

## La relatività

Le teoria della relatività ristretta nacque come tentativo di spiegazione di quanto accade nel campo dell'elettromagnetismo. Nel diciottesimo e al principio del diciannovesimo secolo, la teoria dell'elettricità era completamente dominata dall'analogia newtoniana. Due cariche elettriche si attraggono se sono di segno differente e ma si respingono se sono dello stesso segno; in ciascun caso la forza varia con l'inverso del quadrato della distanza come nel caso della gravità. Questa forza era concepita come azione a distanza, fino a che **Faraday**, in alcuni notevoli esperimenti, dimostrò quale fosse l'effetto del mezzo interposto. Fu però **Clerk Maxwell** il primo a dare una forma matematica ai risultati indicati dagli esperimenti di **Faraday** e fornì una serie di ragioni per pensare che la luce sia un fenomeno elettromagnetico, consistente in onde elettromagnetiche. Si poteva dunque supporre che l'**etere**, che da lungo tempo si pensava che fosse il mezzo di trasmissione della luce, fosse anche il mezzo per la trasmissione degli effetti elettromagnetici. La correttezza della teoria di Maxwell sulla luce fu dimostrata dagli **esperimenti di Hertz** per la produzione di onde elettromagnetiche. Abbiamo fin qui un trionfale resoconto di progressi, nel quale la teoria e la sperimentazione assumono alternativamente il ruolo di guida.

Il movimento scientifico culminato con Hertz era un movimento tendente a rendere tutto continuo. **L'etere era continuo, le onde che si muovevano nell'etere erano continue.** Sopravvenne poi la scoperta della struttura atomica della materia e della **struttura discontinua degli atomi stessi** costituiti da protoni, neutroni ed elettroni. La scoperta della struttura frazionata della materia è inseparabile dalla scoperta di altri **fenomeni quantistici** come le righe degli spettri atomici.

I problemi affrontati dalla teoria della relatività ristretta sono messi in luce dall'**esperimento di Michelson e Morley**. Ammettendo l'esattezza della teoria di Maxwell sull'elettromagnetismo, avrebbero dovuto manifestarsi **determinati riscontrabili effetti del moto attraverso l'etere**; in realtà non se ne manifestava nessuno e divenne indispensabile **escogitare qualche teoria questa ed altre incongruenze**.

La teoria di Maxwell si riduceva ad alcune equazioni, note come "**equazioni di Maxwell**" che, attraverso tutte le rivoluzioni della fisica, sono rimaste nei secoli valide accrescendo la loro importanza e la propria validità, dato che gli argomenti iniziali di Maxwell in loro favore erano così deboli che l'esattezza dei risultati da lui raggiunti va ascritta in pratica all'intuizione. Lorentz assunse che le equazioni di Maxwell siano valide solo in un sistema privilegiato, **quello in cui l'etere è fermo**. Ma allora come trascrivere le equazioni per un altro sistema in moto rispetto al primo? Lorentz si rese conto che ben presto del fatto che ogni modifica nella forma di quelle equazioni avrebbe comportato che negli altri sistemi di riferimento le leggi (di natura sperimentale) dell'elettromagnetismo sarebbero diverse e da ciò sarebbe seguita la possibilità di rivelare lo stato di moto rispetto all'etere. Ma, pensò Lorentz, se tutti gli esperimenti volti a rivelare lo stato di moto della Terra rispetto all'etere avevano dato esito negativo, solo un'ipotesi poteva essere sostenuta: quello secondo cui esistono **delle trasformazioni diverse da quelle galileiane che lasciano inalterate le equazioni di Maxwell**. Nel 1904 Lorentz scrisse in forma definitiva queste trasformazioni che, oltre a coinvolgere le coordinate spaziali, per garantire il risultato corretto prevedono una **trasformazione anche per il tempo**. Egli tuttavia non attribuì significato fisico a questo "tempo modificato"; lo chiamò **tempo locale** ma, come scrisse egli stesso anni dopo la pubblicazione della relatività:

*".. Io non pensai mai che questo tempo avesse niente a che fare con il tempo reale. Questo tempo reale era per me ancora rappresentato dalla più antica nozione classica di tempo assoluto, indipendentemente da ogni sistema di riferimento. Esisteva per me un solo tempo vero: consideravo la mia trasformazione del tempo solo come un'ipotesi di lavoro euristico, di modo che la teoria della relatività è davvero opera solo di Einstein..."*

Le leggi di trasformazione, che portano il suo nome, furono formulate assai prima delle teorie sulla contrazione dei tempi e la dilatazione delle lunghezze. Lorentz giustificava questa contrazione solo come una conseguenza delle modificazione che subivano gli strumenti di misura quando cambiava il loro stato di moto rispetto al sistema di riferimento assoluto (cioè quello in cui l'etere è in quiete). Egli anticipò i risultati di Einstein sulla relatività ristretta, eppure non seppe capirne il senso fisico.

