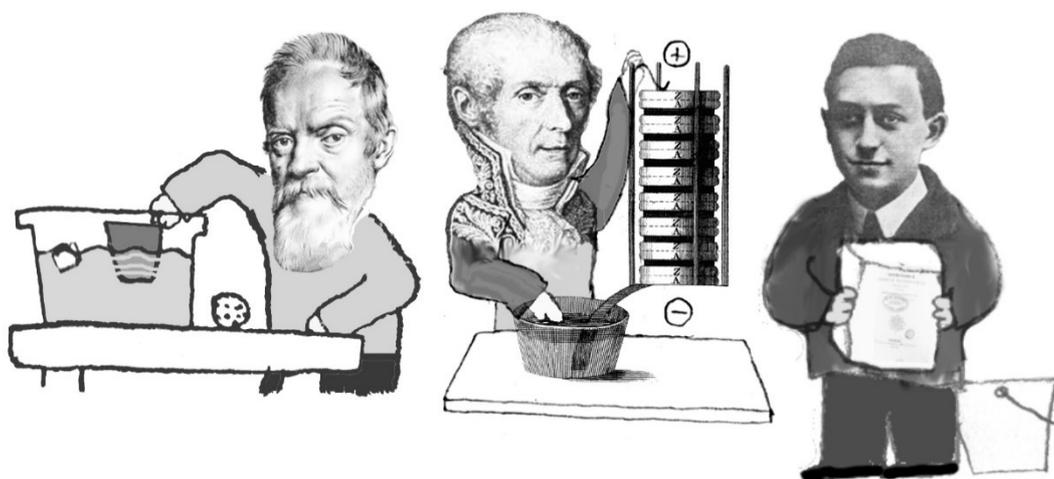


Corso “La Storia della Fisica con Reinventore”

con Antologia ed Esperimenti con materiali semplici
per docenti delle Scuole Superiori e non solo

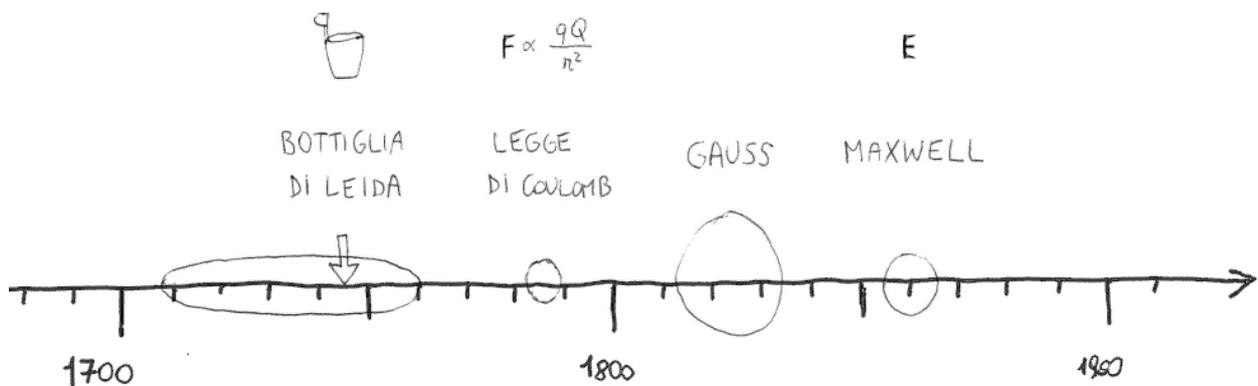


Lezione 1/20

Legge di Gauss per il campo elettrico

Martedì 3 novembre 2020

Linea del tempo



Nella linea del tempo sono evidenziati i 4 capitoli di questo incontro:

1. Dalle prime scoperte alla bottiglia di Leida

- 1.1 I primi esperimenti pag. 3
- 1.2 John L. Heilbron pag. 4
- 1.3 Didattica: gli esperimenti storici reinventati con materiali semplici pag. 5

