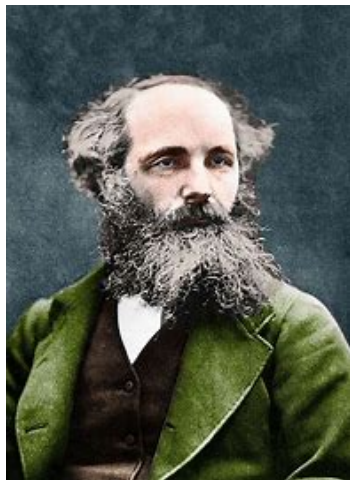


Relatività e geometria

Francesco Paoli

Filosofia della scienza, 2023-24

James Clerk Maxwell (1831-1879)



Maxwell e l'elettromagnetismo (1)

- Prima di Maxwell, i fenomeni elettrici e magnetici erano stati studiati da Faraday, Ampère ed altri, ma mancava una teoria unificata.
- Maxwell elabora la prima teoria moderna dell'elettromagnetismo, che ricomprende ed unifica tutte le precedenti osservazioni, esperimenti e modelli matematici entro le cosiddette equazioni di Maxwell.
- Le equazioni di Maxwell dimostrano che l'elettricità, il magnetismo e la luce sono tutte manifestazioni del medesimo fenomeno: il campo elettromagnetico.

Maxwell e l'elettromagnetismo (2)

- Il campo elettromagnetico si propaga sotto forma di onde ad una velocità che Maxwell prova a misurare sperimentalmente, ottenendo un valore molto prossimo alla velocità della luce, che è sempre costante.
- Questo lo porta a sostenere che la luce stessa sia un'onda elettromagnetica.
- Maxwell parteggia quindi per il modello ondulatorio in ottica e sostiene la propagazione della luce attraverso l'etere.

Maxwell contro Newton

- Per Newton la velocità di un corpo rispetto a un osservatore dipende dalla velocità dell'osservatore: osservatori con velocità diverse misureranno valori diversi legati dalle trasformazioni di Galileo.
- Le equazioni di Maxwell, tuttavia, presuppongono che la velocità della luce sia finita e invariabile, indipendentemente dalle velocità dell'osservatore e della sorgente luminosa.
- Le equazioni di Maxwell non sono quindi invarianti per trasformazioni galileiane, perché non ammettono che le velocità si sommino nel modo da esse indicato.
- Gli studiosi si dividono: alcuni attaccano la teoria di Maxwell, altri (tra cui Maxwell stesso) sostengono l'ipotesi di un riferimento privilegiato (l'etere) valido per l'elettromagnetismo ma non per la meccanica, nella quale varrebbe la relatività galileiana. Riprende in termini moderni lo *spazio assoluto* newtoniano.

Problemi della nozione di etere (1)

Supponiamo che l'etere esista. Esso è *trascinato* o *stazionario*? Ad esempio: nel moto di rotazione terrestre, vi è o no un movimento relativo tra Terra ed etere? Entrambe le ipotesi portano problemi. Problemi dell'etere trascinato:

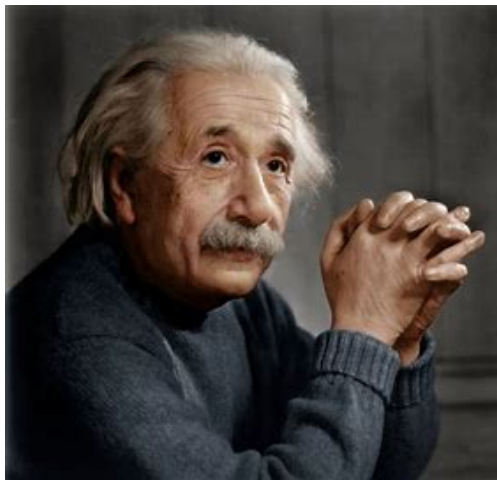
- Alcuni esperimenti sull'aberrazione della luce delle stelle mostrano che l'etere rimane stazionario almeno a distanze astronomiche.
- L'effetto Sagnac mostra che due raggi di luce, emanati dalla stessa sorgente luminosa in direzioni diverse su una piattaforma rotante, richiedono tempi diversi per ritornare alla sorgente luminosa. Tuttavia, se l'etere viene trascinato dalla piattaforma, questo effetto non dovrebbe verificarsi affatto.

