DA ARISTOTELE AD EINSTEIN

IL LUNGO VIAGGIO DELLA FISICA
DAL SISTEMA GEOCENTRICO ALLA RELATIVITA'

di Giovanni Ruffino (Genova)

Un veloce viaggio attraverso la storia della Fisica, da Aristotele a Copernico, Galileo, e Newton, proseguendo fino alla fisica moderna di Lorentz ed Einstein, che ci porta dal moto assoluto del sistema geocentrico al moto relativo di Galileo, per proseguire fino ai fenomeni che si verificano quando la velocità degli oggetti si avvicina a quella della luce, descritti dalla moderna teoria della relatività.

- Questo scritto appartiene al sito www.ricercaetereperduto.it. La lettura è libera. -

La Fisica moderna inizia la sua storia negli ultimi anni del Cinquecento con gli studi, gli esperimenti e l'opera divulgativa di Galileo.
Nei tre secoli successivi la scienza ha avuto finalmente uno sviluppo grandioso scoprendo innumerevoli leggi, allora ritenute perfette ed immutabili. Ma tra la fine dell'Ottocento e i primi anni del Novecento, con gli studi di Fitzgerald, Lorentz, Poincaré, Einstein ed altri, apparve evidente che le leggi della fisica classica non sono applicabili ai sistemi che comprendono velocità non trascurabili rispetto alla velocità della luce.
Nel 1905 Einstein espose la teoria della Relatività Ristretta, detta anche speciale, che tratta i sistemi di riferimento inerziali, cioè in moto rettilineo uniforme. Un ulteriore passo in avanti arrivò nel 1916, sempre per merito di Einstein, con la teoria della Relatività Generale che comprende i sistemi di riferimento accelerati e la curvatura dello spazio per effetto delle masse dei corpi.
Prima di dedicarci a questi temi è necessario considerare, seppur in modo molto sintetico, l'evoluzione storica dei concetti della fisica prima di Galileo.

Aristotele (384–322 a.C.), molto apprezzato anche nel Medioevo e definito da Dante - maestro di color che sanno - sosteneva che per ottenere il moto rettilineo uniforme fosse necessario applicare ad un oggetto una forza costante (e noi naturalmente sappiamo che è sbagliato). Dato che lo stato di quiete esiste solo con forze esterne nulle, per gli aristotelici c'era questa differenza importante tra stato di quiete e moto rettilineo uniforme.
Inoltre il moto era sostanzialmente assoluto. Infatti, si supponeva che la Terra, immobile, fosse proprio il centro dell'universo e tutti i moti dovevano essere riferiti ad essa. Questa descrizione dell'universo è detta geocentrica, ed è in accordo con quanto scritto nella Bibbia.

Aristarco di Samo (310 – 230 a.C.) propose il sistema eliocentrico, con il Sole al centro e tutti i pianeti, Terra compresa, che ruotano intorno ad esso, che però venne subito rifiutato dai potenti dell'epoca appunto perché negava la centralità della Terra.
Tolomeo (100 – 175 d.C.) nel secondo secolo d.C. completò la descrizione del sistema geocentrico. La sua opera giunse in Europa attraverso la traduzione araba con il nome di Almagesto e rimase in uso fino a quattro secoli fa.
Dall'epoca di Aristotele, infatti, occorsero circa 19 secoli all'umanità per uscire da questi equivoci, tratti da deduzioni filosofiche, sostenuti dal potere religioso come dogmi e basati solo sull'aspetto apparente degli eventi.
Arrivò il 1530 quando Copernico scrisse il – Comentariolus – un breve lavoro in cui espose nuovamente il sistema eliocentrico, sostenuto da nuove osservazioni astronomiche e da calcoli matematici.
La reazione alla sua opera non si fece attendere; dato che contraddiceva le Sacre Scritture arrivarono subito i fulmini di Martin Lutero, mentre i cattolici sul momento non lo contrastarono. E Copernico, che era un ecclesiastico cattolico polacco, poté continuare le ricerche nel suo osservatorio astronomico. Nel 1543, pochi giorni prima di morire, accettò di far stampare il libro "De revolutionibus orbium coelestium", in cui descrive più ampiamente il sistema eliocentrico.
Giordano Bruno sostenne il sistema copernicano e ne dedusse che l'universo è infinito e che in esso non vi è nessun centro. Aggiunse anche che vi sono infiniti mondi popolati e animati dall'infinito amore di Dio. Finì sul rogo nel 1600.
Nei precedenti secoli bui anche altre persone, rimaste sconosciute, molto probabilmente tentarono di riproporre il sistema eliocentrico di Aristarco, ma non furono ascoltate, oppure anch'esse furono "ridotte al silenzio".
Contro il sistema geocentrico, oltre al moto apparente del Sole intorno alla Terra, c'era anche la questione della - parallasse stellare – cioè la variazione dell'angolo di osservazione di una stella a distanza di sei mesi, quando la Terra occupa sulla sua orbita una posizione diametralmente opposta rispetto alla precedente. Ai tempi di Copernico e di Galileo non era ancora noto che la distanza tra la Terra e le stelle, anche quelle più vicine, è grandissima rispetto al diametro dell'orbita terrestre, e la parallasse della stella più vicina, la Proxima Centauri, è solamente 0,75 secondi d'arco, un angolo talmente piccolo che non era assolutamente possibile valutarlo a quell'epoca. Solamente nell'Ottocento si è riusciti a misurarlo per la prima volta.
Comunque i sostenitori del sistema eliocentrico andarono avanti e nel 1609 Keplero, studiando i dati delle osservazioni di Tico Brahe, riuscì a stabilire che le orbite dei pianeti sono leggermente ellittiche, e non perfettamente circolari, come erano ritenute fino ad allora.
In precedenza, nel 1593 Galileo riuscì finalmente a correggere l'errore di Aristotele e ad esporre la legge d'inerzia, che afferma: un oggetto si muove con moto rettilineo uniforme quando su di esso non agiscono forze esterne, o quando la loro somma è nulla.
Questa, in realtà, è l'espressione molto chiara e concisa formulata da Newton più di mezzo secolo dopo. Comunque, questo fondamentale principio venne scoperto da

