπάρχει στο φύλλο εργασίας, θεωρούμε ότι είναι καλό να γίνει μια σύντομη καταγραφή της, ώστε να αποτυπωθεί καλύτερα στη μνήμη τους. Περιμένουμε να γράψουν: **α)** δύο βάσεις σχήματος “Γ” (κρεμάλα), **β)** δύο ελατήρια, **γ)** δύο μαγνήτες και **δ)** δύο πηνία. Φυσικά το μάθημα ακολουθεί προηγούμενα μαθήματα, στα οποία οι μαθητές έχουν διδαχθεί την έννοια πηνίο και το έχουν ξαναδεί (αν όχι θα πρέπει εμείς να τους ενημερώσουμε για το τι είναι και τι κάνουν αυτά τα “κίτρινα πράγματα” που βλέπουν μπροστά τους).

**1.1** Ξεκινάμε τις δραστηριότητες θέτοντας σε ταλάντωση τον έναν μαγνήτη.

Παρατηρούμε ότι η ταλάντωσή του διαρκεί σημαντικά (λόγω του βάρους του μαγνήτη, της σταθεράς του ελατηρίου και των μικρών αποσβέσεων). Ζητάμε από τους μαθητές να επιβεβαιώσουν ότι ο άλλος μαγνήτης δεν επηρεάζεται.

**1.2** Με σκοπό να δείξουμε ότι υπάρχει σύζευξη των πηνίων – μαγνητών μόνο όταν αποκαθίσταται ηλεκτρικό κύκλωμα, ενώνουμε ένα καλώδιο μεταξύ των πηνίων. Ζητάμε και πάλι από τους μαθητές να επιβεβαιώσουν ότι ο άλλος μαγνήτης δεν επηρεάζεται.

**1.3** Ενώνοντας και το δεύτερο καλώδιο παρατηρούμε δύο φαινόμενα: **α)** το πρωταρχικό, δηλαδή την σχεδόν άμεση έναρξη της ταλάντωσης του δεύτερου μαγνήτη και **β)** το δευτερεύον φαινόμενο της ταχύτερης απόσβεσης της αρχικής (αλλά και της νέας) ταλάντωσης. Ζητάμε από τους μαθητές απλά την καταγραφή αυτών των δύο φαινομένων και προχωρούμε στην ολοκλήρωση αυτής της δραστηριότητας...

**1.4** Εκτελούμε, τώρα, το πείραμα ανάποδα: ακινητοποιούμε τους μαγνήτες και θέτουμε σε ταλάντωση τον άλλο μαγνήτη. Αμέσως, καταλαβαίνουμε ότι το

φαινόμενο είναι συμμετρικό, δηλαδή η ταλάντωση οποιουδήποτε μαγνήτη θέτει σε κίνηση τον άλλο, ενώ παράλληλα και οι δύο ταλαντώσεις μειώνονται γρήγορα. Ζητάμε μια απλή και σύντομη καταγραφή των φαινομένων και φυσικά δεν απαιτούμε τα “γιατί”, μιας και αυτά θα ξεκαθαριστούν στο τέλος όλων των δραστηριοτήτων.

Η ανατροφοδότηση του μαθήματος θα μας γυρίσει πίσω σε αυτό το αρχικό πείραμα της *ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης* και εκεί θα δοθεί η πλήρης εξήγηση των φαινομένων της.

**2.** Παραθέτουμε εδώ μια αναδρομή στο 1831 ως τρόπο σύνδεσης των πειραμάτων που θα ακολουθήσουν με τους ιστορικούς τους προγόνους. Στη συνέχεια, έχοντας στήσει στον πάγκο τη διάταξη που φαίνεται στο φύλλο εργασίας, ζητάμε από τους μαθητές να καταγράψουν τα όργανα που θα χρησιμοποιήσουμε. Έχουμε κατηγοριοποιήσει τα όργανα σε δύο διαφορετικούς πίνακες, ώστε να γίνει υποσυνείδητα ο διαχωρισμός των δύο *ηλεκτρικών κυκλωμάτων* και να κατανοήσουν οι μαθητές πως το φαινόμενο της επαγωγής ρεύματος σε ένα πηνίο δεν σχετίζεται με την μπαταρία αλλά με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το άλλο κύκλωμα (στο οποίο υπάρχει η μπαταρία).

**2.1 – 2.4** Ο καθηγητής εκτελεί το πείραμα: τοποθετεί το μικρό πηνίο μέσα στο μεγάλο και συνδέει το μεγάλο στη μπαταρία. Το γαλβανόμετρο<sup>51</sup> καταγράφει ρεύμα για μικρό χρονικό διάστημα. Περιμένει λίγο μέχρι να μηδενιστεί η ένδειξη και στη συνέχεια αποσυνδέει τη μπαταρία. Το γαλβανόμετρο τώρα καταγράφει ρεύμα αντίθετης φοράς, το οποίο μετά από λίγο ξαναμηδενίζεται. Στη συνέχεια, ο καθηγητής επαναλαμβάνει το πείραμα και δίνει τον χρόνο στους μαθητές να συμπληρώσουν τις ερωτήσεις 2.1 – 2.4.

**2.5** Προκειμένου να “συμμαζέψουμε” λίγο τις νεοαποκτηθείσες γνώσεις, παραθέτουμε μια μικρή περίληψη του φαινομένου με συμπλήρωση κενών. Οι λέξεις που πρέπει να συμπληρωθούν με τη σειρά είναι: μαγνήτη, μαγνητικό, ρεύμα, διακόπτουμε, αντίθετη, αντίστροφη, αρχίζει, σταματάει, σταθερό. Στο

---

<sup>51</sup> Για όλα τα πειράματα αυτού του μέρους θα χρησιμοποιήσουμε το μεγάλο αναλογικό γαλβανόμετρο CONEL DAVA-320, με τις εξής ρυθμίσεις: αριστερός διακόπτης στο “3 mA”, δεξιός διακόπτης στο “DC”, ακροδέκτες στα “COM” και “V, mA”. Οι ίδιες ρυθμίσεις θα παραμείνουν κάθε φορά που χρησιμοποιούμε το συγκεκριμένο όργανο στο παρόν σενάριο.



τέλος του κειμένου δίνουμε για πρώτη φορά τον όρο **επαγωγή** και τον ορισμό του.

**2.6** Στη συνέχεια θα εξετάσουμε ορισμένες παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται το φαινόμενο. Στην αρχική μας ερώτηση εισάγουμε και τη φράση «*το ρεύμα που επάγεται στο πηνίο*», ώστε οι μαθητές ν’ αρχίσουν να συνηθίζουν στη νέα γλώσσα. Ο καθηγητής μπορεί να εξηγήσει προφορικά πως η φράση σημαίνει «*το ρεύμα που δημιουργείται χωρίς τη χρήση μπαταρίας, το ρεύμα που δημιουργείται μέσω του φαινομένου της επαγωγής*».

**2.6.1** Το πρώτο που θα κάνουμε (το έκανε και ο Faraday το 1831) είναι να αλλάξουμε ρόλους στο μικρό και στο μεγάλο πηνίο. Να βάλουμε, δηλαδή, το μικρό πηνίο στη μπαταρία και το μεγάλο στο γαλβανόμετρο. Το φαινόμενο είναι πανομοιότυπο και αυτό ζητάμε να μας καταγράψουν οι μαθητές.

**2.6.2** Αυτή δραστηριότητα πραγματοποιήθηκε από τον Faraday λίγες μέρες μετά το αρχικό πείραμα. Συγκεκριμένα, αποτελεί μέρος των πειραμάτων που έκανε μετά τον *δακτύλιο* στην προσπάθειά του να καταδείξει τον καθοριστικό ρόλο του πυρήνα μαλακού σιδήρου στην ενίσχυση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Κρίνουμε ότι μπορούμε να την εντάξουμε σε αυτό το σημείο μιας και έχουμε ήδη στημένη τη διάταξη. Τοποθετούμε, λοιπόν, έναν πυρήνα μαλακού σιδήρου στο μικρό πηνίο και στη συνέχεια το βάζουμε μέσα στο μεγάλο πηνίο. Συνδέουμε το μικρό πηνίο στο γαλβανόμετρο και το μεγάλο στη μπαταρία και παρατηρούμε μια πολύ πιο σημαντική απόκλιση της βελόνας. Επομένως, το επαγόμενο ρεύμα είναι πολύ ισχυρότερο και αυτό ζητάμε από τους μαθητές μας να καταγράψουν. Επίσης, τους ζητάμε να κάνουν μια (επιστημονική) υπόθεση για τον ρόλο του πυρήνα περιμένοντας να πάρουμε μια απάντηση που να σχετίζεται με το υλικό (σίδηρος).

Να τονίσουμε εδώ ότι ο εκπαιδευτικός θα πρέπει να προσέξει ώστε να έχει το μικρό πηνίο με τον πυρήνα στο γαλβανόμετρο και το μεγάλο στην μπαταρία. Στην αντίθετη περίπτωση, η απάντηση για τον ρόλο του πυρήνα είναι πάρα πολύ απλή και ήδη διδαγμένη από προηγούμενα μαθήματα (ο πυρήνας αυξάνει τη μαγνητική ένταση του πηνίου κατά τον παράγοντα  $\mu$

της μαγνητικής διαπερατότητας του σιδήρου, σύμφωνα με τον τύπο  $B=\mu B_0$ , επομένως με ισχυρότερο πεδίο το φαινόμενο της επαγωγής, λογικά, θα είναι ισχυρότερο). Σκοπός μας είναι να δείξουμε ότι ο πυρήνας ενισχύει το φαινόμενο της επαγωγής, ακόμα και όταν το μαγνητικό πεδίο (του μεγάλου πηνίου) που το παράγει παραμένει το ίδιο.

**2.6.3** Ο αριθμός των σπειρών σε όλα τα πειράματα που πραγματοποίησε ο Faraday εκείνη την περίοδο αποτέλεσε έναν καθοριστικό παράγοντα. Πάντα κατασκεύαζε τα πηνία του με πολλαπλά άκρα, ώστε να τα μεγαλώνει ή να τα μικραίνει όπως ήθελε. Έτσι και εμείς εδώ θα ασχοληθούμε με αυτόν τον παράγοντα.

Προκειμένου να ελέγξουμε την επίδραση του αριθμού των σπειρών στο φαινόμενο της επαγωγής, θα συναρμολογήσουμε τη διάταξη που φαίνεται στην αντίστοιχη εικόνα του φύλλου εργασίας. Τα τρία πηνία<sup>52</sup> (από το “βαλιτσάκι”) συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και η συνδεσμολογία συνδέεται στο γαλβανόμετρο. Το μικρό πηνίο (με ή χωρίς πυρήνα) συνδέεται στο τροφοδοτικό σε σταθερή τάση (περίπου 10 V) και χρησιμοποιούμε τον ON/OFF διακόπτη του ως διακόπτη του κυκλώματος. Τοποθετούμε το μικρό πηνίο μέσα στο κόκκινο πηνίο (300 σπειρών) και ανοίγουμε τον διακόπτη. Παρατηρούμε μικρή απόκλιση στο γαλβανόμετρο. Κλείνουμε τον διακόπτη και βλέπουμε την αντίστοιχα μικρή, αντίστροφη απόκλιση στο γαλβανόμετρο. Στην συνέχεια, τοποθετούμε το μικρό πηνίο μέσα στο μπλε πηνίο (600 σπειρών) και εκτελώντας το ίδιο πείραμα βλέπουμε μεγαλύτερες αποκλίσεις. Η τρίτη επανάληψη του πειράματος με το κίτρινο πηνίο (1200 σπειρών) θα μας δώσει πολύ πιο έντονες αποκλίσεις, άρα πολύ ισχυρότερο επαγωγικό ρεύμα. Μιας και το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο (του μικρού πηνίου στο τροφοδοτικό) έχει πάντα την ίδια μέγιστη τιμή, συμπεραίνουμε ότι το φαινόμενο της επαγωγής εξαρτάται τελικά από τον αριθμό των σπειρών του πηνίου στο οποίο παρατηρείται.

Ζητάμε από τους μαθητές τη συμπλήρωση ορισμένων κενών (με τις λέξεις: σταθερό, διαφορετικό, αυξάνεται) σε φράσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα που παρατήρησαν. Τέλος, ζητάμε να διατυπώσουν ένα

<sup>52</sup> Κόκκινο: 300σπ./1Ω, Μπλε: 600σπ./2,5Ω, Κίτρινο: 1200σπ./15Ω



συμπέρασμα για τη σχέση του αριθμού των σπειρών των πηνίων και του επαγωγικού ρεύματος που δημιουργείται σε αυτά.

Ως καταληκτική δραστηριότητα σε αυτό το σημείο, ζητάμε από τους μαθητές να βρουν τον λόγο που τοποθετήσαμε τα τρία πηνία σε σειρά και δεν κάναμε το πείραμα ξεχωριστά με το καθένα. Για λόγους οικονομίας χρόνου ζητάμε αυτό να γίνει στο σπίτι ως εργασία. Η απάντηση στο ερώτημα σχετίζεται με τις διαφορετικές, ωμικές αντιστάσεις που παρουσιάζει το κάθε πηνίο. Λόγω αυτών των διαφορετικών αντιστάσεων, αν και η τάση που επάγεται εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών, το ρεύμα εξαρτάται και από την κάθε αντίσταση. Έτσι το γαλβανόμετρο δεν δίνει σαφή αποτελέσματα για το πιο ρεύμα είναι μεγαλύτερο. Μάλιστα αν το πείραμα γίνει έτσι, θα φανεί ότι το πηνίο με τις λιγότερες σπείρες (κόκκινο) δίνει μεγαλύτερο το ρεύμα επειδή παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη αντίσταση<sup>53</sup>. Για να αποφύγουμε αυτόν τον σκόπελο, συνδέουμε τα τρία πηνία στη σειρά και έτσι έχουμε μια συνολική αντίσταση ( $1+2,5+15= 18,5 \Omega$ ). Με αυτόν τον τρόπο, όπου και να δημιουργηθεί η τάση (επαγωγική τάση), θα δημιουργήσει ρεύμα πάνω στην ίδια αντίσταση. Απαλλάσσοντας, λοιπόν, το φαινόμενο από την ωμική του εξάρτηση παίρνουμε ρεύμα που εξαρτάται αποκλειστικά από την τάση και άρα από τον αριθμό των σπειρών.

3. Θα ασχοληθούμε τώρα με το ιστορικό πείραμα του *δακτυλίου*. Αρχικά δίνουμε μια πολύ σύντομη περιγραφή της ιστορικής διάταξης καθώς και ένα σχέδιο από το ημερολόγιο του ίδιου του Faraday. Ίσως θα ήταν διδακτικό, αν υπάρχει δυνατότητα προτζέκτορα στο εργαστήριο φυσικών επιστημών, να προβάλλεται ο [δακτύλιος](#), όπως διασώζεται σήμερα στο *μουσείο Faraday*, στο Βασιλικό Ινστιτούτο του Λονδίνου. Η ιστορική περιγραφή μας σταματά με αποσιωπητικά ώστε να αφήσουμε την ανακάλυψη στους ίδιους τους μαθητές με τα όργανα που τους έχουμε δώσει.

**3.1** Παρακινούμε, τώρα, τους μαθητές να κατασκευάσουν την πειραματική διάταξη που θα χρησιμοποιήσουν. Τα υλικά βρίσκονται στο “βαλιτσάκι” του

<sup>53</sup> Σύγκριση:  $N_{\text{κίτρ.}} = 4N_{\text{κόκκ.}}$ , ενώ  $R_{\text{κίτρ.}} = 15R_{\text{κόκκ.}}$

ηλεκτρομαγνητισμού και ο καθηγητής μπορεί από τον πάγκο του να εκτελεί βήμα – βήμα την κατασκευή, ώστε οι μαθητές να ακολουθούν. Μιας και οι κατασκευές ήταν για τους περισσότερους μαθητές μια οικεία παιδική τους ενασχόληση (βλέπε *LEGO, Playmobile, κλπ*), θεωρούμε ότι σε αυτό το στάδιο θα βοηθήσει στη συγκέντρωση της προσοχής τους στο πείραμα ακόμη περισσότερο. Στη συνέχεια, καλούνται να συνδέσουν το τροφοδοτικό (0 – 20 V) και το ψηφιακό αμπερόμετρο στη συσκευή σύμφωνα με τις οδηγίες που τους δίνονται στο φύλλο εργασίας. Μια επιπλέον πληροφορία τους παρέχεται μέσω του σχηματικού διαγράμματος της διάταξης και του ένθετου απλοποιημένου σχεδίου του δακτυλίου.

**3.2** Ακολούθως, εκτελούμε το βασικό πείραμα του δακτυλίου: αποκαθιστώντας το κύκλωμα μεταξύ του ενός πηνίου και του τροφοδοτικού παρατηρούμε με το αμπερόμετρο (επαγωγικό) ρεύμα στο άλλο πηνίο. Το ρεύμα είναι παροδικό και στη συνέχεια μηδενίζεται. Κλείνοντας το τροφοδοτικό, μηδενίζουμε το ρεύμα στο πρώτο πηνίο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επαγωγή νέου ρεύματος (αντίθετης φοράς) στο κύκλωμα του δεύτερου πηνίου με το αμπερόμετρο.

Αρχικά ζητάμε από τους μαθητές να υποθέσουν – προβλέψουν το τι θα συμβεί ανοίγοντας το τροφοδοτικό και σε μια δεύτερη ερώτηση αν αυτό που θα συμβεί θα έχει διάρκεια. Φυσικά στηριζόμαστε στο γεγονός ότι μιλάμε για ένα ενιαίο σχέδιο μαθήματος (ανεξάρτητα αν πραγματοποιείται σε μια ή περισσότερες διδακτικές ώρες, αρκεί να είναι συνεχόμενες). Επομένως, από το προηγούμενο μέρος (δραστηριότητες 2 – 2.6.3) υποθέτουμε ότι μπορούν να θυμούνται ότι τα επαγωγικά φαινόμενα είναι παροδικά και όχι μόνιμα. Και αν δεν το θυμούνται, θα το διαπιστώσουν αμέσως μετά.

Προκειμένου να τονίσουμε την αντίθετη φορά των δύο επαγωγικών ρευμάτων, επιστούμε την προσοχή στους μαθητές να αναφέρουν στο φύλλο εργασίας τους και τα πρόσημα των ρευμάτων που εμφανίζονται στα αμπερόμετρα.

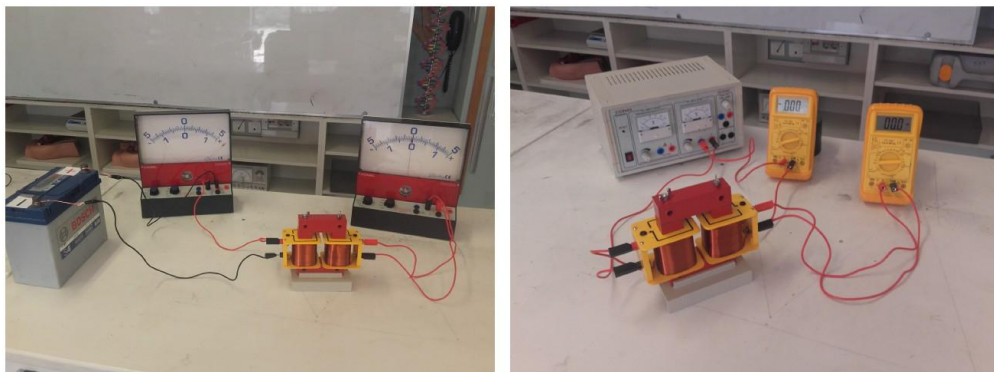
**3.3** Ζητάμε στη συνέχεια από τις ομάδες των μαθητών να μας δώσουν τα πρόσημα των ρευμάτων (αρχικού και τελικού). Φτιάχνουμε έναν πίνακα με αυτά τα πρόσημα (βλέπε φύλλο εργασίας) στον πίνακα του εργαστηρίου και ζητάμε από τους μαθητές να το αντιγράψουν στο φύλλο εργασίας τους. Από τον πίνακα αυτό τους ζητάμε να εξάγουν ένα συμπέρασμα σχετικά με τα



πρόσημα και επομένως σχετικά με τη φορά του επαγωγικού ρεύματος περιμένοντας μια απάντηση σαν: «το αρχικό ρεύμα έχει πάντα αντίθετη φορά από το τελικό». Ελέγχουμε τις απαντήσεις και διορθώνουμε τις τυχόν λανθασμένες, ώστε να μπορέσουμε να συνεχίσουμε με την επόμενη δραστηριότητα.

**3.4** Τώρα ερχόμαστε και πάλι σε μια επίδειξη από τον πάγκο του καθηγητή. Σκοπός είναι να καταλήξουμε σε μια από τις εκφράσεις του κανόνα του Lenz για τη σχέση των φορών του επάγοντος και του επαγόμενου ρεύματος. Ιστορικά, ο Faraday δεν έκανε το πείραμα με δύο γαλβανόμετρα, όμως αναφέρει το συμπέρασμά του, που μαζί με πολλά, άλλα παρόμοια, ουσιαστικά, αποτέλεσαν το σύνολο των εκφράσεων που αργότερα ο Lenz διατύπωσε ως κανόνα.

Συναρμολογούμε, λοιπόν, τη διάταξη που φαίνεται στις επόμενες φωτογραφίες. Δίνουμε δύο εναλλακτικές προτάσεις αλλά στο φύλλο εργασίας θα χρησιμοποιήσουμε την αριστερή, ως διδακτικά καλύτερη, μιας και τα μεγάλα γαλβανόμετρα CONEL των εργαστηρίων μας έχουν πιο “αργές αντιδράσεις” στις ενδείξεις τους και έτσι οι μαθητές μπορούν να αντιληφτούν καλύτερα τα φαινόμενα (ο εγκέφαλός τους έχει τον απαιτούμενο χρόνο να επεξεργαστεί τις ενδείξεις σε σχέση με τις αντίστοιχες των ψηφιακών).