Einstein comprese che, quando ci si muove a velocità prossime a quelle della luce, spazio e tempo subiscono delle effettive trasformazioni che non li rendono più entità assolute, o addirittura metafisiche. Se si dava credito all'esperienza di Michelson, **una sola cosa appariva costante nel passare da un sistema di riferimento ad un altro: la velocità della luce**, uguale nella direzione del moto della Terra che in direzione opposta. Egli partì proprio da qui, assumendo come **postulato** che, non lo spazio né il tempo, ma  $c$  sia in variante per tutti gli osservatori.

**Con la teoria della relatività ristretta, Einstein si propose di dimostrare come i fenomeni elettromagnetici possono non essere influenzati dal moto uniforme attraverso l'etere, se un etere c'è.**

Nato ad Ulm il 14 marzo 1879, Albert Einstein trascorse l'adolescenza a Monaco di Baviera, dove il padre dirigeva una piccola azienda elettrochimica. Acquistata la cittadinanza svizzera, s'iscrisse al Politecnico di Zurigo e vi conseguì la laurea nel 1900. S'impiegò subito all'Ufficio Brevetti di Berna, dedicando alla ricerca i ritagli di tempo lasciati dai suoi impegni d'ufficio e trascurando in una certa misura la letteratura scientifica contemporanea. Tuttavia si pose subito in grande evidenza per i suoi lavori giovanili di termodinamica. Nel **1905** pubblicò tre fondamentali scritti: sulla teoria dei quanti che gli valse il premio Nobel per la fisica nel 1921; sul moto browniano; sulla relatività, a cui accenneremo tra poco. Nel 1909 ottenne la cattedra di fisica teorica nel Politecnico di Zurigo, nel 1913. Dimesso dalla cattedra e privato della cittadinanza tedesca perché ebreo e pacifista, fu nominato Professore nell'Università di Princeton dove morì il 18 aprile 1955.

Il primo concetto tradizionale che Einstein sottopone a critica è il concetto di tempo, cominciando dal concetto di **contemporaneità** di due avvenimenti. La meccanica classica riteneva che la contemporaneità di due eventi, avvenuti nelle immediate vicinanze di A e B, si potesse verificare trasportando l'orologio da un punto all'altro e, neppure si chiedeva se il moto dell'orologio ne alterasse il ritmo. Ciò evidentemente prendeva in considerazione una velocità infinita della luce. Einstein riesce a dare il criterio di simultaneità per due avvenimenti che avvengono nei punti lontani A e B dello stesso sistema di riferimento: sono simultanei due eventi nei punti A e B, se due segnali luminosi partiti da A e B quando si verificano gli eventi giungono contemporaneamente nel punto medio di AB. **Ma questa simultaneità relativa constatata in un sistema non si verifica più in un altro sistema in moto rispetto al primo.** Se un osservatore giudica simultanei due avvenimenti del sistema di cui fa parte, un altro osservatore animato di moto traslatorio uniforme rispetto al primo, non li giudica simultanei. La simultaneità dunque è un concetto relativo all'osservatore. Einstein illustrò questo concetto con un esempio divenuto ormai classico: una strada ferrata AB sulla quale viaggia un lunghissimo treno A'B' con velocità  $v$ . Sia M' il punto medio del treno A'B' coincidente col punto medio M di strada ferrata AB. Due segnali lanciati rispettivamente da A a B arrivino contemporaneamente in M: essi non arrivano simultaneamente in M' ma il segnale lanciato da B arriva prima del segnale lanciato da A, se il treno si muove nel senso da A a B. Pertanto gli eventi sono simultanei per l'osservatore in M sulla strada ferrata, ma sono successivi per l'osservatore M' sul treno.