Galileo e alcuni anni dopo fu esposto, con una versione più lunga, anche da Descartes (Cartesio). E in seguito da Newton.
Galileo scoprì anche che il moto rettilineo uniforme di un sistema di oggetti, o di un laboratorio, non influisce sui processi meccanici che avvengono in esso. Ora noi sappiamo che non influisce nemmeno su tutti gli altri processi: chimici, elettromagnetici, termici, ottici, ecc. Per quest'aspetto tutti i sistemi di riferimento in stato di quiete o in moto rettilineo uniforme sono equivalenti. Tali sistemi sono detti inerziali o galileiani, appunto in onore del loro scopritore.
Oltre a questo, l'opera di Galileo è importantissima: egli inventò e divulgò il metodo del ragionamento scientifico razionale, portando la scienza ad un approccio completamente nuovo con la natura, basato sui risultati degli esperimenti e delle osservazioni, e completato con applicazioni matematiche.
Mentre prima la scienza, che era sostanzialmente quella di Aristotele, era impostata su deduzioni filosofiche e attribuiva agli oggetti e alle sostanze strane qualità, comprese quelle nobiliari.
Ad esempio, prima dell'intervento di Galileo, Copernico scrive che il Sole si trova al centro perché è un signore risplendente; mentre Newton, dopo Galileo, scrive che il Sole si trova al centro perché ha una massa molto maggiore di quella dei pianeti.
Occorre anche dire che all'epoca di Galileo erano già disponibili strumenti di misura di lunghezze, di pesi e del tempo abbastanza precisi, che mancavano, specialmente gli orologi, nei secoli precedenti.
Galileo fu anche il primo a utilizzare il cannocchiale in astronomia. Con i miglioramenti da lui stesso apportati riuscì a fare le prime scoperte, come i quattro satelliti principali di Giove, e altre osservazioni importanti. Egli fu anche un grande divulgatore e scrisse numerose opere, tra queste uno dei più famosi capolavori scientifici di tutti i tempi, il - Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo - con cui demolì per sempre le teorie di Aristotele e Tolomeo e contribuì all'affermazione del sistema copernicano.
Per questo nel 1633 fu processato a Roma dal Sant'Uffizio e venne costretto ad abiurare solennemente la teoria eliocentrica. Così riuscì ad evitare il rogo e fu condannato "solamente" al carcere a vita. La pena fu subito commutata in isolamento perpetuo, dapprima a Roma, poi a Siena, e infine nella sua villa di Arcetri, dove morì nel 1642.
Ma il suo pensiero era ormai diffuso in Europa e con il nuovo metodo di studio e con il principio d'inerzia, nacque la meccanica classica,
La nuova strada aperta da Galileo fu presto percorsa da altri grandi, Newton su tutti. Il nuovo metodo venne esteso anche agli altri campi della scienza e iniziò una serie incessante di scoperte in tutte le discipline scientifiche.
Ritorniamo brevemente ad Aristotele e al concetto errato del moto rettilineo uniforme ottenuto mediante una forza esterna. E' evidente che l'errore è particolarmente ingenuo, perché bastava considerare una freccia scagliata da un arco per capire subito che una forza esterna, in realtà, accelera l'oggetto.
Newton, infatti, espose la celebre equazione $F = m \cdot a$
che esprime in modo chiarissimo questa proprietà delle forze.

Egli scoprì anche la legge della gravità : $F = \frac{G \cdot M' \cdot M''}{R^2}$

Questa equazione è importantissima e utilissima perché permette di interpretare il moto dei pianeti intorno al Sole e di effettuare altri calcoli astronomici. Ma occorre sottolineare che essa non è la spiegazione fisica della forza di gravità; nel senso che l'equazione esprime solo quello che succede, non il perché succede.
Newton, infatti, in un primo tempo disse di - non fingere ipotesi - sulla natura fisica della forza. Scrisse anche nei Mathematical Principles che è assolutamente sbagliato attribuire alle masse la proprietà di esercitare forze a distanza sulle altre masse senza alcun "mezzo" interposto, come sostenevano alcuni filosofi dell'epoca.
E qualche tempo dopo, nelle Quaestiones dell'Optics (Query 21) sostenne che la ragione fisica della forza gravitazionale risiede nella differenza di densità del "mezzo" (etere) che circonda le masse e che riempie tutto lo spazio.

Con la caduta dell'ipotesi dell'immobilità e della centralità della Terra venne anche a mancare il riferimento assoluto, o privilegiato, ad essa legato, ed era posto il problema della molteplicità delle velocità e delle traiettorie di uno stesso corpo relativamente a più riferimenti. Ad esempio il moto della Luna rispetto alla Terra ha una velocità e una traiettoria, e rispetto al Sole un'altra velocità e un'altra traiettoria, che sono anch'esse vere.
Ne consegue il carattere relativo delle velocità e, direttamente, anche la relatività fisica dell'energia cinetica, dato che essa è funzione del quadrato della velocità secondo la nota formula:

$E = \frac{1}{2}mv^2$ e dipende quindi dall'osservatore.

D'altra parte era già ben chiaro, anche prima di Galileo, che una carrozza in corsa ha una valenza energetica completamente diversa, se l'osservatore è un passeggero che viaggia sopra di essa, o se invece si trova sulla strada. Quindi ogni velocità, traiettoria ed energia cinetica non deve essere intesa in senso assoluto, ma solamente in senso relativo all'osservatore.
Per lo studio del moto di un corpo è necessario conoscere le relazioni spazio-temporali tra quel corpo e il corpo di riferimento, o, più semplicemente, tra il corpo e l'osservatore, intendendo anche un osservatore astratto, puramente concettuale, però intendendo che egli è immaginariamente dotato di tutti gli strumenti necessari per determinare la posizione dell'oggetto.
Per questo scopo inoltre si definisce un sistema di coordinate di riferimento solidale con l'osservatore, e la posizione dell'oggetto in moto è definita da tre coordinate spaziali. Poi è necessario possedere un orologio per collegare la variazione di posizione dell'oggetto al trascorrere del tempo e, a questo punto, il moto è completamente determinato nello spazio e nel tempo, ed è anche possibile scrivere le equazioni matematiche che lo definiscono.