Εικόνα 60. Κυκλώματα Δακτυλίου με δύο αμπερόμετρα - γαλβανόμετρα

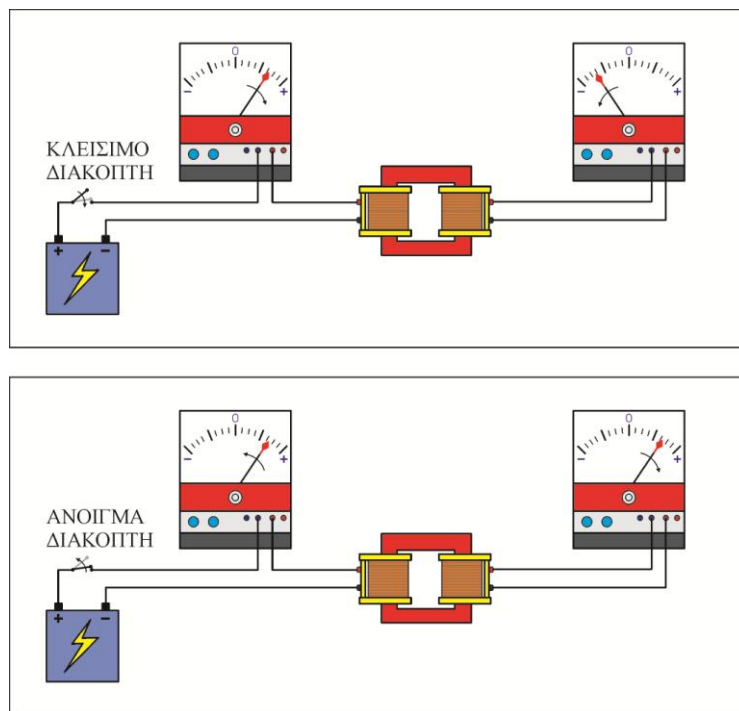
Εδώ ο εκπαιδευτικός θα πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή στις συνδέσεις που θα κάνει. Προτείνουμε να έχει γίνει και δοκιμαστεί από πριν η συνδεσμολογία, ώστε τα όργανα να δώσουν τα αποτελέσματα που θέλουμε να δούνε οι μαθητές μας. Αν γίνει λάθος σύνδεση (κάτι που είναι εύκολο σε



μια τέτοια διάταξη υπό την πίεση του μαθήματος), τότε οι ενδείξεις θα μπερδέψουν τους μαθητές και θα “καταρρεύσει” όλη η δραστηριότητα.

Εκτελούμε το πείραμα συνδέοντας τη μπαταρία (ή το τροφοδοτικό) στο αριστερό πηνίο της διάταξης και βλέπουμε το αμπερόμετρο του κυκλώματος αυτού να δείχνει θετική ένδειξη (η οποία σταθεροποιείται) και το αμπερόμετρο του δεξιού πηνίου να δείχνει αρνητική ένδειξη (η οποία μετά από λίγο μηδενίζεται). Στη συνέχεια, αποσυνδέουμε τη μπαταρία και βλέπουμε το αμπερόμετρό της να μηδενίζει την ένδειξή του, ενώ το αμπερόμετρο του δεξιού πηνίου να δείχνει θετική ένδειξη (η οποία και πάλι μηδενίζεται μετά από λίγο).

Ενώ για εμάς, τους εκπαιδευτικούς, τα προηγούμενα αποτελούν απλώς επιβεβαίωση αυτών που γνωρίζουμε για τον κανόνα του Lenz, για τους μαθητές, που τα βλέπουν πρώτη φορά, αποτελούν σαφώς δύσκολα φαινόμενα όχι μόνο στην ερμηνεία τους αλλά ακόμα και στην καταγραφή τους. Έτσι, προτείνεται η επανάληψη του πειράματος δύο ή τρεις φορές ακόμα, ώστε οι μαθητές να μπορέσουν να συμπληρώσουν σωστά τα σχήματα που τους δίνονται στο φύλλο εργασίας και τα οποία ουσιαστικά αποτελούν την βήμα – βήμα καταγραφή του φαινομένου. Η σωστή σχεδίαση είναι η εξής:



Σχήμα 6. Φορές επαγόντων και επαγωγικών ρευμάτων στον Δακτύλιο



Τέλος διατυπώνουμε τον κανόνα του Lenz με δύο κενά, ώστε οι μαθητές να έχουν ολοκληρωμένη τη μελέτη των ρευμάτων σε αυτό το σημείο. Τα κενά συμπληρώνονται με τις λέξεις: αντίθετα, ίδια.

**3.5** Θα κλείσουμε τη μελέτη του πειράματος του δακτυλίου με τρεις παραλλαγές που θα μας δώσουν τρεις διαφορετικές εξαρτήσεις του φαινομένου. Τα πειράματα που θα ακολουθήσουν θα πραγματοποιηθούν από τους μαθητές ενώ, αν υπάρχει χρόνος, θα προτείνουμε και κάποιες επιπλέον δραστηριότητες που μπορεί να κάνει ο εκπαιδευτικός από τον πάγκο του ως επίδειξη.

**3.5.1** Αρχικά θα εξετάσουμε τη σχέση της περιέλιξης των πηνίων με τη φορά του επαγωγικού ρεύματος. Αν και οι μαθητές έχουν διδαχθεί τον τρόπο εύρεσης του βόριου πόλου του πηνίου<sup>54</sup> από προηγούμενα μαθήματα, θεωρούμε πως το να εμπλακούμε σε μια τέτοια μελέτη θα ήταν εκτός πνεύματος του παρόντος σεναρίου. Ας μην ξεχνάμε, άλλωστε, ότι προσπαθούμε να εισάγουμε τους μαθητές μας στις έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μέσω των ιστορικών πειραμάτων του Faraday και όχι να κάνουμε εκτενή και πλήρη μελέτη των φαινομένων.

Θα κάνουμε, επομένως, μια μόνο αναφορά στη συγκεκριμένη πλευρά του φαινομένου. Ζητάμε από τους μαθητές να κάνουν τις τέσσερις δυνατές συνδέσεις των πηνίων με το τροφοδοτικό και το αμπερόμετρο. Για να μην τους μπερδέψουμε με “θετικά” και “αρνητικά” (μιας και δεν υπάρχουν σημάψεις στα πηνία), αναφερόμαστε στα χρώματα (κόκκινο και μαύρο) των ακροδεκτών των καλωδίων (μπανάνες) και των υποδοχέων των πηνίων (μπόρνες). Σε κάθε παραλλαγή ζητάμε απλά να καταγράψουν το πρόσημο (+ ή -) που φαίνεται στο αμπερόμετρο κατά την αποκατάσταση ή τη διακοπή του κυκλώματος του τροφοδοτικού. Στο τέλος, αναφέρουμε το συμπέρασμα χωρίς πολλές λεπτομέρειες και χωρίς να ζητήσουμε κάτι επιπλέον από τους μαθητές. Θέλουμε απλά να καταγραφεί ο φαινόμενο στη μνήμη τους.

**3.5.2** Τώρα θα κάνουμε μια άλλη παραλλαγή που αφορά την αυξομείωση του ρεύματος μέσω της αυξομείωσης της τάσης του τροφοδοτικού. Να πούμε

<sup>54</sup> Κανόνας: με τα τέσσερα δάχτυλα του δεξιού χεριού τυλίγουμε το πηνίο όπως το τυλίγει και το ρεύμα και ο αντίχειρας δείχνει τον βόριο πόλο. Δείτε [εδώ](#) την οπτικοποίηση του κανόνα.

εδώ ότι το συγκεκριμένο πείραμα δεν το αναφέρει ο Faraday στη δημοσίευση του 1832 πιθανώς γιατί δεν είχε τη δυνατότητα μεταβολής της τάσης στην μπαταρία του. Θα βοηθήσει, όμως, τους μαθητές στη συνειδητοποίηση της έννοιας *ταχύτητα μεταβολής του μαγνητικού πεδίου*, που ο εκπαιδευτικός θα κληθεί να χρησιμοποιήσει στα επόμενα μαθήματα, για να εισάγει τον *ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής* και τελικά να διατυπώσει τον *νόμο του Faraday*.

Ζητάμε, λοιπόν, από τους μαθητές να τοποθετήσουν τα καλώδια της συσκευής στα χρώματά τους και να “παίξουν” με τον περιστροφικό διακόπτη αυχομείωσης της τάσης 0 – 20 V του τροφοδοτικού. Αρχικά, τους ζητάμε να αυξήσουν και στη συνέχεια να μειώσουν την τάση αργά και στη συνέχεια γρήγορα. Κάθε φορά ζητάμε να καταγράψουν τη μέγιστη τιμή που μπορούν να δουν στο αμπερόμετρό τους. Αν το πείραμα γίνει προσεκτικά, αν δηλαδή τηρηθεί το “αργά” και το “γρήγορα” των οδηγιών, τότε οι μέγιστες τιμές των ρευμάτων θα έχουν πράγματι σημαντική διαφορά μεταξύ τους και αυτό που θέλουμε να δείξουμε θα γίνει εμφανές. Προτείνεται, λοιπόν, στον εκπαιδευτικό να επιστήσει την προσοχή των μαθητών σε αυτό το σημείο του φύλλου εργασίας. Ζητάμε, τέλος, μια γενίκευση των παρατηρήσεων σαν συμπέρασμα και περιμένουμε μια απάντηση που να συσχετίζει το μέγεθος του επαγωγικού ρεύματος με την ταχύτητα (ή τον ρυθμό) αυχομείωσης της τάσης στο πρωτεύον πηνίο. Αργότερα, ο εκπαιδευτικός θα χρησιμοποιήσει το συμπέρασμα αυτό για να περάσει από την αυχομείωση της τάσης στη μεταβολή του επάγοντος μαγνητικού πεδίου και της ροής.

**3.5.3** Κλείνοντας τα πειράματα του δακτυλίου θα ακολουθήσουμε για άλλη μια φορά τα βήματα του Faraday. Ζητάμε, τώρα, από τους μαθητές να εκτελέσουν για μια ακόμη φορά το πείραμα του δακτυλίου και αυτή τη φορά να καταγράψουν τις μέγιστες τιμές που βλέπουν στο αμπερόμετρό τους κατά το άνοιγμα και κατά το κλείσιμο του διακόπτη.

Στη συνέχεια, ζητάμε να αποσυναρμολογήσουν τη διάταξη, να απομακρύνουν τον σιδερένιο πυρήνα και να τοποθετήσουν τα πηνία κοντά, όπως και πριν αλλά χωρίς τον δακτύλιο. Καλό θα είναι ο εκπαιδευτικός να εκτελεί τις ίδιες κινήσεις στον πάγκο του, ώστε οι μαθητές που



δυσκολεύονται στην κατανόηση των οδηγιών να βλέπουν τι πρέπει να κάνουν.

Εκτελώντας και πάλι το πείραμα, δηλαδή ανοίγοντας τον διακόπτη και στη συνέχεια ξανακλείνοντάς τον, οι μαθητές καταγράφουν πολύ μικρότερα επαγωγικά ρεύματα στο αμπερόμετρό τους. Τους ζητάμε να γράψουν τι παρατηρούν θεωρώντας ότι σιγά – σιγά γίνεται κατανοητός ο ρόλος του πυρήνα. Για να κατανοηθεί πλήρως αυτός ο ρόλος, ζητάμε τώρα από τους μαθητές να βάλουν το μικρό πάνω μέρος του δακτυλίου ανάμεσα στα πηνία (βλέπε εικόνα στο φύλλο εργασίας) και να εκτελέσουν τα ίδια βήματα (άνοιγμα διακόπτη, καταγραφή μεγίστου αρχικού ρεύματος, κλείσιμο διακόπτη, καταγραφή μεγίστου τελικού ρεύματος). Θα πρέπει να παρατηρήσουν πως, τώρα, τα μέγιστα ρεύματα έχουν ενδιάμεσες τιμές σε σχέση με τα αντίστοιχα των δύο προηγούμενων πειραμάτων<sup>55</sup>. Έτσι, ζητάμε να μας γράψουν ένα συμπέρασμα περιμένοντας να μας αναφέρουν πως ο πυρήνας μας δίνει ισχυρότερο φαινόμενο και πως ακόμα και ένα μικρό κομμάτι σιδήρου (όχι κυκλικός πυρήνας) μας δίνει ισχυρότερο φαινόμενο απ’ ότι να μην υπάρχει καθόλου.

Από όλα τα πειράματα, που έχουν γίνει μέχρι τώρα, γίνεται σταδιακά κατανοητό πως ο πυρήνας μαλακού σιδήρου παίζει ρόλο ενίσχυσης του φαινομένου της επαγωγής. Σε αυτό το σημείο (και εφόσον υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος) ο εκπαιδευτικός μπορεί να προχωρήσει στη επίδειξη ορισμένων ακόμη πειραμάτων σχετικά με τον πυρήνα. Ακολουθώντας πάλι τον ίδιο τον Faraday και χρησιμοποιώντας γέφυρες χαλκού και αλουμινίου<sup>56</sup> μπορεί να δείξει ότι οι γέφυρες αυτές (ως μη μαγνητικά υλικά) δεν επηρεάζουν καθόλου την ισχύ του επαγωγικού φαινομένου. Μπορεί, λοιπόν, ναδειχθεί πως ένας πυρήνας χαλκού ή αλουμινίου δεν έχει περισσότερη επίδραση απ’ αυτήν που έχει ο απλός αέρας. Επομένως, θα γίνει κατανοητό στους μαθητές πως ο ρόλος του

<sup>55</sup> Ίσως ο εκπαιδευτικός θα μπορούσε να αντιστρέψει τη σειρά των δύο τελευταίων πειραμάτων και τα πειράματα να γίνουν: α) δακτύλιος, β) πηνία με το μικρό άνω τμήμα, γ) πηνία χωρίς καθόλου δακτύλιο.

<sup>56</sup> Από το βαλιτσάκι της “συσκευής θερμικής αγωγιμότητας και θερμοδυναμικής ισορροπίας” (α-Lab, Αμαξοτεχνική α.ε.β.ε.) που υπάρχει στα γενικά Λύκεια.

πυρήνα είναι σημαντικός, όταν μιλάμε για πυρήνα σιδήρου και όχι οποιουδήποτε άλλου (μη μαγνητικού) υλικού.



Εικόνα 61. Πυρήνες - Γέφυρες από χαλκό και αλουμίνιο

4. Μετά τον δακτύλιο ο Faraday πειραματίστηκε με διάφορες άλλες διατάξεις. Σκοπός του ήταν η εμβάθυνση και κατανόηση του φαινομένου της επαγωγής και κυρίως η κατανόηση του ρόλου του πυρήνα μαλακού σιδήρου. Αποτέλεσμα ήταν αρχικά η κατασκευή της πρώτης γεννήτριας (μαγνήτης μέσα – έξω σε πηνίο) και στη συνέχεια η κατασκευή της πρώτης δυναμογεννήτριας (χάλκινος δίσκος που περιστρέφεται ανάμεσα σε πόλους πεταλοειδούς μαγνήτη). Στο τελευταίο αυτό μέρος θα ασχοληθούμε με δύο από τα πειράματα του Faraday μετά τον δακτύλιο, την *τριγωνική διάταξη* και την *γεννήτρια*. Μιας και τα εργαστήρια των Γυμνασίων και Λυκείων δεν διαθέτουν διάταξη *δυναμογεννήτριας*, θα την αφήσουμε για κάποιο άλλο σχέδιο μαθήματος.

**4.1 Τριγωνική Διάταξη:** εδώ θα κατασκευάσουμε μια διάταξη που έφτιαξε ο Faraday τον Σεπτέμβριο του 1831 με υλικά που διαθέτουμε στα σχολικά εργαστήρια. Αρχικά θα χρειαστούμε ένα μικρό πηνίο, σαν αυτό από τον διπλό ηλεκτρομαγνήτη που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα του 2<sup>ου</sup> μέρους του παρόντος σεναρίου. Επίσης, θα χρειαστούμε και έναν πυρήνα γι' αυτό το πηνίο, ο οποίος θα πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερος σε μήκος από το ίδιο το πηνίο, ώστε να εξέχει λίγο και από τις δύο άκρες του. Για να ολοκληρώσουμε το πείραμα, εκτός από καλώδια και ένα αμπερόμετρο – γαλβανόμετρο, θα πρέπει να διαθέτουμε και δύο μεγάλους (περίπου 30 cm σε μήκος) μαγνήτες. Όμως, κάτι τέτοιο δεν διαθέτουν τα σχολικά εργαστήρια και έτσι θα καταφύγουμε σε μια ιδιοκατασκευή: θα ενώσουμε τρεις μικρούς κυλινδρικούς μαγνήτες (από τα “βαλιτσάκια” του ηλεκτρομαγνητισμού) σε

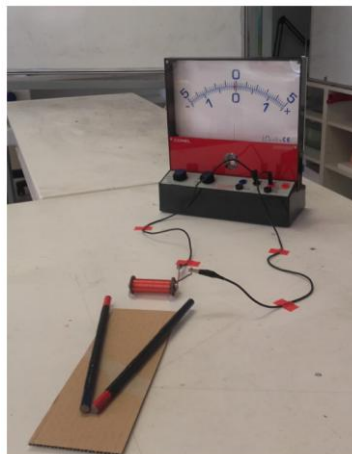


σειρά και θα τους σταθεροποιήσουμε με μονωτική ταινία. Θα επαναλάβουμε άλλη μια φορά τη διαδικασία και, τελικά, θα έχουμε τους δύο μεγάλους μαγνήτες που χρειαζόμαστε.



Εικόνα 62. Τρόπος κατασκευής μακρόστενου μαγνήτη από τρεις μικρότερους

Στη συνέχεια, ενώνουμε το πηνίο με το μεγάλο γαλβανόμετρο και σταθεροποιούμε τα καλώδια στον πάγκο με μονωτική ταινία. Καλό θα είναι να έχουμε σταθεροποιήσει (με λίγη θερμόκολλα) και το πηνίο στον πάγκο και μπροστά από αυτό να έχουμε σταθεροποιήσει ένα κομμάτι χαρτόνι, πάχους περίπου 5 mm. Αυτό θα μας δώσει μια καλή βάση πάνω στην οποία θα μπορούσαμε να κινήσουμε τους μαγνήτες μας, ώστε αυτοί να μπορούν να ακουμπούν ακριβώς πάνω στα άκρα του πυρήνα, ο οποίος λόγω του πηνίου είναι επίσης υπερυψωμένος κατά περίπου 5 mm.



Εικόνα 63. Η σύγχρονη "Τριγωνική Διάταξη"

Εκτελούμε το πείραμα σταδιακά ως εξής: αρχικά φέρουμε σε επαφή τον έναν πόλο του ενός μαγνήτη με το άκρο του πυρήνα. Παρατηρούμε ένδειξη στο γαλβανόμετρο. Ακολούθως, αποκολλάμε τον μαγνήτη και το γαλβανόμετρο δείχνει αντίθετα. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία έχοντας αλλάξει πολικότητα στον μαγνήτη και παρατηρούμε αντίθετες αποκλίσεις

στο γαλβανόμετρο. Στη συνέχεια, κάνουμε τις ίδιες δραστηριότητες (επαφή και αποκόλληση με τον έναν ή τον άλλο πόλο του μαγνήτη) στον άλλο πόλο του πυρήνα. Οι αποκλίσεις είναι τώρα αντιστρόφως αντίθετες. Όλα αυτά ζητάμε να μας τα καταγράψουν οι μαθητές μας στο φύλλο εργασίας με λίγα λόγια.

Ακολουθώντας, πραγματοποιούμε το αυθεντικό πείραμα του Faraday στο οποίο ακουμπάμε μαζί τους δύο μαγνήτες στα άκρα του πυρήνα. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο, δηλαδή το ρεύμα που επάγεται είναι ισχυρότερο και η απόκλιση της βελόνας του γαλβανομέτρου μεγαλύτερη. Ζητάμε από τους μαθητές μια εκτίμηση του γιατί έχουμε περισσότερο ρεύμα, περιμένοντας μια απάντηση που να σχετίζεται με την ενισχυτική επαλληλία των δύο πεδίων των μαγνητών.

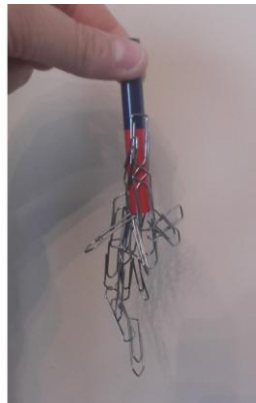
Και εδώ κάνουμε μια “τολμηρή” ερώτηση: συνδυάζοντας τα προηγούμενα ρωτάμε προς τα πού θα κινηθεί η βελόνα του γαλβανομέτρου, αν αποκολλήσουμε τον έναν ή τον άλλο μαγνήτη. Η αυθόρμητη απάντηση που περιμένουμε είναι «αντίθετα», αλλά αν κάποιος σκεφτεί και θυμηθεί λίγο τα πειράματα που μόλις είδε θα προβλέψει πως επειδή αποκολλούμε από το ένα άκρο, βόρειο (ή νότιο) πόλο ενώ από το άλλο, νότιο (ή βόρειο αντίστοιχα), η απόκλιση της βελόνας θα πρέπει να είναι η «ίδια». Εν τοιαύτη περιπτώσει, κάνουμε την επίδειξη και το δείχνουμε εξηγώντας παράλληλα το τι συμβαίνει. Ζητάμε, τέλος, από τους μαθητές που προέβλεψαν λάθος να διορθώσουν το φύλλο εργασίας τους.