2. La legge di Coulomb

- 2.1 L'equazione pag. 6
- 2.2 Didattica: studio e replica di esperimenti importanti pag. 6
- 2.3 Approfondimenti: le riviste pag. 7

3. "Gauss ci applica il suo formidabile intelletto"

- 3.1 La legge di Gauss pag. 8
- 3.2 Esempio: la macchia d'olio pag. 9
- 3.3 Gauss-Weber: il sistema assoluto di misure pag. 10
- 3.4 Esercizio: gli esponenti di M L e T pag. 11

4. James Clerk Maxwell

- 4.1 Didattica: la biografia tramite racconti e disegni pag. 12
- 4.2 I diversi modi di vedere il potenziale pag. 13
- 4.3 Le equazioni di Maxwell pag. 14

Inoltre:

6 Allegati
16 link

1. Dalle prime scoperte alla Bottiglia di Leida

1.1 I primi esperimenti

Cominciamo presentando una serie di esperimenti con materiali semplici: sono esperimenti che proponiamo in particolare nella scuola primaria e nella secondaria di primo grado, dato che non ci sono misure e formule e sono particolarmente adatti per cominciare a trattare il tema.

Spesso però gli studenti arrivano alle superiori non avendone conoscenza diretta, ed è quindi opportuno cominciare da qui, dato che per familiarizzarsi con i fenomeni vanno sempre bene, sono sempre affascinanti.

E inoltre, la nostra storia elettrica comincia proprio da qui.

- **Il palloncino di Franklin**

Benjamin Franklin (1706-1790) è stato un personaggio multiforme, grande scienziato e politico americano.

In elettrostatica ha svolto vari esperimenti, aiutandosi anche con un “Tubo di Vetro”, tutt’ora conservato al museo di Philadelphia. Noi reinventiamo questi esperimenti con un lungo palloncino modellabile (al posto del tubo di vetro) e una sciarpa di lana.

È un modo molto efficace di introdurre i concetti di “carica”, “attirare” e “respingere”.

LINK 1 <https://www.reinventore.it/approfondimenti/elettricit-e>

- **La cannuccia di Gray (o Elettroscopio Gigante)**

Stephen Gray (1666-1736) è stato uno scienziato britannico, scopritore dei conduttori. Il suo esperimento (che abbiamo reinventato col nome “la cannuccia di Gray” e trattato nel Link 1) mostra questa grande scoperta. Nel seguente link riportiamo due sue lettere (Antologia).

LINK 2 <https://www.reinventore.it/approfondimenti/a-distanze-prodigiose>

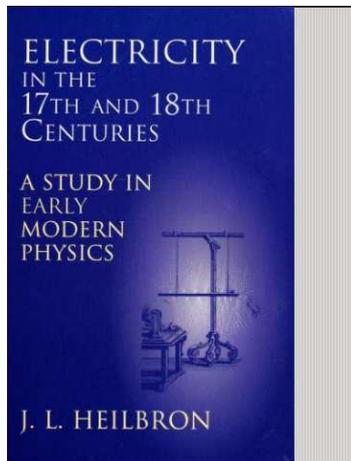
- **Bottiglia di Leida**

Nella città olandese di Leida, nel 1745, i fratelli Musschenbroek fecero una scoperta epocale, che oggi chiamiamo “condensatore”. Possiamo ricostruire anche questo esperimento con materiali semplici, con un paio di bicchieri di plastica, un foglio di alluminio, un tubo di PVC.