Il punto realmente difficile da superare, per risolvere il problema, riguardava il tempo. Era necessario introdurre la nozione di **tempo "proprio" ed abbandonare la vecchia convinzione dell'esistenza di un unico tempo universale.** Le leggi quantitative dei fenomeni elettromagnetici sono espresse dalle equazioni di Maxwell e si è constatato che queste equazioni sono vere per qualsiasi osservatore, comunque egli si muova. È un elegante problema matematico **scoprire quali differenze ci debbono essere tra le misurazioni compiute da un osservatore e le misurazioni compiute da un altro, perché nonostante il loro moto relativo, possano verificare la validità delle medesime equazioni.** La risposta è data dalla **"trasformazione di Lorentz"**, elaborata come formula da Lorentz, ma interpretata e resa comprensibile da Einstein.

La **"trasformazione di Lorentz"** ci dice **quale calcolo di distanze e di tempi dovrà essere compiuto da un osservatore di cui sia noto il moto relativo, quando siano dati tempi e distanze calcolati da un altro osservatore.** Facciamo un esempio. Supponiamo che vi troviate su un treno che corre verso est su binari perfettamente dritti, a una velocità pari a tre quinti della velocità della luce. Supponiamo che misuriate la lunghezza del treno e che troviate che è lungo cento metri. Supponiamo che un uomo che vi vede passare

riesca , con accurati metodi scientifici, a calcolare la lunghezza del treno. Se lavora bene troverà che il treno è lungo ottanta metri. Tutto quello che si trova sul treno gli apparirà, a confronto col vostro modo di vedere, **accorciato nel senso della marcia del convoglio**. I piatti del vagone ristorante, che a voi appaiono come normali piatti rotondi, gli sembreranno ovali, gli sembrerà cioè che la dimensione dei piatti nella direzione in cui cammina il treno sia pari soltanto ai quattro quinti della dimensione dei piatti parallela alla larghezza del treno. Tutto ciò è reciproco. Supponiamo che vediate dal finestrino un uomo con la canna da pesca lunga, secondo lui, cinque metri. Se costui tiene la canna verticale, la vedrete lunga come la vede lui; lo stesso , se la tiene orizzontale ad angolo retto rispetto alla ferrovia. Ma se la tiene orizzontale nel senso della ferrovia, la canna vi apparirà lunga soltanto quattro metri. Tutte le lunghezze nella direzione del moto sono diminuite del venti per cento , sia per coloro che guardano nel treno dal di fuori, sia per coloro che guardano dal treno verso l'esterno.

Ma gli **effetti relativi al tempo** sono ancora più strani. Questo aspetto è stato spiegato con lucidità quasi ideale da **Eddington** che pone l'ipotesi di un aviatore che stia volando , relativamente alla Terra, a una velocità di duecentosessantamila chilometri ogni secondo. " Se osserviamo attentamente l'aviatore, dedurremo che è insolitamente **lento nei movimenti**, e tutto quello che succede nel velivolo che si muove con lui ci apparirà analogamente rallentato, come se il tempo avesse dimenticato di scorrere . Il moderato rallentamento di cui abbiamo parlato sussiste anche tenendo conto del tempo di trasmissione della luce. Ma anche qui entra in gioco la reciprocità, perché secondo il modo di vedere dell'aviatore siamo noi che viaggiamo sotto di lui a duecentosessantamila chilometri ogni secondo, e quando anche avrà tenuto conto del tempo di trasmissione della luce resterà sempre dell'opinione che siamo degli indolenti. La nostra sigaretta dura il doppio della sua" Ciascuno pensa che la sigaretta dell'altro duri il doppio della propria.

La faccenda del tempo è piuttosto intricata, per la ragione che gli avvenimenti che uno giudica simultanei, un altro li considera separati da un certo lasso di tempo. Facciamo un esempio per vedere come una cosa funzioni. Prendiamo in considerazione degli eventi che accadono in un punto fisso della Terra, e chiediamoci quanto i viaggiatori di un treno, che viaggia dritto verso est a una velocità pari a tre quinti della velocità della luce, li giudicheranno successivi all'inizio del viaggio. La risposta è che entrerà in gioco il rallentamento di cui parla Eddington; in questo caso, quella che sembra un'ora della persona ferma lungo la ferrovia, sembrerà un'ora e un quarto alla persona che lo guarda dall'esterno del treno. Reciprocamente , quella che sembra un'ora nella vita di colui che sta sul treno, sembrerà un'ora e un quarto alla persona che lo guarda dall'esterno del treno. Ciascuno, osservando la vita dell'altro, ne prolunga i periodi di tempo di un quarto, rispetto alla durata che hanno per chi li sta vivendo. **La proporzione è la stessa per i tempi e per le lunghezze.**

Uno degli scopi essenziali di tutta la teoria, è di confermare che la velocità della luce sarà la stessa per tutti gli osservatori, comunque essi si muovano . Questo fatto, stabilito sperimentalmente, era incompatibile con le vecchie teorie , ed ha reso assolutamente indispensabile l'accettazione di alcuni stupefacenti concetti.

