

# Introduzione ai Circuiti Elettrici

*prof. Luciano De Menna*  
*Università di Napoli Federico II*  
***Lezione 1***

Il titolo del corso è “Introduzione ai Circuiti Elettrici” ed il mio nome è Luciano De Menna. Questa è la prima lezione del corso e, come vedrete, sarà una sorta di introduzione generale alla tematica oggetto del corso.

## Testi consigliati

- *Luciano De Menna: Elettrotecnica, ed. Vittorio Pironti, Napoli, 1998*
  - <http://www.elettrotecnica.unina.it>
- *S. Bobbio, L. De Menna, G. Miano e L. Verolino: Esercizi di Elettrotecnica: Vol. 1, Vol. 2, Vol. 3. ed. CUEN, Napoli, 1998.*

2

Esiste un testo ed è quello qui riportato, ma è esaurito da tempo nella sua forma cartacea. Ne esiste una forma digitale che è possibile scaricare gratuitamente dal mio sito che è anch'esso indicato nella diapositiva. Ma come vedrete, sarà necessario scaricarlo solo se si intende leggere anche alcune parti complementari che da tempo non sono più in programma e non perché non siano importanti, ma semplicemente per esigenze di tempo. In realtà nello stesso sito troverete anche le copie di queste slide con il necessario commento, che saranno in pratica sostitutive del libro di testo.

Anche per quanto riguarda gli esercizi, esiste un testo scritto, che è qui riportato, ma in effetti la mole di materiali esercitativi che è disponibile nel sito rende non necessario anche questo testo, che sarebbe del resto anche lui scaricabile gratis.

## Cosa serve e cosa impareremo

- *Servono la matematica e la fisica dei corsi del primo anno;*
- *Impareremo ad analizzare il funzionamento dei circuiti elettrici.*
- *Due obiettivi: uno teorico ed uno pratico*
- *Laboratorio*

3

Cosa bisogna conoscere per affrontare proficuamente il corso e cosa è presumibile che da esso si apprenda? Alla prima domanda è facile rispondere: essenzialmente gli argomenti trattati nei tradizionali corsi di Fisica e di Matematica o Analisi Matematica. In effetti introdurremo anche alcuni metodi matematici che, probabilmente, non si è avuto il tempo di sviluppare nei corsi in questione: ma per questi faremo una opportuna, anche se sintetica introduzione. Avremo fondamentalmente due obiettivi: uno teorico, studiare il modello dei circuiti elettrici, e l'altro pratico, imparare a risolvere semplici reti elettriche. Perché solo le semplici? Perché esistono i codici numerici che lo fanno egregiamente per quelle complicate. Ci sarà dunque nel corso una parte teorica ed una parte pratica, entrambe egualmente importanti

## I due modelli

*Fenomeni Elettromagnetici*

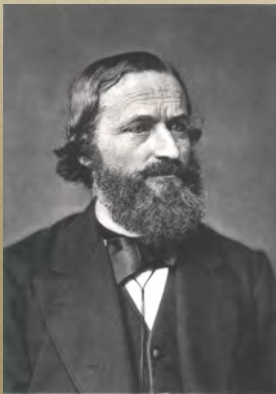
*Modello  
dei Circuiti*

*Modello  
dei Campi*

4

I fenomeni elettrici e magnetici possono essere descritti e studiati utilizzando due modelli distinti: il modello dei Campi, giustamente associato al nome di James Clerk Maxwell ed alle sue celebri equazioni, e quello dei Circuiti o anche modello di Kirchhoff - Gustav Robert Kirchhoff - e delle sue non meno note due leggi omonime. In realtà i due modelli non sono del tutto equivalenti, anzi il primo è molto più generale del secondo, che da quello può essere ricavato e che addirittura è da considerarsi solo un modello approssimato, nella maggior parte dei casi.

## Il Modello dei Circuiti



*G.R.Kirchhoff  
(1824 - 1887)*

*Nella sua tesi di  
dottorato!*

5

Gustav Robert Kirchhoff formulò le sue due famosissime leggi omonime nella sua tesi di dottorato; aveva 26 anni, credo.

## Leggi di Kirchhoff

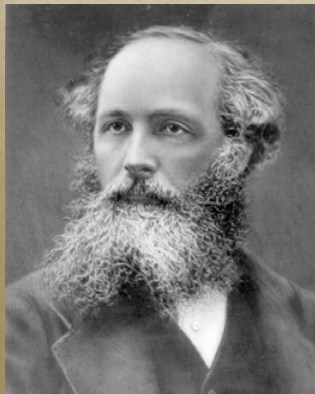
In un nodo  $\rightarrow \sum_r I_r = 0$

In una maglia  $\rightarrow \sum_s V_s = 0$

6

L'approssimazione del modello dei Circuiti è naturalmente estremamente buona e le semplificazioni che il modello stesso introduce sono tanto significative da giustificarne pienamente l'adozione in tutti i casi in cui essa è consentita. Molte delle moderne applicazioni - per esempio i calcolatori - sarebbero intrattabili con un modello dei Campi!

# Il modello dei campi



James Clerc Maxwell  
1831 - 1879

Nel 1873 pubblica la sua opera  
fondamentale:

*Treatise on electricity and  
magnetism!*

7

Il modello dei campi è invece, come si diceva, associato al nome di James Clerk Maxwell, ed è mostrato nella sua forma integrale nella slide successiva.

Questo libro si occuperà essenzialmente di circuiti, o di reti, come spesso equivalentemente si dice, e quindi potrebbe prescindere dal modello dei campi, ed introdurre i circuiti e le loro leggi indipendentemente ed in maniera assiomatica.

# Le equazioni di Maxwell

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q_v}{\epsilon_0}$$

$$\oint_\gamma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_{S_\gamma} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}_\gamma$$

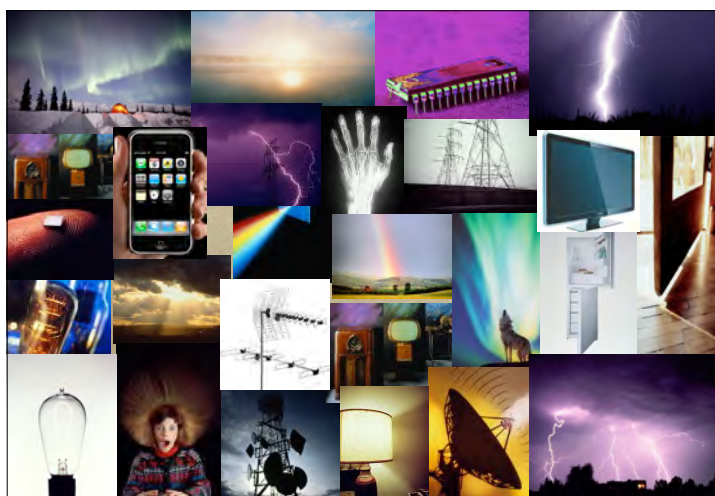
$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_\gamma \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \iint_{S_\gamma} \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}_\gamma$$

In forma  
integrale

8

Noi non seguiremo questa strada perché la riteniamo meno efficace didatticamente, e faremo quindi uso del modello dei campi per introdurre i diversi concetti e le stesse leggi dei circuiti, derivandole da quelle di Maxwell.