Problemi della nozione di etere (2)

Problemi dell'etere stazionario:

- Il fatto che le onde luminose siano onde trasversali (le particelle del mezzo in cui si propagano oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione) e l'elevatissima velocità di propagazione della luce richiederebbero un etere solido, dotato di elevata rigidità (milioni di volte più dell'acciaio); l'etere deve però essere fluido per riempire lo spazio.
- Ogni corpo in movimento nell'universo produrrebbe un vento d'etere che dovrebbe muoversi alla stessa velocità del corpo in movimento e con direzione opposta. Per esempio la Terra, a causa del suo movimento all'interno del sistema solare, dovrebbe incontrare un vento d'etere a 30 km/s. Qualsiasi cosa immersa nell'etere sarebbe influenzata dal vento, compresa la luce.
- Esperimento di Michelson e Morley.

Albert Einstein (1879-1955)



La simultaneità a distanza (1)

- Siano A e B due luoghi spazialmente separati, fissati rispetto a un sistema di riferimento inerziale, ma altrimenti arbitrario. Supponiamo che in A accada un evento E . Quale evento in B è sincrono all'evento E ?
- Se un evento in B può esercitare un'influenza causale su E , sicuramente è ad esso antecedente; viceversa, se E può esercitare un'influenza causale su esso, è sicuramente posteriore.
- Prima di Einstein, non vi era ragione di escludere la possibilità di influenze causali arbitrariamente veloci, ma nella teoria della relatività nessun'influenza causale può viaggiare più velocemente della luce nel vuoto.

La simultaneità a distanza (2)

- Supponiamo che un raggio luminoso parta da B al tempo t_1 (misurato da un orologio in quiete posto in B) ed arrivi in A in coincidenza con l'evento E . Assumiamo anche che il raggio sia istantaneamente riflesso e torni in B al tempo t_2 .
- In base al criterio delle influenze causali, *ogni* evento che accade in B nell'intervallo aperto (t_1, t_2) ha uguale diritto di essere considerato sincrono all'evento E .
- Per ripristinare l'unicità della simultaneità di eventi in luoghi spazialmente separati, occorre fare un'assunzione (*sincronia standard*). Per definizione consideriamo simultanei l'evento E e l'evento accaduto in B all'istante $\frac{t_1+t_2}{2}$. In altri termini, ipotizziamo che i tempi di andata e di ritorno del raggio siano uguali.

Esiste uno spazio assoluto?

- Ricordiamo che secondo Maxwell le equazioni della teoria elettromagnetica valgono per il sistema di riferimento privilegiato dell'etere, mentre devono assumere forma diversa in sistemi in moto rispetto ad esso (nei quali valgono la relatività galileiana e le leggi della meccanica).
- Per determinare questo sistema, dovremmo poter stabilire quali eventi sono in assoluto simultanei, e come abbiamo visto questo richiede l'invio di segnali luminosi.
- Se quindi l'identificazione del sistema di riferimento privilegiato richiede l'invio di segnali luminosi, e poi viene usato per misurare la velocità della luce, si entra in un circolo vizioso.
- In un certo senso, ciò che Einstein propone è estendere la relatività galileiana alla teoria di Maxwell. Le equazioni di Maxwell assumono la stessa forma in ogni sistema di riferimento inerziale.
- Poiché tali equazioni determinano la velocità della luce, ciò implica che ogni osservatore inerziale, indipendentemente dalla sua velocità, misurerà lo stesso valore per la velocità della luce.

Gli assiomi della relatività

- 1 Ogni legge generale della natura valida in un sistema di riferimento, vale nella stessa forma anche in ogni sistema di riferimento inerziale (rispetto al primo).
- 2 La luce ha sempre la stessa velocità di propagazione nel vuoto, indipendentemente dallo stato di moto dell'osservatore o della sorgente luminosa.

