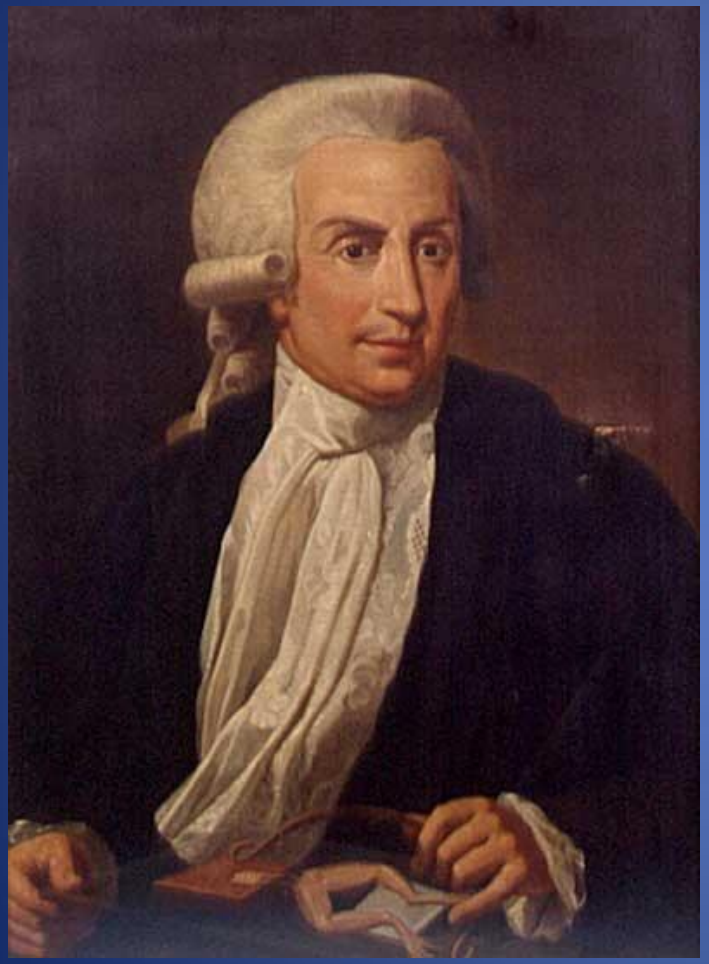
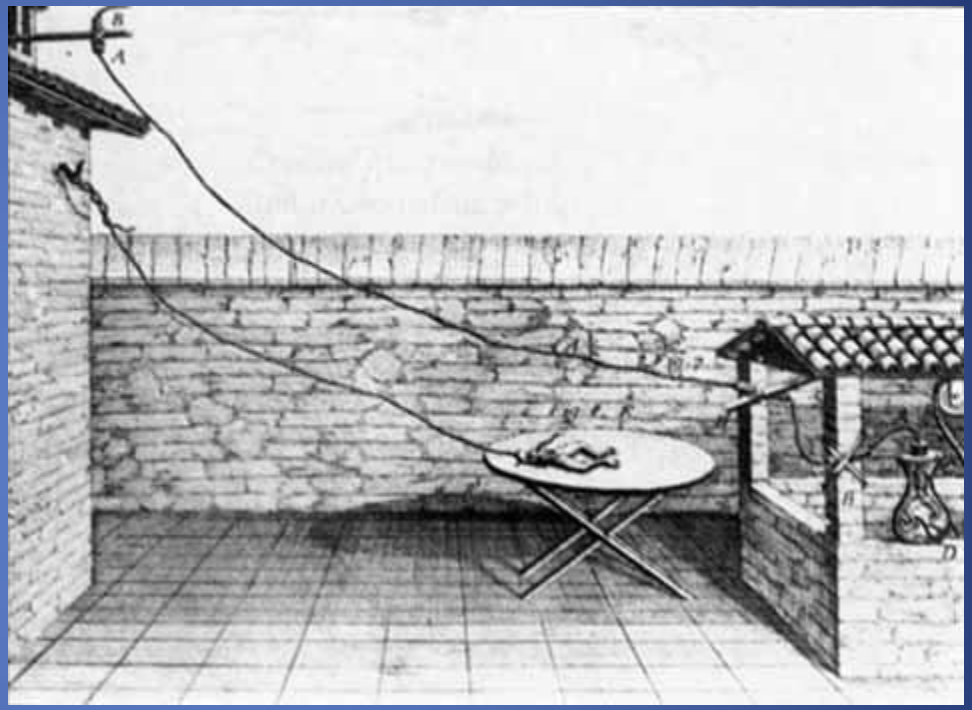
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Χάρης Βάρβογλης
Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

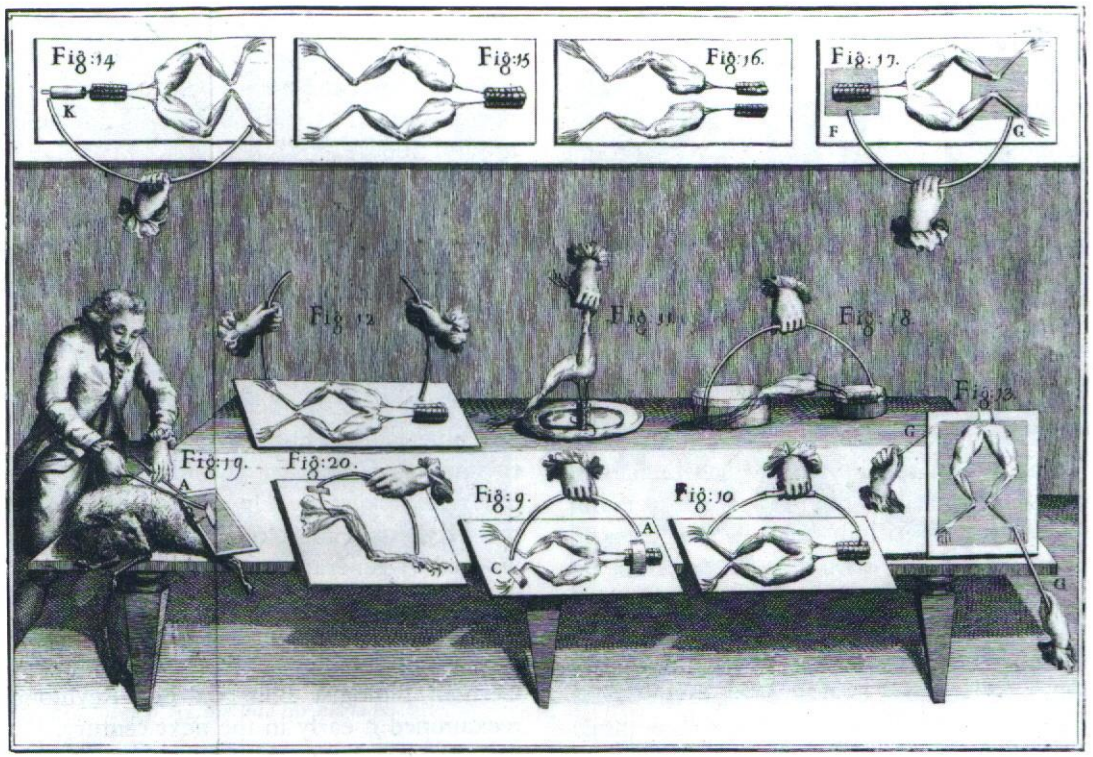
Luigi Galvani (1737-1798)





- Ήταν γιατρός και εργαζόταν στη φυσιολογία των νεφρών, των αυτιών και των μυών.
- Οι ακριβείς συνθήκες της ανακάλυψης δεν είναι γνωστές.
- Κατά την πιθανότερη εκδοχή, οι μύες των ποδιών ενός βατράχου, τα οποία κρέμονταν από ένα χάλκινο τσιγκέλι, συσπάστηκαν όταν τους ακούμπησε με τον ατσάλινο νυστέρι του.