Πριν καταλήξουμε στα τελικά συμπεράσματα και κλείσουμε αυτό το σετ πειραμάτων, κάνουμε ένα μικρό αλλά πολύ διδακτικό πείραμα: με έναν μαγνήτη σηκώνουμε αρκετούς σιδερένιους συνδετήρες προτρέποντας τους μαθητές να αναρωτηθούν τι κάνει τους κάτω – κάτω συνδετήρες να έλκονται, αν και δεν ακουμπούν άμεσα στον μαγνήτη.

Προφανώς η απάντηση που περιμένουμε είναι ότι μαγνητίζονται λόγω της επαφής τους με τους άλλους συνδετήρες, που ακουμπούν άμεσα στον μαγνήτη. Με άλλα λόγια, όταν ένα σιδερένιο αντικείμενο έρθει σε επαφή (αν και όχι απαραίτητα) με έναν μαγνήτη, γίνεται και το ίδιο μαγνήτης<sup>57</sup>.

---

<sup>57</sup> Και πάλι θεωρούμε ότι είναι εκτός πνεύματος του παρόντος σεναρίου να ανοίξουμε εδώ μια συζήτηση περί θεωρίας [περιοχών Weiss](#). Μας αρκεί η διαπίστωση της μαγνήτισης μέσω της επαφής.



Εικόνα 64. Απλή επίδειξη έλξης μαγνήτη σε συνδετήρες

Έτσι, προχωράμε στο επόμενο ερώτημα που αφορά την τριγωνική διάταξη: τι συμβαίνει στον πυρήνα του μαλακού σιδήρου, όταν ακουμπούν οι μαγνήτες; Γίνεται και αυτός μαγνήτης. Αναμένουμε, λοιπόν, την προηγούμενη απάντηση από τους μαθητές ως συνέπεια της “μελέτης” του πειράματος των συνδετήρων. Και στη συνέχεια, είμαστε έτοιμοι να οικοδομήσουμε την εξήγηση του επαγωγικού φαινομένου ως αποτέλεσμα της δημιουργίας μαγνητικού πεδίου μέσα στο πηνίο. Έχουμε, επομένως, τον πυρήνα, ο οποίος μαγνητίζεται, και το μαγνητικό του πεδίο εισέρχεται μέσα στο πηνίο. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται το επαγωγικό ρεύμα στο πηνίο. Είναι σχεδόν αντίθετο φαινόμενο από τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο πηνίο, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα (μπαταρίας). Και λέμε «σχεδόν» γιατί, ενώ το μαγνητικό πεδίο του ρευματοφόρου πηνίου είναι μόνιμο όσο το ρεύμα είναι σταθερό, το επαγωγικό ρεύμα στο πηνίο είναι παροδικό και διαρκεί μόνο όσο διαρκεί η μεταβολή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, που του επιβάλλεται.

Τα παραπάνω προσπαθούμε να τα εκμαιεύσουμε από τους μαθητές μας με τρεις ερωτήσεις: «τι παθαίνει ο πυρήνας σιδήρου;», «πως αυτό συνδέεται με το επαγωγικό φαινόμενο στο πηνίο;», και «είναι μόνιμο το φαινόμενο;». Φυσικά δεν περιμένουμε πλήρεις απαντήσεις και γι’ αυτό έχουμε στο τέλος μια παράγραφο με συμπλήρωση κενών, ώστε να συγκεντρωθεί και να αποσαφηνιστεί η νέα γνώση. Οι λέξεις που συμπληρώνουν τα κενά είναι: επάγεται, αντίθετα, ίδια, ίδια, αντίθετη, επαφή, μαγνητίζεται, πηνίο. Στο τέλος του κειμένου παραθέτουμε (χωρίς κενά για την αποφυγή λαθών) με



**έντονα** γράμματα το συμπέρασμα, το οποίο σε μεταγενέστερα μαθήματα, θα αξιοποιηθεί, για να εξηγηθεί ο τύπος  $E_{επ.} = -N\Delta\Phi/\Delta t$ , που αποτελεί τη σύγχρονη μαθηματική διατύπωση του νόμου του Faraday.

**4.2 Γεννήτρια:** στην τελευταία σειρά πειραμάτων θα δούμε τη γέννηση της πρώτης συσκευής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από μηχανική κίνηση και, φυσικά, τον προάγγελο της επόμενης και πιο σημαντικής εφεύρεσης της εποχής αυτής, της *δυναμογεννήτριας*. Ξεκινάμε με μια μικρή ιστορική αναδρομή και ένα χαρακτηριστικό σκίτσο από το ημερολόγιο του ίδιου του Faraday. Ενημερώνουμε τους μαθητές ότι και πάλι θα ακολουθήσουμε τα βήματα του Faraday στη παρουσίαση των πειραμάτων.

**4.2.1** Ζητάμε από τους μαθητές να κατασκευάσουν το κύκλωμα “αμπερόμετρο – πηνίο” και με τον μαγνήτη που διαθέτουν να ασχοληθούν με αυτό για περίπου δύο λεπτά. Δεν τους κατευθύνουμε, προκειμένου μέσω της αυτενέργειας να μπορέσουν να δουν τα φαινόμενα που στη συνέχεια θα τους παρουσιάσουμε αναλυτικά. Ελπίζουμε ότι αρκετοί θα παρατηρήσουν τη δημιουργία επαγωγικού ρεύματος κατά την είσοδο ή την έξοδο του μαγνήτη από το πηνίο. Αν, όντως, αυτό συμβεί, θα έχουμε ήδη δημιουργήσει έναν ικανό ενθουσιασμό, που θα “εκμεταλλευτούμε” στη συνέχεια.

**4.2.2** Τώρα θα γίνουμε πιο συγκεκριμένοι και κυρίως πιο συστηματικοί. Με αναλυτικές οδηγίες, που δίνονται στο φύλλο εργασίας, ζητάμε από τους μαθητές την εισαγωγή και εξαγωγή του μαγνήτη, καθώς και την παραμονή του μέσα σ’ αυτό. Η καταγραφή των μεγίστων ρευμάτων θα μας δείξει ότι η εισαγωγή και η εξαγωγή δίνουν αντίθετα ρεύματα, ενώ κατά την παραμονή το ρεύμα μηδενίζεται. Στη συνέχεια εκτελούμε όλες (3×4) τις δυνατές παραλλαγές, δηλαδή την εισαγωγή, παραμονή και εξαγωγή του άλλου πόλου και τις δύο παραπάνω διαδικασίες με ταχύτερο ρυθμό.

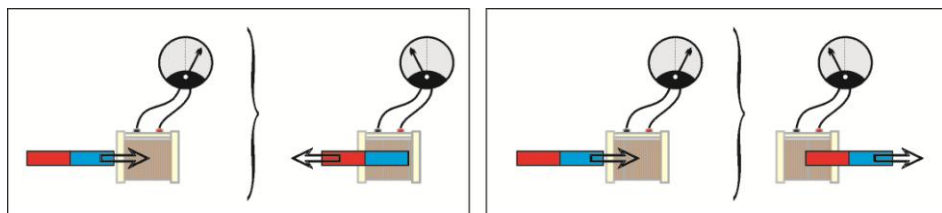
Προκειμένου να τονώσουμε το ηθικό των μαθητών μας, δηλώνουμε πως «*μόλις κατασκεύασαν την πρώτη γεννήτρια*» με, επιπλέον, σκοπό να συνειδητοποιήσουν τη σπουδαιότητα αυτής της ανακάλυψης. Σε αυτό το σημείο ο εκπαιδευτικός μπορεί να προβάλλει στην οθόνη του προτζέκτορα την εικόνα της πρώτης [γεννήτριας](#) που κατασκευάστηκε, όπως αυτή



διασώζεται ακόμα στο μουσείο Faraday, στο Βασιλικό Ινστιτούτο του Λονδίνου.

Ζητάμε επίσης από τους μαθητές να καταγράψουν τα συμπεράσματά τους περιμένοντας να αναφέρουν όχι μόνο την παραγωγή ρεύματος από την κίνηση του μαγνήτη αλλά και την εξάρτηση της έντασης αυτού του ρεύματος από την ταχύτητα και τη φορά κίνησης του μαγνήτη.

**4.2.3** Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί μια τελευταία δραστηριότητα από τους μαθητές. Αφού πρώτα συμπληρώσουν μια παράγραφο με κενά (οι λέξεις είναι: αντίθετο, ίδιο, είσοδος, έξοδος) που συγκεντρώνει τις προηγούμενες αποκτηθείσες γνώσεις, τους θέτουμε το ερώτημα τι θα συμβεί αν ο μαγνήτης μπει από τη μια και με συνεχόμενη κίνηση βγει από την άλλη. Το ερώτημα τέθηκε και από τον ίδιο τον Faraday και η απάντηση που δόθηκε ήταν ότι το ρεύμα που καταγράφεται κατά την είσοδο του μαγνήτη είναι αντίθετο από το ρεύμα που καταγράφεται κατά την έξοδο είτε από την ίδια πλευρά (μπαίνει βόρειος, βγαίνει βόρειος), είτε κατά την έξοδο από την άλλη πλευρά (μπαίνει βόρειος και από την άλλη τελικά βγαίνει νότιος). Το επόμενο σχήμα εξηγεί τα όσα προαναφέραμε:



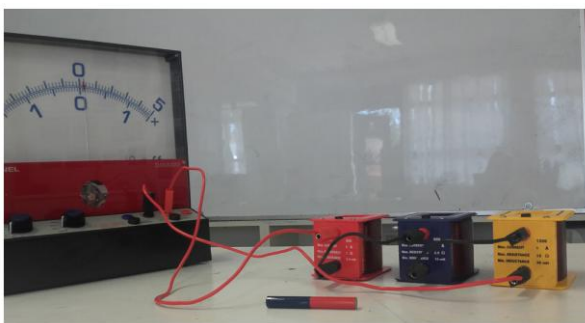
Σχήμα 7. Έξοδος νότιου (μπλε) από αριστερά ισοδυναμεί με έξοδο βόρειου (κόκκινου) από δεξιά

Προτρέπουμε τους μαθητές να εκτελέσουν το πείραμα (αργά) με το πηνίο “πλαγιαστό” και να καταγράψουν τις παρατηρήσεις τους. Ίσως μια προφορική κουβέντα μεταξύ του εκπαιδευτικού και των μαθητών για το φαινόμενο σε αυτό το σημείο να ήταν εποικοδομητική. Προτείνουμε, επίσης, ο εκπαιδευτικός να φτιάξει στον πίνακα του εργαστηρίου (ή να το δείξει στην οθόνη του προτζέκτορα) το σχέδιο που προηγήθηκε.

**4.2.4** Για το τέλος, θα αφήσουμε την πρωτοβουλία στον εκπαιδευτικό ώστε να κάνει γρήγορα τρεις επιδείξεις σχετικά με τια εξαρτήσεις του φαινομένου από διάφορους παράγοντες. Για την επίδειξη αυτών των φαινομένων

προτείνεται η χρήση του μεγάλου γαλβανόμετρου CONEL, μιας και η κίνηση της βελόνας του είναι αργή και οι μαθητές προλαβαίνουν να συνειδητοποιήσουν τι βλέπουν. Σε κάθε περίπτωση ζητάμε σύντομη καταγραφή των φαινομένων.

- Η πρώτη δραστηριότητα σχετίζεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη. Έτσι, ο εκπαιδευτικός πρώτα εισάγει αργά έναν μαγνήτη και στη συνέχεια εισάγει το ίδιο αργά δύο μαγνήτες με διάταξη NN-SS. Η διαφορά στο επαγωγικό φαινόμενο είναι εμφανής. Προσοχή! αν οι δύο μαγνήτες μπουν με διάταξη NS-SN, τα αποτελέσματα θα είναι σχεδόν μηδενικά.
- Στη δεύτερη δραστηριότητα ασχολούμαστε με την εξάρτηση του φαινομένου από τον αριθμό των σπειρών του πηνίου. Και εδώ θα πρέπει να προσέξουμε πως, αν το πείραμα γίνει με τρία διαφορετικά πηνία, η διαφορετική αντίσταση του κάθε πηνίου θα δώσει ασαφή αποτελέσματα για τα επαγωγικά ρεύματα. Έτσι, θα κάνουμε το ίδιο όπως και στη δραστηριότητα **2.6.3**, δηλαδή θα βάλουμε τα τρία πηνία (300, 600, 2100 σπειρών) σε σειρά, ώστε το επαγωγικό ρεύμα να έχει πάντα την ίδια (ολική) αντίσταση και η τιμή του να εξαρτάται μόνο από την επαγωγική τάση που δημιουργείται στο εκάστοτε πηνίο, στο οποίο εισάγουμε ή εξάγουμε τον μαγνήτη.

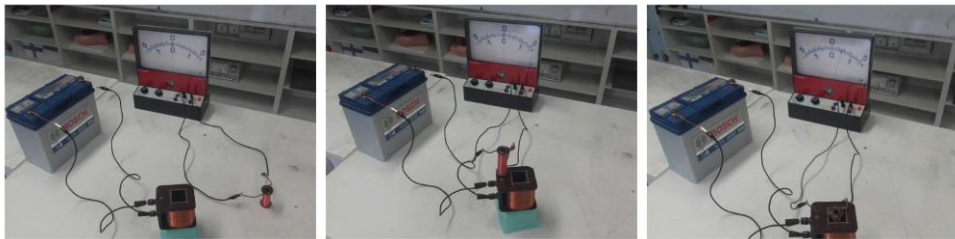


Εικόνα 65. Τρία πηνία (300-600-1200) σε σειρά

- Τέλος θέτουμε μια λίγο προβοκατόρικη ερώτηση: *μπορούμε να παράγουμε ρεύμα από ρεύμα; και αυτό συμφέρει;* Η απάντηση θα δοθεί, αν κάνουμε το πείραμα “πηνίο σε πηνίο”, και αυτή τη φορά βάζουμε και βγάζουμε το μικρό πηνίο στο μεγάλο σαν να ήταν το πρώτο ραβδόμορφος μαγνήτης. Γιατί να το κάνουμε αυτό; Μα γιατί το έκανε (και αυτό) ο Faraday. Εδώ,



ο εκπαιδευτικός θα πρέπει να αναφέρει πως ο Faraday ενδιαφερόταν για την πλήρη διερεύνηση του φαινομένου της επαγωγής και όχι για “ηλεκτροπαραγωγή”. Ίσως, θα πρέπει επίσης να αναφερθεί πως την εποχή αυτή (αν και είχε τις αμφιβολίες του) διαχώριζε τον μαγνητισμό του ρευματοφόρου πηνίου από τον μαγνητισμό του μόνιμου μαγνήτη. Ήθελε, έτσι, να διαπιστώσει πως και οι δύο αυτοί μαγνητισμοί έδιναν το ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή τη δημιουργία του επαγωγικού ρεύματος. Τώρα όσον αφορά την ερώτηση «*συμφέρει;*» Προφανώς και όχι, γι’ αυτό ο Faraday και πολλοί μεταγενέστεροί του εφευρέτες και επιστήμονες στράφηκαν στη μηχανική (περιστροφική) κίνηση προκειμένου να παράξουν ρεύμα σε μαζική κλίμακα. Μια μικρή αναφορά του εκπαιδευτικού στα παραπάνω θεωρείται ικανοποιητική και προτείνεται.



Εικόνα 66. Πηνίο σε Πηνίο

5. ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΙΣΗ: ολοκληρώνοντας τις δραστηριότητες θα γυρίσουμε πίσω και θα ζητήσουμε, ως ανατροφοδότηση, από τους μαθητές μας να εξηγήσουν το αρχικό πείραμα ενεργοποίησης του ενδιαφέροντός τους: την *ηλεκτρομηχανική ταλάντωση*. Παραθέτουμε μια φωτογραφία προς υπενθύμιση του φαινομένου αλλά, αν η διάταξη είναι ακόμη στημένη στον πάγκο του καθηγητή, προτείνουμε να επαναληφθεί μια ακόμα φορά το πείραμα. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να προβληθεί κάποιο βίντεο του πειράματος στην οθόνη.

Η εξήγηση του φαινομένου γίνεται μέσω της συμπλήρωσης ενός κειμένου με κενά. Οι λέξεις που λείπουν είναι: μεταβολή, επαγωγικό, ρεύμα, διαρρέει, διαρρέεται, μαγνήτης, έλκεται, απωθείται, απώλεια, αντιστάσεις. Έτσι, οι μαθητές θα αποκτήσουν μια σφαιρική άποψη σχετικά με την επαγωγή και ο εκπαιδευτικός θα μπορέσει να προχωρήσει, τις επόμενες ημέρες, στη διδασκαλία των μαθηματικών τύπων και των νόμων του φαινομένου.

6. Τέλος προτείνεται στους μαθητές, ως προαιρετική εργασία για το σπίτι, η κατασκευή ενός πηνίου από υλικά που μπορούν εύκολα να βρουν και η μετατροπή του σε γεννήτρια με τη χρήση ενός μαγνήτη. Μάλιστα, προτρέπουμε τους μαθητές να φέρουν την κατασκευή τους στο σχολείο και να την δοκιμάσουν με τον μαγνήτη και το αμπερόμετρο του εργαστηρίου.

- Ακολουθεί το φύλλο εργασίας: «*Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή*».
- Όλα τα πειράματα που αναφέρονται στο συγκεκριμένο σενάριο δείχνονται σε [βίντεο](#) που περιγράφουμε στη συνέχεια της εργασίας.



## Φυσική Β΄ Λυκείου

## ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

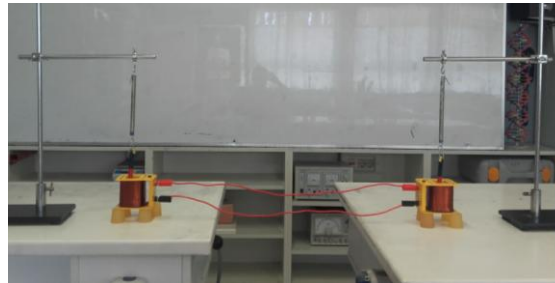
(θετικού προσανατολισμού)

### Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή



1. Παρατηρήστε τη συσκευή που είναι στημένη στον πάγκο του καθηγητή. Δώστε τα βασικά στοιχεία που την αποτελούν:

- α) \_\_\_\_\_  
β) \_\_\_\_\_  
γ) \_\_\_\_\_  
δ) \_\_\_\_\_



- 1.1 Θέτουμε σε ταλάντωση τον έναν μαγνήτη. Κινείται ο άλλος; Ναι  , Όχι
- 1.2 Ενώνουμε το ένα καλώδιο μεταξύ των πηνίων. Κινείται ο άλλος; Ναι  , Όχι
- 1.3 Ενώνουμε και το άλλο καλώδιο, δηλαδή δημιουργούμε ένα κλειστό κύκλωμα μεταξύ των πηνίων.
- Κινείται ο άλλος; Ναι  , Όχι
  - Επηρεάζεται η κίνηση του αρχικού μαγνήτη; Ναι  , Όχι
- 1.4 Ακινητοποιούμε τους μαγνήτες και τώρα θέτουμε σε ταλάντωση τον άλλο μαγνήτη. Περιγράψτε με λίγα λόγια αυτό που παρατηρείτε:

---

---

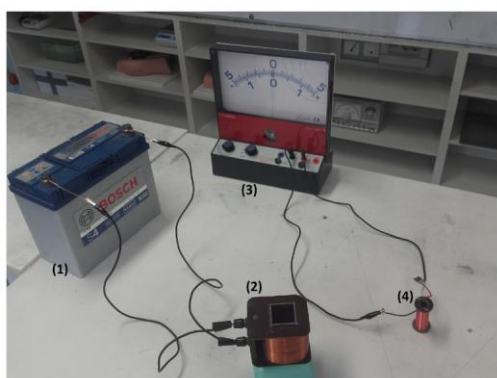
---

---



**2. Στα τέλη Αυγούστου του 1831 ο Michael Faraday τυλίγει αρκετά μέτρα σύρμα γύρω από έναν ξύλινο κύλινδρο και δημιουργεί δύο πηνία, το ένα μέσα στο άλλο. Συνδέει το ένα με μπαταρία και το άλλο με γαλβανόμετρο. Έτσι άρχισαν όλα...**

Παρατηρήστε την πειραματική διάταξη στον πάγκο του καθηγητή. Καταγράψτε τα βασικά όργανα και συσκευές που βλέπετε.



