



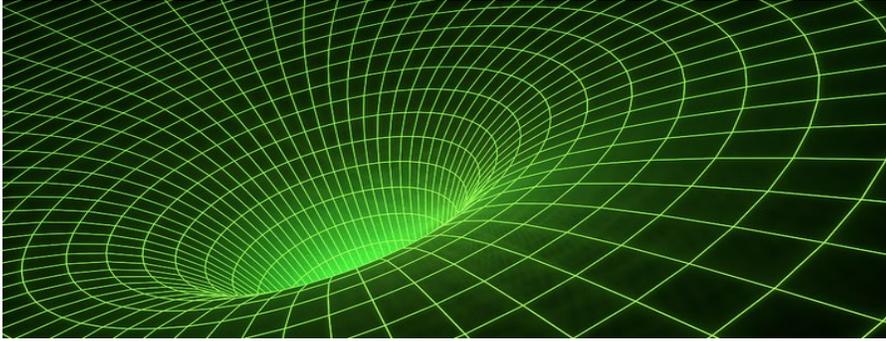
Modelli nella scienza e nella pedagogia scientifica

Il caso di J. Clerk Maxwell

Francesco Nappo
Politecnico di Milano



La competenza modellistica



Il mestiere della scienza

Il ragionamento **per analogia** gioca un ruolo centrale nella storia della scienza, e in particolare nella storia della fisica.

Una domanda centrale della mia ricerca in epistemologia è: che cosa **attrae** gli scienziati così tanto all'analogia?

Ciò che emerge dallo studio della storia e della pratica scientifica è che una parte importante della formazione di uno scienziato coinvolga lo sviluppo di una **competenza modellistica**: in particolare, di saper giudicare quando un'analogia con un dominio noto è più profonda di un'altra analogia.

Questo indica la presenza di una **conoscenza tacita** (una capacità di giudizio) che non è facilmente articolabile ma che si apprende con l'esperienza.



Meta-analogia ricercatore/studente

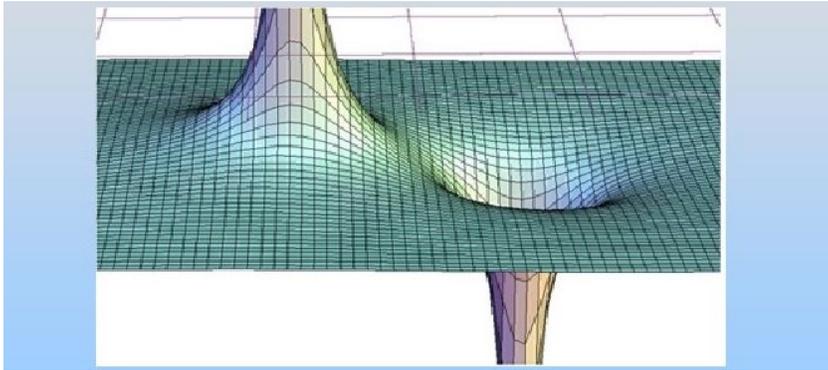
1. Lo studente apprende più facilmente **ricapitolando** lo sforzo intellettuale del ricercatore. Un ruolo per la storia della scienza.
2. Lo studente diventa scientificamente più sofisticato imparando a produrre e valutare le **proprie** analogie e i **propri** modelli.

Evidenza dalla pedagogia

1. Lo sviluppo di **conoscenza** modellistica contribuisce all'apprendimento (cf. Greca e Moreira 2000; Lozano e Cardenas 2002; Schwarz e White 2005).
2. Lo sviluppo di **meta-conoscenza** modellistica (i.e., epistemologia dei modelli scientifici) contribuisce all'apprendimento (cf. Gobert e Pallant 2004; Schwarz e White 2005; Nicolau e Constantinou 2014).



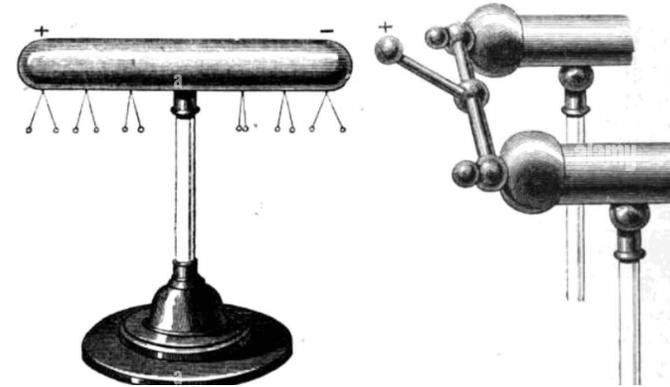
Elementi di storia



L'elettromagnetismo prima del 1855

Che cosa si sapeva, sull'elettro-magnetismo, *prima* di Maxwell?