Non avendo più un corpo centrale ritenuto fermo, per definire un sistema di riferimento assoluto rimaneva solo la possibilità di vincolarlo all'etere universale, il mezzo immobile che si riteneva riempisse tutto lo spazio, e che in varie forme è stato accettato dai maggiori fisici della storia, Newton, Faraday, Maxwell, Lorentz e Michelson compresi. Tuttavia, malgrado i numerosi esperimenti, il principale dei quali fu quello di Michelson-Morley, non si è ancora riusciti ad definire "il moto relativo all'etere" o, semplicemente, relativo allo spazio, osservando solamente quello che succede dentro il laboratorio.
Il concetto di spazio è molto importante ed è stato studiato durante tutta la storia del pensiero umano. Ma nei primi decenni del Novecento lo spazio venne identificato, molto sbrigativamente, con il vuoto inteso proprio come - il nulla -.
In seguito, invece, è emerso che lo spazio è partecipe degli avvenimenti fisici, e non è un semplice scenario passivo. Perciò l'argomento viene ripreso più avanti, quando avremo esposto nuovi elementi, come il fattore gamma e la curvatura dello spazio.
Anche dell'esperimento di Michelson-Morley è scritto più avanti, ma è bene anticipare che è fatto eseguendo misure solamente su quello che succede dentro il laboratorio, senza guardare all'esterno (come per gli esperimenti concettuali che Galileo aveva proposto di effettuare dentro la stiva della famosa nave).
Dato che non è mai stato notato nessun effetto della velocità della Terra su quelle misure, si stabilì che da questo punto di vista tutti i sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme sono equivalenti, appunto perché l'osservatore può eseguire tutti gli esperimenti possibili dentro il proprio laboratorio che non noterà nessun effetto della sua velocità.
Invece**,** se l'osservatore guarda anche all'esterno, e se punta il suo telescopio sulle "stelle fisse" o sulle galassie remote, allora può valutare il proprio stato di moto in base a due fenomeni fisici che sono: l'effetto Doppler e l'aberrazione della luce delle stelle. Infatti Lorentz continuò a credere nell'esistenza di un riferimento assoluto solidale con lo spazio, stabilito per l'appunto con osservazioni esterne.
Recentemente anche l'osservazione della radiazione di fondo evidenzia il moto dell'osservatore rispetto allo spazio, e ci rivela che la Terra si muove a circa 400 km al secondo. Che concorda con la velocità stimata con i due fenomeni precedenti.
Per questo motivo, ai nostri giorni si può sostenere che il sistema di riferimento rispetto al quale la radiazione di fondo è isotropa può essere considerato privilegiato rispetto a tutti gli altri.
In questo modo si eliminano tutti i paradossi, o malintesi, compreso quello dei gemelli, nati dalla mancanza di un riferimento assoluto.
Anche Feynman in - Sei pezzi meno facili - precisa bene che è impossibile definire il proprio stato di moto, a condizione che l'osservatore effettui misure solamente su quello che succede all'interno del laboratorio, e non all'esterno di esso.
Infatti, per l'effetto Doppler si ha che la luce delle stelle viene ricevuta con una frequenza che dipende appunto dalla velocità dell'osservatore.
Mentre l'aberrazione della luce influisce sull'angolo di orientamento del telescopio impiegato per osservare una stella (non giacente sulla direzione della velocità della Terra) in funzione della velocità dell'osservatore terrestre.

E ripetendo le misure dopo sei mesi, quando la velocità della Terra rispetto al Sole si è invertita, sono subito evidenti gli effetti del cambiamento di velocità perché i valori misurati sono diversi dai precedenti.

Occorre notare che tutti i moti ritenuti rettilinei e uniformi che consideriamo, in realtà, sono solo approssimazioni di traiettorie curve, seppur con raggio grandissimo.
Non è difficile vedere che un sistema di riferimento solidale con la Terra non è inerziale. La Terra infatti si muove relativamente al Sole su di un'ellisse con piccola eccentricità, ed è anche dotata di un moto di rotazione attorno ad un proprio asse.
Però, per la maggior parte dei problemi di fisica, il nostro naturale sistema di riferimento può essere considerato inerziale con sufficiente grado di precisione. Infatti la rotazione annuale intorno al Sole avviene su di una curva con raggio medio di circa 150 milioni di chilometri e per intervalli di tempo brevi la traslazione può essere approssimata con dei tratti rettilinei. E la rotazione attorno all'asse polare ha una piccola velocità angolare, un angolo giro nelle 24 ore.
Quest'ultimo movimento è percepibile solamente per alcuni fenomeni: il pendolo di Foucault, la deviazione delle perturbazioni atmosferiche e delle correnti marine, l'erosione prevalente di una delle due rive dei fiumi che si muovono in direzione Nord- Sud. Mentre la rivoluzione intorno al Sole, evidenzia la non inerzialità della Terra quando si deve studiare il moto degli altri pianeti. Per questo scopo il sistema di riferimento Gea non è idoneo; il moto dei pianeti deve essere riferito al sistema di riferimento Helios. In altre parole, è evidente che è ha ragione Copernico e che ha torto Tolomeo.

Riguardo la forza di gravità che agisce sui corpi celesti, la meccanica classica dà per scontata l'ipotesi della istantaneità delle azioni gravitazionali, anche se non è espressamente dichiarato.
In effetti nessuna azione può essere realizzata senza materia, o sostanza di un mezzo, o interazione di particelle; perciò non può essere istantanea.
Per la fisica moderna l'azione reciproca tra oggetti distanti, gravitazionale o elettromagnetica, viene schematizzata (ma non spiegata) con un campo vettoriale e si trasmette da punto a punto con velocità finita: la velocità della luce.
Il concetto del campo fu introdotto nell'Ottocento per merito di Faraday con le sue ricerche sulle forze elettromagnetiche, poi fu esteso anche a quelle gravitazionali, e alle onde elettromagnetiche da Maxwell e Hertz.
A quei tempi i campi e le onde erano intesi come stati fisici dell'etere, allora considerato come una sostanza contenuta dentro lo spazio. Però questo concetto di etere era sbagliato e conduceva a evidenti contraddizioni, perciò venne abbandonato.
E come abbiamo già detto, la fisica del Novecento identificò lo spazio con il - nulla - del vuoto. Ma in questo - nulla - furono lasciati i campi e le onde, che così sono diventati dei concetti astratti privi di ogni sostegno fisico, dei puri formalismi grafici-matematici.
Molte persone sono convinte che per spiegare la forza di gravità sia sufficiente esclamare: - Col campo!- E poi tracciare due vettori su di un foglio di carta.