1 <sup>ο</sup> ΚΥΚΛΩΜΑ	
1	
2	

2 <sup>ο</sup> ΚΥΚΛΩΜΑ	
3	
4	

**2.1** Τοποθετούμε το μικρό πηνίο μέσα στο μεγάλο. Συνδέουμε το μεγάλο πηνίο στην μπαταρία. Τι παρατηρείτε;

---



---

**2.2** Το φαινόμενο που παρατηρήσατε κατά την προηγούμενη σύνδεση συνεχίζεται;  
Ναι  , Όχι

**2.3** Αποσυνδέουμε την μπαταρία. Τι παρατηρείτε;

---



---

**2.4** Το φαινόμενο που παρατηρήσατε κατά την προηγούμενη αποσύνδεση συνεχίζεται;  
Ναι  , Όχι



**2.5** Ας περιγράψουμε συνολικά το φαινόμενο: όταν συνδέσουμε την μπαταρία στο μεγάλο πηνία, αυτό μετατρέπεται σε \_\_\_\_\_. Όμως, το \_\_\_\_\_ πεδίο του διέρχεται και μέσα από το μικρό πηνίο. Έτσι, στο μικρό πηνίο δημιουργείται \_\_\_\_\_, το οποίο γίνεται αντιληπτό από την ένδειξη στο γαλβανόμετρο (αμπερόμετρο). Το ρεύμα αυτό σταματά να υπάρχει μετά από λίγο και ξαναεμφανίζεται, όταν \_\_\_\_\_ το κύκλωμα. Η διαφορά με το αρχικό ρεύμα είναι ότι έχει \_\_\_\_\_ φορά, κάτι που φαίνονται από την \_\_\_\_\_ εκτροπή της βελόνας του γαλβανόμετρου. Και πάλι, το ρεύμα στο μικρό πηνίο παύει να υπάρχει μετά από λίγο. Μπορούμε να πούμε πως το ρεύμα στο μικρό πηνίο εμφανίζεται μόνο όταν το μεγάλο πηνίο \_\_\_\_\_ να διαρρέεται από ρεύμα ή \_\_\_\_\_ να διαρρέεται από ρεύμα, και όχι όταν αυτό διαρρέεται από \_\_\_\_\_ ή δεν διαρρέεται καθόλου από ρεύμα. Το φαινόμενο που περιγράφουμε ονομάζεται ΕΠΑΓΩΓΗ (η δημιουργία ρεύματος από μεταβολή του μαγνητικού πεδίου).

**2.6** Όμως, από τι άλλο εξαρτάται το ρεύμα που επάγεται στο ένα πηνίο λόγω του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται στο άλλο;

**2.6.1** Αρχικά θ’ αλλάξουμε τη σύνδεση των οργάνων – συσκευών. Θα συνδέσουμε το μεγάλο πηνίο στο γαλβανόμετρο και το μικρό στη μπαταρία. Τι παρατηρείτε;

---

---

**2.6.2** Στη συνέχεια θα βάλουμε μέσα στο μικρό πηνίο ένα κομμάτι σιδήρου (κράμα μαλακού σιδήρου που δεν μαγνητίζεται μόνιμα). Εκτελούμε και πάλι το πείραμα. Τι παρατηρούμε και τι μπορούμε να υποθέσουμε για τον “πυρήνα” μαλακού σιδήρου που βάλαμε;

---

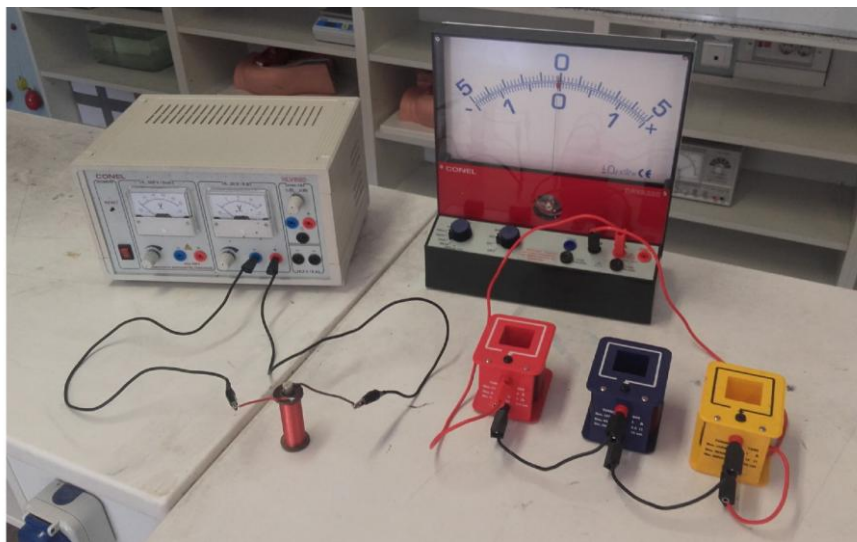
---

---

---



**2.6.3** Πιστεύετε ότι το φαινόμενο εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών των πηνίων; Έχουμε μάθει ότι το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών του (για την ακρίβεια, από την πυκνότητα  $N/l$  των σπειρών του τύπου  $B=4\pi k_{\mu}IN/l$ ). Είναι, λοιπόν, λογικό πως, αν βάλουμε στη μπαταρία πηνία με όλο και αυξανόμενο αριθμό σπειρών, θα έχουμε όλο και μεγαλύτερα μαγνητικά πεδία, άρα εντονότερο το φαινόμενο της επαγωγής στο πηνίο του γαλβανόμετρου. Τι θα συμβεί, όμως, αν συνδέσουμε πηνία με διαφορετικό αριθμό σπειρών στο γαλβανόμετρο και το μικρό πηνίο στο τροφοδοτικό σε σταθερή τάση;



Πραγματοποιούμε το κύκλωμα της προηγούμενης εικόνας και εκτελούμε το πείραμα. Τοποθετούμε διαδοχικά το μικρό πηνίο στο κόκκινο (300 σπειρών), στο μπλε (600 σπειρών) και το κίτρινο (1200 σπειρών) πηνίο και ανοίγουμε κάθε φορά τον διακόπτη του τροφοδοτικού, αφού πρώτα το έχουμε ρυθμίσει στα 10 V περίπου. Το ρεύμα που διαρρέει το μικρό πηνίο είναι \_\_\_\_\_, γιατί η τάση στα άκρα του και η αντίστασή του είναι σταθερές. Όμως, το ρεύμα που μας δίνει το κάθε πηνίο στο γαλβανόμετρο είναι \_\_\_\_\_ και συγκεκριμένα \_\_\_\_\_ όσο αυξάνεται ο αριθμός των σπειρών. Επομένως:

---



---



---



- Σκεφτείτε και απαντήστε στο σπίτι: γιατί δεν κάναμε το πείραμα ξεχωριστά με το κάθε πηνίο αλλά τα συνδέσαμε όλα μαζί σε σειρά;

---

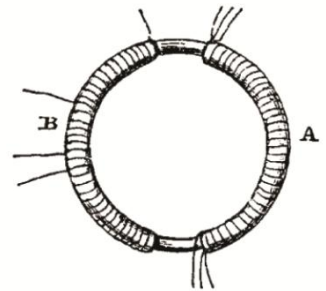
---

---

---



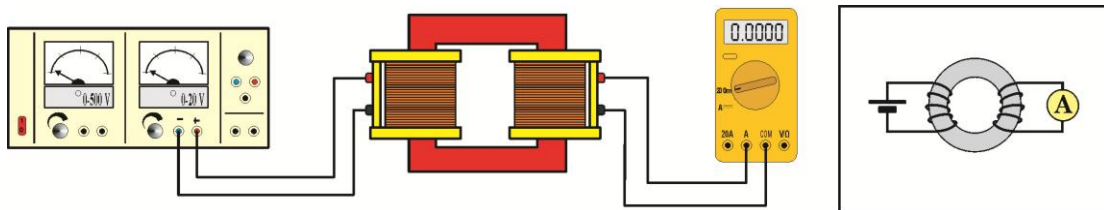
**3. Στις 29 Αυγούστου του 1831 ο M. Faraday εκτελεί το πιο ιστορικό από τα πειράματα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τυλίγει γύρω από έναν σιδερένιο δακτύλιο δύο σύρματα, τα οποία μονώνει τόσο μεταξύ τους όσο και με τον δακτύλιο, με βαμβακερό νήμα και ύφασμα. Έχοντας κατασκευάσει δύο πηνία, συνδέει το ένα σε γαλβανόμετρο και το άλλο στη μπαταρία του. Με την αποκατάσταση του κυκλώματος βλέπει...**



**3.1** Ας κάνουμε τώρα μια ανακατασκευή του ιστορικού πειράματος του Faraday. Στους πάγκους σας έχετε όλα τα υλικά που χρειάζονται: το “βαλιτσάκι” του ηλεκτρομαγνητισμού, ένα τροφοδοτικό 0 – 20 V, ένα ψηφιακό πολύμετρο και καλώδια σύνδεσης. Ακολουθήστε τις οδηγίες του καθηγητή σας και κατασκευάστε την παρακάτω διάταξη:



- Στη συνέχεια συνδέστε το ένα πηνίο με το τροφοδοτικό (ΠΡΟΣΟΧΗ! το τροφοδοτικό είναι πάντα κλειστό και οι περιστροφικοί του διακόπτες στο “0”). Συνδέστε στο δεξιό βολτόμετρο (0 – 20 V).
- Το άλλο πηνίο θα συνδεθεί στο ψηφιακό (κίτρινο) πολύμετρο.
- Το πολύμετρο θα πρέπει να είναι κλειστό, ο περιστροφικός του διακόπτης στα “200 m” (συνεχές ρεύμα) και οι ακροδέκτες θα συνδεθούν στις θέσεις “COM” και “A”. Τώρα το πολύμετρό σας θα λειτουργεί ως αμπερόμετρο. Ζητήστε τη βοήθεια του καθηγητή σας αν έχετε πρόβλημα.
- Το κύκλωμα που κατασκευάσατε είναι το παρακάτω:



### 3.2 Ας πειραματιστούμε:

- Ανοίξτε το τροφοδοτικό.
- Περιστρέψτε τον διακόπτη του βολτομέτρου (0 – 20 V) στα 10 V περίπου.
- Κλείστε το τροφοδοτικό.
- Ανοίξτε το αμπερόμετρο.

#### ► ΠΡΙΝ ΑΝΟΙΞΕΤΕ ΤΟ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ:

- Τι περιμένετε να συμβεί, όταν θα ανοίξετε το τροφοδοτικό;

---



---

- Αυτό που περιγράψατε μόλις τώρα, πιστεύετε ότι θα έχει διάρκεια;

---

#### ► ΑΝΟΙΞΕΤΕ ΤΟ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ:

Περιγράψτε με λίγα λόγια αυτό που παρατηρείτε στο αμπερόμετρο (μην ξεχάσετε να αναφέρετε και το πρόσημο του ρεύματος).



---

---

---

► **ΚΛΕΙΣΤΕ ΤΟ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ:**

Περιγράψτε με λίγα λόγια αυτό που παρατηρείτε στο αμπερόμετρο (μην ξεχάσετε να αναφέρετε και το πρόσημο του ρεύματος).

---

---

---

**3.3** Η κάθε ομάδα να δώσει στον καθηγητή τα πρόσημα των δύο επαγωγικών ρευμάτων (το αρχικό κατά το άνοιγμα του διακόπτη και το τελικό κατά το κλείσιμό του). Αντιγράψτε τα πρόσημα στον παρακάτω πίνακα:

Ομάδα	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z	H
Πρόσημο $I_{αρχ.}$								
Πρόσημο $I_{τελ.}$								

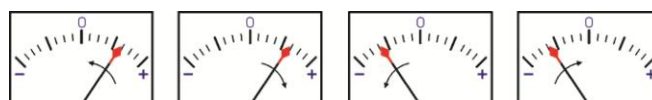
Τι συμπέρασμα βγάξετε για τη φορά του επαγωγικού ρεύματος από τον πίνακα των πρόσημων που φτιάξαμε;

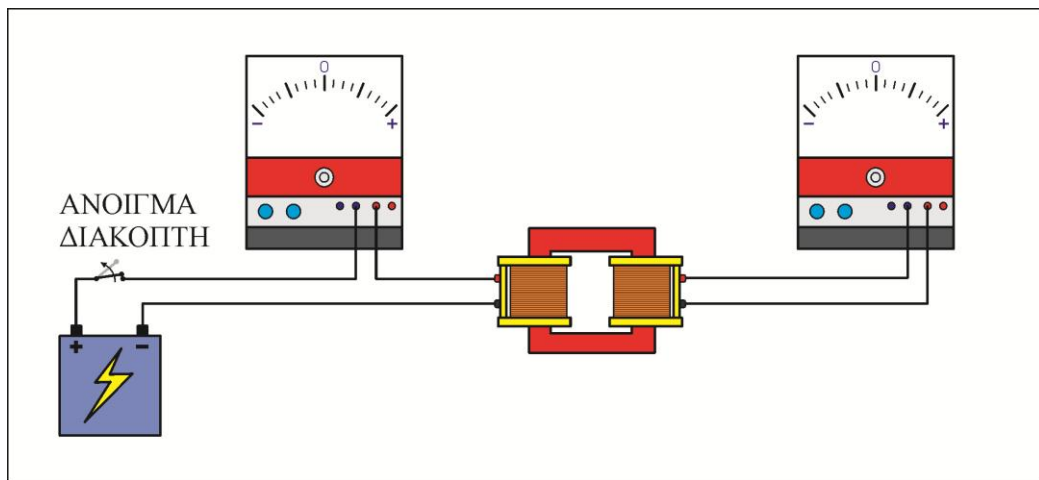
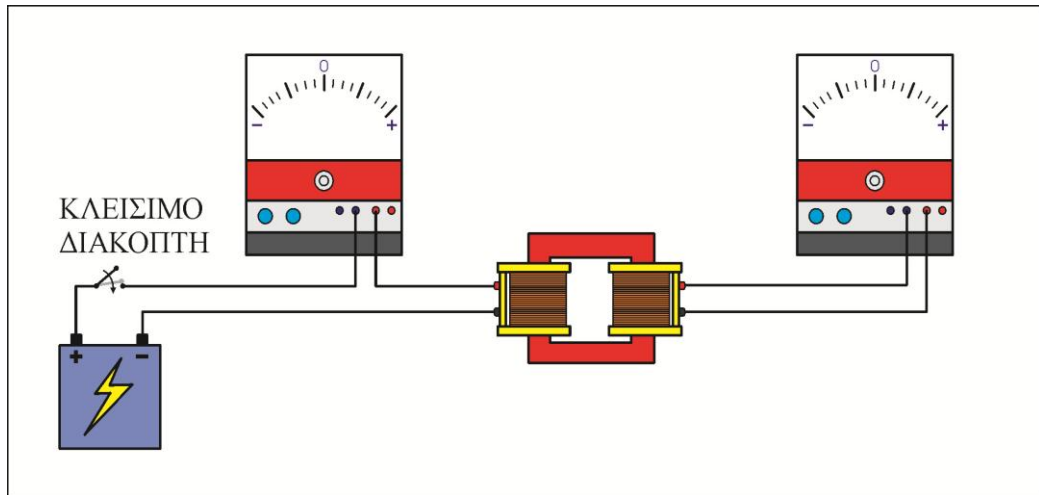
---

---

**3.4** Όμως, πως σχετίζεται η φορά του επαγωγικού ρεύματος με τη φορά του επάγοντος ρεύματος; Δηλαδή, τι σχέση έχει το ρεύμα του τροφοδοτικού με το ρεύμα που δημιουργείται στο κύκλωμα πηνίου – αμπερομέτρου;

Για να απαντήσετε σε αυτό το ερώτημα (ένα θεμελιώδες ερώτημα σε όλη την έρευνα που διεξήγαγε Faraday το 1831) παρακολουθήστε την επίδειξη στον πάγκο του καθηγητή σας. Στη συνέχεια, σχεδιάστε τους δείκτες των αμπερομέτρων και τη φορά κίνησής τους:

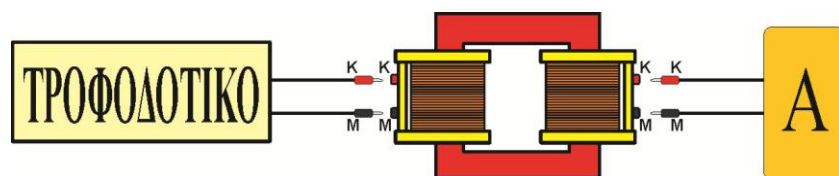




Το τελικό συμπέρασμα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Όταν το επαγωγικό ρεύμα δημιουργείται από ρεύμα που αυξάνεται ( $0 \rightarrow I$ ), τότε έχει \_\_\_\_\_ φορά από αυτό. Όταν, όμως, το επαγωγικό ρεύμα δημιουργείται από ρεύμα που μειώνεται ( $I \rightarrow 0$ ), τότε έχει \_\_\_\_\_ φορά με αυτό. Η διατύπωση αυτή, αργότερα, αποτέλεσε μια από τις εκφράσεις του κανόνα του *Lenz*.

**3.5** Ας πειραματιστούμε λίγο ακόμα: θα εκτελέσετε τώρα, ορισμένα επιπλέον πειράματα, με τον δακτύλιο που έχετε κατασκευάσει.

**3.5.1** Τα πηνία στη συσκευή σας έχουν μαύρες και κόκκινες υποδοχές (μπόρνες). Τα καλώδια που διαθέτετε έχουν επίσης μαύρα και κόκκινα άκρα (μπανάνες).





- Φροντίστε η συσκευή σας να έχει συνδεδεμένα τα καλώδια ανάλογα με τα χρώματά τους (κόκκινη μπανάνα σε κόκκινη μπόρνα και μαύρη σε μαύρη, όπως στο προηγούμενο σχήμα).
    - ❖ Ανοίξτε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
    - ❖ Κλείστε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
  - Στη συνέχεια αντιστρέψτε τα καλώδια στο αριστερό πηνίο (κόκκινη μπανάνα σε μαύρη μπόρνα και μαύρη μπανάνα σε κόκκινη μπόρνα).
    - ❖ Ανοίξτε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
    - ❖ Κλείστε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
  - Επαναφέρετε τα καλώδια στο αριστερό πηνίο, όπως ήταν αρχικά (κόκκινο σε κόκκινο και μαύρο σε μαύρο) και αντιστρέψτε τα καλώδια στο δεξιό πηνίο (κόκκινη μπανάνα σε μαύρη μπόρνα και το αντίστροφο).
    - ❖ Ανοίξτε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
    - ❖ Κλείστε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
  - Χωρίς να πειράξετε το δεξιό πηνίο, αντιστρέψτε τώρα και τα καλώδια του αριστερού πηνίου (κόκκινο σε μαύρο και αντίστροφα).
    - ❖ Ανοίξτε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
    - ❖ Κλείστε το τροφοδοτικό. Το πρόσημο του ρεύματος στο αμπερόμετρο είναι ( ).
- Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι η φορά του επαγωγικού ρεύματος εξαρτάται από τον τρόπο περιέλιξης των πηνίων (αν το ρεύμα “εισέρχεται” από την αντίθετη είσοδο, διαρρέει το πηνίο ανάποδα απ’ ότι έχει περιελιχθεί κατά την κατασκευή του).

**3.5.2** Ας δούμε, τώρα, έναν ακόμη παράγοντα, από τον οποίο εξαρτάται το φαινόμενο. Μέχρι τώρα είπαμε ότι, όταν το ρεύμα στο ένα πηνίο αυξάνεται (στιγμιαία) από το μηδέν σε μια καθορισμένη τιμή, στο άλλο πηνίο εμφανίζεται επαγωγικό ρεύμα και το ίδιο συμβαίνει κατά την διακοπή του πρώτου ρεύματος. Τι θα συμβεί, όμως, αν το ρεύμα στο ένα πηνίο μεταβάλλεται διαρκώς; Ας πειραματιστούμε:

- Τοποθετήστε τα καλώδια στη συσκευή σας, όπως τα είχατε αρχικά (κόκκινα σε κόκκινα και μαύρα σε μαύρα).
- Γυρίστε τον περιστροφικό διακόπτη του βολτομέτρου, του τροφοδοτικού, στα 0 V.
- Ανοίξτε το τροφοδοτικό.
- Αυξήστε σταδιακά και αργά την τάση από τα 0 στα 20 V παρατηρώντας παράλληλα την ένδειξη του επαγωγικού ρεύματος στο αμπερόμετρό σας. Καταγράψτε τη μέγιστη τιμή που είδατε:  $I_{\max}^{\text{αρχ.}} = \dots\dots\dots \text{mA}$ .
- Μειώστε σταδιακά και αργά την τάση από τα 20 στα 0 V παρατηρώντας παράλληλα την ένδειξη του επαγωγικού ρεύματος στο αμπερόμετρό σας. Καταγράψτε τη μέγιστη τιμή που είδατε:  $I_{\max}^{\text{τελ.}} = \dots\dots\dots \text{mA}$ .
- Επαναλάβετε τα δύο προηγούμενα πειράματα αυτή τη φορά με μεγαλύτερη ταχύτητα (γυρίστε τον διακόπτη γρήγορα από τα 0 στα 20 και από τα 20 στα 0 V). Τι ρεύματα παρατηρείτε τώρα;  $I_{\max}^{\text{αρχ.}} = \dots\dots\dots \text{mA}$  &  $I_{\max}^{\text{τελ.}} = \dots\dots\dots \text{mA}$ .

Μπορείτε να γενικεύσετε τις παραπάνω παρατηρήσεις σας και να εξάγετε ένα συμπέρασμα;

---



---



---



---

**3.5.3** Ας δούμε τώρα πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος του πυρήνα στο πείραμά μας (και ας θυμηθούμε από τη δραστηριότητα **2.6.2** τον ρόλο του και εκεί). Ξεκινάμε με το *πείραμα αναφοράς* (ως προς το οποίο θα συγκρίνουμε τα επόμενα αποτελέσματά μας).



- Συνδέστε τα καλώδια όπως τα είχατε αρχικά (κόκκινα στα κόκκινα και μαύρα στα μαύρα).
- Ανοίξτε το τροφοδοτικό, ρυθμίστε το στα 10 V και κλείστε το ξανά.
- Ξανανοίξτε το τροφοδοτικό και καταγράψτε τη μέγιστη τιμή που δείχνει το αμπερόμετρό σας:  $I_{\max}^{\alpha\phi\lambda} = \dots\dots\dots \text{mA}$ .
- Κλείστε το τροφοδοτικό και καταγράψτε, πάλι, τη μέγιστη τιμή που δείχνει το αμπερόμετρό σας:  $I_{\max}^{\tau\epsilon\lambda} = \dots\dots\dots \text{mA}$ .