Ερμηνεία των πειραμάτων του από τον ίδιο



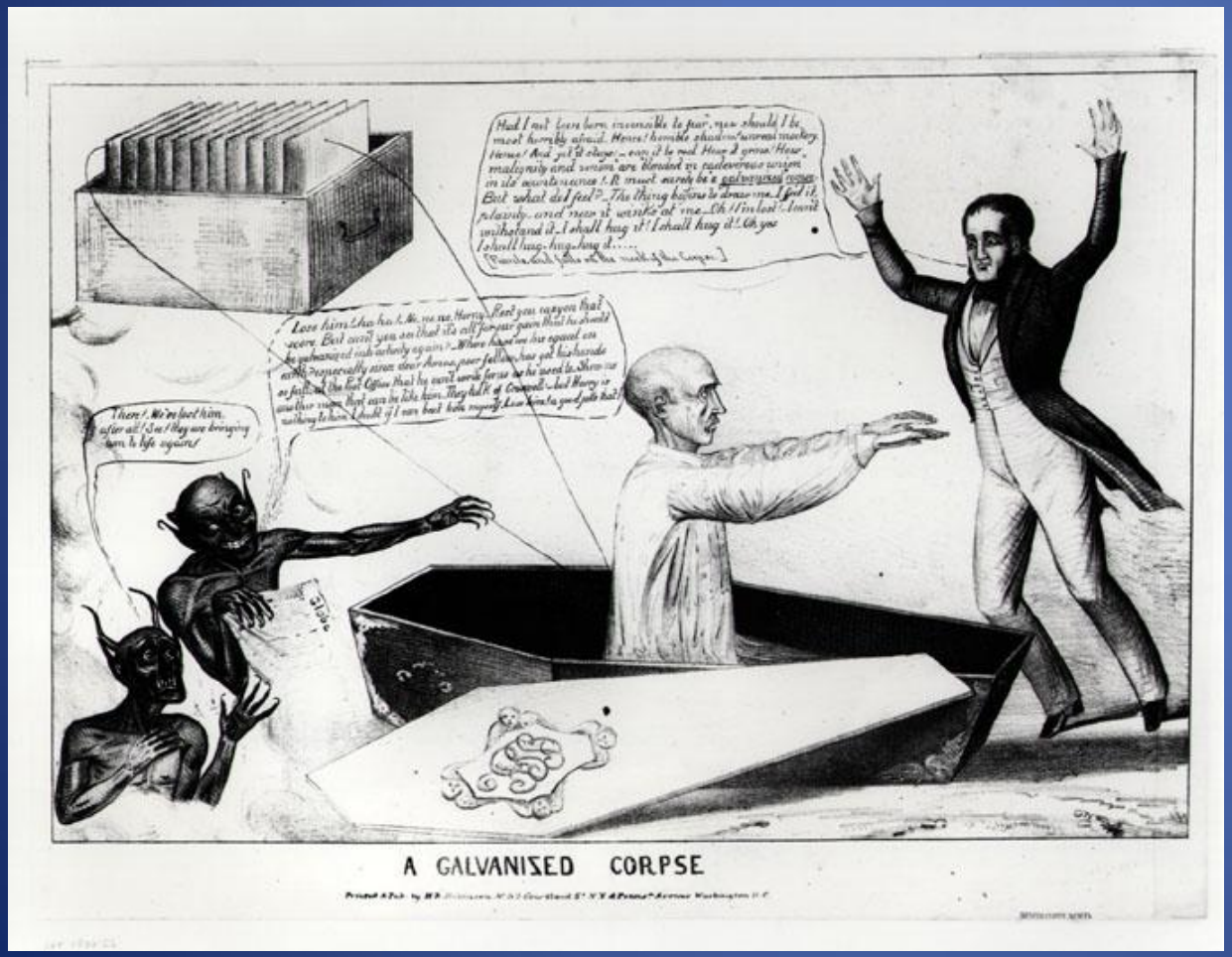
Luigi Galvani's electricity-producing machine one day accidentally sparked a twitch in the leg of a freshly dissected frog. The general observation that electrical stimuli can cause muscles to contract set off the search for "animal electricity."

- Οι μύες είναι ανιχνευτές του ηλεκτρισμού (σωστό).
- Αυτός ο ηλεκτρισμός είναι ζωικής προέλευσης (όχι πάντα).
- Ο όρος *γαλβανισμός* επινοήθηκε από τον Βόλτα, για να περιγράψει αυτό το φαινόμενο.
- Ο Γκαλβάνι πέθανε πιστεύοντας ότι είχε ανακαλύψει ένα διαφορετικό είδος ηλεκτρισμού από αυτό των Coulomb *και Σια.*

Γαλβανισμός και Φρανκεστάιν

- Το καλοκαίρι του 1816 ο καιρός έμοιαζε περισσότερο με έναν κρύο και βροχερό *ηφαιστειακό χειμώνα*, οφειλόμενο στην έκρηξη του ηφαιστείου Mount Tambora το 1815.
- Η *Mary Shelley,* 18 χρονών τότε, και ο μετέπειτα σύζυγός της, ποιητής Percy Bysshe Shelley, επισκέφθηκαν τον Λόρδο Βύρωνα και την παρέα του στη Βίλλα Diodati στις όχθες της λίμνης της Γενεύης, στην Ελβετία.
- Ο καιρός ήταν πολύ κρύος και ακατάλληλος για εκδρομές και περιπάτους και η ομήγυρη έμενε μέσα στο σπίτι.
- Επειδή βαριόταν, αποφάσισαν να οργανώσουν ένα διαγωνισμό για ιστορίες τρόμου.
- Η Mary Shelley, που είχε διαβάσει την ανακάλυψη του Galvani και τις ιδέες του σχετικά με τον ζωικό ηλεκτρισμό, συνέλαβε την ιδέα της πασίγνωστης νουβέλας: *Frankenstein; or, The Modern Prometheus*.

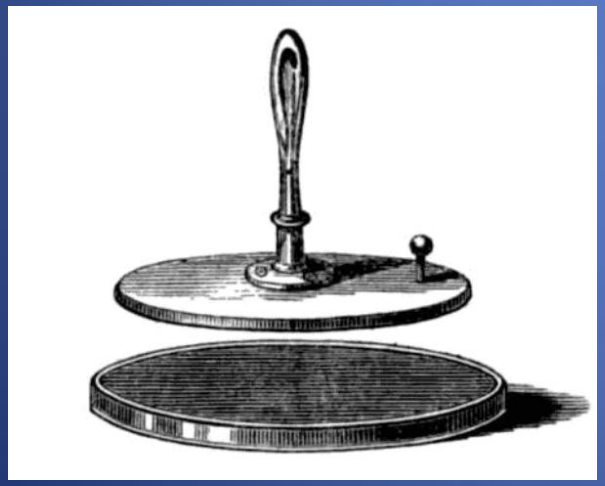
Ο Γαλβανισμός στη λογοτεχνία



- Ο ζωικός ηλεκτρισμός εθεωρείτο ότι έχει αναζωογονητικά αποτελέσματα.
- Η ιδέα απέκτησε παγκόσμια αναγνώριση, μετά τη νουβέλα *Frankenstein*, or *The New Prometheus* της Mary Shelley.

Alessandro Volta (1745-1827)

- Γεννήθηκε στο Κόμο.
- Φυσικός, καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Pavia.
- Ανακάλυψε το μεθάνιο.
- Εφηύρε τον *ηλεκτροφόρο*, μια πρωτόγονη ηλεκτροστατική γεννήτρια.

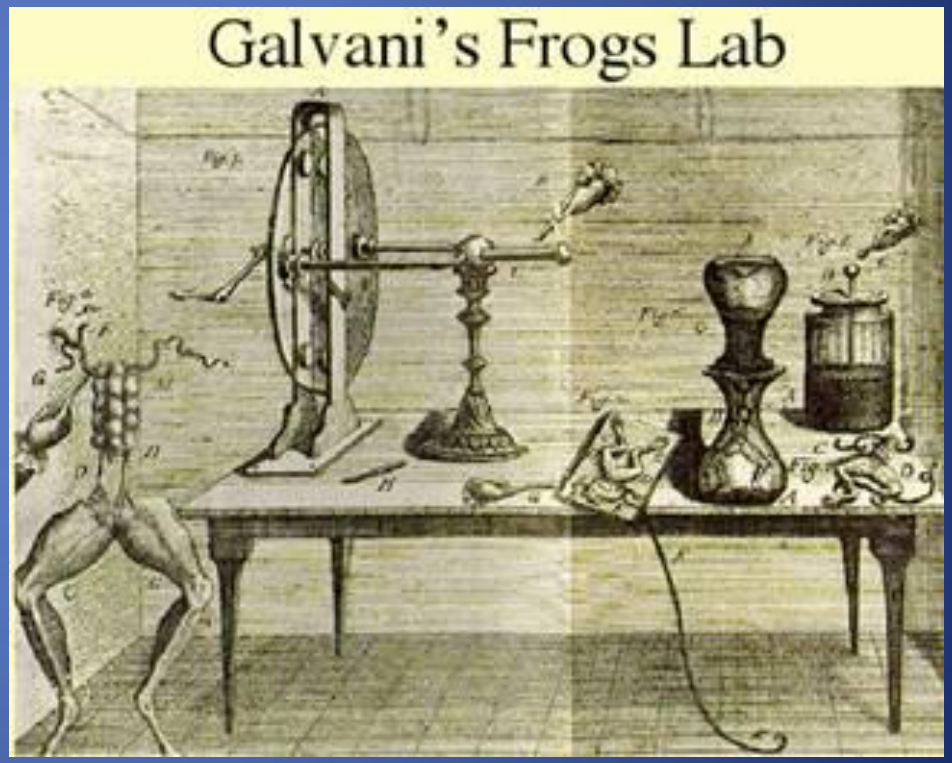


Ηλεκτροφόρος, από ένα βιβλίο Χημείας του 1840

Tempio Voltiano, Como

Πειράματα του Βόλτα

- Ο Βόλτα αντιλήφθηκε ότι τα βατραχοπόδαρα πάθαιναν συσπάσεις ακόμα και όταν βρίσκονταν σε επαφή με μια εξωτερική πηγή ηλεκτρισμού, όπως μια λουγδουνική λάγηνος ή μια ηλεκτροστατική γεννήτρια.
- Έτσι κατέληξε στο (ορθό) συμπέρασμα ότι η αιτία των συσπάσεων ήταν εξωτερική.
- Αλλά δεν μπορούσε να εξηγήσει τις συσπάσεις που προκαλούνταν με την επαφή σε ένα γυμνωμένο νεύρο.