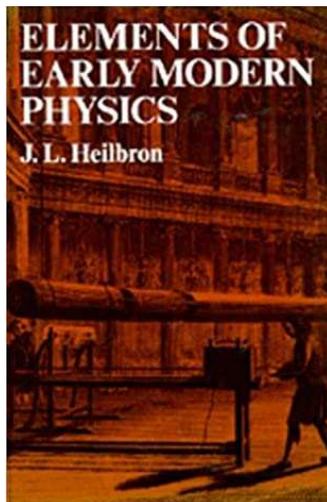
LINK 3 <https://www.reinventore.it/approfondimenti/la-bottiglia-di-leida>

1.2 John L. Heilbron

John Lewis Heilbron è uno storico americano nato nel 1934, grande narratore e studente di Thomas Kuhn: presentiamo alcuni suoi libri sull'elettricità. Sono le monografie di riferimento sull'elettricità nel 1600 e 1700.



- “Electricity in the 17th and 18th Century” (1979)



- “Elements of Early Modern Physics” (1982), è un riassunto del precedente, ed è tradotto in italiano da Il Mulino “Alle origini della fisica moderna. Il caso dell'elettricità” (1984). Verosimilmente si può trovare usato su internet (maremagnum o altre librerie).

Sul sito web archive.org si possono legalmente trovare (in inglese) entrambi i lavori.

LINK 4
LINK 5

https://archive.org/details/electricityin17t00jlhe_0

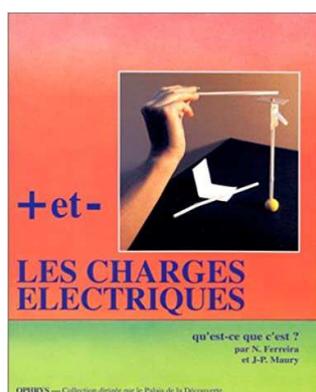
https://archive.org/details/bub_gb_vBH0vBmG61IC/mode/2up

ALLEGATO 1 – Estratto (Heilbron) pag 286-292

1.3 Didattica: gli esperimenti storici reinventati con materiali semplici

Inseriamo nel nostro corso vari spunti di didattica. In questo caso, la possibilità di ripetere, o reinventare, gli esperimenti storici con materiali semplici.

Questi sono esperimenti qualitativi, riguardano la scoperta di effetti, non vengono fatte misure. Si possono “reinventare” con materiali semplici. Citiamo a questo proposito alcuni studiosi brasiliani e, bando alla modestia, noi stessi:



- Norberto Ferreira (didattica con materiali semplici).
Il libro: “+ e – Les charges electriques”(1991)
- AKT Assis:
mette insieme i materiali semplici (alla Norberto Ferreira) e la storia della scienza (principalmente da Heilbron), per esempio nel suo “I fondamenti sperimentali e storici dell'elettricità” (2010)

LINK 6 <https://www.aif.it/indice-rivista/quaderno-26/>
quaderno 26 di La Fisica nella Scuola, trad. it. Pietro Cerreta, 2017
c'è anche un secondo volume (2018).

LINK 7 Le immagini presenti nel libro si possono scaricare in maniera ordinata da qui:
https://www.researchgate.net/publication/322802050_I_Fondamenti_Sperimentali_e_Storici_dell'Elettricit%C3%A0/figures

- Reinventore: oltre ai link del punto 1.1, presentiamo il capitolo “Io sono Elettricità”, tratto dal nostro libro “Laboratorio in Scatola” del 2015. Sul nostro sito www.reinventore.it, nella sezione “Laboratori” si possono trovare tanti approfondimenti. Il link di seguito li riassume in maniera ordinata.

LINK 8 <https://www.reinventore.it/approfondimenti/scatolab-08-io-sono-elettricit%C3%A0>
ALLEGATO 2 Io sono Elettricità (B.Danese)

2. La Legge di Coulomb

La bottiglia di Leida dà una scossa a tutto il mondo. Da argomento di studio marginale l'elettricità diventa importantissima. Da quel momento si possono distinguere due filoni:

- il “teatro dell'elettricità”, con le scosse nei salotti, i girotondi, i baci elettrici: spettacolare;
- la “ricerca”: più appartata, solitaria, ma arrivano le misure quantitative.