Τώρα, αποσυναρμολογήστε τελείως τη συσκευή σας. Τοποθετήστε τα πηνία πολύ κοντά (σχεδόν σε επαφή) μεταξύ τους και συνδέστε το δεξιό με το αμπερόμετρο και το αριστερό στο κλειστό τροφοδοτικό.



- Ανοίξτε το τροφοδοτικό. Τι παρατηρείτε;

\_\_\_\_\_

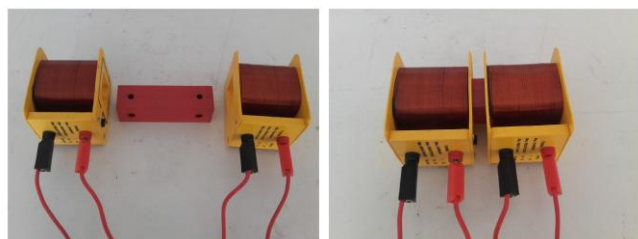
\_\_\_\_\_  $I_{\max}^{\alpha\phi\lambda} = \dots\dots\dots \text{mA}$

- Κλείστε το τροφοδοτικό. Τι παρατηρείτε τώρα;

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  $I_{\max}^{\tau\epsilon\lambda} = \dots\dots\dots \text{mA}$

Τώρα τοποθετήστε το μικρό, κόκκινο, πάνω τμήμα του τετράγωνου πυρήνα, έτσι ώστε να είναι “λίγο μέσα” σε κάθε πηνίο (βλέπε φωτογραφία).





- Ανοίξτε το τροφοδοτικό και καταγράψτε την ένδειξη του αμπερομέτρου. Στη συνέχεια κλείστε το τροφοδοτικό και κάντε το ίδιο.

$$I_{\max}^{\text{αρχ.}} = \dots\dots\dots \text{mA} \quad \& \quad I_{\max}^{\text{τελ.}} = \dots\dots\dots \text{mA}$$

- Τι παρατηρείτε και πως μπορούμε να γενικεύσουμε τις παρατηρήσεις μας σε ένα συμπέρασμα;

---



---



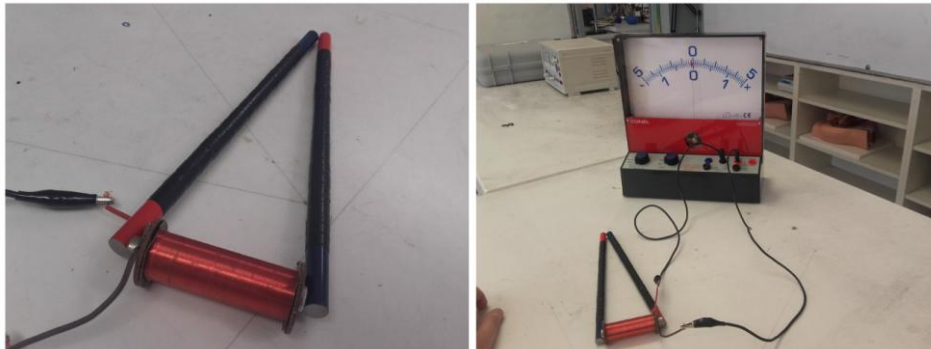
---



**4. Μετά το περίφημο πείραμα του δακτυλίου και για τις επόμενες εβδομάδες ο Faraday πειραματίστηκε με διάφορες άλλες διατάξεις, προκειμένου να μελετήσει το φαινόμενο της επαγωγής σε βάθος.**

Κλείνοντας, λοιπόν, το μάθημά μας ας δούμε δύο από αυτές τις “μετά δακτυλίου” διατάξεις.

**4.1 Η Τριγωνική Διάταξη:** αποτελείται από δύο, μεγάλου μήκους, μαγνήτες και ένα πηνίο με πυρήνα, το οποίο συνδέουμε σε γαλβανόμετρο.



Παρακολουθήστε την επίδειξη στον πάγκο του καθηγητή σας και συμπληρώστε τις παρακάτω προτάσεις:

- Τι συμβαίνει όταν φέρνουμε σε επαφή έναν πόλο του ενός μαγνήτη με τον πυρήνα του πηνίου;

---



- Τι συμβαίνει όταν αποκολλούμε τον μαγνήτη αυτό, από τον πυρήνα;

---

- Αν αλλάξουμε την πολικότητα του μαγνήτη;

---

- Αν αλλάξουμε την πλευρά του πυρήνα στην οποία ακουμπάμε/αποκολλούμε τον μαγνήτη;

---

Τώρα θα ακουμπήσουμε και τους δύο μαγνήτες μαζί, με τον βόρειο πόλο του ενός στη μια πλευρά του πυρήνα και τον νότιο πόλο του άλλου στην άλλη πλευρά του πυρήνα.

- Το φαινόμενο, τώρα, είναι πιο έντονο. Που νομίζετε ότι οφείλεται αυτό;

---

- Συνδυάζοντας τα πειράματα που κάναμε, πριν λίγο, με τον έναν μαγνήτη, μπορείτε, τώρα, να προβλέψετε προς τα πού θα κινηθεί η βελόνα αν αποκολλήσουμε τον έναν ή τον άλλο μαγνήτη;

---

---

---

► **Ας το επιβεβαιώσουμε...**

Θα θυμηθούμε, τώρα, κάτι άλλο: παρατηρήστε τον καθηγητή σας. Εκτελεί ένα από τα πρώτα πειράματα που όλοι σας, κάποτε, κάνατε ως παιδιά... Το τι συμβαίνει, όλοι το καταλαβαίνετε. Όμως, γιατί έλκονται οι κάτω – κάτω συνδετήρες αφού δεν ακουμπάνε στον μαγνήτη; Υπάρχει κάποια ιδιότητα που μετάλλου (Fe) από το οποίο είναι φτιαγμένοι οι συνδετήρες;

---

---

- Επανερχόμαστε στην τριγωνική διάταξη. Τι “παθαίνει” ο πυρήνας σιδήρου, όταν ακουμπάμε τον έναν ή και τους δύο μαγνήτες πάνω του;

---

---

- Πως το παραπάνω φαινόμενο συνδέεται με την επαγωγή (δημιουργία) ρεύματος στο πηνίο;

---

---

- Είναι μόνιμο φαινόμενο;

---

---

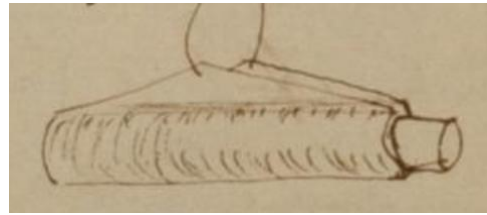
Τελικά Συμπεράσματα: όταν ακουμπάμε τους πόλους δύο μαγνητών στα άκρα του πυρήνα ενός πηνίου, τότε \_\_\_\_\_ ρεύμα σε αυτό (που το ανιχνεύουμε με το γαλβανόμετρο). Όταν αποκολλάμε τους μαγνήτες, το ρεύμα που θα δημιουργηθεί έχει \_\_\_\_\_ φορά από το προηγούμενο. Αν ακουμπήσουμε μόνο τον έναν μαγνήτη από τη μια πλευρά του πυρήνα ή μόνο τον άλλο από την άλλη, το επαγόμενο ρεύμα έχει την \_\_\_\_\_ φορά. Αν αποκολλήσουμε μόνο τον ένα μαγνήτη από την μια πλευρά του πυρήνα ή μόνο τον άλλο από την άλλη πλευρά, το ρεύμα έχει και πάλι την \_\_\_\_\_ φορά, όμως, αυτή είναι \_\_\_\_\_ από τη φορά των προηγούμενων περιπτώσεων.

Το ρεύμα που επάγεται στο πηνίο οφείλεται στο γεγονός ότι με την \_\_\_\_\_ των μαγνητών στα άκρα του πυρήνα, αυτός \_\_\_\_\_ και το μαγνητικό του πεδίο διέρχεται μέσα από το \_\_\_\_\_. Όταν, όμως, έχουμε μεταβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μέσα σ’ ένα πηνίο, τότε σε αυτό εμφανίζεται το φαινόμενο της επαγωγής και δημιουργείται (επαγωγικό) ρεύμα.

Με άλλα λόγια, η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, που διέρχεται μέσα από ένα πηνίο, επάγει σε αυτό ρεύμα. Προσοχή: το μαγνητικό πεδίο είναι εξωτερικό, δηλαδή δημιουργείται από άλλο αίτιο και όχι από ρεύμα που διαρρέει το ίδιο το πηνίο. Είναι, επομένως, **αιτία του (επαγωγικού) ρεύματος** και όχι αποτέλεσμά του.

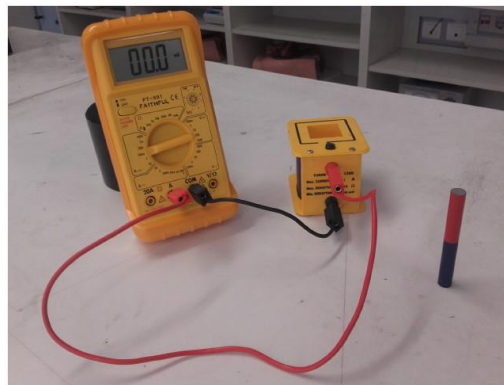


**4.2 Στις 17 & 18 Οκτωβρίου του 1831, ο Faraday κατασκευάζει τη συσκευή που βλέπουμε στο διπλανό (δικό του) σχέδιο.**



**Αν και η εικόνα είναι λίγο ασαφής, οι περιγραφές που δίνει δίπλα της είναι αρκετά λεπτομερείς. Αυτές οι περιγραφές θα μας οδηγήσουν και στα δικά μας πειράματα:**

**4.2.1** Αρχικά θα πρέπει να κατασκευάσετε το κύκλωμα της επόμενης εικόνας και να έχετε και έναν μικρό μαγνήτη (υπάρχει στο “βαλιτσάκι” σε ειδικό κουτάκι). Οι ακροδέκτες στο αμπερόμετρο πρέπει να είναι πάλι στα “COM” και “A” και ο περιστροφικός του διακόπτης στα “200m” (συνεχές).



- Ανοίξτε το αμπερόμετρο και «παίξτε» με το κύκλωμα και τον μαγνήτη για δύο λεπτά. (Προσοχή: μην αλλάξετε τις ρυθμίσεις στο αμπερόμετρο). Καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας:

---

---

---

**4.2.2** Ας γίνουμε τώρα πιο συγκεκριμένοι: να θυμηθούμε ότι το μπλε μέρος του μαγνήτη είναι ο βόρειος πόλος και το κόκκινο ο νότιος.

Θα εισάγετε αργά τον μαγνήτη με τον βόρειό του πόλο στο πηνίο, θα τον αφήσετε για λίγο ήρεμο μέσα και, τέλος, θα τον βγάλετε, πάλι αργά. Θα

καταγράψετε κάθε φορά τα μέγιστα ρεύματα που βλέπετε<sup>58</sup>. Στη συνέχεια θα κάνετε το ίδιο με τον νότιο πόλο, πάλι αργά<sup>59</sup>.

Μετά θα επαναλάβετε τις δύο προηγούμενες διαδικασίες αλλά αυτή τη φορά γρήγορα και θα καταγράψετε πάλι τα ρεύματα.

Ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα για να κάνετε οργανωμένα την όλη διαδικασία:

- Εισάγετε αργά τον βόρειο πόλο στο πηνίο:  $I_{\max}^{\rightarrow N} = \dots\dots mA$
- Αφήστε σε ηρεμία τον μαγνήτη μέσα στο πηνίο:  $I^{Nin} = \dots\dots mA$
- Βγάλτε αργά τον βόρειο πόλο από ο πηνίο:  $I_{\max}^{N\rightarrow} = \dots\dots mA$
- Εισάγετε αργά τον νότιο πόλο στο πηνίο:  $I_{\max}^{\rightarrow S} = \dots\dots mA$
- Αφήστε σε ηρεμία τον μαγνήτη μέσα στο πηνίο:  $I^{Sin} = \dots\dots mA$
- Βγάλτε αργά τον νότιο πόλο από ο πηνίο:  $I_{\max}^{S\rightarrow} = \dots\dots mA$
- Εισάγετε γρήγορα τον βόρειο πόλο στο πηνίο:  $I_{\max}^{\rightarrow N} = \dots\dots mA$
- Αφήστε σε ηρεμία τον μαγνήτη μέσα στο πηνίο:  $I^{Nin} = \dots\dots mA$
- Βγάλτε γρήγορα τον βόρειο πόλο από ο πηνίο:  $I_{\max}^{N\rightarrow} = \dots\dots mA$
- Εισάγετε γρήγορα τον νότιο πόλο στο πηνίο:  $I_{\max}^{\rightarrow S} = \dots\dots mA$
- Αφήστε σε ηρεμία τον μαγνήτη μέσα στο πηνίο:  $I^{Sin} = \dots\dots mA$
- Βγάλτε γρήγορα τον νότιο πόλο από ο πηνίο:  $I_{\max}^{S\rightarrow} = \dots\dots mA$

► ΣΥΓΧΑΡΗΤΗΡΙΑ: μόλις κατασκευάσατε την πρώτη **γεννήτρια**, δηλαδή την πρώτη μηχανή παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από μηχανική κίνηση. Γράψτε με λίγα λόγια τα συμπεράσματά σας από τα πειράματα που κάνατε:

---

---

---

<sup>58</sup> Συμβολισμοί:  $\rightarrow N$ : εισαγωγή βόρειου πόλου,  $N_{in}$ : βόρειος πόλος μέσα,  $N\rightarrow$ : εξαγωγή βόρειου πόλου

<sup>59</sup> Συμβολισμοί:  $\rightarrow S$ : εισαγωγή νότιου πόλου,  $S_{in}$ : νότιος πόλος μέσα,  $S\rightarrow$ : εξαγωγή νότιου πόλου



**4.2.3** Ας δούμε τώρα μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή του πειράματος. Στις προηγούμενες δραστηριότητες καταγράψαμε τα εξής: το πρόσημο του επαγωγικού ρεύματος, όταν μπαίνει βόρειος πόλος είναι \_\_\_\_\_ από το πρόσημο, όταν ο βόρειος πόλος βγαίνει. Όμως, είναι \_\_\_\_\_, όταν βγαίνει νότιος πόλος. Επομένως η \_\_\_\_\_ βορείου ή η \_\_\_\_\_ νοτίου πόλου μαγνήτη στο πηνίο, είναι ισοδύναμα φαινόμενα.

Τι φαντάζεστε ότι θα συμβεί αν βάλουμε τον μαγνήτη στο πηνίο με τον βόρειό του πόλο και τον σπρώξουμε να βγει από την άλλη;

- Βάλτε το πηνίο “πλαγιαστό”, δηλαδή με τον άξονά του παράλληλο στον πάγκο σας και εκτελέστε το παραπάνω πείραμα. Κάντε το αργά, για να προλάβετε να δείτε τα πρόσημα των επαγωγικών ρευμάτων. Καταγράψτε το φαινόμενο:

---

---

---

**4.2.4** Θα παρακολουθήσετε τώρα, στον πάγκο του καθηγητή σας, ορισμένες επιδράσεις σχετικά με τις εξαρτήσεις του φαινομένου από διάφορους παράγοντες και θα καταγράψετε τα συμπεράσματά σας.

- Εξαρτάται το φαινόμενο από την ένταση του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη;

---

- Εξαρτάται το φαινόμενο από τον αριθμό των σπειρών του πηνίου;

---

- Μπορούμε να ξοδέψουμε ρεύμα για να παράξουμε ρεύμα; συμφέρει;

---

---

---



5. ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ: μιας και τελειώσαμε με τα εισαγωγικά πειράματα της επαγωγής και μάθαμε αρκετά πράγματα αυτές τις μέρες, ας γυρίσουμε στο αρχικό μας πείραμα, την *ηλεκτρομηχανική ταλάντωση*. Ας θυμηθούμε τι είχαμε κάνει παρατηρώντας την παρακάτω φωτογραφία:



Θέτοντας σε ταλάντωση τον πρώτο μαγνήτη έχουμε συνεχή είσοδο και έξοδο του από το πηνίο. Αυτό προκαλεί \_\_\_\_\_ στο μαγνητικό πεδίο, που διέρχεται από το πηνίο, και άρα \_\_\_\_\_ φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό, λοιπόν, δημιουργεί \_\_\_\_\_ στο πηνίο, το οποίο μέσω των καλωδίων \_\_\_\_\_ και το απέναντι πηνίο. Όταν, όμως, το άλλο πηνίο \_\_\_\_\_ από ηλεκτρικό ρεύμα, γίνεται \_\_\_\_\_. Έτσι, ξεκινάει να \_\_\_\_\_ (και να \_\_\_\_\_) και ο δεύτερος μαγνήτης δημιουργώντας την ταλάντωση που βλέπουμε. Ο λόγος για τον οποίο αποσβαίνει τόσο γρήγορα η ταλάντωση του πρώτου μαγνήτη (άρα και του δεύτερου) είναι η \_\_\_\_\_ ενέργειας ως θερμότητα στις \_\_\_\_\_ των πηνίων και των καλωδίων. Επειδή η διάταξη είναι συμμετρική, το φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί και από την ανάποδη πλευρά.



6. ΔΟΥΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΠΙΤΙ: (...προαιρετικό)

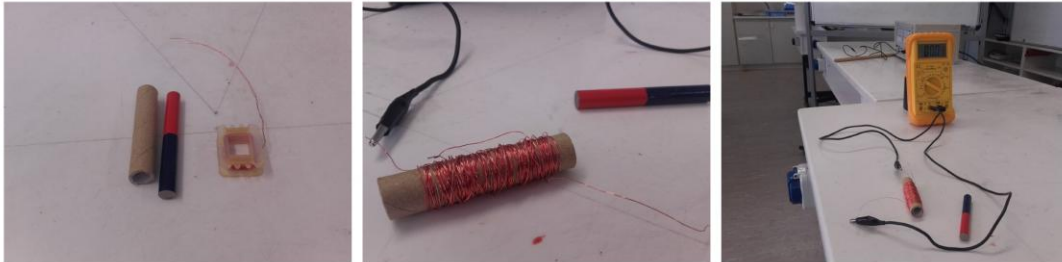
Από έναν παλιό μετασχηματιστή (πχ από φορτιστή κινητού τηλεφώνου) μπορείτε να βγάλετε ένα πηνίο. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το ίδιο ή το σύρμα του για να φτιάξετε ένα δικό σας. Για να το κάνετε αυτό, αρκεί να τυλίξετε αρκετές σπείρες από



Αναστάσιος Νέζης “Ιστορικά πειράματα Faraday και η αξιοποίησή τους στη διδακτική της Φυσικής σε Γυμνάσιο και Λύκειο”

το σύρμα γύρω από ένα χαρτονένιο κύλινδρο<sup>60</sup>. Να σημειώσουμε ότι το σύρμα των πηνίων αυτών είναι περασμένο με ειδικό μονωτικό βερνίκι, άρα θα πρέπει με κάποιο μαχαίρι ή ξυράφι να ξύσετε τα άκρα του, προκειμένου να είναι αγωγίμα. Όταν το ετοιμάσετε, φέρτε το στο σχολείο να το δοκιμάσουμε!!!

Καλή Επιτυχία!



<sup>60</sup> ...μπορείτε να βρείτε έναν στο σουπερμάρκετ, όταν η ταμίας αλλάζει το ρολό των αποδείξεων στην ταμιακή μηχανή!







## Κατασκευή εκπαιδευτικών ταινιών μικρής διάρκειας και ανάρτησή τους στο διαδίκτυο

Ένα σημαντικό μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή video που αφορούν τα πειράματα που προαναφέρθηκαν στα σενάρια. Η πορεία παρουσίασης των πειραμάτων είναι (όπως και στα σενάρια) σχεδόν ιστορική, βασισμένη στη δημοσίευση *Experimental Researches in Electricity*, του 1832. Σε όλα τα βίντεο υπάρχουν φωτογραφίες, σχήματα, λεζάντες και τίτλοι – κείμενα που επεξηγούν σε κάθε στάδιο αυτά που βλέπει ο θεατής. Για καλύτερη κατανόηση προτείνουμε να έχουν διαβαστεί πρώτα τα αντίστοιχα σενάρια ή, ακόμα καλύτερα, το 2<sup>ο</sup> μέρος της παρούσας εργασίας.

Ο σκοπός αυτής της δραστηριότητας είναι η αναπαραγωγή και διάδοση της γνώσης. Θεωρούμε, επίσης, ότι τα video θα λειτουργήσουν σαν εφελκυστικό για τους εκπαιδευτικούς που θα θελήσουν να ασχοληθούν πειραματικά με την επαγωγή είτε από την πλευρά μιας ερευνητικής εργασίας (project) είτε στην περίπτωση που ο ηλεκτρομαγνητισμός ξαναμπεί στη διδακτέα ύλη. Επίσης, τα video μπορούν να λειτουργήσουν ως ηλεκτρονικό εγχειρίδιο (manual) για όποιον θελήσει να αναπαράγει τα πειράματα που αναφέρονται στα σενάρια.

Η ανάρτηση έχει γίνει στο κανάλι του συγγραφέα [www.youtube.com/tasosne](http://www.youtube.com/tasosne) (και συγκεκριμένα στο playlist [FARADAY](#)) και όλα είναι διαθέσιμα για αναπαραγωγή σε οποιαδήποτε ηλεκτρονική συσκευή υποστηρίζει τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αναλυτικά τα video είναι τα εξής:

### 1. [Ørsted's Experiment \(το πείραμα του Ørsted\)](#)

Μια σειρά πειραμάτων με πυρήνα το ιστορικό πείραμα εκτροπής μιας μαγνητικής βελόνας από ρευματοφόρο αγωγό.