Η εφεύρεση της βολταϊκής στήλης

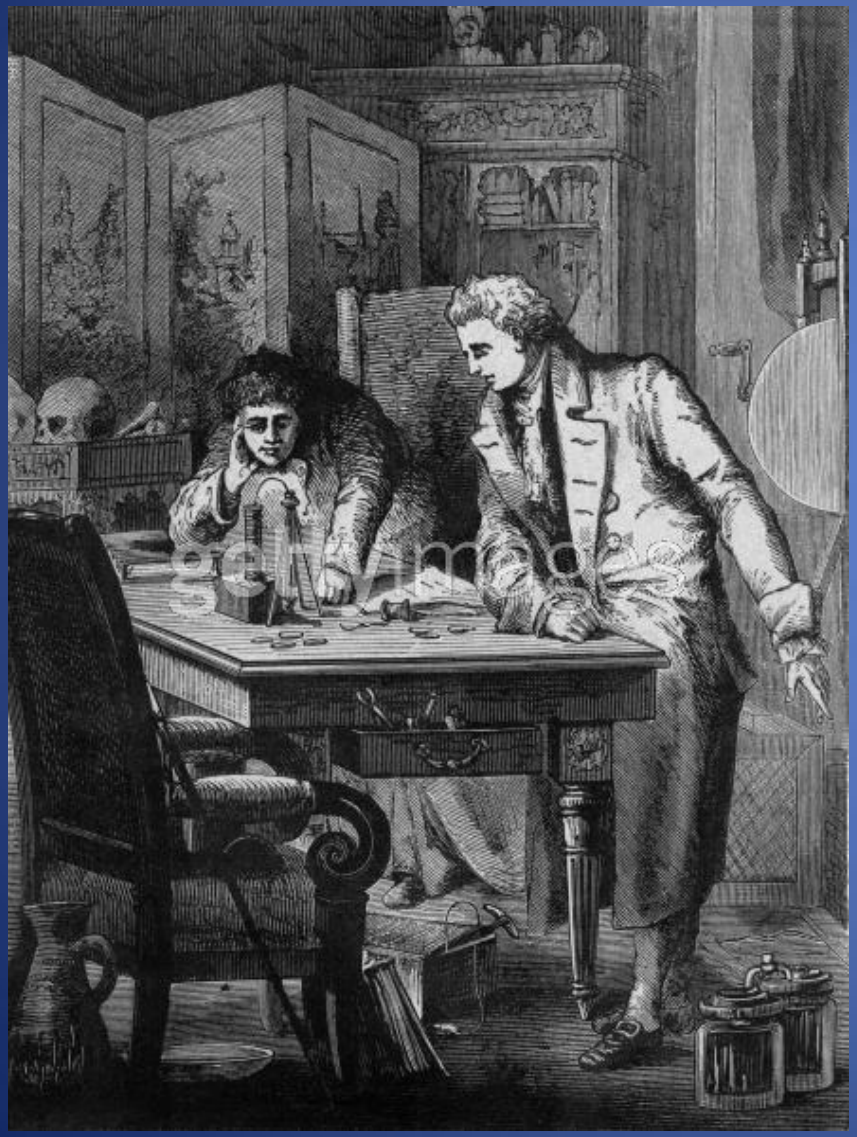
Πρωτότυπη βολταϊκή στήλη, Tempio Voltiano, Como

- Ο Βόλτα σκέφθηκε, σωστά, ότι ο ηλεκτρισμός παράγεται όταν εισάγονται δύο διαφορετικοί αγωγοί στα σωματικά υγρά του βατράχου.
- Έτσι αντικατέστησε τα σωματικά υγρά με ένα διάλυμα αλατιού και κατασκεύασε την πρώτη μπαταρία, ένα *βολταϊκό* (ή ηλεκτρικό) *στοιχείο*.
- Τα περισσότερα στοιχεία έχουν τάση ~1 V.
- Για να πετύχουμε μεγαλύτερες τάσεις, πρέπει να συνδέσουμε περισσότερα βολταϊκά στοιχεία στη σειρά, κατασκευάζοντας έτσι μια *μπαταρία*.
- Για να κάνει τη μπαταρία πιο εύχρηστη, ο Βόλτα αντικατέστησε το υδατικό διάλυμα του αλατιού με χαρτόνια μουσκεμένα σε αλατόνερο,
- Αυτή η νέα συσκευή ονομάσθηκε *βολταϊκή στήλη*, λόγω του σχήματος της.
- Ήταν ο πρόγονος των σημερινών μπαταριών.

Μπαταρία 20 στοιχείων

Μπαταρία C-Zn , ~1880, Museo Galileo, Florence

Ηλεκτρόλυση



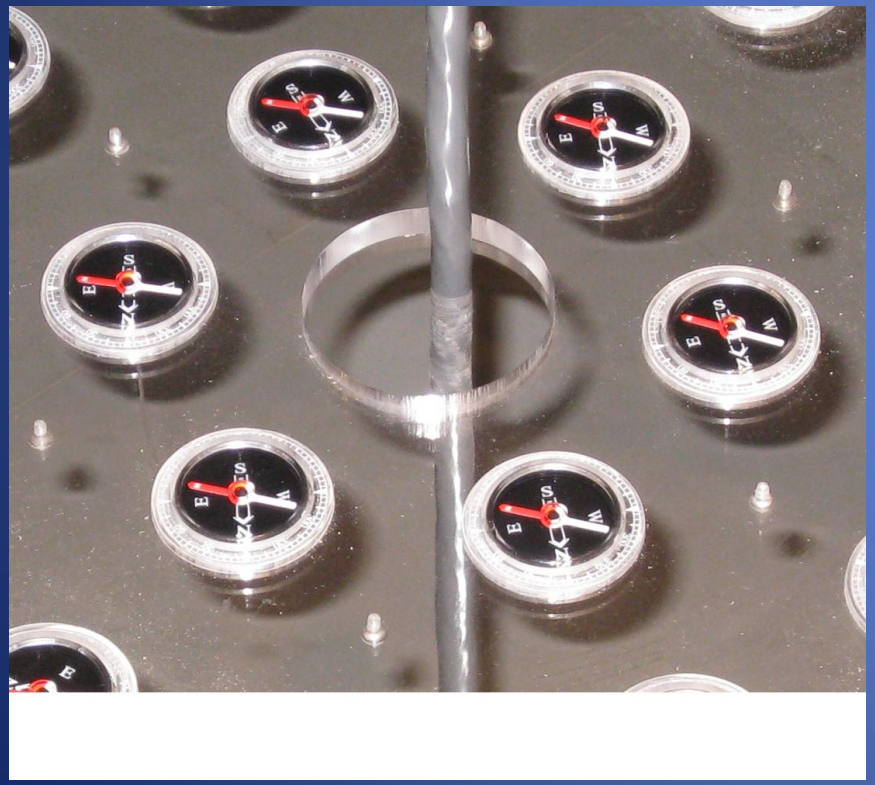
- Οι Anthony Carlisle και William Nicholson πέτυχαν το 1800 να ηλεκτρολύσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο.
- Ο Sir Humphry Davy, χρησιμοποιώντας μια μπαταρία 3.000 στοιχείων (~4.5 kV!), πέτυχε να πάρει αλκάλια σε μεταλλική μορφή.
- Αργότερα ο Michael Faraday διατύπωσε τους νόμους της ηλεκτρόλυσης.
- Τα αποτελέσματά του ήταν κρίσιμα για την γενική αποδοχή της ατομικής θεωρίας του Dalton.
- Η σημερινή ονοματολογία στην ηλεκτρόλυση (άνοδος, κάθοδος, ιόν κλπ.) είναι λέξεις που επινοήθηκαν από τον Faraday, με τη βοήθεια του πάστορα William Whewell.

Hans Christian Ørsted (1777-1851)

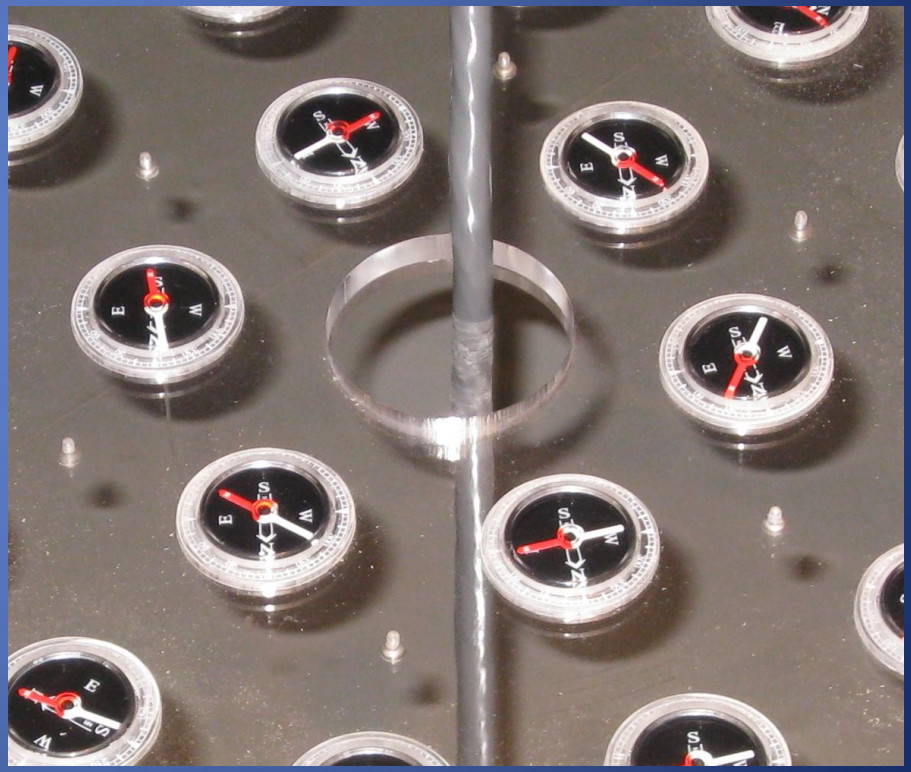
Ανακάλυψε τον ηλεκτρομαγνητισμό:
Η μαγνητική βελόνα κινείται στη γειτονιά ενός ηλεκτρικού ρεύματος.