È talmente ampia la fenomenologia contenuta nel modello delle equazioni di Maxwell e sono tanto numerose le applicazioni del nostro mondo moderno che ad esso sono legate, che veramente viene da domandarsi come sarebbe il nostro mondo senza il modello del campo elettromagnetico.

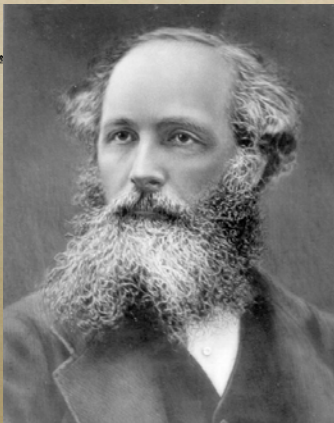
Ma il contributo di Maxwell alla scienza moderna va forse ben al di là del sistema di equazioni che da lui prende il nome, ed è di natura più profonda, direi addirittura filosofica, tanto che riteniamo utile un breve digressione, anche di carattere storico, che metta in luce il tormentato e profondo processo che portò il grande scienziato alle sue conclusioni.

9

frottage

## Maxwell e la nascita della scienza moderna

Parleremo dunque di Maxwell, il grande scienziato scozzese della metà dell'ottocento, e della "nascita della scienza moderna". In effetti il vero obiettivo è parlarvi del secondo argomento, della "nascita della scienza moderna", o per meglio dire della nascita di una piena consapevolezza di cosa sia veramente il metodo scientifico. Nel linguaggio comune si usa spesso il termine "scientifico" come sinonimo di "serio". "È scientifico" significa "è sicuro", incontrovertibile. Ma il metodo scientifico non può evidentemente limitarsi alla serietà, né, come ben sappiamo, il mondo della scienza è il mondo delle certezze ed è privo di dubbi e di improvvise rivoluzioni.



James Clerk  
Maxwell

Edimburgo,  
13 giugno 1831  
Cambridge,  
5 novembre 1879

Vi parlerò, dunque di Maxwell, James Clerk Maxwell, di questo signore, che certamente voi già conoscete, nato ad Edimburgo quasi due secoli fa e morto abbastanza giovane, ad appena 48 anni, a Cambridge. Se si pensa agli incredibili contributi che ha dato alla scienza moderna - e non solo nell'elettromagnetismo - viene da domandarsi che cosa avrebbe potuto fare se il destino gli avesse dato qualche anno di vita in più. Nonostante l'imponenza di questa immagine, di questa importante barba, il destino non gli aveva dato una grande statura; era bassino, poco più di un metro e cinquanta. Uno di quei casi in cui la statura scientifica ha pienamente compensato la piccola statura fisica.

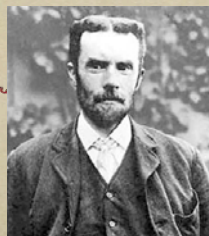
## Equazioni di Maxwell

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q_v}{\epsilon_0}$$

$$\oint_\gamma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_{S_\gamma} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}_\gamma$$

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_\gamma \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \iint_{S_\gamma} \left( \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}_\gamma$$



Oliver Heaviside  
1850-1925



Come dicevamo, in ambiente "elettrico" Maxwell è naturalmente universalmente noto per le sue equazioni. Anche se quella qui riportata è la forma in cui noi oggi le scriviamo, forma introdotta circa vent'anni dopo da Oliver Heaviside, e non quella in cui le scriveva lui, senza però sostanziali differenze di contenuto. Ma Maxwell ha dato contributi altrettanto importanti in molti altri campi: nell'ottica e nella teoria dei colori (è considerato il primo ad aver ottenuto una "permanente" fotografia a colori), nella teoria cinetica dei gas ed altri ancora, come la teoria dei controlli, per esempio. Il suo articolo "On governors" è considerato il primo articolo di Teoria dei Controlli.

## Centocinquant'anni fa: Il mondo rivisitato da Maxwell

*On physical lines of force, 1861*  
*A Treatise on Electricity and Magnetism,*  
1873

13

Noi vogliamo occuparci, però, del Maxwell dell'elettromagnetismo e precisamente del Maxwell di circa centocinquanta anni fa, siamo nel 1861, anno in cui Maxwell pubblicò la prima stesura di un articolo dal significativo titolo "On physical lines of forces" che può considerarsi l'inizio di quel laborioso e accuratissimo lavoro che si concluse poi con la definitiva sistemazione nel "A Treatise on Electricity and Magnetism" del 1873.

## Equazioni di Maxwell

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

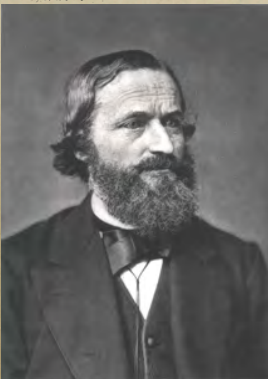
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

per il vuoto

$$c = 300.000 \text{ km / sec}$$

Una delle cose più intriganti delle equazioni di Maxwell è che al suo interno compaiono due costanti  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  che, se combinate in questa maniera  $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ , danno luogo ad una grandezza che ha le dimensioni di una velocità, e che per il vuoto ha il valore  $c=300.000 \text{ km/sec}$ . Ma la velocità di chi? E soprattutto, rispetto a chi? Perché evidentemente una velocità si può misurare solo rispetto ad un determinato riferimento. Questo interrogativo era già presente e nell'aria c'era già una risposta molto chiara: la velocità della luce, visto che stando alle misure più precise allora disponibili, i valori coincidevano.