Vi è un altro aspetto di grandissima importanza nella teoria che stiamo considerando: per quanto le distanze e i tempi siano variabili per i diversi osservatori, possiamo dedurre il dato che si chiama "intervallo" e che è lo stesso per tutti gli osservatori. L'intervallo rappresenta un'autentica relazione fisica tra i due eventi, mentre il tempo e la distanza non lo sono.

La relatività del tempo porta come inevitabile conseguenza la relatività della distanza tra due punti. Infatti supposto di voler determinare la lunghezza di un regolo in moto, un osservatore che si sposti col regolo riporterà su di esso , quante volte occorra, l'unità di misura; un altro osservatore fermo , invece, dovrà determinare le posizioni degli estremi del regolo in un certo istante e poi misurare la distanza, col proprio metro, tra i due segni. Le due operazioni sono diverse e diversi perciò saranno i risultati : quindi anche la distanza tra i due estremi del regolo dipende dai sistemi di riferimento , ossia dal moto relativo de due osservatori.

### *La relatività ristretta*

Einstein pone a base della nuova meccanica due principi che egli enuncia così:

**principio di relatività**: (poi detta ristretta) : le leggi che regolano tutti i fenomeni fisici sono le stesse per due osservatori animati di moto rettilineo uniforme uno rispetto all'altro. Ciò in altre parole significa che con nessun esperimento meccanico o elettromagnetico un osservatore può scoprire se egli è in quiete o in moto rettilineo uniforme. Il principio classico di relatività affermava la stessa cosa, ma limitatamente ai fenomeni meccanici, supponendo che l'osservatore potesse scoprire il suo stato di moto mediante esperienze ottiche o elettromagnetiche.

**principio della costanza della velocità della luce**: la luce si propaga nel vuoto con una velocità costante in tutte le direzioni, indipendentemente dalle condizioni di moto della sorgente e dell'osservatore. Col secondo postulato si spiega immediatamente il risultato negativo dell'esperienza di Michelson, nel 1905 ignota ad Einstein.

I due nuovi principi conducono Einstein, attraverso una trattazione matematica, a ritrovare la condizione di Lorentz per un corpo in moto osservato da un sistema in quiete e reciprocamente per un corpo in quiete osservato da un sistema in moto: se la velocità del corpo mosso o del sistema in moto raggiunge quella della luce nel vuoto, la contrazione è massima e il corpo si contrae in figura superficiale. Ne segue che **una velocità maggiore della luce non ha alcun significato fisico**; ossia codesta velocità è la massima raggiungibile in natura. Va osservato che in un primo tempo la contrazione aveva avuto per Lorentz e per Poincaré un carattere artificiale, si trattava in sostanza di un espediente provvisorio per aggiustare le cose; successivamente Lorentz credette "reale" la contrazione, che ritenne provata proprio dall'esperienza di Michelson. Per la relatività ristretta invece la contrazione non è un artificio o un'apparenza, ma una **conseguenza inevitabile della dipendenza della lunghezza di un regolo dal sistema di riferimento**. La contrazione lorentziana porta come conseguenza che un orologio in moto ritarda rispetto ad uno fisso; ossia, se un fenomeno ha una certa durata per un osservatore mobile, essa appare allungata ad un osservatore fisso e questo fenomeno apparirebbe di durata infinita qualora il mobile si muovesse con velocità della luce; è questo il celebre "paradosso degli orologi".

Supponiamo un viaggiatore interstellare lanciato dalla Terra con una velocità pari a un ventimillesimo della velocità della luce. Il viaggiatore procede in linea retta per un anno (secondo il suo orologio), poi se ne torna indietro, approdando sulla Terra dopo due anni. Al suo ritorno trova, applicando la formula relativistica della dilatazione del tempo, gli abitanti della terra invecchiati di cent'anni (secondo l'orologio della terra, cioè trova altre generazioni di uomini). Ma ormai è stato messo in luce che si tratta di un ragionamento capzioso. E' vero che il viaggiatore interstellare, quando ha raggiunto all'andata e al ritorno, la cadenza del moto uniforme è legato ad un sistema di riferimento galileiano; ma prima, nella fase di lancio, nell'invertire la rotta, nell'atterraggio, egli è soggetto a un'accelerazione e non fa quindi parte di un sistema galileiano: in quelle tre fasi a lui non è applicabile la teoria della relatività ristretta.