1. I fenomeni dell'**elettrostatica** erano ben noti. Coulomb (e, prima di lui, Priestley) avevano ipotizzato una legge analoga alla legge di gravità.
2. Era stato introdotto il concetto fisico di **potenziale** elettrico.
3. Tra le limitazioni, rimaneva il fatto che **l'induzione elettrostatica** fosse quantificabile solo per alcune forme di corpo intermedio.
4. Faraday aveva dimostrato l'esistenza di corpi **diamagnetici** in aggiunta ai corpi **paramagnetici** già noti (come il metallo).
5. Grazie ad Ohm ed altri, si conoscevano alcune delle relazioni tra correnti elettriche e magneti – le relazioni **elettro-magnetiche**.
6. Ampère aveva proposto una legge elettro-magnetica che collegava il **moto di un magnete** ad una corrispondente **corrente elettrica**.



Le quattro leggi

Le quattro leggi principali dell'elettromagnetismo *prima* di Maxwell:

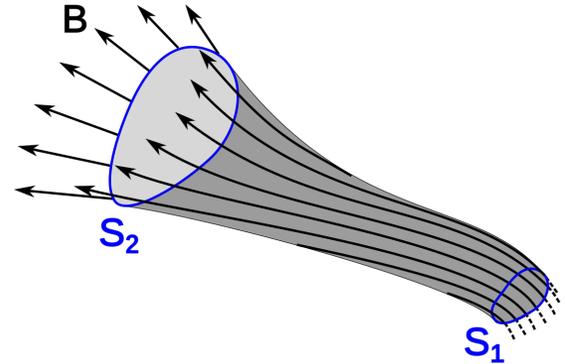
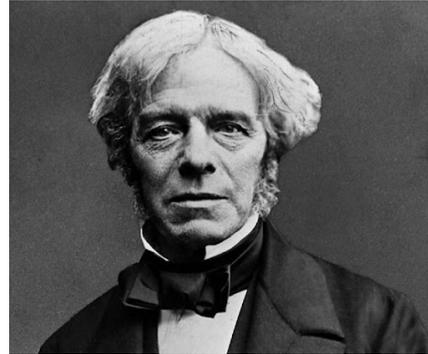
1. la **legge di Gauss** sull'elettricità: $\text{Div } E = \rho/\epsilon_0$
2. la **legge di Gauss** sul magnetismo: $\text{Div } B = 0$
3. la **legge di Faraday** sull'induzione elettrica: $\text{Curl } E = - \delta B / \delta t$
4. la **legge di Ampère** sull'elettromagnetismo: $\text{Curl } B = 4\pi J$

La mossa dello pseudo-Maxwell

Notato che le tre leggi insieme violavano il **principio di conservazione** dell'energia, pseudo-Maxwell aggiunge un termine alla legge di Ampère:

- 4*. la legge di **Ampère-Maxwell**: $\text{Curl } B = 4\pi J + \delta E / \delta t$

Elementi di epistemologia



Quale metodo?

Nel 1855, Maxwell scrive che «lo stato della scienza elettrica è particolarmente sfavorevole alla speculazione». Serve una proto-teoria che possa mettere ordine a quello che sappiamo e guidare nuovi esperimenti. Si può tramite:

1. Il «metodo **matematico**», che consiste nel provare ad indovinare una formula dalla quale le leggi sperimentali note possano essere derivate.
2. Il «metodo dell'**ipotesi fisica**», che consiste nel provare ad indovinare la forma del meccanismo fisico dal quale emergono le osservazioni.
3. Nel primo caso, «perdiamo interamente di vista i **fenomeni fisici** che vogliamo spiegare»; nell'altro, «vediamo i fenomeni solo attraverso un medium, e siamo preda di quella **cecità ai fatti** e **avventatezza nelle assunzioni** che una spiegazione parziale incoraggia» (1855:155).
4. Il metodo ottimale è quello dell'**analogia fisica**: «un modo di ricerca, che consente alla mente ad ogni passo di afferrare una chiara concezione fisica, senza però costringerci a credere ad una qualche teoria fondata sulla scienza da cui quel modello è stato preso in prestito» (1855:156).