2.1 L'equazione

Il risultato più importante di questa ricerca è la legge di Coulomb, che prende il nome dal fisico francese Charles Augustin de Coulomb (1736-1806).

$$F \propto \frac{qQ}{r^2}$$

dove la forza F è proporzionale al prodotto delle cariche (q e Q) e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le due (r).

Questa legge ricalca la formula di Newton dell'attrazione gravitazionale tra due masse qualsiasi, con le cariche elettriche al posto delle masse.

2.2 Didattica: studio e replica di esperimenti importanti

La legge di Coulomb ci permette di parlare della ricerca in storia della fisica intesa come “studio e replica di esperimenti importanti” (in inglese “replication method”).

In particolare, consideriamo le seguenti tre esperienze.

- **Pavia Project Physics** (ricostruzione virtuale dell'esperimento di Coulomb)

Il gruppo di storia e didattica della fisica presso l'Università di Pavia ha svolto negli anni una ricerca storica e didattica su Coulomb e altri esperimenti. In particolare, per quanto riguarda Coulomb, citiamo il testo “De' Curiosi Esperimenti” di Silvana Galbadini (che propone le memorie di Coulomb) e il CD con la ricostruzione virtuale degli esperimenti. Silvana Galbadini, da insegnante di liceo, è molto attenta all'uso efficace e semplice di queste risorse (testi originali e ricostruzione virtuale).

Usiamo parte di questo lavoro, oggi accessibile in gran parte liberamente su internet, per presentare l'esperimento di Coulomb.

LINK 9 <http://ppp.unipv.it/Coulomb/index.html>

- **Peter Heering** (ricostruzione esperimento, studio risultati)

Un altro centro che ha prodotto molti lavori in storia della scienza intesa come “ricostruzione di esperimenti importanti” è l'Università di Oldenburg in Germania.

Qui citiamo la ricostruzione di Peter Heering dell'esperimento di Coulomb, con uno studio delle controversie del tempo legate alla riproducibilità dei suoi risultati e all'accettazione della sua legge. Per questi motivi Heering arrivò alla conclusione che Coulomb non avesse

raggiunto la sua formula per via sperimentale.

LINK 10 <http://www.staff.uni-oldenburg.de/peter.heering/deutsch/theater.html#nameoffame>

ALLEGATO 3 – The role of historical experiments in science teaching (Heering)

- **Alberto A. Martinez** (“Coulomb vendicato”)

Dal lontano Portorico, Alberto A. Martinez riapre la questione, perché rifà anche lui gli esperimenti di Coulomb con successo replicandone i risultati. Ci sono i colpi di scena anche nella storia della fisica.

ALLEGATO 4 – Replication of Coulomb’s torsion balance (Martinez)

2.3 Approfondimenti: le riviste

Per ogni argomento, impariamo a riconoscere che ci sono diversi tipi di fonti.

Innanzitutto, ci sono una o più monografie di riferimento, dei lavori corposi e annotati frutto di anni di lavoro di storici della scienza. Per il periodo sull'elettrostatica fino a Coulomb compreso, abbiamo incontrato Heilbron.

Per ulteriori sviluppi, approfondimenti, smentite, c'è il mondo degli articoli sulle riviste di settore. Delle società e delle conferenze dove si incontrano i ricercatori di quello specifico ramo.

1. la rivista “Science & Education”
2. l'istituto IHPST (**LINK 11** <https://www.ihpst.cnrs.fr/en>)
3. la rivista “Archive for the History of Exact Sciences”
LINK 12 <https://www.springer.com/journal/407>
4. molti di questi articoli si possono trovare tramite Jstor (**LINK 13** www.jstor.org) o altre piattaforme.

3. Gauss ci applica il suo formidabile intelletto

Carl Friedrich Gauss è stato un grandissimo scienziato tedesco (1777-1855), definito anche “il principe dei matematici”, e ha dato contributi fondamentali in matematica, statistica, fisica (magnetismo, elettrostatica, ottica), astronomia...