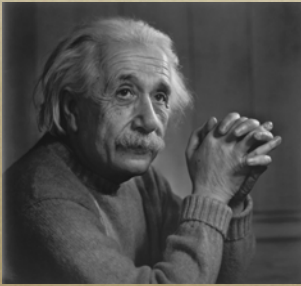
## Gustav Robert Kirchhoff



*... very nearly equal  
to the velocity of  
light in vacuum.*

Tant'è che già qualcuno aveva avanzato l'ipotesi che le perturbazioni elettriche viaggiassero alla velocità della luce: Gustav Robert Kirchhoff, il padre della teoria dei circuiti, che enunciò le due celebri leggi dei circuiti elettrici (era ancora studente di dottorato!). Altra rispettabile barba ed altra piccola statura se diamo fede a questa immagine in cui è ritratto insieme con Robert Bunsen. In un suo articolo del 1857, dal titolo "On the Motion of electricity in Wires" Kirchhoff avanzava timidamente l'ipotesi che le perturbazioni elettriche in un conduttore senza perdite viaggiassero alla velocità della luce.

## La relatività ristretta



*Albert Einstein*  
1879 - 1955

"... most profound and the most fruitful that physics has experienced since the time of Newton."

Ma sorprendentemente Kirchhoff non va oltre questa timida osservazione. Ci voleva il profondo lavoro critico di Maxwell per fare il balzo successivo. Come forse saprete, fu proprio la presenza di questa velocità  $c$ , una costante universale che entra direttamente nel sistema delle equazioni, a indurre Albert Einstein a sviluppare la sua critica dell'idea di contemporaneità, e quindi del concetto di tempo, che portò poi alla teoria della Relatività ristretta. Non per niente Einstein mostrò sempre una grande ammirazione per il lavoro di Maxwell, che ebbe a definire come "the most profound and most fruitful that physics has experienced since the time of Newton".

## Le azioni a distanza



*Attrazione e repulsione tra le cariche elettriche, ma anche tra magneti*

Ma torniamo al 1961. Il problema che intrigava moltissimo Maxwell era quello delle azioni a distanza. Come può un corpo agire su di un altro corpo, messo ad una certa distanza, senza che ci sia un "intermediario" che "trasporta" questa azione? Intendiamoci, non è che le azioni a distanza non fossero già state introdotte nella Scienza: Newton è di un paio di secoli precedente. Ma l'attrazione gravitazionale si presenta in una sua maniera particolare da indurre meno in speculazioni di questo tipo. Apparentemente essa non ha variazioni, è stazionaria. Non possiamo accenderla e spegnerla, essenzialmente perché non esistono masse negative per controbilanciare quelle positive.

## Il telone di Helmholtz



<https://www.youtube.com/watch?v=Gfjosaps13w&feature=youtu.be>

E comunque anche per questa forza furono ipotizzati possibili "mezzi" che ne giustificassero la trasmissione se è vero che qualcuno - credo Helmholtz - immaginò questa similitudine per spiegare ai non addetti ai lavori l'attrazione gravitazionale. Immaginate di avere un grande telone elastico, teso perché fissato ad una cornice rigida; un po' come nei jamping che si utilizzano oggi per divertimento per un certo tipo di ginnastica. Se supponiamo il telone perfettamente piano e poniamo una pallina di un qualche materiale (non troppo pesante) sul telone, essa rimarrà ferma. Se invece la pallina ha una velocità iniziale, essa continuerà il suo moto rettilineo fino ad urtare i bordi.

## Il telone di Helmholtz



Immaginate ora di mettere sul telone una massa di un materiale molto pesante, per esempio piombo.

Per la presenza della massa pesante, il telone si deformerà affossandosi al centro dove la massa rapidamente si è andata a collocare. Se a questo punto poggiamo sul bordo del telone una sferetta più piccola di metallo, magari ancora piombo, essa rapidamente si muoverà verso il centro dove è la sfera grande.

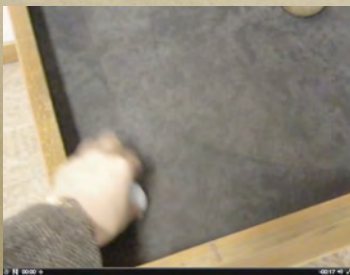
Visto dall'alto questo fenomeno, fa pensare che la sferetta è stata attratta dalla massa più grande.

## Il telone di Helmholtz



Immaginate ora di lanciare sulla superficie del telone, con un lancio radente, la piccola sferetta. Per effetto della deformazione del telone e della velocità iniziale di lancio della sferetta, essa seguirà una orbita elicoidale che la porterà a girare un certo numero di volte intorno alla massa grande, fino a collidervi definitivamente. Proprio come accade in questo filmato.

## La deformazione



*Il telone di Helmholtz*

La sferetta sembra attratta dalla massa al centro del telone. Se immaginiamo di eliminare le perdite per attrito, possiamo anche ipotizzare la possibilità di orbite stazionarie. Tutto questo, visto dall'alto fa pensare che la sferetta orbiti intorno alla massa centrale, attirata da una forza invisibile. Ecco spiegata l'attrazione. In realtà la prima massa ha prodotto una deformazione che è causa dell'attrazione sulla seconda. Ma deformazione di chi? Questa domanda divideva il mondo scientifico in due fazioni: i sostenitori dell'azione a distanza "tout court" e quelli dell'esistenza dell'etere: questo era il nome dato al mezzo invisibile responsabile della intermediazione.

## L'etere luminifero



Fizeau, Armande-Hippolyte-Louis (1819 - 1896)



Galileo Galilei (Pisa, 15 febbraio 1564 - Arcetri, 8 gennaio 1642)

Quanto al fatto di dover ipotizzare un mezzo invisibile che fosse il tramite di una qualche azione, neanche questo era la prima volta. Anche per la luce si parlava di un etere luminifero. E la velocità di propagazione era stata misurata con abbastanza precisione con metodi ottici da Fizeau. Prima di prendere subito campo per l'una o l'altra fazione, dobbiamo tenere in conto il fatto che noi oggi viviamo in un mondo in cui l'azione a distanza è esperienza quotidiana di tutti quanti. Siamo avvezzi, con un telecomando, a fare cose incredibili. Ma la cosa aveva tutt'altro significato per gli uomini della metà del 1800, i contemporanei di Maxwell.

## Come vivevano



Per entrare nella loro ottica proviamo a ricordare come vivevano. Gli uomini si vestivano così, almeno in Inghilterra, e le donne così. Sapevano tutti andare a cavallo, che era praticamente il principale mezzo di locomozione, e per i più pigri c'era la carrozza... tante carrozze: Londra aveva problemi di traffico per il gran numero di carrozze.

