

L'elettrodinamica dei corpi in movimento¹

A. Einstein

È noto che l'elettrodinamica di Maxwell - come la si interpreta attualmente - nella sua applicazione ai corpi in movimento porta a delle asimmetrie, che non paiono essere inerenti ai fenomeni. Si pensi per esempio all'interazione elettromagnetica tra un magnete e un conduttore. I fenomeni osservabili in questo caso dipendono soltanto dal moto relativo del conduttore e del magnete, mentre secondo l'interpretazione consueta i due casi, a seconda che l'uno o l'altro di questi corpi sia quello in moto, vanno tenuti rigorosamente distinti. Se infatti il magnete è in moto e il conduttore è a riposo, nei dintorni del magnete esiste un campo elettrico con un certo valore dell'energia, che genera una corrente nei posti dove si trovano parti del conduttore. Ma se il magnete è in quiete e si muove il conduttore, nei dintorni del magnete non esiste alcun campo elettrico, e si ha invece nel conduttore una forza elettromotrice, alla quale non corrisponde nessuna energia, ma che - a parità di moto relativo nei due casi considerati - dà luogo a correnti elettriche della stessa intensità e dello stesso andamento di quelle alle quali dà luogo nel primo caso la forza elettrica. Esempi di tipo analogo, come pure i tentativi andati a vuoto di constatare un moto della terra relativamente al "mezzo luminoso" portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica non corrisponda ad alcuna proprietà dell'esperienza, e che inoltre per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni meccaniche debbano valere anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche, come già è dimostrato per le quantità del prim'ordine. Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato "principio di relatività") come postulato, e oltre a questo introdurremo il postulato con questo solo apparentemente incompatibile, che la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata V , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti. Questi due postulati bastano a pervenire ad un'elettrodinamica dei corpi in movimento semplice ed esente da contraddizioni, costruita sulla base della teoria di Maxwell per i corpi in quiete. L'introduzione di un "etere luminoso" si dimostra fin qui come superflua, in quanto secondo l'interpretazione sviluppata non si introduce uno "spazio assoluto in quiete" dotato di proprietà speciali, né si associa un vettore velocità ad un punto dello spazio vuoto nel quale abbiano luogo processi elettromagnetici. La teoria da svilupparsi si fonda - come ogni altra elettrodinamica - sulla cinematica dei corpi rigidi, poiché le affermazioni di una tale teoria riguardano relazioni tra corpi rigidi (sistemi di coordinate), orologi e processi elettromagnetici. La non sufficiente considerazione di queste circostanze è la radice delle difficoltà, con le quali l'elettrodinamica dei corpi in movimento attualmente deve lottare.

I. Parte cinematica

§1. Definizione della simultaneità

Si assuma un sistema di coordinate, nel quale valgano le equazioni meccaniche di Newton. Chiamiamo questo sistema di coordinate il "sistema a riposo", per distinguerlo nel discorso dai sistemi di coordinate che si introdurranno in seguito e per precisare la descrizione.

¹Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik **17**, 891-921 (1905).

Se un punto materiale è a riposo rispetto a questo sistema di coordinate, la sua posizione rispetto a quest'ultimo può essere determinata mediante regoli rigidi utilizzando i metodi della geometria euclidea, e può essere espressa in coordinate cartesiane. Se vogliamo descrivere il *moto* di un punto materiale, diamo i valori delle sue coordinate in funzione del tempo. Ora si deve tenere ben in mente che una descrizione matematica siffatta ha un significato fisico solo quando si sia detto chiaramente in precedenza che cosa si intende qui per "tempo". Dobbiamo tener presente che tutte le nostre asserzioni nelle quali il tempo gioca un ruolo sono sempre asserzioni su *eventi simultanei*. Quando per esempio dico: "Quel treno arriva qui alle ore 7," ciò significa: "Il porsi della lancetta piccola del mio orologio sulle 7 e l'arrivo del treno sono eventi simultanei".²

Potrebbe sembrare che tutte le difficoltà che riguardano la definizione del "tempo" si potrebbero superare se sostituissi al posto di "tempo" l'espressione "posizione della lancetta piccola del mio orologio". Una definizione del genere basta infatti quando si tratta di definire un tempo indipendentemente dalla posizione nella quale si trova l'orologio; ma la definizione non basta più quando si tratta di collegare temporalmente serie di eventi che abbiano luogo in posti diversi, ovvero - il che è equivalente - valutare temporalmente eventi che abbiano luogo in posti lontani dall'orologio.

Potremmo altresì accontentarci di valutare temporalmente gli eventi mediante un osservatore che si trovi assieme all'orologio nell'origine delle coordinate, e che associ la corrispondente posizione delle lancette dell'orologio ad ogni segnale luminoso che giunga a lui attraverso lo spazio vuoto, e che rechi testimonianza dell'evento da valutare. Una tale coordinazione porta con sé tuttavia l'inconveniente di non essere indipendente dal punto di vista dell'osservatore che accudisce all'orologio, come sappiamo dall'esperienza. Giungiamo ad una determinazione molto più pratica mediante la seguente considerazione.