Il suo contributo è stato così importante che Maxwell, nel suo “Trattato” del 1873, un testo fondamentale in cui Maxwell stesso riassume e mette in prospettiva la storia dell’elettromagnetismo, riferendosi proprio agli studi compiuti da Gauss sul magnetismo, scrive: Gauss ci applica il suo formidabile intelletto...

Gauss, as a member of the German Magnetic Union, brought his powerful intellect to bear on the theory of magnetism, and on the methods of observing it, and he not only added greatly to our knowledge of the theory of attractions, but reconstructed the whole of magnetic science as regards the instruments used, the methods of observation, and the calculation of the results, so that his memoirs on Terrestrial Magnetism may be taken as models of physical research by all those who are engaged in the measurement of any of the forces in nature.

La “Legge di Gauss” è stata esposta da Gauss nel 1813, anche se era già stata enunciata precedentemente dall’italiano Lagrange nel 1762. Ma Gauss, come nota Maxwell, oltre a questa legge mette in ordine un po’ tutto l’elettromagnetismo...

3.1 L’equazione

Gauss espone quella che verrà chiamata “La legge di Gauss” nel 1813, in un libricino di 24 pagine dal titolo improponibile, che trovate in allegato: *Theoria attractionis corporum sphaeroidicorum ellipticorum homogeneorum methodus nova tractat.*

ALLEGATO 5 – (Gauss)

Esistono diverse formulazioni di questa “legge di Gauss”, di seguito ne inseriamo 4.

$$\Phi_E = \frac{Q_{TOT}}{\epsilon_0} \quad \iint E \cdot d\sigma = \iiint \frac{\rho}{\epsilon_0} dv \quad \nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \nabla \cdot E = 4\pi\rho$$

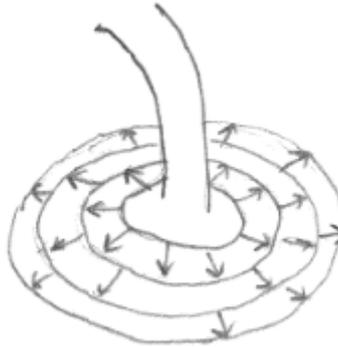
La legge di Gauss è molto generale e si applica all’attrazione gravitazionale, elettrica e magnetica. Egli l’ha introdotta nel caso di attrazioni gravitazionali, ma si può immediatamente generalizzare.

Nel senso che a noi preme sottolineare questa legge è una versione più generale della legge di Coulomb. Come la legge di Coulomb, essa mette in relazione le cariche elettriche (Q_{tot}) e la forza elettrica o il campo elettrico ($E=F/q$). L’enfasi sul “campo elettrico” verrà in seguito con Faraday e Maxwell.

3.2 Esempio: la macchia d'olio

Per introdurre in modo semplice il concetto del flusso di un vettore attraverso una superficie ricorriamo alla macchia d'olio.

Si tratta di un esempio bidimensionale anziché tridimensionale.



Versiamo olio da una bottiglia, a velocità o portata costante. Si forma una macchia d'olio che, dato che continuiamo a versare, si espande – per così dire – “a macchia d'olio”! Con che velocità avanza il bordo della macchia d'olio? Sempre quella? No.

La velocità di avanzamento del bordo diminuisce mentre la superficie del bordo (circonferenza o superficie laterale) aumenta.

Il flusso, definito come il prodotto del vettore velocità per la superficie del bordo, è costante.

E questo per qualunque circonferenza.

Questo risultato si generalizza a qualunque superficie chiusa. Il flusso del vettore velocità nella macchia d'olio è costante attraverso il bordo della macchia, qualunque forma assuma.

Questo risultato è valido per il “campo di velocità” di questa macchia d'olio, ma si può generalizzare al caso tridimensionale, nel caso della luce, della gravità, del campo elettrico.