## Come vivevano

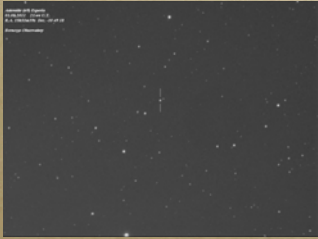


Per i lunghi viaggi c'erano le diligenze e per le tratte più frequentate, i treni, che erano quelli a cui i film sul vecchio west ci hanno abituato. Maxwell visse a Londra solo nel periodo in cui fu al King's College. Visse prevalentemente a Edinburgo, sua città natale, a Cambridge, a Aberdeen e, soprattutto a Glenlair, in campagna, dove era la casa di famiglia e la tenuta che aveva ereditato dal padre. Voi potete ben capire come nel contesto che abbiamo cercato di ricostruire era del tutto naturale che qualcuno si rifiutasse di accettare la possibilità di un'azione a distanza tra due corpi senza un intermediario. Sembrava un effetto di magia, piuttosto che una teoria scientifica.



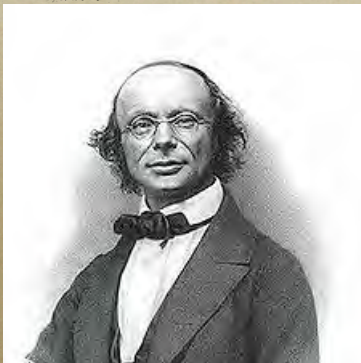
## Cosa accadeva nel mondo nel 1861

*Intanto noi facevamo l'unificazione.  
Cominciava la Guerra Civile Americana  
Ci fu un disastroso terremoto in Argentina  
Schiapparelli scopriva l'asteroide 69 Esperia*



Per entrare ancora meglio nei tempi di cui parliamo proviamo a vedere cosa accadeva nel mondo nel 1861. Beh, noi facevamo l'Unità d'Italia e l'America la guerra civile. Ci fu un disastroso terremoto in Argentina e la città di Mendoza fu completamente rasa al suolo e Schiapparelli, scoprì l'asteroide 69 Esperia. Così battezzato, perché dedicato all'Italia. A questo punto torniamo alle nostre azioni a distanza ed al problema dell'etere. Voi potete ben capire come nel contesto che abbiamo cercato di ricostruire era del tutto naturale che qualcuno si rifiutasse di accettare la possibilità di un'azione a distanza tra due corpi senza un intermediario.

## Il problema dell'etere



Wilhelm Weber  
1804 - 1891

Pure, scienziati di valore avevano accettato la possibilità di azioni a distanza ed uno di loro Weber aveva concepito una teoria che dava conto di tutti i fenomeni elettromagnetici noti. Tutti, tranne uno di non banale importanza. Il fatto è che se uno accetta la possibilità di azioni a distanza tra corpi è immediatamente portato ad immaginarle istantanee: un corpo di determinate caratteristiche (carico, per esempio), per la sua sola presenza, agisce su di un altro corpo posto ad una certa distanza, immediatamente. Perché se ciò dovesse avvenire con un certo ritardo, bisognerebbe pensare che qualcosa viaggi, e se viaggia, viene immediata la domanda: dove? In quale mezzo? con che velocità e soprattutto rispetto a chi?

## Conservazione dell'Energia



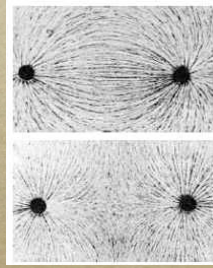
Hermann von Helmholtz  
1821 - 1894

Quindi l'azione a distanza era generalmente immaginata istantanea, e così era, almeno nella sua prima formulazione, nella teoria di Weber. Ma questo era in contrasto con un'altra legge che proprio in quei tempi si andava affermando: la legge della conservazione dell'energia. L'articolo di Helmholtz, che fu il primo a proporre una forma generale, è del 1847. All'epoca si era propensi a credere che una certa grandezza - l'energia, appunto in tutte le sue diverse forme - dovesse conservarsi in ogni trasformazione fisica. Orbene una teoria di azioni a distanza, con una forza che dipende dalla velocità, senza ritardo, non può conservare l'energia, come sarebbe molto facile far vedere.

## Le linee di forza



Michael Faraday  
1791 -1867



Maxwell non voleva accettare questa violazione del principio di conservazione dell'energia e per questo era legato all'idea dell'etere: il fantomatico mezzo che veicola le azioni elettromagnetiche.

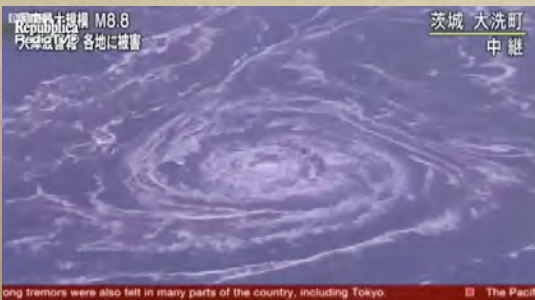
Del resto Maxwell era da sempre affascinato dall'idea delle linee di forza introdotte da Faraday. Faraday è stato un personaggio singolare: uno sperimentatore dall'intuizione sorprendente. Gran parte del lavoro teorico di Maxwell e dei suoi contemporanei si fondò sugli esperimenti di Faraday, e sulle sue intuizioni. Per questo motivo gli articoli di Maxwell sull'argomento di cui stiamo trattando si intitolavano "On the Physical lines of force". Come dare un significato reale a queste linee, a questi sottili nastri che si irraggiavano dalle cariche?

## La superficie di un lago ideale



Ma il problema non era così semplice, e l'obiettivo di Maxwell era molto più complesso. Per comprenderlo facciamo un paragone. Pensiamo alla superficie di una distesa d'acqua, di un lago. Ma non un lago qualunque, un lago turbato da profondi movimenti sotto la superficie, che creano correnti, vortici ed altre diavolerie del genere. Un corpo galleggiante sulla superficie di questo lago sarebbe soggetto a queste forze e si muoverebbe di conseguenza seguendo le correnti ed eventualmente scomparendo in un vortice. Immaginate ora che tutto questo accada, senza che la superficie del lago sia turbata in apparenza. Ad un osservatore esterno i movimenti del corpo galleggiante apparirebbero del tutto inspiegabili, e magari attribuibili all'azione di altri corpi posti a distanza.