Il principio di **costanza della velocità della luce** è in netto contrasto coi principi della meccanica classica. Esso pone un limite superiore alla velocità, mentre la meccanica classica considerava anche velocità infinite; in conseguenza il nuovo principio cambia le regole di composizione della velocità della meccanica classica: la velocità della luce per esempio, aggiunta alla velocità della sorgente, dà in ogni caso la stessa velocità della luce (esempio della scala mobile). La formula classica di composizione di due velocità nella stessa direzione era molto semplice: essa diceva che la velocità risultante è la somma algebrica delle velocità componenti; la formula relativistica trovata da Einstein è più complessa e tale che **per piccole velocità, lontane dalla velocità della luce, essa praticamente equivale alla formula classica, ma se ne discosta sempre più, via via che aumentano le velocità componenti**. La meccanica classica appare dunque una meccanica di prima approssimazione.

Una delle prime conseguenze dei postulati della relatività è che tutte le leggi fisiche o, meglio, le loro espressioni matematiche rimangono invariate per una trasformazione di Lorentz. Si formula così un criterio per stabilire se una legge fisica rientra nello schema relativistico: vi rientra se la sua espressione matematica sia tale che essa rimanga della stessa forma per una trasformazione di Lorentz. Si trova così per esempio che rientrano nello schema relativistico le equazioni di Maxwell, ma non la legge di gravitazione universale.

Naturalmente il postulato fondamentale della meccanica classica – la proporzionalità tra forza ed accelerazione- viene profondamente mutato nella nuova meccanica. Senza ricorrere a sviluppi matematici, si può intravedere la necessità di questo mutamento pensando che, se un corpo raggiungesse la velocità della luce, nessuna forza la potrebbe più aumentare, ossia in queste condizioni di moto la forza non produce più accelerazione. **Nella meccanica relativistica quanto più la velocità di un corpo è grande, tanto più difficile è accrescerla. E siccome codesta resistenza all'accelerazione è la massa del corpo, ne viene che la massa di un corpo aumenta con la velocità. Mentre la meccanica classica considerava la massa come una costante intrinseca del corpo , la relatività la considera invece variabile e crescente con la velocità.** La massa che considera la meccanica classica è la massa relativistica di riposo. Non è possibile rilevare sperimentalmente le variazioni di massa se non per grandi velocità prossime a quella della luce. Gli elettroni sono pertanto proiettili ideali per queste verifiche ed oggi si può dire che la variazione relativistica della massa è verificata quotidianamente nei fenomeni di fisica nucleare.

Nello stesso anno mirabile 1905, dalla variabilità della massa con la velocità, Einstein dedusse per via matematica una conseguenza di straordinaria importanza: più tardi egli ne dette una spiegazione intuitiva, che ora esporremo. Supponiamo più sferette in quiete in una scatola; se si applica alla scatola una forza esterna, essa assume una certa accelerazione dipendente dalla massa di riposo delle sferette. Ma se le sferette si mettessero in moto in tutti i sensi, come le molecole di un gas e con velocità prossime a quelle della luce, la forza esterna produrrebbe lo stesso effetto? Evidentemente no, perché la velocità delle sferette resiste al moto, come la massa. Il caso particolare fu brillantemente generalizzato da Einstein a tutte le forme di energia: **l'energia sotto qualunque forma si comporta come la materia, non c'è differenza essenziale tra massa ed energia: l'energia possiede massa e la massa rappresenta energia.** La fisica classica aveva introdotto due sostanze, la materia e l'energia, e aveva enunciato due corrispondenti leggi di conservazione; la relatività riduce ad una sola la sostanza e a una sola la legge di conservazione di massa- energia. Massa ed energia si trasformano l'una nell'altra con un ben determinato rapporto, data la formula relativistica  $E = mc^2$  . La formula fu data da Einstein per la prima volta nel 1907.

L'equivalenza tra massa ed energia sembrò la proposizione più paradossale della relatività ma questa veduta relativistica si dimostrò tra le più feconde; il pubblico generico ne ebbe conferma in un evento terrificante: la bomba di Hiroshima.