Ma non è così, perché rimane da definire che cos'è fisicamente il campo nello spazio, e in che modo esso interagisce fisicamente con la materia.
Ma dato che lo spazio viene ancora identificato con il nulla del vuoto, come nel Novecento, allora è impossibile trovare risposte nel nulla. Perciò, per poter spiegare veramente le ragioni fisiche della gravità, prima occorre rivedere l'attuale concetto di spazio.
In questa direzione, un importante passo in avanti lo ha fatto Einstein nel 1916 proponendo la curvatura dello spazio con la teoria della Relatività Generale, come vedremo più avanti.

Per quanto riguarda il tempo dobbiamo considerare se l'osservatore riceve l'informazione di un determinato evento istantaneamente, oppure con un certo ritardo dipendente dalla distanza. Vale a dire se si può valutare la velocità della luce come - tendente all'infinito - oppure no. Galileo cercò di misurarla, ma non essendo dotato di mezzi adeguati, concluse che la sua velocità o è infinita, o è grandissima, intendendo con questo che è milioni di volte maggiore della velocità dei corpi studiati. Con queste ipotesi, il tempo che impiega l'immagine di un evento a raggiungere l'osservatore è assolutamente trascurabile (in matematica si dice: un Δt tendente a zero) , se la distanza tra evento ed osservatore non è immensa. Ne risulta che due osservatori posti in punti diversi riceveranno l'immagine di uno stesso evento (quasi) nello stesso istante. Allora si può pensare ad un tempo assoluto, uguale per tutti i punti dello spazio in esame e per tutti gli osservatori.
La velocità della luce viene indicata con la lettera c, iniziale di - celeritas - (velocità in Latino), e noi sappiamo che non è infinita, ma vale circa 300000 km al secondo. E se stiamo studiando dei moti con velocità non trascurabili rispetto a c, o con distanze molto grandi, allora non possiamo più avvalerci del tempo assoluto.
Pensiamo, ad esempio, ad un oggetto che viaggia con velocità pari ad un decimo di c e ad un osservatore; quando l'oggetto passa per un punto P, che poniamo distante un chilometro dall'osservatore, egli riceve l'informazione che esso si trova in quel punto con un ritardo di $1/300000$ di secondo, durante il quale l'oggetto ha già percorso altri cento metri. Ne consegue che nell'istante in cui l'osservatore crede che l'oggetto si trovi in corrispondenza del punto P, in realtà si trova già cento metri più avanti.
Se nel sistema è presente un altro osservatore, con distanza diversa dal punto P, egli riceverà l'informazione che l'oggetto transita per il punto P in un istante diverso dal precedente.
Un fatto simile si verifica quando le distanze sono molto grandi. Ad esempio, se osserviamo la stella Sirio, distante circa otto anni luce dalla Terra, noi siamo portati a pensare che in quel momento si trovi proprio nel punto in cui la vediamo, ma in realtà occupava quella posizione otto anni fa e ora è un po' scostata. Il discorso vale anche per le altre stelle che sono ancora più distanti. Alcune di queste sono già collassate e non esistono più, però noi continuiamo a vederle come quando erano in vita, e le immagini del loro collasso giungeranno sulla Terra tra molti anni.
Perciò se le distanze, o le velocità, sono molto grandi, allora si deve rinunciare al tempo assoluto.

E' poi importante definire cosa avviene nel passaggio da un sistema di riferimento ad un altro. In termini matematici questo problema viene detto: trasformazione delle coordinate. Si tratta di trovare le equazioni che legano le coordinate di un punto in un sistema di riferimento alle coordinate dello stesso punto rispetto ad un altro sistema di riferimento. Per oggetti che hanno velocità molto minore della velocità della luce e con distanze non troppo grandi, si usano le trasformazioni di Galileo, e questo è il campo della meccanica classica. Mentre per gli oggetti che hanno velocità non trascurabile rispetto a c si devono usare le trasformazioni di Lorentz; questo invece è il campo della moderna teoria della relatività.

Sistemi inerziali galileiani

Come abbiamo appena detto, vengono così definiti i sistemi di riferimento inerziali con velocità molto minori della velocità della luce.
Ad esempio, possiamo stabilire che deve essere $v < 0{,}001c$, oppure $v < 0{,}0001c$, o anche valori minori. Dipende dal grado di precisione richiesto per lo studio del fenomeno che si deve esaminare, perché con il rapporto v/c varia il - fattore gamma - che vedremo nel prossimo paragrafo; e nelle condizioni sopra scritte possiamo ritenere che esso sia uguale all'unità con un accettabile grado di approssimazione.
Dati due osservatori in moto reciproco costante, definiamo due sistemi di coordinate K e K', costituiti da due terne di assi ortogonali, solidali con i due osservatori. Supponiamo inoltre, per maggior chiarezza, di orientare i due assi x e x' lungo la direzione del moto relativo del sistema K' rispetto al sistema K, che avviene con velocità v. Si ha che, uno stesso punto P, nel sistema K' ha le coordinate x',y',z', e nel sistema K ha coordinate x,y,z. Poniamo t = 0 l'istante in cui le due terne coincidono.
Le equazioni di trasformazione delle coordinate tra i due sistemi sono dette trasformate di Galileo:

$$x' = x - v \cdot t \qquad y' = y \qquad z' = z.$$

Per i sistemi galileiani si suppone (si dà per scontato) che il tempo trascorra in modo identico in tutti i sistemi di riferimento, in altre parole il ritmo degli orologi non dipende dalla loro velocità. Inoltre gli eventi vengono percepiti in modo istantaneo in tutti i punti dello spazio esaminato da entrambi gli osservatori, quindi si ammette l'esistenza di un tempo assoluto **t = t'**.
Un'altra ipotesi fondamentale è che la lunghezza dell'unità di misura, cioè del regolo con cui vengono misurate tutte le lunghezze, non vari con lo stato di moto, cioè :
L = L' (vedremo in seguito che queste ultime ipotesi non sono sempre vere, anche se può sembrare poco intuitivo).
Come abbiamo già detto, risulta che le velocità dei corpi, le loro traiettorie e le energie cinetiche sono relative al sistema di riferimento scelto. Tuttavia, nei sistemi galileiani altre grandezze non cambiano: le masse, le forze, le accelerazioni, l'energia

potenziale, sono assolutamente identiche in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Esse sono dette invarianti rispetto alla trasformazione di Galileo, e cosa molto importante, anche le leggi della fisica non dipendono dalla scelta del sistema di riferimento.