Πείραμα Ørsted

Χωρίς ρεύμα



Με ρεύμα

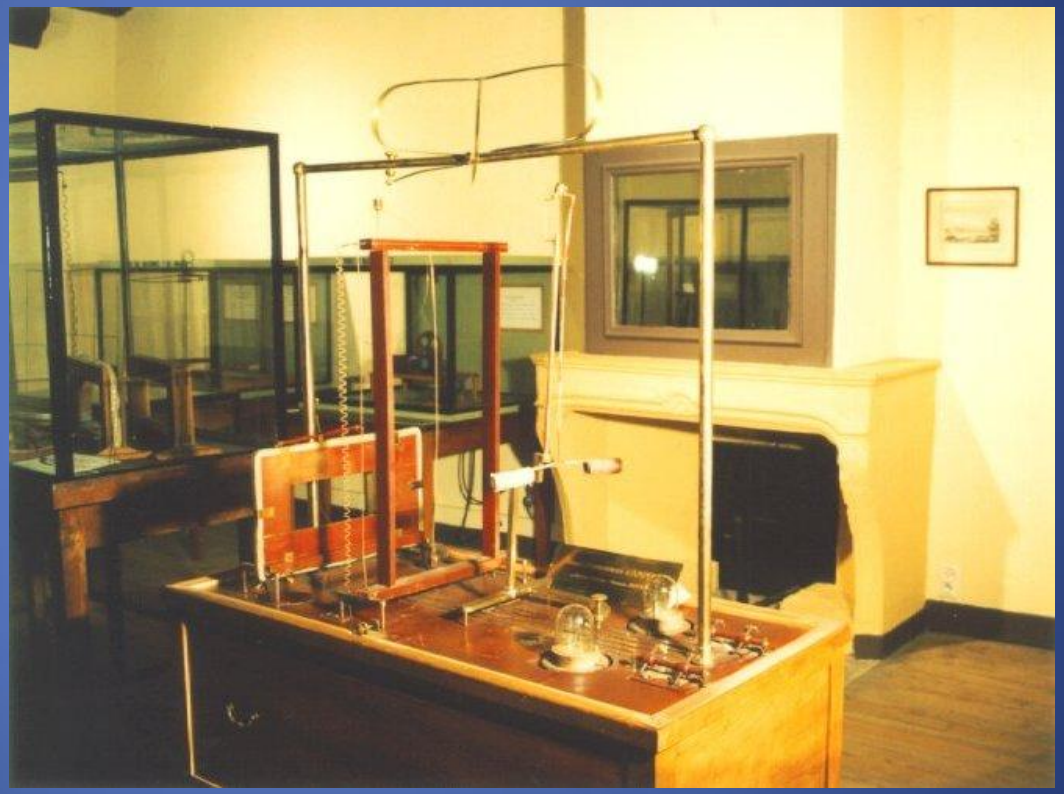


ΚΔΕΜΤ Νόησις

Χρονολόγιο της ανακάλυψης

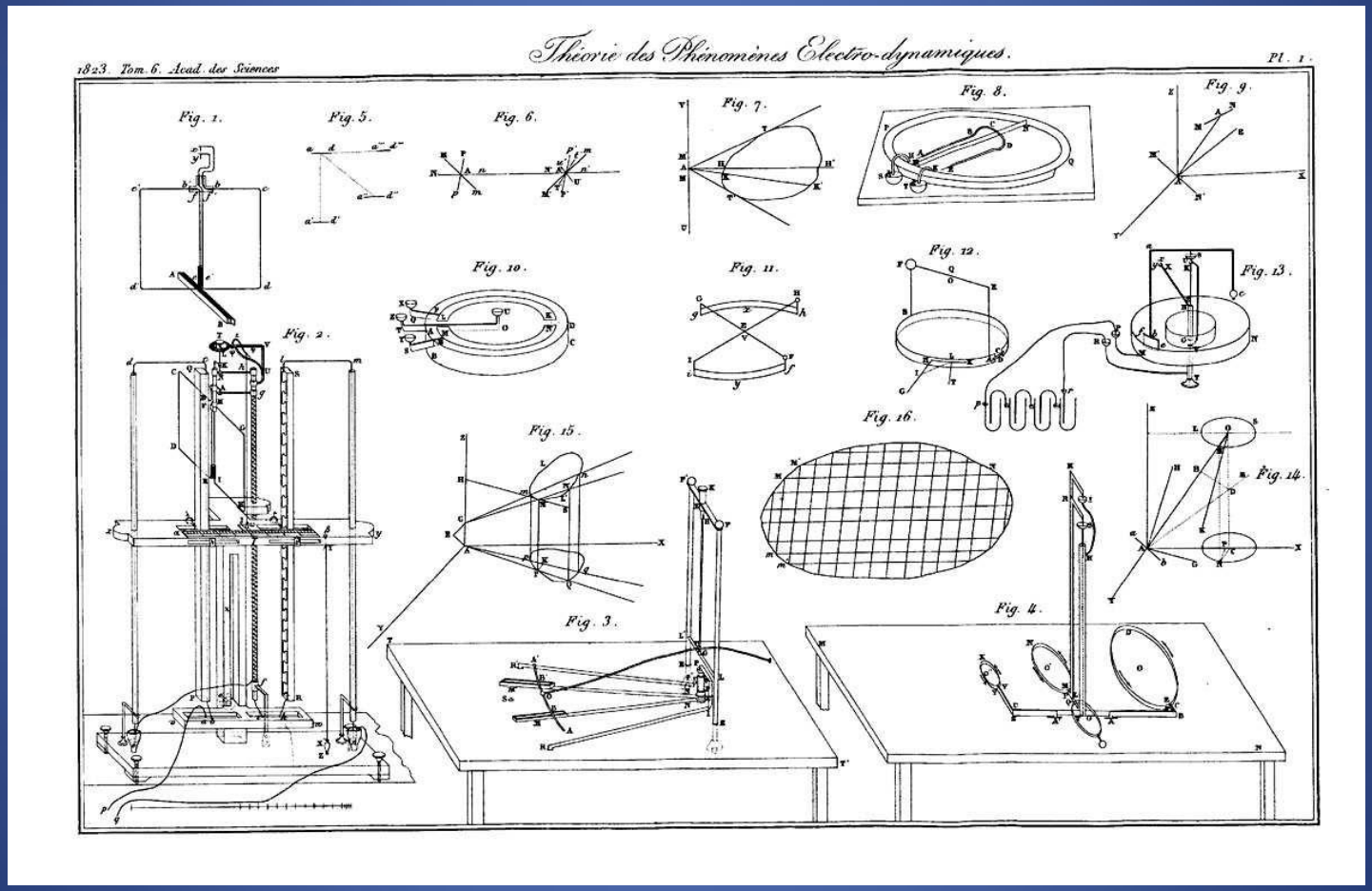
- Καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης
- Τυχαία ανακάλυψη: Απρίλιος 1820
- Δημοσίευση σε φυλλάδιο: Ιούλιος 1820
- Πειράματα το καλοκαίρι από τον Arago (της Γαλλικής Ακαδημίας Επιστημών) – εμφανίζεται μαγνητική δύναμη και μεταξύ ρευμάτων
- Παρουσίαση των πειραμάτων στο Εθνικό Ινστιτούτο (το όνομα της Ακαδημίας Επιστημών τον καιρό του Ναπολέοντα): 11 Σεπτεμβρίου 1820
- Πειράματα του Ampère: πρώτη παρουσίαση στο Ινστιτούτο στις 18 Σεπτεμβρίου!

André-Marie Ampère (1775-1836)
Ο Νεύτωνας του Ηλεκτρομαγνητισμού



Ανακατασκευή της πειραματικής διάταξης του Ampère
(Deutsches Museum, 1947)

Σχήματα από την πρώτη επιστημονική δημοσίευση του Ampère



1ο-2ο πείραμα: κάτω αριστερά, 3ο πείραμα: κάτω κέντρο, 4ο πείραμα: κάτω δεξιά

Τα τέσσερα πειράματα - Ι

- 1. Δύο σύρματα με ίσα και αντίθετης κατεύθυνσης ρεύματα, ίσια ή τυλιγμένα μεταξύ τους: η μαγνητική βελόνα δεν κινείται.
  - Συμπέρασμα: η *συνάρτηση* που δίνει τη δύναμη μεταξύ ρευμάτων είναι *ανάλογη προς τα ρεύματα*.
- 2. Δύο σύρματα, ένα ίσιο και το άλλο «κυματοειδές»: ίδιο αποτέλεσμα με το παραπάνω.
  - Συμπέρασμα: το *ηλεκτρικό ρεύμα* μπορεί να αναλυθεί σε «συνιστώσες», δηλαδή είναι *διάνυσμα*.

Τα τέσσερα πειράματα - ΙΙ

- 3. Ένα ημικυκλικό σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα, ελεύθερο να κινείται γύρω από άξονα που διέρχεται από το κέντρο του και είναι κάθετος στο επίπεδο του κύκλου, δεν κινείται όταν πλησιάσουμε σε αυτό ένα μόνιμο μαγνήτη ή ένα άλλο σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα.
  - Συμπέρασμα: Η *δύναμη* είναι *κάθετη στο ρεύμα*.

- 4. Τρία κυκλικά σύρματα, που διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, με διαφορετικές ακτίνες R_i και αποστάσεις L_{ij} μεταξύ τους. Αν $R_1/R_2 = R_2/R_3 = L_{12}/L_{23}$, τότε τα τρία κυκλικά σύρματα ισορροπούν.
  - Συμπέρασμα: η *δύναμη* είναι της μορφής ~ $1/r^2$.