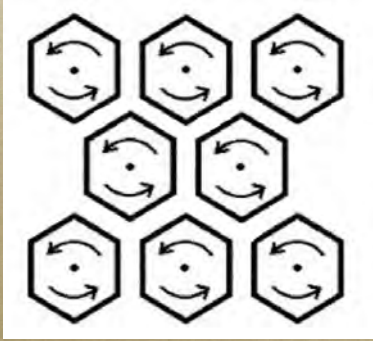
## Il mezzo tramite delle azioni



Immaginate per esempio di non vedere il mare nel filmato di questo spaventoso vortice prodotto dall'ultimo Tsunami in Giappone. Ecco, Maxwell questo cercava: di ricavare le qualità e le proprietà (tanto per capirci, densità, viscosità, elasticità vorticosità ecc.) che dovevano essere attribuite al mezzo (invisibile!) trasportatore delle azioni elettromagnetiche, per poter giustificare i comportamenti nei corpi sotto le azioni delle forze elettromagnetiche. Ci riuscì, con un modello molto complesso, che però possiede una eleganza formidabile. È troppo lungo spiegarlo nel dettaglio, ma è utile ricordarne alcuni aspetti.

<http://video.repubblica.it/dossier/giappone-terremoto-tsunami/vortice-in-mare-la-barca-trascinata-via/63870/62496>

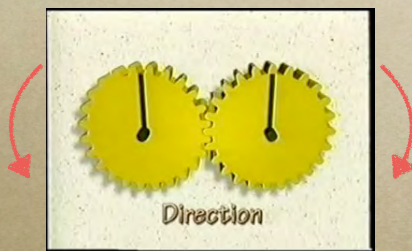
## I vortici



Già Faraday si era accorto che le linee di forza si comportano come fili tesi, e che questa tensione è sufficiente a spiegare l'attrazione e repulsione dovuta al campo magnetico prodotto da correnti. Per spiegare questa tensione Maxwell immagina l'esistenza di invisibili "vortici" circolari, che in questi disegni rappresenta come esagoni, che possono essere messi in moto. L'effetto del moto provoca espansione nel piano della rotazione e contrazione (e quindi tensione) nella direzione dell'asse di rotazione, spiegando così l'attrazione e repulsione magnetica.

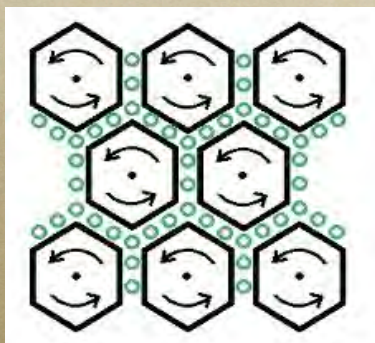
Ma come possono vortici adiacenti girare tutti nella stessa direzione?

## Il modello meccanico



Queste due ruote dentate chiariscono subito il problema! Le due ruote girano necessariamente in verso opposto! Quindi i vortici adiacenti non potevano girare tutti nello stesso verso!

## Le particelle



Per spiegare perché debbano girare tutti nello stesso verso di rotazione Maxwell è costretto ad introdurre delle "ruote libere" tra le celle che consentono di trasmettere il moto, come è illustrato in quest'altra animazione.

## Free wheel

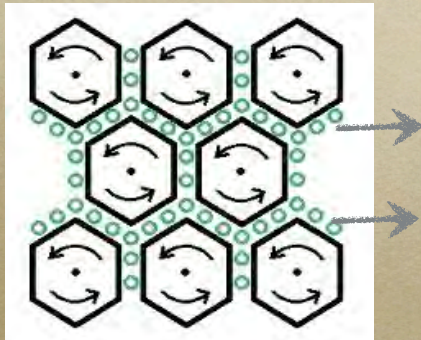


Se guardate le ruote verdi vedete che esse girano nello stesso verso, proprio per la presenza della ruota gialla. È logico: un ingranaggio, una inversione... due ingranaggi due inversioni, e la prima e la terza girano nello stesso verso.

[www.youtube.com/watch?v=RA1Fq4r\\_Qdk&h=90&w=120&tbnid=4RDnwWHUA\\_Zl8M&zoom=1&tbnh=72&tbnw=96&usg=\\_\\_NiZzJldmGqC69VKYuJc339-Act4=](http://www.youtube.com/watch?v=RA1Fq4r_Qdk&h=90&w=120&tbnid=4RDnwWHUA_Zl8M&zoom=1&tbnh=72&tbnw=96&usg=__NiZzJldmGqC69VKYuJc339-Act4=)

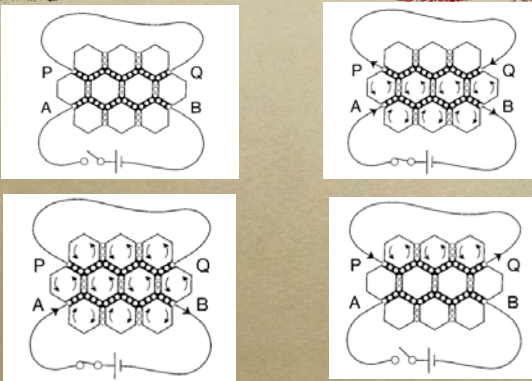
[www.youtube.com/watch?v=RA1Fq4r\\_Qdk&h=90&w=120&tbnid=4RDnwWHUA\\_Zl8M&zoom=1&tbnh=72&tbnw=96&usg=\\_\\_NiZzJldmGqC69VKYuJc339-Act4=](http://www.youtube.com/watch?v=RA1Fq4r_Qdk&h=90&w=120&tbnid=4RDnwWHUA_Zl8M&zoom=1&tbnh=72&tbnw=96&usg=__NiZzJldmGqC69VKYuJc339-Act4=)

## le correnti



Ecco il modello nel suo complesso. Ma chi lo mette in moto? A questo punto il primo colpo di genio: assumiamo che le “ruote libere” siano in realtà cariche elettriche elementari e che possano essere messe in moto traslatorio, per esempio in questa direzione. Due piccioni con una fava: le particelle in movimento danno la corrente e contemporaneamente fanno girare i vortici o celle che danno conto del campo magnetico. Geniale!

## L'induzione



Questo modello dà in qualche modo conto del campo magnetico prodotto dalle correnti, e delle forze di interazione tra le correnti stesse, ma anche, sorprendentemente, e sarebbe facile vederlo, del fenomeno dell'induzione elettromagnetica, cioè il fatto che l'accensione o lo spegnimento di una corrente in un circuito produce una corrente in un altro circuito nelle vicinanze. Sarebbe facile farlo vedere con queste 4 immagini che schematizzano quello che accade in momenti successivi. Ma lo faremo dopo aver riepilogato insieme le leggi dell'elettromagnetismo.