'On Faraday's lines of force' (1855)

L'idea è di dare forma matematica alla concezione delle 'linee di forza':

1. Si considera un sistema di tubi attraversati da un fluido incompressibile, con la sezione trasversale dei tubi modulata in modo tale per cui l'intensità di una linea forza è inversamente proporzionale al **quadrato** della distanza. Si tratta di un sistema di tubi 'geometrico' in cui il fluido riempie tutto lo spazio e non ci sono interstizi tra i tubi.
2. Preservando l'analogia idrodinamica, si cerca dunque di derivare le proprietà note dell'elettricità e del magnetismo **come se** fossero effettivamente sistemi di tubi attraversati da un fluido incompressibile, con l'intensità di forza misurata dalla velocità del fluido in ciascun tubo.

Esempio di modellizzazione

Sperimentalmente, si trova che l'induzione elettrostatica è maggiore nei conduttori che negli isolanti. Possiamo considerare un isolante (un blocco di vetro) una parte di spazio nel quale la *resistenza* al fluido è maggiore. In questo modo, sia l'attrazione elettrostatica sia il potenziale vengono ridotti.

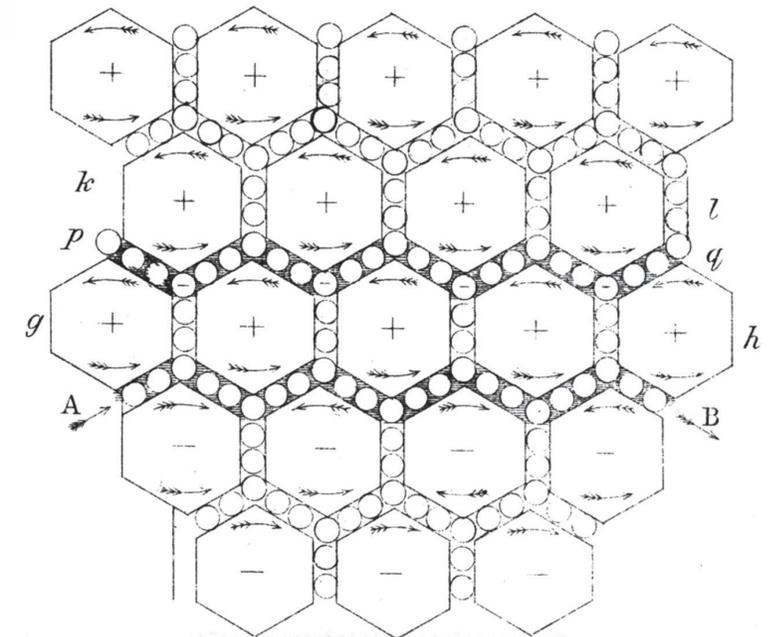
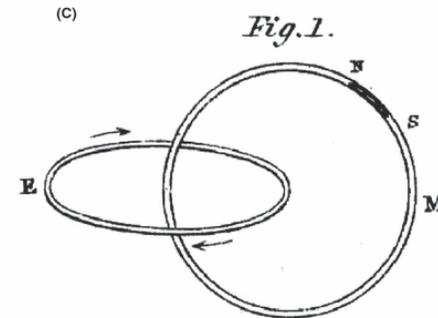


Come si arriva alle equazioni di Maxwell

Il modello dei vortici molecolari

Possiamo creare un'analogia con un sistema meccanico, tale per cui elettricità e magnetismo si comportano microscopicamente *come se* fossero quel sistema?