3.3 Gauss – Weber: il sistema assoluto di misure

Il motivo per cui la legge è intitolata a Gauss risiede, come riconosce Maxwell, nel suo grande lavoro di chiarimento della teoria magnetica ed elettrica.

Un aspetto importante di questo lavoro è “il sistema assoluto di misure” che Gauss stabilisce insieme col suo collega fisico Weber.

Gauss riduce tutte le grandezze magnetiche (ed elettriche) alle tre grandezze esclusivamente meccaniche-dinamiche: massa M, lunghezza L e tempo T.

Vediamo come:

Legge di Coulomb (senza costanti di proporzionalità, e il segno =).

$$F = \frac{qQ}{r^2}$$

Gauss ricava le “dimensioni” della carica q.

$$[carica] = \sqrt{[Forza] \cdot [r^2]}$$

Sapendo che le dimensioni della forza (massa M per accelerazione LT^{-2}) si possono scrivere così

$$[forza] = M^1 \cdot L^1 \cdot T^{-2} \quad (\text{M massa, L lunghezza, T tempo})$$

otteniamo (tenendo conto che la distanza r è una lunghezza):

$$[carica] = \sqrt{M^1 \cdot L^1 \cdot T^{-2} \cdot L^2}$$

$$[carica] = M^{\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{3}{2}} \cdot T^{-1} \quad (\text{M massa, L lunghezza, T tempo})$$

La legge di Coulomb diventa così nelle mani di Gauss la definizione della carica, e perfino delle “dimensioni” della carica stessa.

3.4 Esercizio: gli esponenti di M L e T

Ora possiamo fare un piccolo gioco, completando in autonomia le dimensioni delle diverse grandezze indicate, sia puramente “meccaniche” sia “elettriche”.

ESERCIZIO: mettere gli esponenti nelle formule

$$[forza] = M \cdot L \cdot T$$

dimensioni della forza... [Forza] = M L T-2

$$[Energia] = M \cdot L \cdot T$$

dimensioni dell'energia... [Energia] = M L² T-2

$$[Energia/Volume] = M \cdot L \cdot T$$

dimensioni della densità di energia: [Energia/Volume]

ora vediamo le dimensioni di una grandezza “elettrica”, il campo elettrico:

$$[campo\ elettrico] = M \cdot L \cdot T$$

dimensioni del campo elettrico: forza/carica [E]

Abbiamo fatto questo excursus-gioco per riprendere un’osservazione contenuta in un saggio del fisico-matematico Freeman Dyson sulle equazioni di Maxwell. Egli nota che il campo elettrico ha le stesse dimensioni della radice quadrata della densità di energia

$$[radice\ quadrata\ di\ Energia/volume] = M \cdot L \cdot T$$

Dyson sottolinea questo punto, dicendo: il campo elettrico non è misurabile-osservabile, non misuro la radice quadrata di una densità d’energia. A essere misurabile-osservabile è il quadrato del campo elettrico, analogo a una densità di energia.

Alla fine dell’incontro torneremo su questo punto, da cui Dyson trae un interessante parallelo.

ALLEGATO 6 – (Dyson)

4. James Clerk Maxwell

In questo incontro, accenniamo solo brevemente, e in maniera più “rilassata”, alla figura del grande scienziato scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879).

Ne parleremo infatti ancora nei prossimi 3 incontri, e in maniera più diffusa e approfondita.

4.1 Didattica: la biografia tramite racconti e disegni

Cogliamo l’occasione anche per mostrare un altro aspetto della “storia della fisica”. La storia della fisica intesa come biografia, il lato umano, la vita, il “chi era”.