Το video ξεκινάει με την επίδειξη της πολλαπλής μπαταρίας (9,18,...,45 V) που κατασκευάστηκε ειδικά για την πραγματοποίηση του πειράματος (μιας και το τροφοδοτικό του σχολικού εργαστηρίου “έριχνε” συνεχώς την ασφάλειά του).

Στη συνέχεια, φαίνεται η συσκευή (ιδιοκατασκευή) και ένα αρχικό πείραμα: η περιστροφή της συσκευής γύρω από κατακόρυφο άξονα χωρίς να διαρρέεται από ρεύμα, ώστε να φανεί ότι η πυξίδα δείχνει συνεχώς σε μια κατεύθυνση, στο βορρά. Έτσι, ο θεατής θα πειστεί ότι η πυξίδα, πράγματι, εκτρέπεται από την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος, όταν αυτό διαρρέει τη συσκευή.

Κατόπιν, συνδέουμε τη συσκευή στη μπαταρία και βλέπουμε την εκτροπή της βελόνας. Με αντίθετη σύνδεση της μπαταρίας (αντίθετο ρεύμα) βλέπουμε αντίθετη εκτροπή.

Συνεχίζουμε με την επίδειξη του γαλβανόμετρου Schweigger (άλλη μια ιδιοκατασκευή) που πολλαπλασιάζει το φαινόμενο που παρατήρησε ο Ørsted. Εδώ, βλέπουμε απλώς την εκτροπή της βελόνας, όταν το όργανο διαρρέεται από ρεύμα και την επαναφορά στον αρχικό της προσανατολισμό, όταν το ρεύμα διακόπτεται.

Τέλος, κλείνουμε αυτό το video με δύο πειράματα για το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού. Στο πρώτο έχουμε τοποθετήσει τέσσερις πυξίδες περιμετρικά ενός κατακόρυφου σύρματος. Οι πυξίδες εκτρέπονται από την αρχική τους διεύθυνση, όταν το σύρμα διαρρέεται από ρεύμα. Μάλιστα, λόγω του σχήματος του μαγνητικού πεδίου (ομόκεντροι κύκλοι γύρω από το σύρμα) οι βελόνες των πυξίδων διατάσσονται κυκλικά γύρω από αυτό. Τα παραπάνω φαίνονται καλύτερα, αν ρίξουμε ρινίσματα σιδήρου γύρω από το σύρμα στη θέση των πυξίδων. Αυτές είναι και οι καταληκτικές φωτογραφίες του video μαζί με κάποιες γκραβούρες και σχήματα (από το διαδίκτυο) ως επίλογος και επανάληψη (55).

## 2. [FARADAY 1831 \(part 1\)](#)

Αυτό αποτελεί το πρώτο από μια σειρά video που αφορούν τα ιστορικά πειράματα που διεξήγαγε ο Michael Faraday από τον Αύγουστο έως τα τέλη του 1831 και δημοσίευσε την 1/1/1832 στην εργασία του *Experimental Researches in Electricity*.

Στο video αυτό βλέπουμε την σύγχρονη αναπαραγωγή του πρώτου πειράματος που έκανε ο Faraday στα τέλη του Αυγούστου, λίγο πριν το σπουδαίο πείραμα του *δακτυλίου*. Πρόκειται για το “*Πηνίο σε πηνίο*” το οποίο πραγματοποιούμε με δύο πηνία (μικρό & μεγάλο) από το σχολικό εργαστήριο.

Βλέπουμε την επαγωγή ρεύματος στο μικρό πηνίο, όταν αυτό είναι μέσα στο μεγάλο και το τελευταίο διαρρέεται από ρεύμα. Βλέπουμε, επίσης, επαγωγή αντίθετου ρεύματος, όταν διακόπτεται το ρεύμα στο μεγάλο πηνίο και, μετά την εισαγωγή πυρήνα μαλακού σιδήρου, εντονότερα και τα δύο προηγούμενα φαινόμενα. Στο video φαίνεται, επίσης, η αντιστροφή των εκτροπών της βελόνας του γαλβανόμετρου, όταν το μικρό πηνίο συνδεθεί αντίθετα. Με τον τρόπο αυτό



δείχνεται η εξάρτηση της φοράς του επαγωγικού ρεύματος από τον τρόπο περιέλιξης του πηνίου.

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρούμε και με τη χρήση του γαλβανόμετρου Schweigger, ώστε να καταδειχθεί το γεγονός ότι το φαινόμενο δεν είναι κάποιο πολύπλοκο και δυσνόητο ζήτημα που απαιτεί το εξειδικευμένο όργανο<sup>61</sup> του εργαστηρίου (το οποίο λίγο έως πολύ λειτουργεί ως “μαύρο κουτί” στο μυαλό των μαθητών μας).

Γίνεται, επίσης, επίδειξη μιας έτοιμης συσκευής, που αποτελείται από δύο επάλληλα πηνία (το ένα ταιριάζει ακριβώς μέσα στο άλλο). Σε αυτό το σημείο, εκτός από την εξάρτηση από τον πυρήνα σιδήρου κάνουμε ακόμη μια παραλλαγή: αλλάζουμε τον τρόπο σύνδεσης των δύο πηνίων. Αρχικά, τα έχουμε με το μεγάλο (εξωτερικό) στο τροφοδοτικό και το μικρό (εσωτερικό) στο γαλβανόμετρο. Στη συνέχεια, συνδέουμε το μεγάλο στο γαλβανόμετρο και το μικρό στο τροφοδοτικό. Φυσικά τα επαγωγικά αποτελέσματα είναι τα ίδια.

Τέλος, δείχνουμε την εξάρτηση του φαινομένου της επαγωγής από τον αριθμό των σπειρών του πηνίου. Συνδέουμε τρία πηνία (300, 600 και 1200 σπειρών) σε σειρά μεταξύ τους και τα άκρα της συστοιχίας στο γαλβανόμετρο. Τοποθετούμε σταδιακά το μικρό πηνίο (το οποίο το έχουμε στο τροφοδοτικό) στο κάθε μεγάλο πηνίο και ανοίγουμε –και κλείνουμε– τον διακόπτη. Το επαγωγικό ρεύμα που καταγράφουμε έχει συνεχώς αυξανόμενη τιμή (περίπου 5:9:14 αναλογικά), γεγονός που μας δείχνει τη σχέση του φαινομένου με τον αριθμό των σπειρών (56).

### 3. [FARADAY 1831 \(part 2\)](#)

Στο video αυτό δείχνουμε αναλυτικά τα πειράματα και τις παραλλαγές που σχετίζονται με το ιστορικό πείραμα του *δακτυλίου*. Γίνεται ανακατασκευή του πειράματος με υλικά του εργαστηρίου και πραγματοποιούνται διάφορες δραστηριότητες.

Αρχικά, βλέπουμε την επαγωγή ρεύματος στο δευτερεύον πηνίο όταν αποκαθίσταται ηλεκτρικό κύκλωμα με μπαταρία, στο πρωτεύον. Η διακοπή του κυκλώματος δείχνει επαγωγικό ρεύμα αντίθετης φοράς. Γίνονται, στη συνέχεια,

<sup>61</sup> αναλογικό γαλβανόμετρο CONEL ή ψηφιακό πολύμετρο FAITHFULL ή οτιδήποτε ανάλογο.

τρεις αντιστροφές καλωδίων, για να καταδειχθεί η εξάρτηση του φαινομένου από τον τρόπο περιέλιξης των πηνίων.

Κατόπιν με τη χρήση δύο γαλβανομέτρων επιβεβαιώνεται ο κανόνας του Lenz για τη φορά του επαγωγικού ρεύματος: όταν στο πρωτεύον πηνίο “ξεκινάει” ρεύμα, τότε στο δευτερεύον επάγεται ρεύμα αντίθετης φοράς. Όταν στη συνέχεια διακόπτεται το ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο, τότε στο δευτερεύον επάγεται ρεύμα ίδιας φοράς. Το φαινόμενο δείχνεται και με αναλογικά και με ψηφιακά αμπερόμετρα.

Το video συνεχίζει με διάφορες παραλλαγές του πειράματος του δακτυλίου, προκειμένου να φανεί ο καταλυτικός ρόλος του κυκλικού (κλειστού) σιδερένιου πυρήνα. Ξεκινάμε με τα πηνία χωρίς τον πυρήνα, το ένα δίπλα στο άλλο. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι τόσο ισχύο που θεωρείται οριακά ανιχνεύσιμο. Το επόμενο βήμα είναι να δοκιμάσουμε πυρήνες από χαλκό και αλουμίνιο (γέφυρες από πειράματα θερμικής αγωγιμότητας) και να δούμε ακριβώς τα ίδια, ισχύα έως οριακά ανιχνεύσιμα αποτελέσματα. Έτσι, φαίνεται ότι τα συγκεκριμένα μέταλλα δεν μπορούν να παίξουν ενεργό ρόλο στην ενίσχυση του φαινομένου, και ο λόγος είναι (όπως αναφέρει και ο ίδιος ο Faraday) ότι δεν αποτελούν μαγνητικά υλικά. Συνεχίζουμε με έναν αυτοσχέδιο (από σύρμα) πυρήνα – γέφυρα με “χαμηλή πυκνότητα”. Το φαινόμενο, τώρα, είναι εντονότερο (σε σχέση με τις γέφυρες Cu και Al), όχι όμως τόσο έντονο όσο με τον αρχικό πυρήνα. Επομένως, ο σιδερένιος πυρήνας παίζει ρόλο στην ενίσχυση του φαινομένου και όσο πιο “πυκνός” είναι τόσο μεγαλύτερη η ενίσχυση.

Προκειμένου να καταδειχθεί ο ρόλος του δακτυλίου ως σχήμα (κλειστή διαδρομή μετάλλου), εκτελούμε μια τελική σειρά πειραμάτων με γραμμικούς πυρήνες: τοποθετούμε τα πηνία στον πάγκο και βάζουμε ανάμεσά τους έναν ορθογώνιο πυρήνα σιδήρου. Το φαινόμενο είναι έντονο, όχι όμως τόσο, όσο με τον τετραγωνικό – κλειστό πυρήνα. Στη συνέχεια αντικαθιστούμε τον ορθογώνιο πυρήνα με άλλον, αυτοσχέδιο (από σύρμα) μικρότερης πυκνότητας. Το φαινόμενο εξασθενεί αρκετά. Στο τέλος, αντικαθιστούμε και αυτόν με έναν άλλο από χάλκινο σύρμα και το φαινόμενο σχεδόν μηδενίζεται. Ομοίως, χωρίς καθόλου πυρήνα, το φαινόμενο είναι σχεδόν ανύπαρκτο.

Το video κλείνει με μια φωτογραφία του ημερολογίου του Faraday με ημερομηνία *Aug. 29<sup>th</sup> 1831* και με τη φωτογραφία του μαρμάρινου αγάλματος

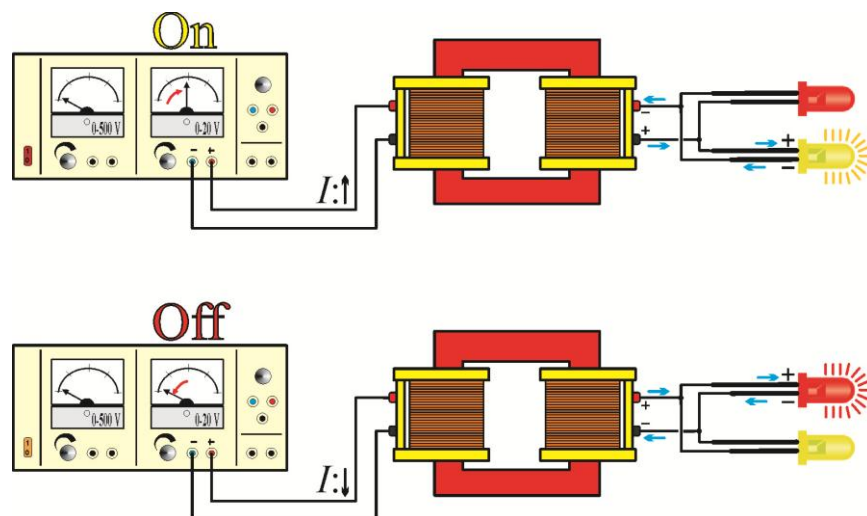


του Faraday από το Βασιλικό Ινστιτούτο, στο οποίο φαίνεται να κρατάει το δακτύλιο (57).

#### 4. FARADAY 1831 UPDATE

Πρόκειται για ένα video μικρής διάρκειας συμπληρωματικό του προηγούμενου [FARADAY 1831 (part 2)]. Σε αυτό δείχνουμε τον δακτύλιο, κατασκευασμένο με τα υλικά του σχολικού εργαστηρίου, συνδεδεμένο με το τροφοδοτικό τάσεων από τη μια και με ένα διπλό LED από την άλλη. Το τροφοδοτικό είναι ρυθμισμένο μόνιμα στα 10 V και εκτελούμε μόνο πειράματα με άνοιγμα και κλείσιμο του διακόπτη του. Το διπλό LED αποτελείται από δύο διόδους LED, μια κόκκινη και μια κίτρινη, ενωμένες με αντίθετες πολικότητες (το + της κόκκινης συνδέεται στο – της κίτρινης και το αντίθετο). Με αυτόν τον τρόπο, όταν διέρχεται ρεύμα συγκεκριμένης φοράς, περνά μόνο από το ένα LED (ενώ αποκόπτεται από το άλλο) και όταν το ρεύμα αλλάζει φορά, περνά από το άλλο LED (ενώ αποκόπτεται από το πρώτο).

Παρατηρούμε, λοιπόν, πως, όταν ανοίγουμε τον διακόπτη και το ρεύμα αυξάνεται στο πρωτεύον πηνίο του δακτυλίου, το επαγόμενο ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο έχει τέτοια φορά που ανάβει το κίτρινο LED. Κλείνοντας τον διακόπτη του τροφοδοτικού το ρεύμα στο πρωτεύον πηνίου μειώνεται (μέχρι μηδενισμού) και έτσι το επαγόμενο ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο έχει αντίθετη φορά (σύμφωνα με τον Lenz) ανάβοντας, τώρα, το κόκκινο LED.



Σχήμα 8. Διάγραμμα σύνδεσης του διπλού LED και της λειτουργίας του στο πείραμα του Δακτυλίου

Επίσης, παρατηρούμε πως τα LEDs ανάβουν μόνο στιγμιαία καταδεικνύοντας με τον καλύτερο τρόπο πως το φαινόμενο της επαγωγής εμφανίζεται μόνο κατά τη μεταβολή (αύξηση:  $0 \rightarrow I$  και μείωση:  $I \rightarrow 0$ ) του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο (58).

## 5. [FARADAY 1831 \(part 3\)](#)

Σε αυτό το video θα αναπαράγουμε ένα από τα “μετά δακτυλίου” πειράματα, την *τριγωνική διάταξη*. Πρόκειται για ένα μικρό πηνίο με πυρήνα, στα άκρα του οποίου ακουμπάμε δύο μεγάλους ραβδόμορφους μαγνήτες, που ενώνονται στα “πίσω” άκρα τους. Το πηνίο συνδέεται σε γαλβανόμετρο, το οποίο καταγράφει επαγωγικό ρεύμα, κάθε φορά που έχουμε επαφή ή αποκόλληση των μαγνητών στον πυρήνα του πηνίου. Είναι, ουσιαστικά, το πείραμα που οδήγησε τον Faraday στην κατασκευή της “Γεννήτριας” (μαγνήτης μέσα – έξω σε πηνίο) λίγες βδομάδες μετά.

Το video ξεκινάει με την γκραβούρα της διάταξης από τη δημοσίευση του 1832 και συνεχίζει με μια εικόνα της σύγχρονης ανακατασκευής της. Δείχνεται ο τρόπος κατασκευής των μακρόστενων μαγνητών (από τρεις μικρότερους) και η χωροταξική διάταξη των οργάνων. Η πειραματική διαδικασία ξεκινάει με επαφές και αποκολλήσεις ενός μαγνήτη σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς (πόλων και πλευρών). Κάθε φορά το γαλβανόμετρο φαίνεται να καταγράφει τα αντίστοιχα ρεύματα.

Στη συνέχεια, δείχνεται το πείραμα που αναφέρει ο Faraday, δηλαδή η επαφή και αποκόλληση του πόλου του ενός μαγνήτη, όταν ο άλλος μαγνήτης είναι ήδη σε επαφή. Ακολουθούν διάφορες παραλλαγές: η ταυτόχρονη επαφή και αποκόλληση δύο ετερόνυμων πόλων (με ισχυρότερα αποτελέσματα) ή δύο ομώνυμων πόλων (με μηδενικά αποτελέσματα), η επαφή ομώνυμων πόλων με διαφορά χρόνου (και αντίθετα αποτελέσματα) και η επανάληψη των παραπάνω με τους “άλλους” πόλους. Δείχνεται ότι δεν παίζει πολύ μεγάλο ρόλο, αν το πείραμα γίνεται με ενωμένους τους “πίσω” πόλους (τριγωνική διάταξη) ή όχι (παράλληλη διάταξη). Τέλος, με επαφή των “μπροστινών” πόλων στον πυρήνα γίνεται επαφή και αποκόλληση των “πίσω” πόλων. Τα αποτελέσματα είναι σχεδόν μηδενικά (59).



## 6. FARADAY 1831 (part 4)

Εδώ θα δούμε τη σύγχρονη ανακατασκευή του περίφημου πειράματος της “Γεννήτριας” και διάφορες παραλλαγές του. Πρόκειται για την πρώτη συσκευή ηλεκτροπαραγωγής από μηχανική κίνηση και αποτελεί τη συνέχεια του *δακτυλίου* και της *τριγωνικής διάταξης* αλλά και τον πρόδρομο της μεγαλύτερης ανακάλυψης του Faraday την εποχή αυτή, της *δυναμογεννήτριας*.

Το video ξεκινά με το χειρόγραφο σχέδιο από το ημερολόγιο του Faraday (με ημερομηνία 17-10-1831) και συνεχίζει με μια φωτογραφία της σύγχρονης διάταξης από το σχολικό εργαστήριο: ενός πηνίου συνδεδεμένου σε αναλογικό γαλβανόμετρο και ενός ραβδόμορφου μαγνήτη<sup>62</sup>. Η πειραματική διαδικασία ξεκινάει με την αργή εισαγωγή του βόρειου πόλου του μαγνήτη στο πηνίο και την καταγραφή μικρού αρνητικού ρεύματος. Το πρόσημο σχετίζεται με τον τρόπο σύνδεσης των καλωδίων και, ουσιαστικά, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να καταγράψουμε την αλλαγή του πρόσημου είτε κατά την έξοδο του βόρειου πόλου είτε, μετά την αντιστροφή του μαγνήτη, κατά την είσοδο του νότιου πόλου. Αφήνουμε λίγο τον μαγνήτη να ηρεμήσει μέσα στο πηνίο και το ρεύμα μηδενίζεται. Κατά την αργή έξοδο του βόρειου πόλου καταγράφεται μικρό θετικό ρεύμα. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία πιο γρήγορα και τα ρεύματα (με την ίδια σειρά πρόσημων) είναι, τώρα, σαφώς μεγαλύτερα.

Ακολουθούν διάφορες παραλλαγές του πειράματος: αρχικά εισάγουμε και εξάγουμε δύο μαγνήτες σε διάταξη NS'-SN' (ουσιαστικά δύο μαγνήτες που αλληλοεξουδετερώνονται) και τα αποτελέσματα είναι σχεδόν μηδενικά. Μετά εισάγουμε και εξάγουμε τους δύο μαγνήτες σε διάταξη NN'-SS' (σαν ένας μαγνήτης διπλάσιας ισχύος) και τα αποτελέσματα είναι σαφώς εντονότερα. Τέλος τοποθετούμε τους μαγνήτες σε σειρά (NSN'S'), κάνουμε εισαγωγή – εξαγωγή και τα αποτελέσματα είναι έντονα όχι, όμως, στο βαθμό που ήταν αμέσως πριν.

Το video συνεχίζει με επανάληψη των πειραμάτων, όταν το πηνίο συνδέεται σε ψηφιακό αμπερόμετρο, και έτσι μπορούμε να καταγράψουμε και αριθμητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια, συνδέουμε το γαλβανόμετρο Schweigger με το

<sup>62</sup> Η διάταξη είναι από τις πιο διαδεδομένες παγκοσμίως, σε σχολικό εργαστήριο και η μοναδική που έμεινε στη διδακτέα ύλη μετά την “αποκαθήλωση” του *Ηλεκτρομαγνητισμού* από το αναλυτικό πρόγραμμα.



πηνίο και εκτελούμε, πάλι, εισόδους και εξόδους του μαγνήτη σε αυτό. Εδώ, προσπαθούμε (με σχετική επιτυχία) να συντονίσουμε τις κινήσεις μας με την κίνηση της βελόνας του οργάνου, ώστε να πετύχουμε τις μέγιστες αποκλίσεις.

Στο επόμενο μέρος αυτού του video, βλέπουμε τη συνεχή κίνηση του μαγνήτη μέσα στο πηνίο. Είτε με ελεύθερη πτώση είτε ελεγχόμενα (κρατώντας τον με ένα χάλκινο υποστήριγμα) βλέπουμε αυτό ακριβώς που αναφέρει και ο Faraday, δηλαδή την καταγραφή ενός ρεύματος, τον ακαριαίο μηδενισμό του και στη συνέχεια την καταγραφή αντίθετου ρεύματος. Ακόμα, πιο εμφανή είναι τα αποτελέσματα, όταν χρησιμοποιούμε το αναλογικό γαλβανόμετρο, λόγω της αργής απόκρισης της βελόνας του.