## Glenlair ... ieri



Restava da spiegare la semplice attrazione elettrostatica. Maxwell era a Londra quando concepiva questo modello, ed era giunto il momento di partire per le vacanze estive a Glenlair, la casa avita che sia lui che Katerin, la moglie amavano moltissimo. Fu quindi con un certo rammarico che questa volta partì per la campagna, con la prospettiva di un meritato riposo, ma con qualcosa in sospeso da completare.

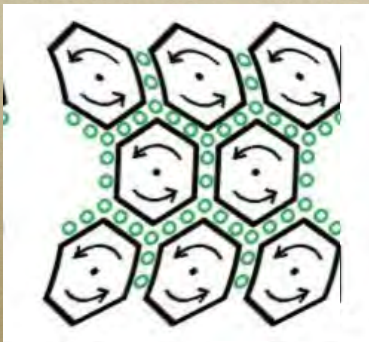
## Glenlair... oggi



*I believe there is a department of the mind conducted independently of consciousness, where things are fermented and decocted, so that when they are run off they come clear.*

Certe idee, però, certi pensieri non si possono interrompere a piacere. Come lui stesso disse: Credo che vi sia una zona del cervello che opera in modo indipendente dalla coscienza, dove le cose vengono fermentate e decotte così che quando vengono fuori esse sembrano già chiare.

## Nei materiali isolanti



Fu quindi a Glenlair che involontariamente il ragionamento continuò, e fu lì che Maxwell ebbe l'idea di assegnare alle celle - forse proprio allora da vortici diventarono celle - una certa elasticità per giustificare il loro ruotare come un solido senza dissipazione di energia.

Ma questo induceva a pensare che in un corpo isolante, il movimento che non poteva esplicitarsi pienamente si trasformasse in una deformazione della cella stessa, e quindi uno stato di tensione, che poteva dare conto dell'attrazione statica tra le cariche.

Ecco... il gioco è fatto, il modello meccanico è stato concepito, anche se un po' farraginoso. Ma c'era di più, molto di più.

## Elasticità...ma allora: onde!



Misure della velocità della luce all'epoca.  
Fizeau: 193,118 miglia al secondo  
Maxwell: 193,088 miglia al secondo

Già Faraday si era accorto che le linee di forza si comportano come fili tesi, e che questa tensione è sufficiente a spiegare l'attrazione e repulsione dovuta al campo magnetico prodotto da correnti.

Si sarà rovinato le vacanze. Perché chiunque può facilmente rendersi conto che se c'è dell'elasticità, c'è anche la possibilità che il mezzo possa essere sede di onde. Pensate ad una molla! E in tal caso, con tutti i dati in possesso, è possibile calcolarne anche la velocità. È sicuro che Maxwell l'abbia subito fatto, anche con dati approssimati, e si sia subito reso conto che la velocità era incredibilmente vicina a quella della luce.

## ... e la luce fu!

*"We can scarcely avoid the conclusion that light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena."*

La logica conclusione gli dovette apparire incredibilmente affascinante: la luce è un fenomeno elettromagnetico ed il mezzo che s'immaginava la trasportasse, anche nel vuoto, l'etere luminifero, era nient'altro che l'etere dei fenomeni elettromagnetici. Che colpo, come lui stesso lo definisce.

Maxwell è stato sempre molto cauto nell'espone il suo modello meccanico dell'etere. Sottolinea più volte che si tratta di un modo utile di vedere le cose, che non intende pretendere una validità fisica dei suoi vortici e ruote libere.

## E il modello meccanico?

*La coincidenza tra la velocità della luce misurata e la tua velocità calcolata delle onde trasversali nel tuo mezzo, sembra un brillante risultato. Ma debbo dire che ci vorranno diversi risultati di questo tipo prima che tu riesca a convincere la gente a pensare che ogni volta che si produce una corrente elettrica, una piccola file di particelle viene schiacciata tra file di ruote*

*C. J. Monro, ottobre 1961*

Maxwell è stato sempre molto cauto nell'espone il suo modello meccanico dell'etere. Sottolinea più volte che si tratta di un modo utile di vedere le cose, che non intende pretendere una validità fisica dei suoi vortici e ruote libere. Probabilmente non dissentiva dall'opinione del suo amico C. J. Monro che nell'October del 1861, in risposta alla sua lettera che gli comunicava la sua grande scoperta, diceva: La coincidenza tra la velocità della luce misurata e la tua velocità calcolata delle onde trasversali nel tuo mezzo, sembra un brillante risultato. Ma debbo dire che ci vorranno diversi risultati di questo tipo prima che tu riesca a convincere la gente a pensare che ogni volta che si produce una corrente elettrica, una piccola file di particelle viene schiacciata tra file di ruote!

## Ma l'etere c'è!

*The theory I propose may therefore be called a theory of the Electromagnetic Field, because it has to do with the space in the neighbourhood of the electric or magnetic bodies, and it may be called Dynamical Theory, because it assumes that in that space there is matter in motion, by which the observed electromagnetic phenomena are produced.*

Cio' nonostante non abbandonò mai l'idea che dovesse esistere un mezzo che trasporta le azioni elettrodinamiche, e fu sempre contrario all'idea dell'azione a distanza.

La teoria che io propongo può perciò essere chiamata una teoria del Campo Elettromagnetico, perché ha a che fare con lo spazio in prossimità dei corpi elettrici e magnetici, e può essere detta anche una Teoria Dinamica, perché assume che in questo spazio ci sia della materia in movimento, a causa della quale sono appunto prodotti i fenomeni elettrici osservati.

## Ma ora le sue proprietà...

*At the commencement of this paper we made use of the optical hypothesis of an elastic medium through which the vibrations of light are propagated, in order to show that we have warrantable...*

*We then examined electromagnetic phenomena, seeking for their explanation in the properties of the field which surrounds the electrified or magnetic bodies. In this way we arrived at certain equations expressing certain properties of the electromagnetic field.*

Del resto anche lui alla fine, anche se non abbandona l'idea dell'etere...

All'inizio di questo articolo abbiamo fatto l'ipotesi ottica di un mezzo elastico attraverso il quale le vibrazioni luminose potevano propagarsi... Poi abbiamo esaminato i fenomeni elettromagnetici cercando la loro spiegazione nelle proprietà del campo che circonda i corpi elettrici e magnetici. In questo modo siamo arrivati a certe equazioni che esprimono le proprietà del campo elettromagnetico.