Nel caso di Maxwell, possiamo rispondere alla domanda in tre modi:

- La biografia propriamente detta, nel nostro caso quella scritta dal suo amico Lewis Campbell: “The Life of James Clerk Maxwell: With a Selection from His Correspondence and Occasional Writings and a Sketch of His Contributions to Science” (1882). In inglese è liberamente disponibile, per esempio su Archive.org [LINK 14](https://archive.org/details/lifeofjamesclerk00camprich) <https://archive.org/details/lifeofjamesclerk00camprich> In italiano è stata tradotta di recente per l’Archivio Dedalo (2015).
- I disegni di sua cugina Jemima Wedderburn (poi Jemima Blackburn), di pochi anni più grande, che ogni giorno disegnava con gli acquerelli e sarebbe diventata una famosa illustratrice. I suoi disegni raccontano la Scozia e l’Inghilterra Vittoriana, e ci danno più di quadro della vita di Maxwell e dei suoi amici.



- I testi di Maxwell stesso, di cui forniamo qualche piccolo esempio (vedi cap. 3 e cap. 4.2). Per un verso è storia della fisica intesa come “antologia della letteratura scientifica”. Per un altro verso l’autore si fa conoscere direttamente attraverso le sue parole, ci parla direttamente.

4.2 I diversi modi di vedere il potenziale

Ci sono tante definizioni di potenziale elettrico.

- Una prima definizione è quella di Volta, che prende in considerazione le bottiglie di Leida e le descrive non solo con la “quantità di carica” ma anche con il “grado di elettrificazione”.
- Una seconda definizione è quella legata all’analogia con la gravitazione. Come c’è la forza di gravità e l’energia potenziale, così al campo elettrico si può associare un potenziale elettrico. Come per il caso gravitazionale, bisogna porre uno “zero” da qualche parte, e interessano le “differenze di potenziale”. È questo il modo di descrivere il potenziale tipico dei tedeschi, Gauss e Weber in testa, ma anche di altri matematici prima di loro, come Lagrange.
- Un’altra analogia, messa in luce da Thomson, è quella tra l’elettrostatica e la teoria del flusso di calore, il potenziale analogo alla temperatura, il gradiente di potenziale e il gradiente di temperatura.

Per approfondimenti su questo si veda Jed Z. Buchwald, “L'Ottocento: fisica. L'elettromagnetismo e il campo”.

LINK 15: https://www.treccani.it/enciclopedia/l-ottocento-fisica-l-elettromagnetismo-e-il-campo_%28Storia-della-Scienza%29/

- Un punto di vista molto importante, infine, è quello di Faraday. Per usare le parole di Maxwell, *For instance. Faraday, in his mind's eye, saw lines of force traversing all space where the mathematicians saw centres of force attracting at a distance: Faraday saw a medium where they saw nothing but distance: Faraday sought the seat of the phenomena in real actions going on in the medium, they were satisfied that they had found it in a power of action at a distance impressed on the electric fluids.*

Maxwell dà veste matematica al punto di vista di Faraday e “unifica” ovvero “riconcilia” i diversi punti di vista sul potenziale. Maxwell dice “Faraday in Inghilterra e i matematici in Germania, state dicendo la stessa cosa”.

Di seguito un breve estratto dalla Introduzione del “Trattato su Elettricità e Magnetismo” in cui Maxwell racconta quanto sopra.

LINK 16: https://archive.org/details/treatiseonelectr01maxw_0/page/n13/mode/2up

The general complexion of the treatise differs considerably from that of several excellent electrical works, published, most of them, in Germany, and it may appear that scant justice is done to the speculations of several eminent electricians and mathematicians. One reason of this is that before I began the study of electricity I resolved to read no mathematics on the subject till I had first read through Faraday's Experimental Researches on Electricity. I was aware that there was supposed to be a difference between Faraday's way of conceiving phenomena and that of the mathematicians, so that neither he nor they were satisfied with each other's language. I had also the conviction that this discrepancy did not arise from either party being wrong. I was first convinced of this by Sir William Thomson, to whose advice and assistance, as well as to his published papers, I owe most of what I have learned on the subject.*