Sistemi inerziali con velocità non trascurabile rispetto a c, trasformazioni di Lorentz

Abbiamo appena visto che quando la velocità degli oggetti è trascurabile rispetto a c, si da per scontato che la massa, le lunghezze e il ritmo degli orologi non cambino con la velocità. Con ritmo degli orologi si intende qualunque movimento periodico utilizzabile per misurare il tempo, dal pendolo alle oscillazioni degli atomi.
Queste ipotesi erano ritenute evidenti e incrollabili fino alla fine dell'Ottocento, e molte persone sono convinte che lo siano ancora oggi, ma, in realtà, rappresentano solo l'apparenza delle cose.
Dopo l'esperimento di Michelson – Morley, si ipotizzò per la prima volta che le lunghezze non rimangono immutate quando le velocità non sono troppo piccole rispetto a c. In seguito è stato dimostrato che in queste condizioni avviene quanto segue:

a) l'orologio in moto con velocità v ha un ritmo più lento dell'orologio in quiete:

(1) $\Delta t' = \Delta t / \sqrt{1 - \beta^2}$ con $\beta = v/c$

Questo fatto è detto dilatazione del tempo.

b) la lunghezza di un segmento parallelo alla direzione del moto si contrae:

(2) $L = L_o \cdot \sqrt{1 - \beta^2}$ col L_o lunghezza del segmento fermo o alle basse v.

Questo fenomeno è detto: contrazione dei regoli in moto.

c) la massa di un corpo in moto aumenta con la velocità :

(3) $m = m_o / \sqrt{1 - \beta^2}$

qui m viene chiamata massa relativistica, e m_o massa a riposo, cioè la massa dell'oggetto fermo rispetto all'osservatore.
La carica elettrica invece rimane costante e indipendente da v.
Nelle tre equazioni si nota subito la presenza della stessa radice quadrata,

allora si definisce: $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, questo termine è detto **fattore gamma** , o di Lorentz, e viene indicato appunto con la lettera greca gamma γ. Ed è d'importanza fondamentale per la Teoria della Relatività, tanto che si incontra più volte in tutti i testi di relatività.
L'equazione (3) si trova spesso espressa con il fattore gamma, in questo modo:

(3bis) $m = \gamma \cdot m_o$

Le equazioni 1, 2, 3 sono dette di Lorentz, anche se la seconda è dell'irlandese Fitzgerald.
Dalle tre formule, e in modo più evidente dalla (**3**), risulta che le particelle non possono raggiungere la velocità della luce, perché la radice al denominatore tenderebbe a zero e la massa m all'infinito.
Riguardo le equazioni (3) e (3bis) occorre dire che alcuni testi da diversi anni non le usano più. Però usano le seguenti:
per la quantità di moto: (4) $q = \gamma m v$ e per l'energia: (5) $E = \gamma m c^2$

nelle quali compare sempre il prodotto γm, come nella (3bis). Nelle equazioni (4) e (5) con m si indica la massa a riposo.
Per questi sistemi il fattore gamma diventa maggiore di 1 e può raggiungere anche valori elevati, perciò si deve rinunciare alle trasformazioni di Galileo. Per essi valgono le **Trasformazioni di Lorentz**:

(6) $x' = (x - v \cdot t) \cdot \gamma$; (7) $y' = y$; (8) $z' = z$; (9) $t' = (t - v \cdot x/c^2) \cdot \gamma$

L'ultima equazione evidenzia che il tempo **t'**, assegnato ad un evento dall'osservatore O', dipende dal tempo t e dalla coordinata x misurata dall'osservatore O.
Quindi, quando la velocità non è trascurabile rispetto a c, spazio e tempo non sono più concetti separati, ma sono strettamente interconnessi l'uno all'altro, perciò dobbiamo usare il termine spazio-tempo.
Mentre per i sistemi galileiani, con $v \ll c$, abbiamo $t' = t$, entrambi indipendenti dalle coordinate spaziali. Allora possiamo ancora usare il termine spazio.

Nei primi anni del Novecento molti fisici rimasero scettici di fronte alle equazioni di Lorentz contenenti il fattore gamma, e per molto tempo il mondo della scienza si divise tra chi giudicava questi fatti come apparenti o errati, e chi invece credeva in essi. Questo fino alla loro verifica sperimentale.
Le prime conferme sperimentali arrivarono con gli acceleratori di particelle già nel primo decennio del Novecento per la formula (3) e in seguito furono confermate anche le prime due, tanto che da molti anni questi eventi sono riconosciuti come veri e reali da tutti i fisici del mondo. Ad esempio la dilatazione del tempo è verificata con gli orologi situati sui satelliti del GPS.