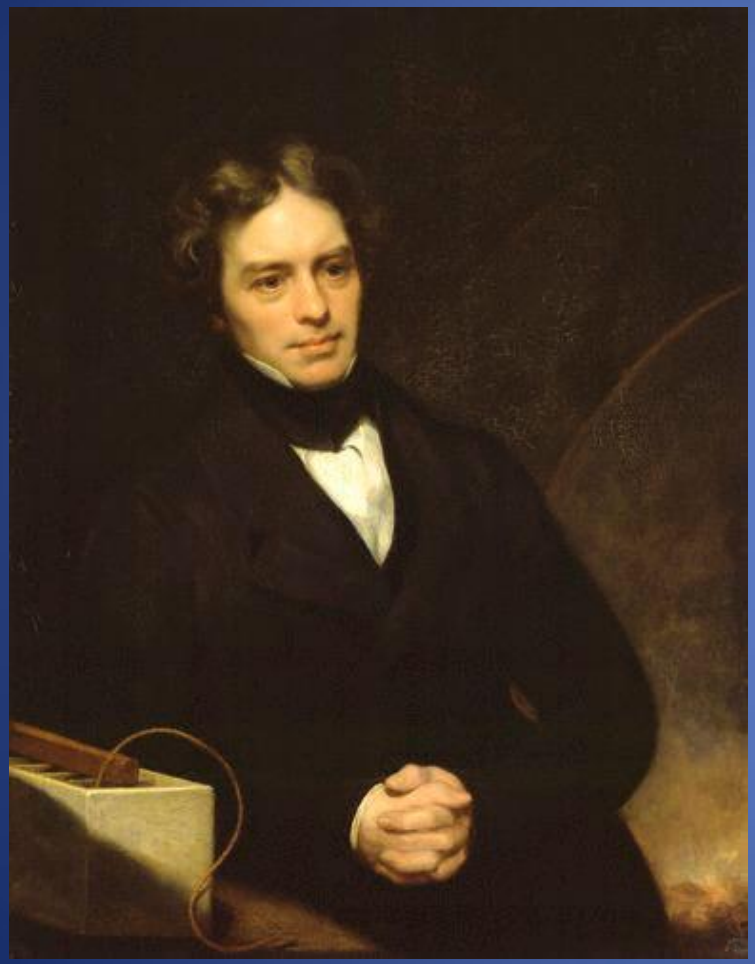
Τελικό αποτέλεσμα του Ampère

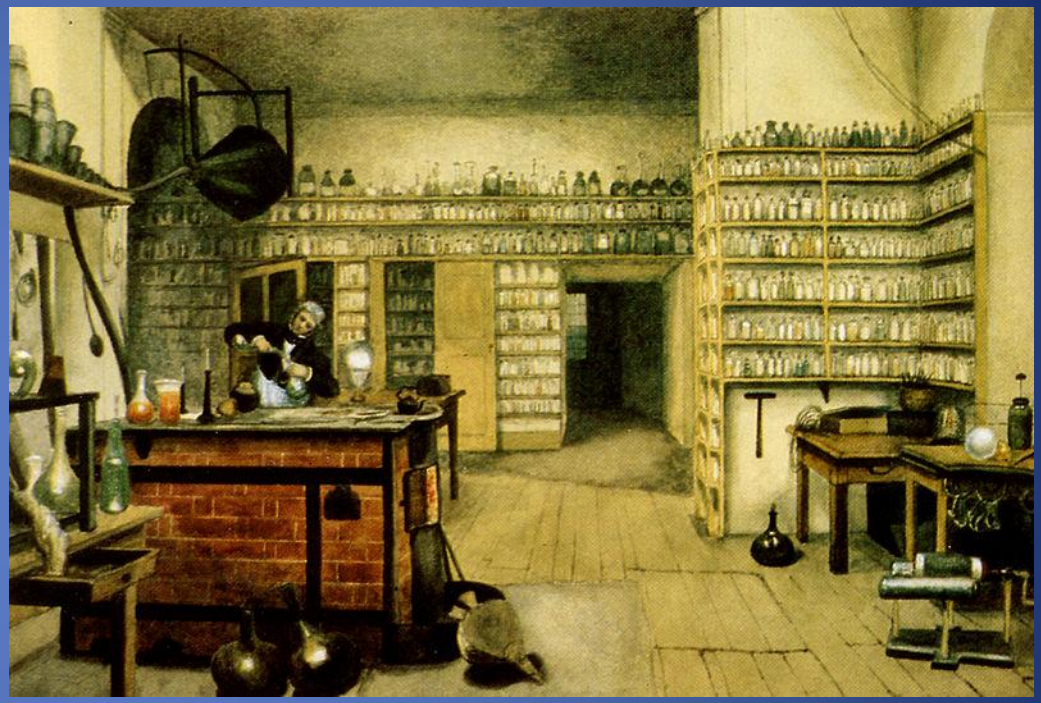
- Ο Ampère έκανε την *επιπλέον υπόθεση* ότι η δύναμη μεταξύ των στοιχειωδών ρευμάτων dl_1 and dl_2 ενεργεί κατά μήκος της ευθείας που συνδέει τα στοιχειώδη ρεύματα (φαίνεται «λογική», αφού έτσι είναι συνεπής με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα *στην ισχυρή μορφή του*!).
- Με αυτόν τον τρόπο η δύναμη είναι της ίδιας μορφής με αυτές που περιγράφουν τις βαρυτικές, ηλεκτροστατικές και μαγνητοστατικές δυνάμεις.
- Ο Maxwell ονόμασε τον Ampère «Νεύτωνα του Ηλεκτρισμού», για τους εξής λόγους:
- Η θεωρία του (στην οποία δεν εμφανίζεται η έννοια του πεδίου)
  - Περιγράφει μόνο στατικά φαινόμενα και
  - Υποθέτει ότι οι δυνάμεις μεταξύ ρευμάτων διαδίδονται με άπειρη ταχύτητα.
- Επομένως είναι το όριο της θεωρίας του Maxwell, για σταθερά ρεύματα και μικρές αποστάσεις.

Ampère «εναντίον» Biot&Savart

- Εκτός από τον Ampère, παρόμοια πειράματα έκανε και ένα άλλο μέλος της Ακαδημίας Επιστημών, ο Jean Baptiste *Biot*, μαζί με τον συνεργάτη του Felix *Savart*.
- Ανακοίνωσαν τα αποτελέσματά τους, μαζί με μια *διαφορετική σχέση για τη δύναμη*, στα τέλη του Οκτωβρίου 1820.
- Στη θεωρία τους η στοιχειώδης δύναμη δεν ενεργεί κατά μήκος της ευθείας που συνδέει τα στοιχειώδη ρεύματα, και έτσι ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα ισχύει μόνο με την ασθενή μορφή του.
- Στην αρχή φαίνεται ότι δεν είναι δυνατό να είναι σωστοί και οι δύο τύποι της δύναμης.
- Όμως αυτό που μετράμε στην πραγματικότητα είναι το (διπλό) επικαμπύλιο ολοκλήρωμα των δύο νόμων, κατά μήκος των βρόχων των δύο ρευμάτων. Αφού κάνουμε αυτή την ολοκλήρωση, οι δύο νόμοι γίνονται ισοδύναμοι.
- Ο νόμος των Biot-Savart ολοκληρώνεται ευκολότερα για τη δύναμη που οφείλεται σε ένα μακρύ ευθύγραμμο σύρματ wire. Στη γλώσσα του Maxwell, αυτό είναι απλά η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Γι’ αυτόν τον λόγο ονομάζουμε «Biot-Savart» την σχέση που δίνει το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου σύρματος άπειρου μήκους που διαρρέεται από σταθερό ρεύμα.

Michael Faraday (1791-1867)





- Ο Faraday και το εργαστήριό του.
- Στο μεγαλύτερο τμήμα της επιστημονικής ζωής του (40 χρόνια) εργάσθηκε στη Χημεία.
- Στη φυσική εργάσθηκε μόνο για 10 χρόνια!