Στο τελευταίο μέρος, βλέπουμε την εξάρτηση του φαινομένου από τον αριθμό των σπειρών του πηνίου. Ενώνουμε (όπως και σε άλλα πειράματα) τα τρία πηνία, των 300, 600 και 1200 σπειρών, σε σειρά και εισάγουμε/εξάγουμε τον μαγνήτη σταδιακά στο 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup> και στο 3<sup>ο</sup> πηνίο. Παρατηρούμε όλο και μεγαλύτερα επαγωγικά ρεύματα. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται με αντιστροφή των πόλων του μαγνήτη.

Το video κλείνει με μια γκραβούρα από τη δημοσίευση του 1832, μια φωτογραφία του δικού μας πειράματος και δύο φωτογραφίες της πραγματικής συσκευής, όπως αυτή διασώζεται σήμερα στο μουσείο Faraday στο Βασιλικό Ινστιτούτο του Λονδίνου (60).

## **7. FARADAY 1831 (part 5)**

Σε αυτό το video παρουσιάζουμε δύο ιδιοκατασκευές που σχετίζονται με τα ιστορικά πειράματα του 1831. Στο πρώτο μέρος, δείχνουμε την κατασκευή του πειράματος “Πηνίο σε πηνίο”, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπουμε στη “Γεννήτρια”. Φαίνεται ο τρόπος κατασκευής των δύο πηνίων, το ένα περιτυλιγμένο γύρω από το άλλο, με χρήση ενός παλιού πηνίου (από μετασηματιστή) και ενός μικρού χαρτονένιου ρολού. Δημιουργούμε, έτσι, δύο πηνία, το ένα από τα οποία συνδέουμε στο τροφοδοτικό και το άλλο στο ψηφιακό αμπερόμετρο. Επειδή ο αριθμός των σπειρών είναι μικρός (σκοπός μας ήταν η επίδειξη του φαινομένου, όχι η “τέλεια” λειτουργία του), ρυθμίζουμε το αμπερόμετρο στην κλίμακα των  $\mu\text{A}$  και τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα: παίρνουμε δύο αντίθετης φοράς ρεύματα κατά το άνοιγμα και το κλείσιμο του



διακόπτη (ή κατά την αυξομείωση της τάσης) και πιο έντονα αποτελέσματα μετά την εισαγωγή του πυρήνα μαλακού σιδήρου<sup>63</sup>.

Στη συνέχεια δείχνεται η μετατροπή της συσκευής σε “γεννήτρια”: ενώνουμε τα δύο πηνία σε σειρά δημιουργώντας ένα μεγάλο ενιαίο πηνίο, το οποίο συνδέουμε στο αμπερόμετρο. Βάζοντας και βγάζοντας τον μικρό κυλινδρικό μαγνήτη στην κοιλότητα του χαρτονένιου κυλίνδρου παρατηρούμε επαγωγικό ρεύμα, το οποίο υπακούει στον κανόνα του Lenz ως προς τη φορά του. Τα αποτελέσματα αντιστρέφονται, όταν αντιστρέψουμε την πολικότητα του μαγνήτη. Τα φαινόμενα δείχνονται και με αναλογικό γαλβανόμετρο και με ψηφιακό αμπερόμετρο. Το αναλογικό όργανο δίνει σαφώς πιο εντυπωσιακά αποτελέσματα λόγω της αργής κίνησης της βελόνας του.

Στο δεύτερο μέρος του video βλέπουμε την ιδιοκατασκευή του πειράματος του *δακτυλίου*. Χρησιμοποιώντας έναν μεταλλικό κρίκο (από είδη κιγκαλερίας, αξίας 0,5 €) και τρία μέτρα δίκλωνο καλώδιο ηχείων (αξίας 0,9 €), κατασκευάζουμε σε πολύ μικρό χρόνο την ιστορική αυτή συσκευή. Χωρίζουμε το καλώδιο στα δύο και περιελίσσουμε το κάθε κομμάτι γύρω από το κάθε ημικύκλιο του κρίκου. Δημιουργούμε, έτσι, δύο πηνία με περίπου 45 σπείρες το καθένα. Στη συνέχεια, συνδέουμε το ένα πηνίο σε μια μπαταρία των 9 V και το άλλο σε ψηφιακό αμπερόμετρο (ρυθμισμένο σε mA).

Συνδέοντας και αποσυνδέοντας τη μπαταρία παρατηρούμε ρεύμα στο αμπερόμετρο, και μάλιστα αντίθετων φορών, σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz. Παρατηρούμε, επίσης, και τον μηδενισμό του ρεύματος του αμπερομέτρου, όταν το ρεύμα στο πηνίο της μπαταρίας αποκατασταθεί και σταθεροποιηθεί.

Τέλος, εκτελούμε το ίδιο πείραμα με δύο 9-βολτες μπαταρίες, σε σειρά, και ένα μικρό, αναλογικό αμπερόμετρο. Τα αποτελέσματα είναι πολύ μικρά: φαίνεται πως η βελόνα κινείται μόνο κατά ένα μικρό κλάσμα της πρώτης διαγράμμισης του οργάνου. Όμως, φαίνεται! Δηλαδή έχουμε ένα καθαρό φαινόμενο: η βελόνα δείχνει θετικό ρεύμα κατά τη σύνδεση των μπαταριών και αρνητικό κατά την αποσύνδεσή τους (61).

Διαπιστώνουμε, λοιπόν, ότι με αυτή την απλή κατασκευή καταφέρνουμε να δείξουμε **ζωντανά** την αρχή που διέπει το ιστορικό αυτό πείραμα, χωρίς να

<sup>63</sup> Όπως αναφέρουμε και στο video, εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε 3-4 καρφιά

καταφύγουμε σε πολύπλοκες διατάξεις και κυρίως χωρίς να καταφύγουμε σε καλοφτιαγμένα, φανταχτερά, ψεύτικα (!) Applets<sup>64</sup>...

## 8. [FARADAY 1831 \(part 6\)](#)

Εδώ βλέπουμε το τελευταίο video της σειράς “FARADAY 1831” η οποία πραγματεύεται τα πειράματα της δημοσίευσης *Experimental Researches in Electricity* και τη σύγχρονη εφαρμογή τους στο σχολικό εργαστήριο. Συγκεκριμένα ασχολούμαστε με την κορυφαία στιγμή της χρυσής χρονιάς του 1831, την *δυναμογεννήτρια*, δηλαδή τη συσκευή που μετατρέπει τη διαρκή περιστροφική κίνηση ενός δίσκου σε συνεχή ηλεκτρική τάση. Όπως αναφέρεται και στο 2<sup>ο</sup> μέρος της εργασίας, η δυναμογεννήτρια είναι η συσκευή που αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο του σύγχρονου τεχνολογικού μας πολιτισμού, μιας και από αυτή ξεκίνησε η επανάσταση της μαζικής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος χωρίς τη χρήση χημικών αντιδράσεων (μπαταριών).

Το video ξεκινά με τα σχέδια του ίδιου του Faraday (από το ημερολόγιό του και από τη δημοσίευση) και συνεχίζει με την παράθεση τριών φωτογραφιών από αντίστοιχες συσκευές, οι οποίες αποτέλεσαν έμπνευση για τη δικιά μας κατασκευή. Στη συνέχεια, βλέπουμε φωτογραφίες της δικιάς μας ιδιοκατασκευής η οποία αποτελείται<sup>65</sup> από τέσσερα επιμέρους τμήματα: α) έναν ισχυρό πεταλοειδή μαγνήτη, ο οποίος στην πραγματικότητα αποτελείται από δύο μικρότερους, ενωμένους έτσι ώστε να αφήνουν ένα μικρό κενό μέσα στο οποίο θα περιστρέφεται ο δίσκος, β) έναν χάλκινο δίσκο πάχους 2 mm και διαμέτρου 21 cm πάνω στον οποίο είναι μόνιμα προσαρμοσμένη μια ξύλινη τροχαλία διαμέτρου 4 cm, γ) δύο χάλκινες ψήκτρες – επαφές, η μια πάνω στον άξονα περιστροφής του δίσκου και η άλλη πάνω στην περιφέρειά του και δ) μια μεγάλη ξύλινη τροχαλία (διαμέτρου περίπου 20 cm) που περιστρέφεται μέσω μανιβέλας. Ένας μάντας μεταδίδει την περιστροφή από την μεγάλη στη μικρή τροχαλία (με σχέση περίπου 1:5) και τελικά στον χάλκινο δίσκο.

Το video συνεχίζει με τη λειτουργία της συσκευής κατά την οποία βλέπουμε πως η περιστροφή κατά μία φορά δίνει ένα μικρό (αλλά ορατό!) ρεύμα θετικού

<sup>64</sup> όπως [αυτό](#), [αυτό](#), [αυτό](#) ή [αυτό](#)...

<sup>65</sup> μιας και η συγκεκριμένη συσκευή δεν υπάρχει στα σχολικά εργαστήρια αλλά *φτιάχτηκε ειδικά* για την παρούσα εργασία, δεν περιλαμβάνεται στα σενάρια και στα φύλλα εργασίας που προηγήθηκαν. Έτσι, δίνουμε εδώ, ορισμένες κατασκευαστικές λεπτομέρειες για την καλύτερη κατανόησή της.



πρόσημου, ενώ η αντίθετη περιστροφή δίνει αντίστοιχο ρεύμα αρνητικού πρόσημου, κάτι που, φυσικά, συμφωνεί με τη θεωρία (δύναμη Lorentz, κανόνας Lenz). Το video κλείνει με την παράθεση του επεξηγηματικού σχεδίου που υπάρχει και στο 2<sup>ο</sup> μέρος (Σχήμα 4) με τον κατάλληλο σχολιασμό για τον τρόπο κίνησης των ελευθέρων ηλεκτρονίων του δίσκου (62).



Εικόνα 67. Η Δυναμογεννήτρια (ιδιοκατασκευή)

## 9. Ηλεκτρομηχανική Αρμονική Ταλάντωση, Electromechanical Harmonic Oscillation

Σε αυτό το video βλέπουμε ένα πείραμα, που συνδυάζει το φαινόμενο της επαγωγής μαζί με μερικά άλλα, ενδιαφέροντα φαινόμενα, που, όπως είπαμε και στο σενάριο, θα λειτουργήσει σαν πείραμα προσέλκυσης της προσοχής των μαθητών μας. Έχουμε, λοιπόν, δύο ορθοστάτες τύπου Γ από τους οποίους κρέμονται –μέσω ελατηρίων– δύο ραβδόμορφοι μαγνήτες. Οι μαγνήτες μπορούν να ταλαντώνονται ελεύθερα μέσα – έξω σε δύο πηνία των 1200 σπειρών.

Αρχικά δείχνονται φωτογραφίες της διάταξης και του τρόπου τοποθέτησης των τμημάτων της. Το video συνεχίζει με την αρχική ταλάντωση του ενός μαγνήτη. Βλέπουμε ότι η ταλάντωση διαρκεί αρκετά, ενώ ο άλλος μαγνήτης παραμένει ακίνητος και ανεπηρέαστος. Μόλις, όμως, κλείσει το κύκλωμα μεταξύ των πηνίων, βλέπουμε αμέσως τον άλλο μαγνήτη να ταλαντώνεται και τον αρχικό να επιβραδύνει πολύ γρήγορα.

Ακολουθεί η εξήγηση του φαινομένου: η κίνηση του πρώτου μαγνήτη δημιουργεί μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στο πρώτο πηνίο. Το φαινόμενο της επαγωγής κάνει την εμφάνισή του και στο πηνίο επάγεται ρεύμα. Το ρεύμα αυτό διαρρέει το κύκλωμα των δύο πηνίων και, όταν το δεύτερο πηνίο διαρρέεται από ρεύμα, γίνεται με τη σειρά του μαγνήτης. Αυτό το μαγνητικό πεδίο είναι που

θέτει σε ταλάντωση τον δεύτερο μαγνήτη. Το φαινόμενο φθίνει ραγδαία λόγω των απωλειών ενέργειας σε θερμότητα και σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Τέλος, δείχνουμε τη συμμετρικότητα του φαινομένου θέτοντας σε ταλάντωση τον άλλο μαγνήτη και συνδέοντας στη συνέχεια τα καλώδια (63).

## 10. Electromagnetic Induction – Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή

Πρόκειται για ένα παλαιότερο video<sup>66</sup> που περιλαμβάνει διάφορα πειράματα που σχετίζονται με το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Αρχικά, δείχνεται η “γεννήτρια”, δηλαδή η παραγωγή επαγωγικού ρεύματος από κίνηση μαγνήτη μέσα σε πηνίο και η εξάρτηση του ρεύματος αυτού από την ταχύτητα κίνησης του μαγνήτη και την πολικότητά του.

Στη συνέχεια, δείχνεται το πείραμα του δακτυλίου με αυξομείωση στην τάση του τροφοδοτικού και με άνοιγμα – κλείσιμο του διακόπτη του. Το video συνεχίζει με την ηλεκτρομηχανική ταλάντωση δύο μαγνητών μέσα σε πηνία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε κλειστό κύκλωμα. Δείχνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ενός μαγνήτη σε ενέργεια ηλεκτρικού ρεύματος, σε μαγνητική ενέργεια στο δεύτερο πηνίο και, τέλος, σε κινητική ενέργεια στον δεύτερο μαγνήτη (και φυσικά σε θερμότητα, που συνάγεται λόγω της σταδιακής μείωσης των ταλαντώσεων).

Το video κλείνει με ένθετα πλάνα από ένα άλλο video<sup>67</sup> του συγγραφέα στο οποίο φαίνεται μια μικρή συσκευή σύζευξης δύο πηνίων, ενός τετραγωνικού (που συνδέεται σε τροφοδοτικό) και ενός κυλινδρικού (που συνδέεται σε μικρό λαμπάκι). Το γρήγορο ανοιγοκλείσιμο του κυκλώματος του τετραγωνικού πηνίου επάγει ικανό ρεύμα στο κυλινδρικό, ώστε το λαμπάκι να ανάβει. Το φαινόμενο μηδενίζεται (και το λαμπάκι σβήνει), όταν το κύκλωμα του τετραγωνικού πηνίου είναι μόνιμα ανοιχτό (...ή μόνιμα κλειστό). Φαίνεται, επομένως, η αναγκαιότητα της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου, ώστε να εμφανιστεί το επαγωγικό φαινόμενο. Τέλος, το τετραγωνικό πηνίο συνδέεται με εναλλασσόμενη τάση και μόλις πατηθεί ο on-διακόπτης του κυκλώματος, το λαμπάκι ανάβει έντονα και μόνιμα. Αυτό οφείλεται στην πολύ γρήγορη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου

<sup>66</sup> αναρτήθηκε στο κανάλι στις 25/9/2011, ένα χρόνο, σχεδόν, πριν την ενασχόληση του συγγραφέα με το μεταπτυχιακό πρόγραμμα της ΚΦΕ.

<sup>67</sup> *The PUZZLE Experiment (total 9)*: εννέα πειράματα ηλεκτρισμού και ηλεκτρομαγνητισμού που ενώνονται μεταξύ τους υπό τη μορφή πάζλ (72).



Αναστάσιος Νέζης “Ιστορικά πειράματα Faraday και η αξιοποίησή τους στη διδακτική της Φυσικής σε Γυμνάσιο και Λύκειο”

λόγω ταχείας εναλλαγής της φοράς του ρεύματος. Το επαγωγικό φαινόμενο είναι σαφώς εντονότερο.

Το video μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον αναγνώστη – συνάδελφο ως μέσο προσέλκυσης της προσοχής, σε ένα εισαγωγικό μάθημα για την επαγωγή. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επίλογος – ανατροφοδότηση στο κλείσιμο της σειράς των μαθημάτων για την επαγωγή (64).







## ΑΝΤΙ ΕΠΙΛΟΓΟΥ

Κλείνοντας αυτή τη διπλωματική εργασία, ας μου επιτραπούν μερικά προσωπικά σχόλια. Η φράση “*βλέπεις, άρα πιστεύεις*” είναι, ίσως, μια από τις βασικότερες αρχές της διδασκαλίας ειδικά στις μικρές ηλικίες. Η εκπαιδευτική διαδικασία στις θετικές επιστήμες μας εξοπλίζει με ένα πανίσχυρο όπλο: το πείραμα. Είναι, λοιπόν, κρίμα να πετάξουμε αυτό το όπλο στα σκουπίδια, χρησιμοποιώντας λογισμικά και applets, για να δείξουμε απλά και θεμελιώδη φαινόμενα, ενώ μπορούμε να τα δείξουμε ζωντανά. Μην νομίζετε ότι θα ήθελα από αυτή τη θέση να δαιμονοποιήσω τα applets. Έχουν και αυτά ρόλο στην εκπαίδευση και μάλιστα σημαντικό, εκεί που δεν μπορεί εκ των πραγμάτων να μπει το πραγματικό πείραμα. Πως θα μπορούσε άλλωστε να δειχθεί το πείραμα του Rutherford, η πυρηνική σχάση ή η κίνηση των πλανητών στο ηλιακό σύστημα;

Όμως, όλα τα ελληνικά σχολεία, παρόλα τα προβλήματα που έχουν, διαθέτουν ένα πηνίο, έναν μαγνήτη και ένα αμπερόμετρο... Πολλά υλικά μπορούμε να τα βρούμε στο εμπόριο σε πολύ χαμηλό κόστος ή ακόμη – ακόμη μπορούμε να ζητήσουμε από τους μαθητές μας να μας τροφοδοτήσουν με τα “σκουπίδια” τους, δηλαδή τα παλιά τους παιχνίδια, τις ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές συσκευές. Αρκεί να το θελήσουμε και μπορούμε να δείξουμε στους μαθητές μας πραγματική επιστήμη και όχι “ετοιματζίδικα”, χρωματιστά πακέτα σε οθόνες υπολογιστών. Ας βάλουμε τους μαθητές μας να πειραματιστούν οι ίδιοι και να παιδευτούν προσπαθώντας να βρουν τους κατάλληλους συνδυασμούς. Να κατανοήσουν μόνοι τους, κατασκευάζοντας τη γνώση και όχι να δέχονται ό,τι θέλει να τους “περάσει” το κάθε λογισμικό.

Ας μην χρησιμοποιούμε τον υπολογιστή για να δείξουμε το *απλό εκκρεμές*... Ας κρεμάσουμε μια γόμα, με κλωστή, από ένα θρανίο και ας την χρονομετρήσουμε με τα κινητά μας τηλέφωνα. Ας μην χρησιμοποιήσουμε τον υπολογιστή για να δείξουμε τον *μαγνήτη* να μπαίνει στο *πηνίο* και ν’ ανάβει η λάμπα. Ας το κάνουμε ζωντανά... και αν δεν πετύχει (που δεν θα πετύχει, γιατί το ρεύμα που παίρνουμε είναι πολύ μικρό) ας βάλουμε ένα αμπερόμετρο στη θέση της λάμπας. Και τότε θα πετύχει! Ας μην αναμειξουμε στην οθόνη του υπολογιστή μας *οξύ και βάση* για ν’ αλλάξει χρώμα ο *δείκτης*... Ας το κάνουμε ζωντανά. Είναι απλό... πολύ απλό!

*Ας αφήσουμε, επιτέλους, το ποντίκι και ας ξαναπιάσουμε το κατσαβίδι...*







## Βιβλιογραφία

1. **Odhams.** *Μεγάλες Μορφές, Επιστήμονες & Εφευρέτες (One Hundrend Great Lives)*. [επιμ.] Κώστας Σταματίου. Αθήνα (London) : εκδ. Αρσενίδης (Odhams Press Ltd.), 1949. σσ. 117-129. <https://www.youtube.com/watch?v=OKTVtATzjY>.
2. **Al-Khalili, Jim.** The birth of the electric machines: a commentary on Faraday (1832) ‘Experimental researches in electricity’. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.* 13 Apr 2015, σ. 373 (2039). <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0208>.
3. **Brady Haran, Keith Moore.** *The Making of Michael Faraday*. [YouTube]. Objectivity #105, 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=UctCk9hzlGk>.
4. **Gayathri Murthy, Ls Seshagiri Rao.** *Michael Faraday - Sapna Divya Darshana Male*. s.l. : Sapna Books House, 2000. [https://books.google.gr/books?id=X6-HAwwAAQBAJ&pg=PP4&lpg=PP4&dq=where+faraday+went+to+school&source=bl&ots=r5KhJDotel&sig=I8KDIPooOwa0k-vblrTR8rbGNko&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEwi\\_teWhnPnRAhVLbxQKHZHMafIQ6AEIPDAE#v=onepage&q=where%20faraday%20went%20to%20school](https://books.google.gr/books?id=X6-HAwwAAQBAJ&pg=PP4&lpg=PP4&dq=where+faraday+went+to+school&source=bl&ots=r5KhJDotel&sig=I8KDIPooOwa0k-vblrTR8rbGNko&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEwi_teWhnPnRAhVLbxQKHZHMafIQ6AEIPDAE#v=onepage&q=where%20faraday%20went%20to%20school).
5. **Jon Eastman, Alex Freeman, Tim Usborne.** *Shock and Awe: The Story of Electricity*. [YouTube]. [συγγρ.] Jim Al-Khalili. BBC 4, Horizon, 2011. <https://www.youtube.com/watch?v=Gtp51eZkwol>.
6. **Πάπυρος-Λαρούς-Μπριτάννικα Εγκυκλοπαίδεια.** Φάραντεϋ, Μάικλ. *Τ61.04*. 2004-2005. Τόμ. 59. (σε ηλεκτρονική μορφή).
7. **Bodanis, David.** *E=mc<sup>2</sup>, η βιογραφία της πιο διάσημης εξίσωσης στον κόσμο*. Αθήνα : εκδ. Λιβάνη, 2003.
8. **Terzi, Enzo.** *Οι 100 μεγαλύτεροι Επιστήμονες του κόσμου*. s.l. : Πήγασος Εκδοτική ΑΕ, 2009. σσ. 43-50. Τόμ. 5.
9. Φαρανταίη Μιχαήλ. *Παγκόσμιον Λεξικόν των Έργων*. Αθήνα : Διεθνής Εκδοτικός Οργανισμός Spiritus Mundi, 1965. Τόμ. 3, σ. 1272.
10. **Jerrold, Walter.** *Michael Faraday, Man of Science*. London : Fleming H Revell Company, 1899.
11. Μάικλ Φαραντέι. *Εγκυκλοπέδεια ΔΟΜΗ*. 2009. Τόμ. 29, σ. 664. 960-8177-81-2.
12. **Faraday, Michael.** Historical sketch of electro-magnetism. *Annals of Philosophy*. 1821-1822, Τόμ. 18, 19, σσ. 195-200, 274-290, 107-121.
13. Βικιπαίδεια. [Ηλεκτρονικό]  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AC%CE%B9%CE%BA%CE%BB\\_%CE%A6%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AD%CE%B9](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AC%CE%B9%CE%BA%CE%BB_%CE%A6%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AD%CE%B9).