## Sono quelle che si deducono

*We now proceed to investigate whether these properties of that which constitutes the electromagnetic field, deduced from electromagnetic phenomena alone, are sufficient to explain the propagation of light through the same substance.*

Ora noi procediamo a investigare se queste proprietà che costituiscono il campo elettromagnetico, dedotte esclusivamente dai fenomeni elettromagnetici, sono sufficienti a spiegare la propagazione della luce attraverso la stessa sostanza.

Abbandona nei fatti quella di far dipendere dalle sue eventuali proprietà meccaniche quelle elettromagnetiche, e riconosce che le proprietà del "mezzo" sono quelle che vengono fuori dalle sue equazioni, tout cour.

## Un momento cruciale

*La scienza non si occupa del reale direttamente, ma solo di modelli del reale.*

E' questo un passo di fondamentale importanza per il modo in cui noi concepiamo la scienza moderna, ed il metodo scientifico.

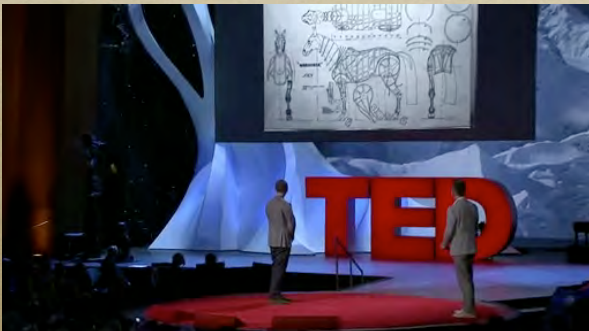
La scienza non si occupa del reale, direttamente, ma solo di un modello del reale. Questo fatto estremamente banale, che spesso anche gli addetti ai lavori tendono a dimenticare, è incontrovertibile. Non sarebbe possibile applicare il metodo scientifico alla realtà contingente, al particolare, perché l'aspetto fondamentale del modello, cui è possibile applicare un metodo scientifico, e che esso debba dipendere da un numero limitato di parametri. Non è la realtà ma una rappresentazione della realtà che in qualche modo la sintetizza.

## La Scienza non sbaglia mai!

*Per questo la Scienza non sbaglia mai.  
Eventualmente quello che è imperfetto è il modello!*

Perciò la Scienza non sbaglia mai, perché se un modello, una teoria non riesce a spiegare completamente i fenomeni, allora vuol dire che il modello è "insufficiente" e o basta aggiungere qualche parametro che in precedenza sei era considerato inessenziale, oppure bisogna radicalmente cambiare tutti il modello.

## Il modello



Il fatto è che a volte, quando il modello è ben concepito e funziona, esso può essere estremamente affascinante ed indurre a confonderlo con la realtà. Non trovo modo migliore per comunicare questa idea con immagini che mostrarvi questo filmato. Si tratta della presentazione a TED, del pupazzo, animato da tre operatori, che è stato costruito per un film di Spielberg che probabilmente avete visto anche voi. Questo non è un cavallo... ma un modello del cavallo, anche se a volte sembra altrettanto bello e può indurre a confonderlo con il cavallo. Così non è lecito porre domande alla Scienza che non siano contenute nel modello. È un grave errore perché in questi casi può sembrare che la Scienza risponda, ma invece non lo fa e... inganna.

[http://www.dailymotion.com/video/xsugvx\\_ted-talk-handspring-puppet-co-the-genius-puppetry-behind-war-horse\\_creation](http://www.dailymotion.com/video/xsugvx_ted-talk-handspring-puppet-co-the-genius-puppetry-behind-war-horse_creation)



## La resa... con condizioni.

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q_v}{\epsilon_0}$$

$$\oint_\gamma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_{S_\gamma} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}_\gamma$$

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_\gamma \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \iint_{S_\gamma} \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}_\gamma$$

Ad un certo punto, dunque, Maxwell comincia ad abbandonarsi alla forza del suo stesso modello.

Il mezzo c'è ancora, ma è diventato secondario. Le proprietà del mezzo, del campo, sono quelle che vengono fuori dalle equazioni. Il modello si libera dalla necessità di essere "meccanicamente credibile". A me sembra che questo sia un momento nodale per lo sviluppo della scienza come noi oggi la intendiamo ed ha due conseguenze immediate.

Da una parte libera il metodo scientifico da vincoli che ne limitavano la sua portata. La relatività, ma ancor più la meccanica quantistica, non potevano essere concepite senza questa liberazione.

## Il modello si libera dai vincoli



*Freeman  
Dyson*

Sentite come descrive le cose Freeman Dyson in un suo articolo dal titolo "Perché la Teoria di Maxwell è così difficile da capire", e con il sottotitolo "La modestia non è sempre una virtù". La moderna visione del mondo che emerge dalla teoria di Maxwell è un mondo con due strati. Il primo strato, lo strato dei costituenti fondamentali del mondo, consiste in campi che soddisfano semplici equazioni lineari. Il secondo strato, lo strato delle cose che noi possiamo direttamente toccare e misurare, consiste in tensioni meccaniche, energie e forze. I due strati sono connessi, perché le quantità nel secondo strato sono forme quadratiche o combinazioni bilineari delle quantità del primo strato...

## Il due strati

*Il primo strato ed  
il secondo strato*

Gli oggetti del primo strato, gli oggetti che sono veramente fondamentali, sono astrazioni non direttamente accessibili ai nostri sensi.

Gli oggetti che noi possiamo sentire e toccare sono nel secondo strato, e il loro comportamento è solo indirettamente determinato dalle equazioni che operano nel primo strato. La struttura a due strati del mondo implica che i processi basilari della natura sono nascosti alla nostra vista.

## La Meccanica Quantistica



Niels Bohr



Erwin Schrödinger

Ma perché introdurre questi due strati? Quale è la necessità di questo dualismo? Non è forse più semplice dire che la natura è quella che è accessibile ai nostri sensi (anche artificialmente estesi, naturalmente!) e che il secondo strato altro non è che il modo in cui noi riusciamo ad interpretarla. Il nostro modello della realtà: una nostra creazione, dunque, e quindi porsi il problema della sua accessibilità, non ha semplicemente senso! Poi Dyson fa un parallelo con la meccanica quantistica e nota quanto essa sia stata accettata in un più breve tempo rispetto a quanto fu necessario alla Teoria di Maxwell.

## La Meccanica Quantistica



Werner Heisenberg



Paul Dirac

Accettata ma non capita, tant'è dice Dyson, che ci sono tante interpretazioni della meccanica quantistica. E poi continua: La ragione di queste dispute sta nel fatto che i diversi interpreti cercano di spiegare il mondo quantistico con le parole del linguaggio di tutti i giorni, e questo linguaggio non è adatto a questo scopo. Il linguaggio di tutti i giorni descrive il mondo così come gli esseri umani lo incontrano e lo vedono. La nostra esperienza del mondo riguarda esclusivamente oggetti macroscopici che si comportano secondo le regole della fisica classica. Tutti i concetti che sono presenti nel nostro linguaggio sono classici.