Relatività generale e geometria non euclidea (1)

- La relatività speciale non spiega la gravitazione. Anzi, la complica: la meccanica newtoniana spiega le forze gravitazionali mediante un'azione istantanea a distanza, la relatività elimina la nozione di simultaneità che un'azione istantanea presuppone.
- Nella teoria del 1907, le equazioni della fisica assumono la stessa forma in ogni sistema inerziale. Nella relatività generale (1915), l'assioma viene esteso a sistemi in moto arbitrario.
- L'idea centrale è che la gravitazione è l'effetto di una curvatura nella varietà riemanniana quadridimensionale dello spazio-tempo (che è localmente euclidea, quindi localmente priva di curvatura).

Relatività generale e geometria non euclidea (2)

- *Principio di equivalenza*: la forza dovuta all'attrazione gravitazionale di un corpo M su un corpo m è uguale alla forza fittizia di cui m risentirebbe se si trovasse in un sistema non inerziale con un'accelerazione pari a quella gravitazionale.
- Un oggetto che viaggia a velocità costante in un sistema di riferimento privo di forze gravitazionali, accelera se esposto a un campo gravitazionale. Per Einstein ciò è dovuto a una deviazione del percorso indotta dalla curvatura dello spazio-tempo provocata dal campo gravitazionale.
- Non c'è niente di misterioso nell'azione a distanza prodotta dalla forza gravitazionale. In realtà, questa non è neppure una forza. Una massa curva lo spazio-tempo per la sua semplice presenza. Due masse si attraggono non in quanto esercitano reciprocamente una forza, ma poiché le loro traiettorie spazio-temporali sono deviate dalla curvatura dello spazio-tempo.

La relatività come teoria dei principi

- *Teoria costruttiva*: usa il metodo sintetico, costruendo modelli ipotetici della realtà e poi li verifica empiricamente.
- *Teoria dei principi*: usa il metodo analitico, partendo da proprietà determinate empiricamente e formulando poi dei criteri matematici ai quali i processi naturali debbono adeguarsi.
- La teoria della relatività è una teoria dei principi. Le proprietà determinate empiricamente sono i due assiomi della teoria.

Come è possibile che le matematiche, le quali dopo tutto sono un prodotto del pensiero umano, dipendente dall'esperienza, siano così ammirevolmente adatte agli oggetti della realtà? [...] A mio avviso la risposta a questa domanda è, in breve, la seguente: nella misura in cui le proposizioni matematiche si riferiscono alla realtà, esse non sono certe; e nella misura in cui esse sono certe, non si riferiscono alla realtà [...]

La geometria si occupa di oggetti denotati con parole come linea retta, punto, ecc. Nessuna conoscenza o intuizione di tali oggetti è presunta, bensì solo la validità degli assiomi [...] Quegli assiomi sono libere creazioni della mente umana [...] Gli assiomi definiscono gli oggetti di cui parla la geometria (A. Einstein, Geometria ed esperienza, pp. 220-21).

Dopo l'adozione nella teoria della relatività generale di uno spazio riemanniano a curvatura variabile, diventa impossibile difendere forme di apriorismo geometrico, come quella kantiana, appellandosi al fatto che – a differenza della geometria di Euclide – gli altri sistemi non sarebbero che pure costruzioni logico-matematiche prive di ogni rilevanza fisica.

- Secondo Poincaré, la scelta di una geometria rispetto a un'altra è convenzionale, ma scegliamo la geometria euclidea grazie alla sua maggiore semplicità.
- Tuttavia, la geometria di per sé non fa alcuna predizione circa il comportamento degli oggetti reali, ma le fa solo nel contesto di una teoria fisica. Ciò che sottoponiamo al controllo sperimentale, quindi è *la teoria complessiva costituita dalla parte geometrica e da quella fisica*.
- Se tra due teorie complessive, $G + F$ e $G' + F'$, la seconda è più semplice (e meglio in accordo con i fenomeni) della prima, dobbiamo sceglierla anche se G' è più complicato di G .