14. **Russell, Collin.** *Michael Faraday: Physics & Faith*. New York : Oxford University Press, 2000.
15. **Johnstone, Gary.** *Einstein's Big Idea*. [YouTube]. [συγγρ.] Gary Johnstone David Bodanis. NOVA PBS, 2005. <https://www.youtube.com/watch?v=B4vDGTyTCLo>.
16. **Lewin, Walter και Goldstein, Warren.** *Για την Αγάπη της Φυσικής*. Αθήνα : Κάτοπτρο, 2014.
17. **Faraday, Michael.** Experimental Researches in Electricity. *Philosophical Transactions*. The Royal Society, 1 Jan 1832, 122, σσ. 125-162.  
<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/122/125.full.pdf+html>.
18. **Harman, Peter.** *Ενέργεια, Δύναμη και Ύλη*. σ.λ. : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1993.
19. Circuits Today. [Ηλεκτρονικό] 25 Oct 2013. <http://www.circuitstoday.com/capacitors-invention-history-and-the-story-of-leyden-jar>.
20. wikipedia. [Ηλεκτρονικό] 29 Dec 2016. <https://en.wikipedia.org/wiki/Farad>.
21. **Holland, Gary.** *London's lighthouse and the story of Trinity Quay Wharf*. [Ηλεκτρονικό] BBC London, 19 Feb 2010.  
[http://news.bbc.co.uk/local/london/hi/people\\_and\\_places/history/newsid\\_8516000/8516036.stm](http://news.bbc.co.uk/local/london/hi/people_and_places/history/newsid_8516000/8516036.stm).
22. **Faraday, Tyndall, Ball, Thompson, Lankaster, Bragg, Bragg, Gregory, Stewart.** *Cristmas at the Royal Institution*. [επιμ.] Frank James. σ.λ. : World Scientific, 2007.
23. LISTVERSE. *Top 10 Scientists Killed or Injured by Their Experiments*. [Ηλεκτρονικό] 2008.  
<http://listverse.com/2008/06/04/top-10-scientists-killed-or-injured-by-their-experiments/>.
24. **Faraday, Michael.** *Faraday's Diary on Experimental Investigation 1820-1862*. [επιμ.] Thomas Martin. Preview Edition. London : Royal Institution, 2009.  
<http://www.faradaysdiary.com/>.
25. **Maxwell, James Clerk.** *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford : Clarendon Press, 1873. <http://www.aproged.pt/biblioteca/MaxwellI.pdf>.
26. **Longair, Malcolm.** '...a paper ...I hold to be great guns': a commentary on Maxwell (1865) 'A dynamical theory of the electromagnetic field'. *Philosophical Transactions A*. A 373, 2015, 20140473. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0473>.
27. **Maxwell, J. C.** AZ Quotes. [Ηλεκτρονικό] [www.azquotes.com/quote/1334303](http://www.azquotes.com/quote/1334303).
28. **West, Krista.** *The Basics of Metals and Metalloids*. σ.λ. : Rosen Publishing Group, 2013. 1-4777-2722-1.
29. **Lang, J. Stephen.** *The Christian History Devotional*. σ.λ. : Thomas Nelson, 2012.  
<https://books.google.gr/books?id=5g-94jpmVAC&pg=PA277&dq=Faraday++chemical+weapons+Crimean+War&hl=el&sa=X&ved>



=0ahUKEwj\_d\_bL1nJzSAhWEyRoKHe0GBTUQ6AEIGjAA#v=onepage&q=Faraday%20%20chemical%20weapons%20Crimean%20War&f=false.

30. The Famous People. [Ηλεκτρονικό] <http://www.thefamouspeople.com/profiles/michael-faraday-549.php>.

31. **The Twickenham Museum.** *Michael Faraday*. Middlesex, England : s.n., 2001. <http://www.twickenham-museum.org.uk/detail.php?aid=137&cid=13&ctid=1>.

32. A Faraday Timetable. [επιμ.] William Jensen. *Bulletin for the History of Chemistry*. University of Cincinnati, 1991, Τόμ. 11, σ. 101.

33. **Gilbert, William.** *De Magnete*. [μεταφρ.] P. F. Mottelay. New York : Dover publications, 1958. [https://books.google.gr/books?id=YT9EmW1TmakC&printsec=frontcover&hl=el&source=gb\\_s\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.gr/books?id=YT9EmW1TmakC&printsec=frontcover&hl=el&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

34. **Νέζης, Αναστάσιος και ομάδα, μαθητών.** *Φιάλη Leyden*. Μουσείο Ιστορίας Παν/μιου Αθηνών. 2016. Συμμετοχή σε Διαγωνισμό. [http://media.wix.com/ugd/2f1a14\\_2e8dfb4cb4b8422c99943bf8de4047b5.pdf](http://media.wix.com/ugd/2f1a14_2e8dfb4cb4b8422c99943bf8de4047b5.pdf).

35. **Gregory, Frederick.** Episodes in Romantic Science. *Oersted and the Discovery of Electromagnetism*. [Ηλεκτρονικό] University of Florida, 1998. <http://users.clas.ufl.edu/fgregory/oersted.htm>.

36. **David Gooding, Frank A. J. L. James.** *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*. London : The MacMillan Press LTD, 1985. 978-0-333-51122-0.

37. **Johnson, George.** *The Ten most Beautiful Experiments*. New York : A.A. Knoff, 2008.

38. **Kuehn, Kerry.** Arago's Misterius Wheel. *Reading: Faraday, Experimental Reseaches in Electricity*. 26, σσ. 279-288. [http://www.kerrykuehn.com/wlcphysics/PHY202/files/phy202\\_ch26.pdf](http://www.kerrykuehn.com/wlcphysics/PHY202/files/phy202_ch26.pdf).

39. **Silvanus Thompson, The Macmillan Company.** *Michael Faraday, His Life and Work*. New York : The Macmillan Company, 1898.

40. **Faraday, Michael.** On some new Electro-Magnetic Motions and on the Theory of Magnetism. *Quarterly Jurnal of Science and Art*. The Royal Institution, 1821, Τόμ. 12, σσ. 74-96.

41. —. *Experimental Reseaches in Electricity*. Unoversity of London. London : R. & J. Edward Taylor, 1844. Τόμ. II.

42. **Parker, Steve.** *Ανακαλύπτω την Επιστήμη: Ηλεκτρισμός*. Αθήνα : Ερευνητές, 1992. 960-368-174-1.

43. **Blundel, Stephen.** *Magnetism. A very short introduction.* s.l. : Oxford University Press, 2012. 978-0-19-960120-2.
44. **Faraday, Michael.** Royal Institution. *Mickael Faraday's Ring-Coil Apparatus.* [Ηλεκτρονικό] 2014. [http://www.rigb.org/docs/faraday\\_notebooks\\_\\_induction\\_0.pdf](http://www.rigb.org/docs/faraday_notebooks__induction_0.pdf).
45. The Royal Institution. *Michael Faraday's Generator.* [Ηλεκτρονικό] 2014. <http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-generator>.
46. **Forbes, Nancy και Mahon, Basil.** *Faraday, Maxwell and the Electromagnetic Field (How two men revolutionized Physics).* New York : Prometheus Books, 2014. 978-1-61614-943-7 .
47. **Faraday, Michael.** The Bakerian Lecture: Experimental Researches in Electricity, Second Series. *Phylosophical Transactions.* Royal Scociety, 1 Jan 1832, 122, σσ. 163-194. <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/122/163.full.pdf+html>.
48. **Alglave, E. και Boulard, J.** *The Electric Light: Its History, Production, and Applications.* [μεταφρ.] T. O'Connor Sloan. New York : D. Appleton & Co., 1884. σ. 224. fig.142.
49. Princeton University. *Joseph Henry Project.* [Ηλεκτρονικό] 18 May 2015. <https://www.princeton.edu/ssp/joseph-henry-project/dynamo/Dynamo.pdf>.
50. **Holmes, F.H.** On magneto-electricity and its application to lighthouse purposes. *Journal of the Franklin Institute.* Dec 1864, Τόμ. 78, 6, σσ. 409-420.
51. **Guttag, Eric.** IPWatchdog. *Granville Woods and Induction Telegraphy.* [Ηλεκτρονικό] 4 Feb 2014. <http://www.ipwatchdog.com/2014/02/04/granville-woods-and-induction-telegraphy/id=47767/>.
52. **Γιώργος, Φλουρής.** *Η Αρχιτεκτονική της Διδασκαλίας και η Διαδικασία της Μάθησης.* Αθήνα : Γρηγόρη, 2005. 960-333-022-1.
53. **Κασσωτάκης, Μιχάλης και Φλουρής, Γιώργος.** *Μάθηση & Διδασκαλία.* Αθήνα : Γρηγόρη, 2006. 978-960-333-794-2.
54. **Αντωνίου, Ν., και συν.** *Φυσική Γ' Γυμνασίου.* Αθήνα : ΟΕΔΒ, 2007.
55. **Νέζης, Αναστάσιος.** YouTube. *tasosne.* [Ηλεκτρονικό] May 2017. <https://youtu.be/OX0W8dbVyaA>.
56. —. YouTube. *tasosne.* [Ηλεκτρονικό] May 2017. <https://youtu.be/xmrcXkHCcgE>.
57. —. YouTube. *tasosne.* [Ηλεκτρονικό] May 2017. <https://youtu.be/E8WSynycNMk>.
58. —. You Tube. *tasosne.* [Ηλεκτρονικό] July 2017. <https://youtu.be/s94SZo3WLZE>.
59. —. YouTube. *tasosne.* [Ηλεκτρονικό] May 2017. <https://youtu.be/-Jgc5ZiS8gQ>.
60. —. YouTube. *tasosne.* [Ηλεκτρονικό] May 2017. [https://youtu.be/rqC43\\_0mXZ4](https://youtu.be/rqC43_0mXZ4) .
61. —. YouTube. *tasosne.* [Ηλεκτρονικό] May 2017. <https://youtu.be/TkFvDjQ0uh8>.



62. —. YouTube. *tasosne*. [Ηλεκτρονικό] July 2017. <https://youtu.be/g-EXgR1eNpA>.
63. —. YouTube. *tasosne*. [Ηλεκτρονικό] 2017, 2017 May. <https://youtu.be/uGJhnnKylgU>.
64. —. YouTube. *tasosne*. [Ηλεκτρονικό] Sept. 2011. <https://www.youtube.com/watch?v=rOEwphpJlds>.
65. **Cropper, William**. *Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking*. s.l. : Oxford University Press, 2001. 0–19–513748–5.
66. **National Institute of Standards and Technology**. The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty. *The Faraday Constant*. [Ηλεκτρονικό] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?f>.
67. **Moore, Amanda**. Intriguing History. *Electromagnet invented 1825 by William Sturgeon*. [Ηλεκτρονικό] 6 Oct 2011. <http://www.intriguing-history.com/1825-invention-of-the-electromagnet/>.
68. NITUM. *Biography of Johann Salomo Christoph Schweigger*. [Ηλεκτρονικό] 1 Oct 2012. <https://nitum.wordpress.com/tag/schweigger-developed-the-galvanometer-as-a-tool-for-measuring-the-strength-and-direction-of-electric-current/>.
69. Heinrich Lenz. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό] 27 Nov 2016. [https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Lenz](https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Lenz).
70. Wikipedia. *Lorentz Force*. [Ηλεκτρονικό] 17 Mar 2017. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_force).
71. **Macchi, Andrea**. Università di Pisa. *Dipartimento di Fisica*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.df.unipi.it/~macchi/TEACHING/FISICA2/PROBLEMS/selfdynamo.pdf>.
72. **Νέζης, Αναστάσιος**. YouTube. *tasosne*. [Ηλεκτρονικό] June 2011. <https://www.youtube.com/watch?v=6V0TLcDagsg>.





## Βιβλιογραφία Εικόνων, Φωτογραφιών και Σχημάτων

Αριθμός Εικόνας	Αναφορά στο Διαδίκτυο
Εξώφυλλο	<a href="http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-ring">http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-ring</a>
1	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:Faraday-Millikan-Gale-1913.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:Faraday-Millikan-Gale-1913.jpg</a>
2	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Humphry_Davy#/media/File:Sir_Humphry_Davy,_Bt_by_Thomas_Phillips.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Humphry_Davy#/media/File:Sir_Humphry_Davy,_Bt_by_Thomas_Phillips.jpg</a>
3	<a href="https://rising-ape.com/2015/03/17/f-is-for-faraday/">https://rising-ape.com/2015/03/17/f-is-for-faraday/</a>
4	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:Faraday_Cochran_Pickersgill.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:Faraday_Cochran_Pickersgill.jpg</a>
5	<a href="http://www.rigb.org/blog/2014/february/sarah-faraday">http://www.rigb.org/blog/2014/february/sarah-faraday</a>
6	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=WQ5o30LcEUI&amp;t=352s">https://www.youtube.com/watch?v=WQ5o30LcEUI&amp;t=352s</a>
7	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Chladni#/media/File:Bowling_chladni_plate.png">https://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Chladni#/media/File:Bowling_chladni_plate.png</a>
8	<a href="http://creyentesintelectuales.blogspot.gr/2012/06/michael-faraday-en-cristo.html">http://creyentesintelectuales.blogspot.gr/2012/06/michael-faraday-en-cristo.html</a>
9	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamo#/media/File:Faraday_disk_generator.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamo#/media/File:Faraday_disk_generator.jpg</a>
10	<a href="http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/122/125.full.pdf+html">http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/122/125.full.pdf+html</a>
11	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:M_Faraday_Th_Phillips_oil_1842.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:M_Faraday_Th_Phillips_oil_1842.jpg</a>
12	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Royal_Institution_Christmas_Lectures#/media/File:Faraday_Michael_Christmas_lecture_detail.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Royal_Institution_Christmas_Lectures#/media/File:Faraday_Michael_Christmas_lecture_detail.jpg</a>
13	<a href="http://discovermagazine.com/galleries/zen-photo/c/cosmic-imagery">http://discovermagazine.com/galleries/zen-photo/c/cosmic-imagery</a>
14	<a href="http://www.faradaysdiary.com/">http://www.faradaysdiary.com/</a>
15	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell#/media/File:James_Clerk_Maxwell.png">https://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell#/media/File:James_Clerk_Maxwell.png</a>
16	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Faraday-house_in_hampton_court.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Faraday-house_in_hampton_court.png</a>
17	<a href="http://www.westminster-abbey.org/our-history/famous-people?collection=wma-people&amp;query=newton">http://www.westminster-abbey.org/our-history/famous-people?collection=wma-people&amp;query=newton</a>
18	<a href="http://www.worldbanknotescoins.com/2015/05/england-20-pound-sterling-note-1993-michael-faraday.html">http://www.worldbanknotescoins.com/2015/05/england-20-pound-sterling-note-1993-michael-faraday.html</a>
19	<a href="http://www.britainfromabove.org.uk/image/epw005598">http://www.britainfromabove.org.uk/image/epw005598</a>
20	<a href="http://www.gettyimages.com/photos/michael-faraday?excludenudity=true&amp;sort=mostpopular&amp;mediatype=photography&amp;phrase=michael%20faraday">http://www.gettyimages.com/photos/michael-faraday?excludenudity=true&amp;sort=mostpopular&amp;mediatype=photography&amp;phrase=michael%20faraday</a>
21	A: <a href="https://nitum.wordpress.com/2012/09/29/biography-of-hans-christian-orsted/">https://nitum.wordpress.com/2012/09/29/biography-of-hans-christian-orsted/</a> B: <a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/Oersted_experiment.png">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/Oersted_experiment.png</a>
22	A: <a href="http://users.clas.ufl.edu/fgregory/oersted.htm">http://users.clas.ufl.edu/fgregory/oersted.htm</a> B: <a href="http://demoweb.physics.ucla.edu/content/20-long-straight-wire">http://demoweb.physics.ucla.edu/content/20-long-straight-wire</a>
23	A: <a href="https://skullsinthestars.files.wordpress.com/2012/01/arago_pic.jpg">https://skullsinthestars.files.wordpress.com/2012/01/arago_pic.jpg</a> B: <a href="http://www.fleaglass.com/ads/aragos-disk/">http://www.fleaglass.com/ads/aragos-disk/</a>
24, 25	<a href="http://efepereth.wdfiles.com/local--files/faraday-motor-with-saltwater/Faraday_3_sep_1821">http://efepereth.wdfiles.com/local--files/faraday-motor-with-saltwater/Faraday_3_sep_1821</a>
26	<a href="http://www.alamy.com/stock-photo/michael-faraday.html?blackwhite=1">http://www.alamy.com/stock-photo/michael-faraday.html?blackwhite=1</a>



27	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Homopolar_motor#/media/File:Faraday_magnetic_rotation.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Homopolar_motor#/media/File:Faraday_magnetic_rotation.jpg</a>
28	<a href="http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faradays-motor">http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faradays-motor</a>
29	<a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Barlow%27s_wheel.jpg">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Barlow%27s_wheel.jpg</a>
30	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%81nyos_Jedlik#/media/File:Jedlik_motor.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%81nyos_Jedlik#/media/File:Jedlik_motor.jpg</a>
31	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor#/media/File:Tesla%27s_induction_motor.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor#/media/File:Tesla%27s_induction_motor.jpg</a>
32	<a href="http://www.rigb.org/docs/faraday_notebooks_induction_0.pdf">http://www.rigb.org/docs/faraday_notebooks_induction_0.pdf</a>
33, 35A, 36, 37B, 40B, 42...47	Πίνακας III, σελ. 131 <i>Experimental Researches in Electricity</i> , Michael Faraday <i>Phil. Trans. R. Soc. Lond.</i> 1832 122, 125-162 <a href="http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/122/125.full.pdf+html">http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/122/125.full.pdf+html</a>
34	<a href="http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-ring">http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-ring</a>
35B	<a href="https://skullsinthestars.com/2008/12/25/mr-faradays-most-excellent-experimental-researches-in-electricity-1831/">https://skullsinthestars.com/2008/12/25/mr-faradays-most-excellent-experimental-researches-in-electricity-1831/</a>
37A	<a href="http://www.rigb.org/docs/faraday_notebooks_generator_0.pdf">http://www.rigb.org/docs/faraday_notebooks_generator_0.pdf</a>
38	<a href="http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-generator">http://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-generator</a>
39	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:Induction_experiment.png">https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday#/media/File:Induction_experiment.png</a>
40A	<a href="http://www.alamy.com/stock-photo/michael-faraday.html?blackwhite=1">http://www.alamy.com/stock-photo/michael-faraday.html?blackwhite=1</a>
41	A: <a href="https://www.flickr.com/photos/67474303@N06/12972438823/">https://www.flickr.com/photos/67474303@N06/12972438823/</a> B: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Homopolar_generator#/media/File:Faraday_disc.svg">https://en.wikipedia.org/wiki/Homopolar_generator#/media/File:Faraday_disc.svg</a>
46	<a href="https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4360079/figure/RSTA20140208F3/">https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4360079/figure/RSTA20140208F3/</a>
48	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Hippolyte_Pixii#/media/File:Wechselstromerzeuger.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Hippolyte_Pixii#/media/File:Wechselstromerzeuger.jpg</a>
49	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Trinity_Buoy_Wharf#/media/File:Bow_Creek_Lighthouse_dusk.JPG">https://en.wikipedia.org/wiki/Trinity_Buoy_Wharf#/media/File:Bow_Creek_Lighthouse_dusk.JPG</a>
50	A: <a href="http://www.brooklynrail.net/images/GranvilleTWoods/granvilletwoods.jpg">http://www.brooklynrail.net/images/GranvilleTWoods/granvilletwoods.jpg</a> B: <a href="http://www.brooklynrail.net/images/GranvilleTWoods/inductiontelegraphsystem.jpg">http://www.brooklynrail.net/images/GranvilleTWoods/inductiontelegraphsystem.jpg</a>
51...67	του συγγραφέα
Όλες οι φωτογραφίες των φύλλων εργασίας	του συγγραφέα
Σχήματα 1...8 & όλα τα Σχήματα των φύλλων εργασίας	του συγγραφέα (φτιαγμένα με το πρόγραμμα COREL Draw 9)  για τα Σχήματα 1B & 2: αρχικά σχήματα στο: <b>Russell, Collin.</b> <i>Michael Faraday: Physics &amp; Faith</i> . New York : Oxford University Press, 2000, p. 63



### Δήλωση

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον.

Ο Δηλών

Αναστάσιος Νέζης