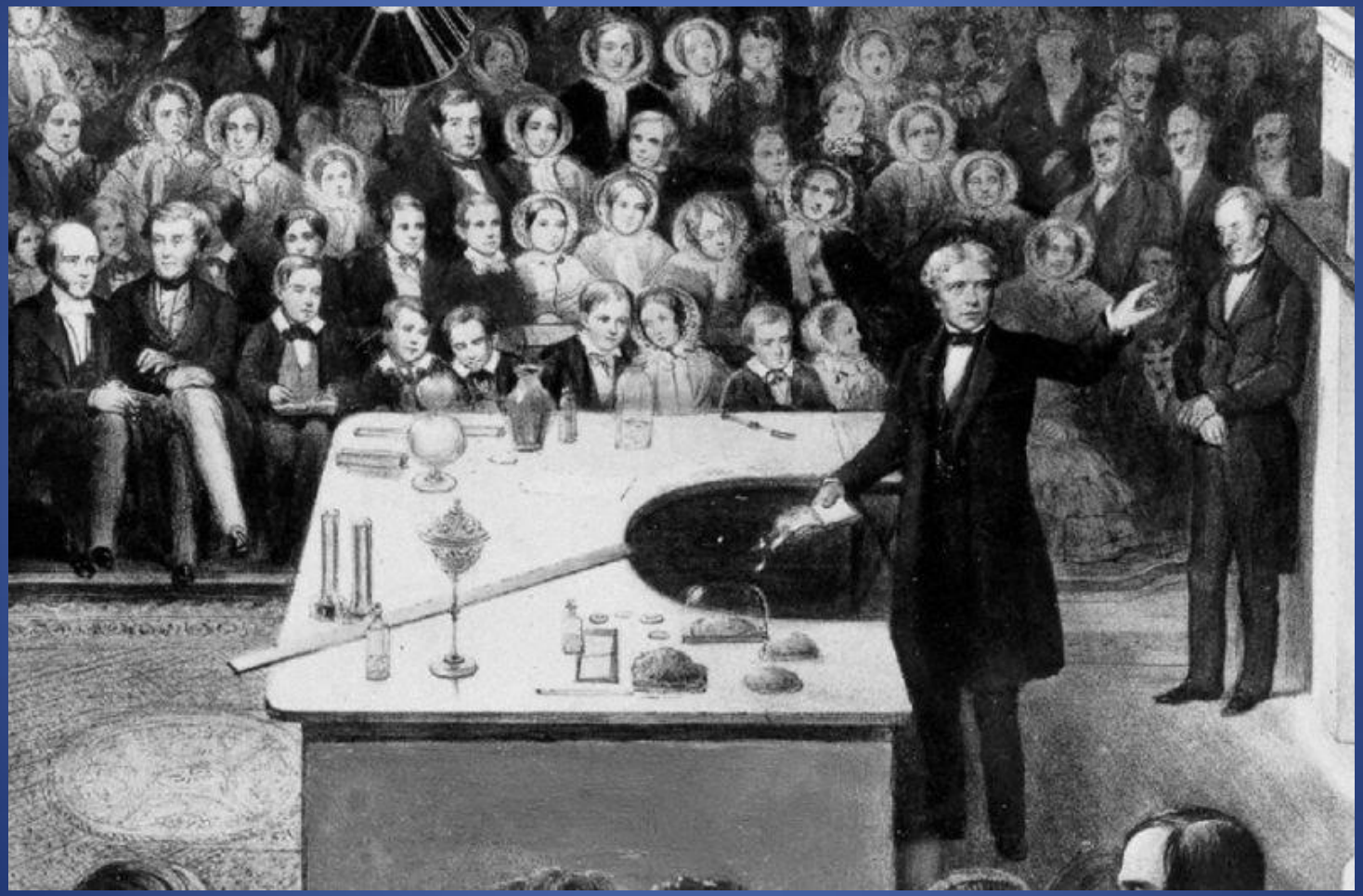
Πρώτα χρόνια

- Εγκατέλειψε το σχολείο σε ηλικία 13 ετών και έπιασε δουλειά σε ένα βιβλιοδετείο.
- Του άρεσε να διαβάζει τα βιβλία τα οποία «έδενε».
- Το 1812, σε ηλικία 20 ετών, παρακολούθησε μια σειρά διαλέξεων που έδωσε ο Sir Humphry Davy, όταν ένας πελάτης του πρόσφερε τα σχετικά εισιτήρια.
- Κράτησε σημειώσεις και έστειλε στον Davy ένα χειρόγραφο βιβλίο 300 σελίδων.
- Ο Davy εντυπωσιάστηκε, και ζήτησε από τον Faraday να γίνει βοηθός του (ανέκδοτο για τον ακαδημαϊκό χώρο).
- Στην πράξη εργαζόταν περισσότερο ως γραμματέας και υπηρέτης.
- Συνόδευσε τους Davies σε ένα μεγάλο ταξίδι στην Ευρώπη (1813-15).
- Έγινε ισόβιος καθηγητής στο Βασιλικό Ίδρυμα το 1827.

Ο φακός που χρησιμοποίησαν οι Davy και Faraday για να κάψουν ένα διαμάντι, χρησιμοποιώντας το φως του Ήλιου, στη Φλωρεντία το 1814.

Florence, Museo Galileo

Ο Faraday στην ετήσια «Χριστουγεννιάτικη Διάλεξη» το 1856

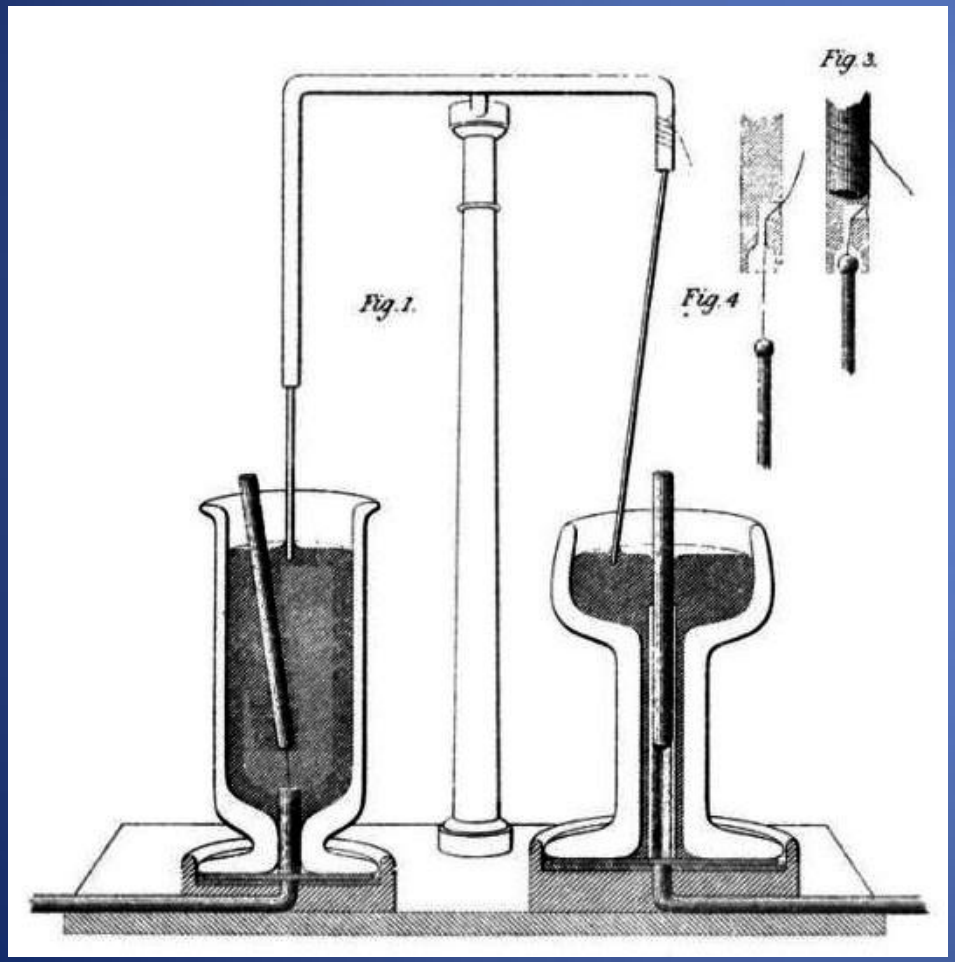


Ο κλωβός Faraday

Ο Faraday στη Φυσική: 1830-1839

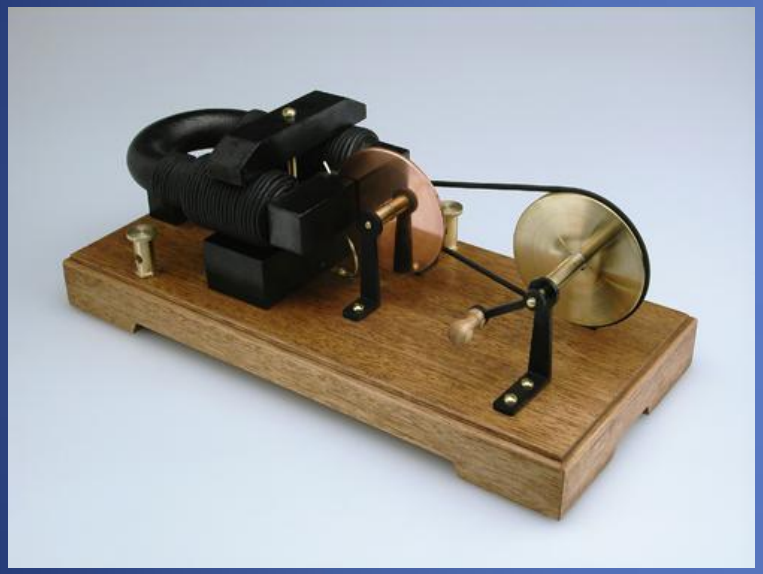
- Από μαθητευόμενος βιβλιοδέτης βοηθός του Davy.
- Εφεύρεση του πρώτου ηλεκτρικού κινητήρα (1821).
- Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή (1831): $V = -\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ ($\Phi = \mathbf{B}\cdot\mathbf{S}$).
- Εφεύρεση της πρώτης γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος (1831).
- Ιδιότητες των πυκνωτών (πόλωση των διηλεκτρικών) – μεταγενέστερα χρησιμοποιήθηκε στη θεωρία του Maxwell.
- Τα ρεύματα της μπαταρίας και της γεννήτριας είναι τα ίδια.
- Διαμαγνητισμός
- Αλληλεπίδραση μεταξύ βαρύτητας-ηλεκτρισμού-μαγνητισμού-φωτός: Στροφή Faraday – μεταγενέστερα συμπληρώθηκε με την ανακάλυψη, από τον Pieter Zeeman, της «διάσπασης» των φασματικών γραμμών από το μαγνητικό πεδίο (βραβείο Nobel 1902).
- Αλλά το πιο σημαντικό (τουλάχιστον για μένα!): εισαγωγή της έννοιας του πεδίου.