Quindi l'osservatore in moto con velocità v non trascurabile rispetto a c, nei confronti dell'osservatore in quiete, ha un orologio con un ritmo più lento, una massa maggiore e un metro che è contratto se è orientato nella direzione del moto, mentre la sua lunghezza rimane invariata se è disposto perpendicolarmente alla stessa velocità.
La determinazione delle velocità può essere fatta rispetto alle stelle fisse, o alle altre galassie, con i già detti metodi dell'effetto Doppler e della aberrazione della luce delle stelle, o rispetto alla radiazione di fondo. Oppure, più semplicemente possiamo scegliere un sistema di riferimento solidale con la Terra.
Naturalmente queste variazioni sono apprezzabili solo per velocità elevatissime, perché il fattore gamma diventa significativamente diverso dall'unità solo per valori di v dell'ordine di centinaia di chilometri al secondo, e non certamente per le velocità che raggiungiamo con i nostri mezzi di trasporto, aerei compresi.
Dei tre fenomeni quello che sembra più "inspiegabile" è certamente l'aumento della massa con la velocità, che è espresso dal prodotto $\gamma \cdot m_0$ nelle equazioni 3) e 3bis), o da $\gamma \cdot m$ nelle equazioni 4) e 5) dei testi che non usano la massa relativistica. Ma occorre prendere atto che è confermato da più di un secolo di prove in tutti gli acceleratori di particelle del mondo, perciò è incontestabile.
Ed è facilissimo verificarlo per gli acceleratori circolari, come LHC di Ginevra.
Basta calcolare, partendo dall'equazione 4), la forza centripeta che deve agire sulla particella per costringerla al moto circolare uniforme, che ovviamente è proporzionale alla sua massa.

Abbiamo $F = dq/dt$ con $q = \gamma mv$ e il risultato è : $F = \gamma mv^2/R$

L'ultima equazione ci indica chiaramente che la particella in moto con velocità v ha la massa che vale γm. Mentre la sua massa a riposo, o alle basse velocità, vale m.
Oltre al calcolo della forza centripeta, l'aumento di massa con la velocità è confermato anche l'esame degli urti tra protoni, sia quelli elastici che quelli anelastici che causano proprio la loro frantumazione. Perciò, che piaccia o no, dobbiamo prendere atto che l'aumento di massa avviene veramente.
Però esso non è interpretabile con gli attuali concetti di spazio e di particella, perché una particella che si muove nello spazio ritenuto vuoto, con nulla attorno, non può incrementare la propria massa.
Allora abbiamo un'ulteriore prova che, come per la gravità, occorre rivedere questi due concetti: di spazio e di particella; proprio come ha cercato di fare Einstein dopo la Relatività Generale, e come è scritto a pag. 14.

Anche se tutti questi fatti possono sembrare poco intuitivi, lo sono soltanto dal punto di vista dei pregiudizi ormai radicatisi nel ritenere come verità assolute le rappresentazioni della fisica classica, che deriva dalla nostra percezione umana limitata a velocità molto piccole.
Ma abbiamo già visto che non dobbiamo fidarci delle apparenze. Ad esempio, la Terra è stata ritenuta ferma fino all'intervento di Copernico e Galileo, mentre in

realtà viaggia, con tutti noi sopra, a 30 km al secondo intorno al Sole, e a circa 100 km/s rispetto alle "stelle fisse" insieme a tutto il sistema solare attraverso la Via Lattea, la quale a sua volta ruota e trasla nello spazio. E la velocità complessiva della Terra, risultante da tutti questi moti, è circa 400 km/s.

Breve descrizione dell'esperimento di Michelson-Morley

L'esperimento venne effettuato nel 1887, e fu condotto dal famoso scienziato Michelson con l'aiuto tecnico di Morley. Allora lo spazio era ancora identificato con l'etere dalla maggior parte degli scienziati, Michelson compreso, e lo scopo era di evidenziare gli effetti del moto della Terra attraverso l'etere. Ma l'esito fu negativo.
Un attento esame dell'esperimento indusse l'irlandese Fitzgerald a proporre l'equazione n° 2, relativa alla contrazione delle lunghezze con la velocità, per spiegare il suo insuccesso.
Subito dopo anche l'olandese Lorentz, per via indipendente, presentò quell'equazione, sostenendola anche con una precisa spiegazione fisica**.** Ma allora, ultimi anni dell'Ottocento, venne considerata un'ipotesi di comodo, poco credibile, o addirittura falsa. E le congetture sull'esito negativo dell'esperimento continuarono senza tenerne conto. E questo fu il principale motivo che causò l'identificazione dello spazio con il nulla del vuoto, avvenuta nei primi decenni del Novecento.
Molto brevemente, l'esperimento consisteva in misure d'interferenza tra due raggi di luce eseguite con un interferometro composto da due bracci ortogonali, che veniva orientato in vari modi su di un piano orizzontale.

E l'equazione (2) : $L = Lo \sqrt{1 - \beta^2}$ ci indica chiaramente che la lunghezza del braccio dell'interferometro parallelo alla velocità della Terra (che non è completamente trascurabile rispetto a c) subisce una contrazione, mentre per l'altro braccio, che è ortogonale alla velocità, ciò non avviene.
Ed è per questo motivo che l'esito dell'esperimento fu negativo, nel senso che le figure d'interferenza dei due raggi non cambiavano variando l'orientamento dell'interferometro. Ma a quell'epoca, come abbiamo detto, la contrazione di Fitzgerald - Lorentz non venne accettata perché questi fenomeni non erano ancora verificati.
Col passare degli anni molti altri scienziati la riproposero, tra cui Eddington. Anche Feynman in - Sei pezzi meno facili - espone una descrizione molto chiara dell'esperimento in cui considera questa contrazione, che attualmente è accetta da tutti i fisici del mondo. Infatti l'equazione (2) da molti anni si trova proprio su tutti i libri di fisica.
Perciò, nei decenni successivi, quando divenne evidente che la contrazione è assolutamente vera e reale, sarebbe stato necessario riconsiderare completamente le conclusioni che seguirono l'esperimento. Ma ciò non è stato fatto, se non in modo marginale e solo in tempi recenti**.**