As I proceeded with the study of Faraday, I perceived that his method of conceiving the phenomena was also a mathematical one, though not exhibited in the conventional form of mathematical symbols. I also found that these methods were capable of being expressed in the

ordinary mathematical forms, and thus compared with those of the professed mathematicians. For instance. Faraday, in his mind's eye, saw lines of force traversing all space where the mathematicians saw centres of force attracting at a distance: Faraday saw a medium where they saw nothing but distance: Faraday sought the seat of the phenomena in real actions going on in the medium, they were satisfied that they had found it in a power of action at a distance impressed on the electric fluids.

When I had translated what I considered to be Faraday's ideas into a mathematical form, I found that in general the results of the two methods coincided, so that the same phenomena were accounted for, and the same laws of action deduced by both methods, but that Faraday's methods resembled those in which we begin with the whole and arrive at the parts by analysis, while the ordinary mathematical methods were founded on the principle of beginning with the parts and building up the whole by synthesis.

I also found that several of the most fertile methods of research discovered by the mathematicians could be expressed much better in terms of ideas derived from Faraday than in their original form.

The whole theory, for instance, of the potential, considered as a quantity which satisfies a certain partial differential equation, belongs essentially to the method which I have called that of Faraday. According to the other method, the potential, if it is to be considered at all, must be regarded as the result of a summation of the electrified particles divided each by its distance from a given point. Hence many of the mathematical discoveries of Laplace, Poisson, Green and Gauss find their proper place in this treatise, and their appropriate expressions in terms of conceptions mainly derived from Faraday.

Great progress has been made in electrical science, chiefly in Germany, by cultivators of the theory of action at a distance. The valuable electrical measurements of W. Weber are interpreted by him according to this theory, and the electromagnetic speculation which was originated by Gauss, and carried on by Weber, Riemann, J. and C. Neumann, Lorenz, &c., is founded on the theory of action at a distance, but depending either directly on the relative velocity of the particles, or on the gradual propagation of something, whether potential or force, from the one particle to the other. The great success which these eminent men have attained in the application of mathematics to electrical phenomena, gives, as is natural, additional weight to their theoretical speculations, so that those who, as students of electricity, turn to them as the greatest authorities in mathematical electricity, would probably imbibe, along with their mathematical methods, their physical hypotheses.

4.3 Le equazioni di Maxwell

I fenomeni elettromagnetici sono descritti dalle 4 equazioni di Maxwell. Quella che abbiamo visto è la legge di Coulomb, poi Legge di Gauss per il campo elettrico, poi “prima” Equazione di Maxwell.

Maxwell ha costruito questo edificio di quattro equazioni, ordinando cose fatte prima di lui, aggiungendone qualcuna.

Nei prossimi tre incontri esamineremo le altre tre equazioni di Maxwell, con questo sistema, una per incontro.

Si procede un po' secondo la storia e un po' secondo crescente complessità o formalizzazione.

Come diceva Maxwell, la scienza si impara meglio se si va a studiarla nel suo stato nascente.

Questa caratteristica di Maxwell come “unificatore di punti di vista diversi” è tipica della fisica moderna, della fisica teorica. Vedere che i due litiganti (per modo di dire), Heisenberg e Schroedinger, stanno dicendo la stessa cosa.

Un altro aspetto della modernità di Maxwell, è richiamato nel saggio di Dyson che abbiamo visto. Il campo elettrico E è molto importante nella teoria elettromagnetica, ma sembra che si possa misurare solo il suo quadrato. Lo stesso succede per la funzione d'onda della meccanica quantistica Ψ , è osservabile soltanto il suo quadrato.

Alla fisica moderna saranno dedicati i successivi quattro incontri, fino a Natale. In questo modo sorvoleremo rapidamente la storia legata alla fisica del quinto anno delle superiori.