Ο μαγνητικός ρότορας του Faraday, 1821

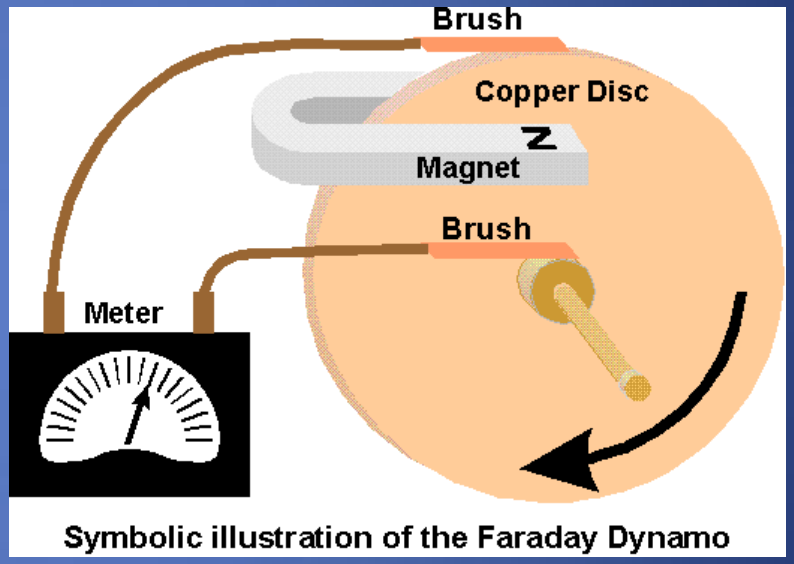


- Το ρεύμα «κλείνει» μέσω του υδραργύρου που περιέχεται στο δοχείο.
- Μπορούμε είτε να κρατήσουμε σταθερό τον μόνιμο μαγνήτη και να αφήσουμε το σύρμα να περιφέρεται, είτε να κρατήσουμε το σύρμα σταθερό και να αφήσουμε τον μόνιμο μαγνήτη να περιφέρεται.

Η γεννήτρια του Faraday, 1831



Πρώιμη γεννήτρια του Faraday (~1870)



Αρχή της γεννήτριας του Faraday

Ο Faraday ως χημικός

- Πέρα από την ηλεκτρόλυση, ανακάλυψε
  - Το βενζόλιο (C_6H_6, στα Αγγλικά benzene)
  - Το τετραχλωροαιθυλαίνιο (υγρό των στεγνοκαθαριστηρίων – χρησιμοποιήθηκε από τον Davies για την ανίχνευση των ηλιακών νετρίνων)
  - Το τριιωδιούχο άζωτο (το πιο ευαίσθητο εκρηκτικό)
- Κατανόησε την κρίσιμη θερμοκρασία για την υγροποίηση των αερίων.

Η κληρονομιά του Faraday

- Ο τελευταίος καθηγητής χωρίς (ούτε) απολυτήριο Γυμνασίου.
- Ο μεγαλύτερος πειραματιστής όλων των εποχών.
- Αυτό που πρέπει να χαρακτηρίζει ένα φυσικό: φυσική σκέψη – αναλογίες.
- Παράδειγμα: μαγνητικές γραμμές και ελαστικές ταινίες.
- Δεν είχε μαθητές – μόνο ένα απόστρατο λοχία, που τον βοηθούσε στα πειράματα.
  - Σχετικό ανέκδοτο

James Clerk Maxwell (1831-1879)

And GOD said:

"$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c}\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} = 0,$$ and

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{1}{c}\frac{\delta \vec{D}}{\delta t} = \frac{4\pi}{c}\vec{J}$$ "

and there was light

- Ο Maxwell δεν έγραψε τις «εξισώσεις του» για να ερμηνεύσει πειραματικά δεδομένα.
- Τις συνέλαβε χρησιμοποιώντας συμμετρίες και αναλογίες.
- Τρόπος σκέψης των αρχαίων Ελλήνων, που τον ακολούθησε και ο Einstein.

Από την αρχική δημοσίευση του Maxwell (1861)

Hence if p_{xx}, p_{yy}, and p_{zz} be the normal stresses parallel to the three axes, considered positive when they tend to increase those axes; and if p_{yz}, p_{zx}, and p_{xy} be the tangential stresses in the three coordinate planes, considered positive when they tend to increase simultaneously the symbols subscribed, then by the resolution of stresses[4],

$$\begin{aligned}
p_{xx} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu v^2 l^2 - p_1 \\
p_{yy} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu v^2 m^2 - p_1 \\
p_{zz} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu v^2 n^2 - p_1 \\
p_{yz} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu v^2 mn \\
p_{zx} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu v^2 nl \\
p_{xy} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu v^2 lm
\end{aligned}$$

If we write

$$\alpha = vl,\ \beta = vm, \text{ and } \gamma = vn$$

then

$$\left.\begin{aligned}
p_{xx} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu\alpha^2 - p_1 & \qquad p_{yz} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu\beta\gamma \\
p_{yy} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu\beta^2 - p_1 & \qquad p_{zx} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu\gamma\alpha \\
p_{zz} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu\gamma^2 - p_1 & \qquad p_{xy} &= \tfrac{1}{4\pi}\mu\alpha\beta
\end{aligned}\right\} (2)$$

- Είναι φανερό ότι ο Maxwell δεν χρησιμοποιούσε διανύσματα!
- Ο Haeviside έγραψε τις 20 βαθμωτές ως 8 διανυσματικές εξισώσεις.
- Σήμερα τις ομαδοποιούμε σε δύο ομάδες από 4 διανυσματικές εξισώσεις, και μόνο η δεύτερη (στη προηγούμενη και την επόμενη διαφάνεια) είναι γνωστή ως «εξισώσεις του Maxwell».

“Επίσημες” εξισώσεις του Maxwell

(A) The law of total currents

$$\mathbf{J}_{\text{tot}} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

(B) The equation of magnetic force

$$\mu \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$$

(C) Ampère's circuital law

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{\text{tot}}$$

(D) Electromotive force created by convection, induction, and by static electricity.

$$\mathbf{E} = \mu \mathbf{v} \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi$$

Οι «άλλες τέσσερις» εξισώσεις

(E) The electric elasticity equation

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon}\mathbf{D}$$

(F) Ohm's law

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\sigma}\mathbf{J}$$

(G) Gauss's law

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

(H) Equation of continuity

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Ο τρόπος σκέψης του Maxwell

- Ανάπτυξη της έννοιας του πεδίου και του διανυσματικού δυναμικού (ηλεκτροτονικής κατάστασης)
- Αναλογίες μεταξύ θερμότητας (δυναμικό-θερμοκρασία) και υδροδυναμικής (ροή πεδίου – ροή υγρού).
- Συμμετρία (ρεύμα μετατόπισης)
- Λύση των εξισώσεων στο κενό – Η/Μ κύματα διαδιδόμενα με ταχύτητα *c*.
- Φως → Η/Μ κύματα (πρόβλεψη του Faraday – διάδοση μαγνητικών διαταραχών).

And GOD said:

"$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c}\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} = 0, \text{ and}$$

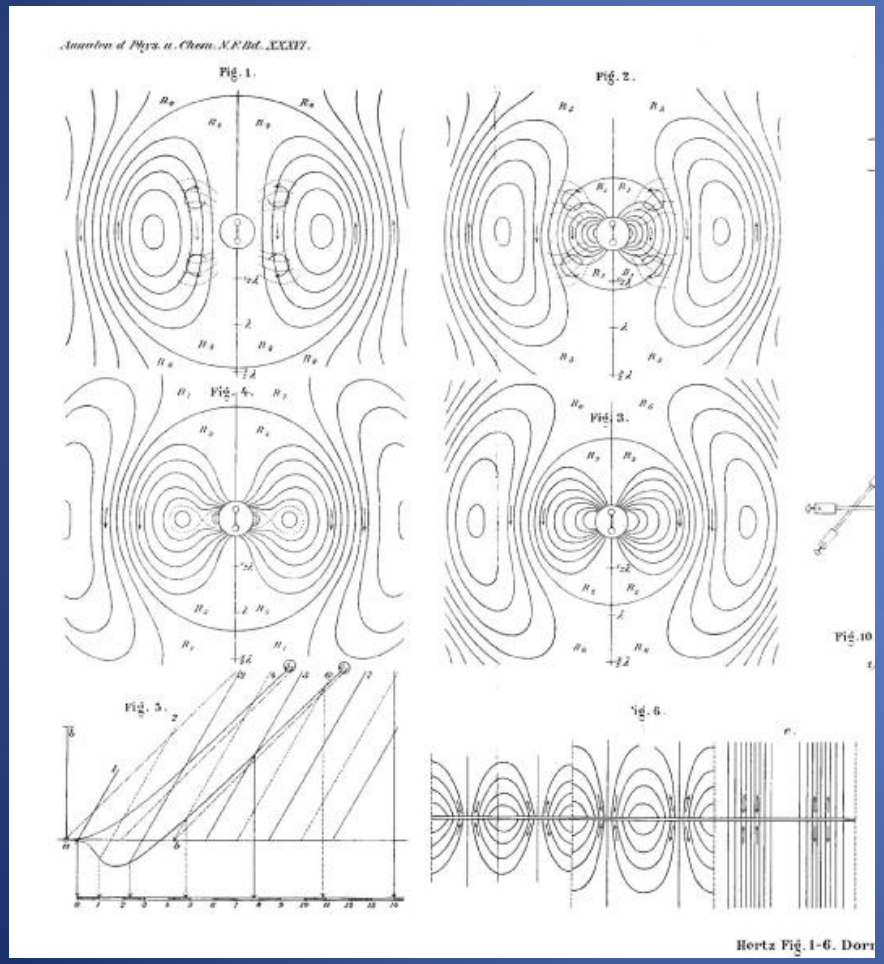
$$\nabla \times \vec{H} - \frac{1}{c}\frac{\delta \vec{D}}{\delta t} = \frac{4\pi}{c}\vec{J}\text{"}$$