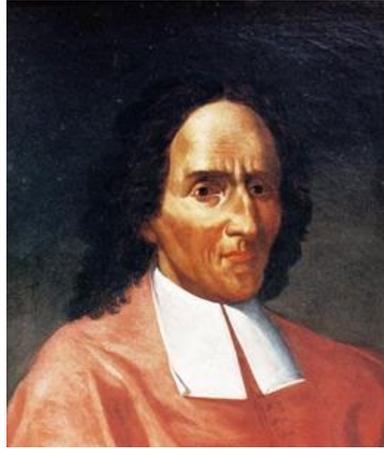
1. Dall'effetto magneto-ottico scoperto da Faraday, Maxwell comincia supponendo che le forze magnetiche siano come dei **vortici**, dove la direzione dell'asse del vortice è la direzione della linea di forza magnetica.
2. L'origine della corrente elettrica è rappresentata dalle «**ruote di rinvio**», che trasportano particelle abitando gli interstizi dei vortici molecolari. In questo modo si derivano i fenomeni di induzione di calore e corrente.
3. Fine Parte II: «Abbiamo ora dimostrato come i fenomeni elettromagnetici possano essere **imitati** da un sistema di vortici molecolari... I fatti dell'elettromagnetismo sono così complicati e vari, che la spiegazione di ogni loro numero da teorie diverse deve essere interessante non solo ai fisici, ma a tutti quanti vogliono sapere... quanto si debba considerare la **somiglianza nell'espressione matematica** di due insiemi di fenomeni come un'indicazione che i fenomeni sono dello stesso tipo». (1865:459)
4. Mancava l'elettrostatica. Per tenere conto dell'accumulo di carica, Maxwell si inventa che il medium nel quale il sistema meccanico abita è elastico. Il risultato è l'introduzione di una «**corrente di spiazzamento**» ($+ \delta E / \delta t$)
5. Il risultato sorprendente è che la **velocità delle onde elettromagnetiche** nel medium, secondo il modello, è esattamente la stessa della **velocità della luce** come misurato sperimentalmente: «possiamo difficilmente evitare la conclusione che la luce consiste nelle ondulazioni dello stesso medium nel quale abitano le forze elettriche e magnetiche» (1865:499).



«[La nuova proto-teoria sull'elettromagnetismo] può ora solo essere provata falsa da esperimenti che **allargheranno notevolmente** i confini delle nostre attuali conoscenze» (1865:450)

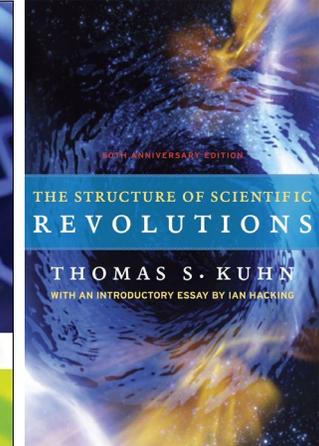
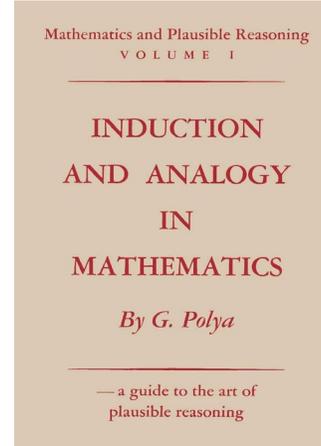


Per la pedagogia



Imparare a filosofare

1. «La stragrande maggioranza delle persone è incapace di trattenere nella mente i simboli senza corpo del puro matematico, per cui, se la scienza dovrà mai diventare **popolare**, e allo stesso tempo rimanere scientifica, non sarà che attraverso un profondo studio e applicazione del modo di fare analogico e delle idee matematiche che ne sono alla base» (1872:560).
2. «Quando esempi di questo metodo di speculazione fisica saranno appropriatamente presentati e spiegati, sentiremo meno lamentele sulle negligenze nel ragionamento degli scienziati, e il **metodo della filosofia induttiva** smetterà di essere ridicolizzato come un mero tirare ad indovinare» (1875:600).
3. Giambattista Vico: «Perché come la metafisica razionale insegna che l'uomo diventa tutte le cose nel comprenderle (*homo intelligendo fit omnia*), così questa **metafisica immaginativa** dimostra che l'uomo diventa tutte le cose nel non comprenderle (*homo non intelligendo fit omnia*); e forse con più verità, perché... col non intendere l'uomo fa di sé le cose e, trasformandosi, vi diventa» (*La Scienza Nuova*: 405)



Due modi di cooptare il prof. di storia e filosofia

1. Una lezione che parta dalla **storia della tecnologia** (elettricità e magnetismo), ripercorra i maggiori episodi della scienza elettro-magnetica, e concluda con le ripercussioni storiche di alcune scoperte.
2. Una lezione che parta interrogandosi sul concetto di **integrità scientifica**, ne consideri la dimensione etica e successivamente quella epistemologica: che cosa significa avere integrità nel metodo?

Lectures suggerite

1. Polya, G. 1954, *Induction and Analogy in Mathematics*, volume 1.
2. Pynchon, T., *L'Incanto del Lotto 49* (romanzo).
3. Nersessian, N., *Creating Scientific Concepts* (in inglese)
4. Kuhn, T., *La Struttura delle Rivoluzioni Scientifiche*

GRAZIE A TUTTI !

contatto:
francesco.nappo@polimi.it