Se nel punto A dello spazio si trova un orologio, un osservatore che si trovi in A può valutare temporalmente gli eventi nell'intorno immediato di A osservando le posizioni delle lancette dell'orologio simultanee con questi eventi. Se anche nel punto B dello spazio si trova un orologio - aggiungeremo, "un orologio esattamente con le stesse proprietà di quello che si trova in A " - allora una valutazione temporale degli eventi nell'intorno immediato di B da parte di un osservatore che si trovi in B è pure possibile. Non è possibile tuttavia, senza un'ulteriore deliberazione, confrontare temporalmente un evento in A con un evento in B ; finora abbiamo definito soltanto un "tempo di A " ed un "tempo di B ", ma non abbiamo definito alcun "tempo" per A e B complessivamente. Quest'ultimo tempo può essere definito soltanto quando si assuma *per definizione* che il "tempo" che la luce impiega per andare da A a B è uguale al "tempo" che essa impiega per andare da B ad A . Ossia, parta un raggio di luce al "tempo di A " t_A da A verso B , sia al "tempo di B " t_B riflesso verso A e ritorni ad A al "tempo di A " t'_A . I due orologi per definizione camminano sincroni quando

$$t_B - t_A = t'_A - t_B.$$

Assumiamo che questa definizione di sincronismo sia possibile in modo esente da contraddizioni, che quindi valgano le condizioni:

²Non si considererà qui l'imprecisione che si introduce nel concetto di simultaneità di due eventi (approssimativamente) nello stesso posto e che viene superata con l'astrazione.

1. Quando l'orologio in B cammina sincrono con l'orologio in A , l'orologio in A cammina sincrono con l'orologio in B .

2. Quando l'orologio in A cammina sincrono sia con l'orologio in B che con l'orologio in C , gli orologi in B e C camminano in modi mutuamente sincroni.

Abbiamo così determinato con l'aiuto di certe esperienze fisiche (pensate) che cosa si debba intendere per orologi a riposo che camminano sincroni e si trovano in posti separati e con questo evidentemente abbiamo ottenuto una definizione di "simultaneo" e di "tempo". Il "tempo" di un evento è l'indicazione simultanea con l'evento di un orologio a riposo che si trova nella posizione dell'evento, che cammina sincrono con un determinato orologio a riposo, e cioè per tutte le determinazioni di tempo compiute con l'orologio stesso.

Assumiamo secondo l'esperienza che la quantità

$$\frac{2\overline{AB}}{t'_A - t_A} = V$$

sia una costante universale (la velocità della luce nello spazio vuoto).

È essenziale che noi abbiamo definito il tempo mediante orologi a riposo nel sistema a riposo; chiamiamo il tempo ora definito, a motivo di questa associazione con il sistema a riposo "il tempo del sistema a riposo".

§2. Sulla relatività delle lunghezze e dei tempi.

Le considerazioni seguenti si fondano sul principio di relatività e sul principio della costanza della velocità della luce, principi che definiamo nel modo seguente.

1. Le leggi secondo le quali evolvono gli stati dei sistemi fisici sono indipendenti da quale di due sistemi di coordinate che si trovino uno rispetto all'altro in moto traslatorio uniforme queste evoluzioni di stato siano osservate.

2. Ogni raggio di luce si muove nel sistema di coordinate "a riposo" con la velocità fissa V , indipendentemente dal fatto che questo raggio di luce sia emesso da un corpo a riposo o in moto. Si ha

$$\text{Velocità} = \frac{\text{Cammino della luce}}{\text{Durata}},$$

dove la "durata" va intesa nel senso della definizione del §1.

Sia dato un regolo rigido a riposo; esso abbia, se misurato con un campione di lunghezza ugualmente a riposo, la lunghezza l . Pensiamo ora che l'asse del regolo giaccia nella direzione dell'asse X del sistema di coordinate a riposo, e che sia impartito in seguito al regolo un moto di traslazione parallela uniforme (velocità v) lungo l'asse X nel senso delle x crescenti. Ci interroghiamo ora riguardo alla lunghezza del regolo *in moto*, che pensiamo trovata mediante le due operazioni seguenti:

a) L'osservatore si muove insieme con il campione di lunghezza anzidetto assieme al regolo da misurare e misura direttamente con l'accostamento del campione la lunghezza del regolo, proprio come quando regolo da misurare, osservatore e campione di lunghezza si trovano a riposo.

b) L'osservatore determina mediante orologi a riposo disposti nel sistema a riposo, sincronizzati secondo §1, in quali punti del sistema a riposo si trovano l'inizio