and there was light

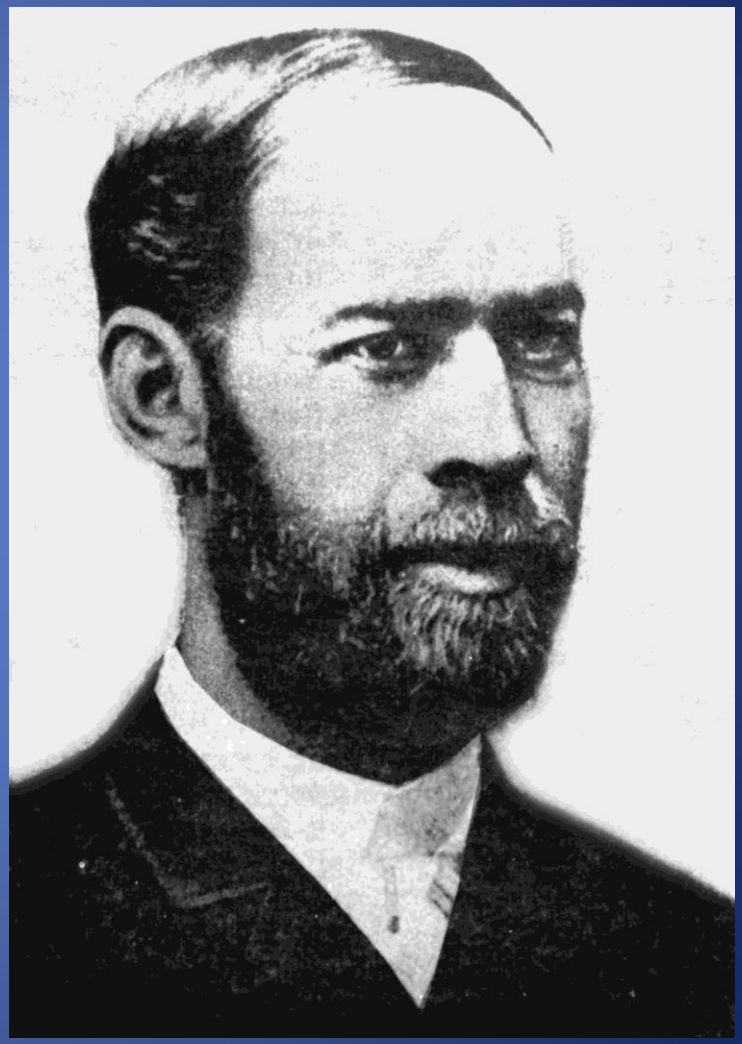
Faraday - Maxwell

- Faraday:
  - Εξαιρετική διαίσθηση, έλλειψη μαθηματικών γνώσεων.
  - Ικανότητα να σκέπτεται με αναλογίες.
  - Φυσική εικόνα πάνω από τα Μαθηματικά.
- Maxwell:
  - Πολύ καλή διαίσθηση, εξαιρετικά Μαθηματικά.
- Κατάφερναν να συνεννοούνται, αλλά ο Maxwell δεν ήταν σίγουρος ότι κατανοούσε τις ιδέες του Faraday και ο Faraday δεν μπορούσε να καταλάβει τα Μαθηματικά του Maxwell!

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)

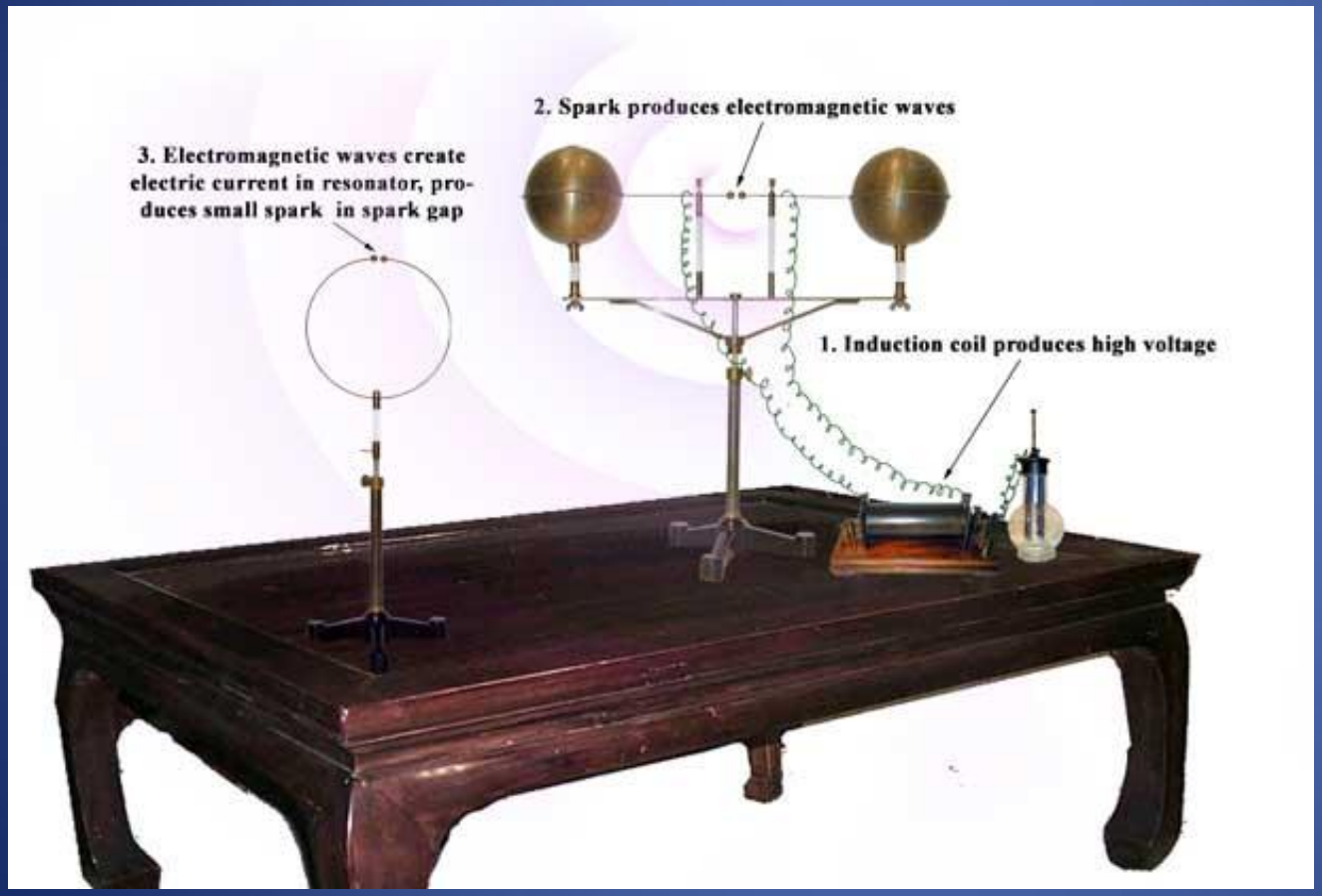


E/M πεδίο από την αρχική δημοσίευση του Hertz



Hertz

Εκπομπή και ανίχνευση Η/Μ κυμάτων



Τα Η/Μ κύματα ανακλώνται, διαθλώνται (από την παραφίνη) και πολώνονται, όπως ακριβώς το φως.

Μηχανική και Ηλεκτρομαγνητισμός

- Η Μηχανική και η Η/Μ θεωρία του Maxwell δεν είναι συμβατές. Ποια από τις δύο είναι η «σωστή»;
- Διατήρηση της ορμής και της ενέργειας στην Η/Μ θεωρία: Ενέργεια και ορμή των πεδίων! (Παράδοξο του Feynman).
- Πείραμα των Michelson-Morley: Πού είναι ο αιθέρας; Σε ποιο μέσο διαδίδονται τα Η/Μ κύματα;
- Συστολή χώρου – διαστολή χρόνου: FitzGerald.
- Μαθηματική περιγραφή: μετασχηματισμοί Lorentz.
- Πλήρης θεωρία των μετασχηματισμών: Poincaré (5 Ιουνίου 1905).
- Ειδική Σχετικότητα: Einstein (30 June 1905) (βλέπε και Σχετικότητα).
- Lorentz:
  - Πολύ καλός δάσκαλος (ένας μαθητής του, ο Zeeman, πήρε το βραβείο Νομπέλ)
  - Οργάνωσε τα πρώτα συστηματικά παγκόσμια συνέδρια (Solvay Institute)

Ηλεκτρομαγνητισμός στο σχολείο και το πανεπιστήμιο

- «Ενοποίησε» τον Ηλεκτρισμό, τον Μαγνητισμό και το Φως (τρεις από τις τέσσερις γνωστές μορφές ενέργειας στα τέλη του 19ου αιώνα).
- Διδάσκεται όπως διατυπώθηκε από τον Maxwell (και τον Heaviside) τον 19ο αιώνα.
- Ένας από του τρεις πυλώνες της κλασικής Φυσικής (οι άλλοι δύο: Μηχανική και Θερμοδυναμική).