## I due strati della Meccanica Quantistica

*Primo strato: funzioni d'onda di Schrodinger, le matrici di Heisenberg e i vettori di stato di Dirac*

*Secondo strato: probabilità di collisione e di trasmutazione di particelle, intensità e polarizzazioni di radiazione, valori attesi dell'energia delle particelle e di spin.*

E poi: Come la teoria di Maxwell, la meccanica quantistica divide l'universo in due strati. Il primo strato contiene funzioni d'onda di Schrodinger, le matrici di Heisenberg e i vettori di stato di Dirac. Le quantità del primo strato obbediscono a semplici equazioni lineari... ma non possono essere osservate direttamente. Il secondo strato contiene probabilità di collisione e di trasmutazione di particelle, intensità e polarizzazioni di radiazione, valori attesi dell'energia delle particelle e di spin. Le quantità del secondo strato possono essere direttamente osservate ma non direttamente calcolate. Anche in questo caso, se accettiamo che funzioni d'onda, matrici e vettori di stato sono nostre creature e non il secondo strato inconoscibile, tutto diventa più chiaro!

## La Scienza si allontana dalla gente

*L'umanità non ha futuro senza Scienza, ma la Scienza tende ad allontanarsi dalla gente.*

*A questo punto si aprono infiniti scenari non del tutto positivi.*

La seconda conseguenza di questa liberazione della Scienza dalla necessità di un modello "ad un solo strato", per dirla con le parole di Dyson, è che essa necessariamente usa un linguaggio che sempre più si allontana dal modo di sentire comune e quindi allontana la Scienza dalla gente comune, e questo in un'era, come la nostra, che sulla Scienza e la sua ancella la Tecnica o Tecnologia, è, per riconoscimento unanime, fondata, costituisce un grave pericolo. L'umanità non ha futuro senza Scienza, ma la Scienza tende ad allontanarsi dalla gente. A questo punto si aprono infiniti scenari non del tutto positivi.

## Le parole di Heaviside

*Una parte di noi vive dopo di noi, diffusa in tutta l'umanità - più o meno - e in tutta la natura. Questa è l'immortalità dell'anima. Ci sono anime grandi ed anime piccole... Quelle di Shakespeare o di Newton erano stupendamente grandi. Uomini di tale statura vivono la maggior parte della loro vita dopo la morte. Maxwell è uno di questi uomini. La sua anima vivrà e si espanderà ancora per molto tempo, e ci illuminerà ancora per centinaia di anni come una delle stelle luminose del passato, la cui luce mette centinaia d'anni a raggiungerci*

Oliver Heaviside, che era una persona non tenera, cinica in qualche modo, ha per Maxwell delle parole bellissime: Una parte di noi vive dopo di noi, diffusa in tutta l'umanità - più o meno - e in tutta la natura. Questa è l'immortalità dell'anima. Ci sono anime grandi ed anime piccole... Quelle di Shakespeare o di Newton erano stupendamente grandi. Uomini di tale statura vivono la maggior parte della loro vita dopo la morte. Maxwell è uno di questi uomini. La sua anima vivrà e si espanderà ancora per molto tempo, e ci illuminerà ancora per centinaia di anni come una delle stelle luminose del passato, la cui luce mette centinaia d'anni a raggiungerci

## Alcuni insegnamenti di questa bella storia

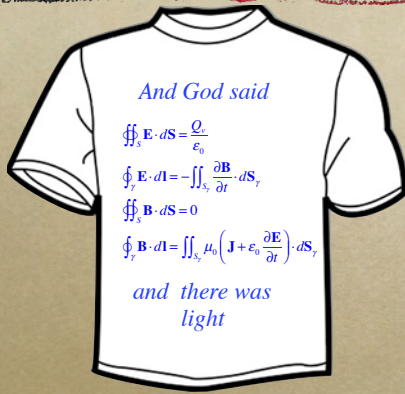
- *La Scienza si occupa di modelli del reale.*
- *La costruzione del modello!*
- *C'è un problema di comunicazione*
- *La falsificazione del modello dominante.*

Possiamo provare a riepilogare le conclusioni di questa introduzione. In primo luogo la Scienza non si occupa del reale ma solo di modelli del reale. Anche per questo motivo la fase più creativa del lavoro scientifico è quella della creazione del modello.

D'altra parte il modello si allontana sempre di più dalla comprensione dei non addetti ai lavori, e questo pone un grave problema di comunicazione. La gente ha bisogno della scienza, e della tecnologia che è la sua ancella, per sopravvivere sulla terra, ma ne ha sempre più paura.

Le vere rivoluzioni scientifiche si verificano quando i fatti ci dicono che il modello in uso va modificato e ci propongono come modificarlo.

## And God said



A Boston, in America, tanti anni fa al MIT, vidi uno studente che indossava una T-shirt con sul petto una scritta così concepita: prima c'era " And God said", poi c'erano le equazioni di Maxwell al posto di "Let there be light", ed infine "and there was light"! (Genesis 1.3.)

È un po' quello che intendeva Einstein quando diceva che Dio doveva parlare un linguaggio matematico! Ma forse, come abbiamo visto, la faccenda sta un po' diversamente: siamo noi che parliamo un linguaggio matematico!

## La luce



Parafrasando la Genesi potremmo dire che noi in fondo non sappiamo se questo mondo, con tutta la sua luce, un Dio lo ha creato: molti lo credono, anzi ne fanno un atto di fede, altri no, ed altri ancora sono agnostici.

## James Clerk Maxwell



$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

Ma noi sappiamo chi ha creato questo modello, racchiuso in queste equazioni. Un vero e proprio atto di creazione, che è quello che precisamente la Scienza fa. È stato questo giovane - in fondo nel 1861 aveva solo 30 anni - James Clerk Maxwell.

## Riepilogo della Lezione 1

- *Introduzione al Corso;*
- *Prerequisiti e finalità del corso;*
- *Modalità di svolgimento dell'esame;*
- *I due modelli: Campi e Circuiti;*
- *Genesi delle equazioni di Maxwell;*

**I riepilogo della lezione è un utile strumento per lo studente in quanto può anche essere visto come un elenco delle possibili domande che ci si può aspettare all'esame. Naturalmente questa prima lezione fa eccezione trattandosi di una introduzione al Corso.**