Dalla Fisica classica alla Fisica moderna

I tre fenomeni espressi dalle equazioni 1) 2) 3) di Lorentz, insieme all'ipotesi quantistica di Planck, hanno determinato una vera rivoluzione nelle basi della Fisica, avvenuta nei primi anni del Novecento. Tanto che ci fu un vero e proprio trapasso, dalla fisica classica, a quella moderna.
Inoltre, negli anni successivi è stato accertato che ogni particella presenta contemporaneamente proprietà corpuscolari e ondulatorie, mentre prima era ritenuta un semplice corpuscolo.
Se consideriamo anche la legge di connessione reciproca tra energia e massa, espressa dalla famosa equazione $E = m \cdot c^2$ esposta da Einstein nel 1905, e il legame tra la particella e il campo che la circonda, allora si deve concludere che la natura stessa delle particelle, del campo, della materia e dell'energia nel suo insieme, in realtà appartengono ad un quadro immensamente più grande della rappresentazione riduttiva e semplicistica legata alle nostre attuali conoscenze, che identificano lo spazio con il nulla del vuoto e le particelle come dei corpi estranei.
E anche le più piccole particelle: elettroni, quark, neutrini, ecc, con tutte le loro differenti proprietà fisiche, dimostrano di essere oggetti complessi e inesauribili.
Quindi abbiamo ben poche ragioni per rimanere increduli di fronte alle tre formule di Lorentz.
E abbiamo già assistito alla rivoluzione copernicana e a quella di Galileo che provocò l'abbandono definitivo delle teorie fisiche di Aristotele e aprì la strada a Newton e agli altri grandi.
Rimane chiaro che, a differenza dei sistemi di Tolomeo e di Aristotele, la fisica classica non è tramontata. Essa rimane valida per i sistemi in cui la velocità degli oggetti è molto minore di c; infatti, in queste condizioni nelle equazioni di Lorentz il fattore gamma tende a uno, e ritorniamo ad avere:

$$t' = t \; ; \quad L' = L \; ; \quad m = m_o \; ;$$

vale a dire: tempo assoluto, lunghezze e massa costanti. Come per alla fisica di Newton.

E finalmente arriviamo all'intervento di Einstein.

Teoria della relatività ristretta, detta anche speciale

Nel 1905 Einstein espose la teoria della relatività ristretta che studia i sistemi di riferimento inerziali, vale a dire in moto rettilineo uniforme, all'interno dei quali però possono avvenire anche dei moti accelerati degli oggetti.
Un contributo fondamentale per questo lavoro, anche se non ufficialmente riconosciuto, venne dalla sua prima moglie, Mileva Maric, bravissima matematica, che in compenso veniva maltrattata ed emarginata dal marito.

Alle basi della teoria ci sono due principi:

a) tutte le leggi della fisica sono identiche in tutti sistemi di riferimento inerziali.

b) la velocità della luce è indipendente dal moto della sorgente e dal moto dell'osservatore.

Il primo principio è un'estensione di quanto già detto da Galileo nel Seicento, e significa che la velocità costante del sistema, in cui si effettuano le prove, non ha nessun effetto sullo svolgimento di qualunque prova e su qualunque misura fatta solamente su quello che succede al suo interno (senza guardare fuori dal sistema) come già scritto.
Il secondo principio deriva direttamente dalla dilatazione del tempo e dalla contrazione dei regoli in moto, espressi dalle equazioni 1) e 2) di Lorentz, ed era già stato proposto da Poincaré.
Su alcuni libri divulgativi, e in alcune trasmissioni televisive, la teoria della relatività viene spesso presentata senza fare cenno al fattore gamma e alle equazioni di Lorentz. Mentre è evidente che sono indispensabili per una valida comprensione.
Infatti, esse sono proprio alla base di questa teoria, sia dal punto di vista fisico, che da quello matematico. D'altro lato, la teoria stessa nella sua completezza, è un' ulteriore conferma della loro validità, che si aggiunge alle verifiche sperimentali già dette.
Deve essere altrettanto chiaro che anche le rappresentazioni della teoria della relatività non sono una verità assoluta. Esse, come la meccanica classica, esprimono una verità approssimata, ma con un grado di approssimazione migliore di quello espresso dalla meccanica classica.
Einstein, con l'aiuto della moglie Mileva Maric, partendo dalle formule di Lorentz espose le trasformazioni delle velocità per i sistemi che hanno v non trascurabili rispetto a c, e la celebre formula $E = m \cdot c^2$ la quale afferma che a energia corrisponde massa e, reciprocamente, a massa corrisponde energia; ed è fondamentale per le reazioni nucleari. (In quest'ultima equazione con m si indica la massa relativistica espressa dalla equazione n° 3).

Teoria della Relatività Generale

La teoria della Relatività Generale (RG) tratta i sistemi di riferimento non inerziali, cioè accelerati, e la gravitazione. Venne presentata da Einstein nel Novembre del 1915 e pubblicata alcuni mesi dopo.
La gravitazione è proposta come una proprietà fisica dello spazio: per effetto della presenza di una massa molto grande, ad esempio un pianeta o una stella, lo spazio si incurva in modo ben percepibile, e gli altri oggetti, con la loro massa, risentono di questa curvatura.
Anche gli oggetti con una piccola massa producono la curvatura dello spazio, ma di solito i loro effetti reciproci sono trascurabili.

Come abbiamo già scritto, con questa teoria lo spazio dimostra di possedere proprietà fisiche che lo rendono anche capace di interagire con la materia, e per questo motivo non può più essere identificato con il nulla. Infatti il vuoto inteso come – il nulla – (a parte che non esiste proprio) non si può incurvare e in generale non può cambiare stato. E il nulla non può interagire con la materia.
Einstein, allora, propose di ritornare all'etere, da lui abbandonato nel 1905, ma non rifiutato completamente. E dopo il 1916 presentò un nuovo modello che identifica l'etere proprio con - lo spazio fisico dotato di proprietà fisiche -, come era già stato proposto da P. Drude e M. Abraham verso la fine dell'Ottocento.
Einstein vi aggiunse l'importante idea che le particelle sono effetti dell'energia nello spazio fisico, e non più oggetti estranei. E questo nuovo concetto è di fondamentale importanza, perché permette di spiegare il movimento delle particelle e degli oggetti nello spazio fisico senza più l'ostacolo del "vento dell'etere", ma anche di interpretare l'aumento di massa con la velocità espresso dalle equazioni 3 e 4.
Quanto scritto è ben documentato, con gli atti dello stesso Einstein, nel libro - Einstein e l'etere - autore L. Kostro, editore Dedalo. E da altre citazioni di Einstein, contenute nel file: - Il Nuovo Etere di Einstein - che si può trovare con Google.
Per questo motivo egli venne accusato da alcuni colleghi di contraddirsi continuamente.
Ma, il fatto di mettere in discussione le proprie opinioni di anni precedenti e di aver ammesso i propri errori (su argomenti così difficili) può essere inteso, invece, come un atto di coerenza con la ricerca della verità e di grande onestà intellettuale.
Lo spazio fisico con le sue proprietà fisiche avrebbe dovuto sostituire lo spazio inteso come il nulla del vuoto, dando nuovamente un senso fisico ai campi e alle onde, ma non fu gradito dalla scienza e venne presto dimenticato, o addirittura - tacitamente censurato-, tanto che ancora oggi non viene presentato nei testi universitarie e poche persone ne sono a conoscenza.
Al contrario, Einstein è descritto come il principale "demolitore" dell'etere. Ma in realtà egli era avverso solamente ai vecchi modelli di etere, intesi come sostanza contenuta dentro lo spazio, e non all' etere inteso come spazio fisico.
Occorre notare che, anche prima del 1905, era sufficiente considerare le equazioni di Maxwell dei campi elettromagnetici, per vedere subito che anch'esse attribuiscono allo spazio "vuoto" delle proprietà fisiche, come la presenza dei campi elettromagnetici E ed H, dell'induzione B e D , la corrente di spostamento, la costante dielettrica ε_o e la permeabilità magnetica μ_o.
Anche la velocità della luce è chiaramente una proprietà fisica dello spazio, essendo:

(10) $c = 1/\sqrt{\mu_o \cdot \varepsilon_o}$ (nel Sistema Internazionale SI)

Maxwell, infatti, era un convintissimo sostenitore dell'etere, pur vivendo in un'epoca in cui i paladini del nulla erano già attivi.

Einstein, ovviamente**,** conosceva le equazioni di Maxwell, ma non accettava l'etere come sostanza distinta dallo spazio e contenuta dentro lo spazio, com'era l'Etere Luminifero di Maxwell e tutti i modelli precedenti.
E' bene aggiungere che anche le moderne teorie del Modello Standard e del campo di Higgs sono orientate verso un modello di spazio, o spazio-tempo, che possiede proprietà fisiche, e non più verso lo spazio inteso come il nulla del vuoto.

Riguardo ai sistemi di riferimento accelerati, Einstein postulò il seguente **Principio di Equivalenza** (PE) che afferma: in un laboratorio chiuso gli effetti di un campo gravitazionale esterno sono equivalenti a quelli dovuti ad un'accelerazione impressa al laboratorio.
Per spiegare questo principio viene esposto l'esempio del missile nello spazio, molto distante da ogni stella o pianeta, che viene accelerato mediante la spinta dei razzi**.** Una persona al suo interno, avverte una forza esercitata dal pavimento sui suoi piedi, proprio come avviene quando il suo corpo è soggetto alla forza di gravità dovuta alla vicinanza di un pianeta.
Ovviamente, se l'osservatore può guardare fuori dal laboratorio vede subito se nei dintorni c'è o non c'è il pianeta che causa la forza gravitazionale, e può anche valutare il proprio moto. Quindi anche il PE è riferito alle sole osservazioni interne.
Ma l'equivalenza tra forza gravitazionale e forza dovuta all'accelerazione impressa al sistema, è già ottenibile con ragionamenti di Fisica Classica. Perciò la parte innovativa della RG è senza dubbio la curvatura dello spazio.
Le sue principali conferme si ebbero dallo studio dell'avanzamento del perielio di Mercurio e dalla curvatura dei raggi di luce provenienti dalle stelle per effetto della gravità del Sole. E recentemente anche dall'osservazione degli effetti delle onde gravitazionali, che sono oscillazioni della curvatura dello spazio che si propagano alla velocità della luce.

Molte persone sono sorprese dal fatto che Einstein non abbia ricevuto il premio Nobel per la teoria della relatività, ma solo alcuni anni dopo per aver dimostrato l'esistenza dei "quanti di luce", successivamente chiamati fotoni. Anche se è noto che già Newton sostenne l'aspetto corpuscolare della luce, ma con i mezzi della sua epoca non riuscì a provarne l'esistenza.
Noi, però, sappiamo che i primi contributi originali della Relatività Ristretta sono di Galileo per quanto riguarda la parte classica, e per la parte moderna, di Fitzgerald, Lorentz, Poincaré e Mileva Maric.
Ad Einstein va il merito di aver completato questa teoria, di averla integrata con la Relatività Generale, e di aver proposto la più fantastica e più famosa equazione della storia della Scienza: $E = m \cdot c^2$ (con m massa relativistica).
Almeno ad Einstein è da attribuire il merito di averla dimostrata e divulgata nel 1905, perché, anche in questo caso, sembra che la paternità non sia proprio sua, ma di qualcun altro, e precisamente dell'italiano Olindo De Pretto che presentò un articolo contenente l'equazione al Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti di Schio nel novembre del 1903, che venne pubblicato il 2 febbraio 1904.

Si deve aggiungere, purtroppo, che quell'equazione indicò anche la via per la costruzione delle terrificanti bombe atomiche lanciate sulle città di Hiroshima e Nagasaki, dagli Americani.
E a consigliare la costruzione di quelle bombe, con una famosa lettera al presidente degli Stati Uniti, fu anche lo stesso Einstein.

Molte grazie per la lettura.

Principali autori di riferimento:
Cavedon, A. Deana, Feynman, Kostro, G.I. Naan, N.F. Ovcinnikov.

Questo file appartiene al sito www.ricercaetereperduto.it. La lettura è libera.

Per maggiori approfondimenti ed esempi puoi vedere, sempre nello stesso sito:

1) Energia Massa Particelle Campi Forze e Nuovo Etere della Fisica
2) Il Nuovo Etere di Einstein

E altri scritti, tutti a lettura libera, che sono il risultato di anni di studi e di confronti in varie discussioni.

Se hai trovato interessante questa lettura puoi contribuire a sostenere il sito e nuovi studi, finalizzati a nostri nuovi scritti, **con una piccola sottoscrizione**.

Nella pagina - **Sottoscrivi** – del sito www.ricercaetereperduto.it troverai le nostre coordinate bancarie che ti permetteranno di dare il tuo libero contributo facilmente e in piena sicurezza.

Ancora grazie