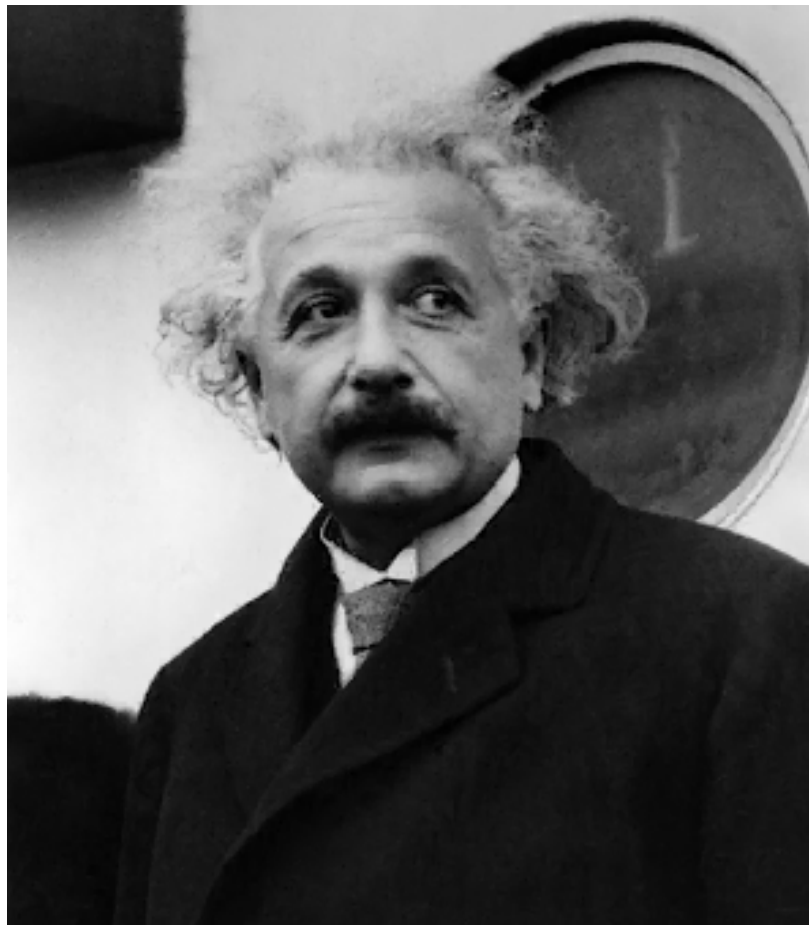


La Relatività

a.c. di Francesco Galgani

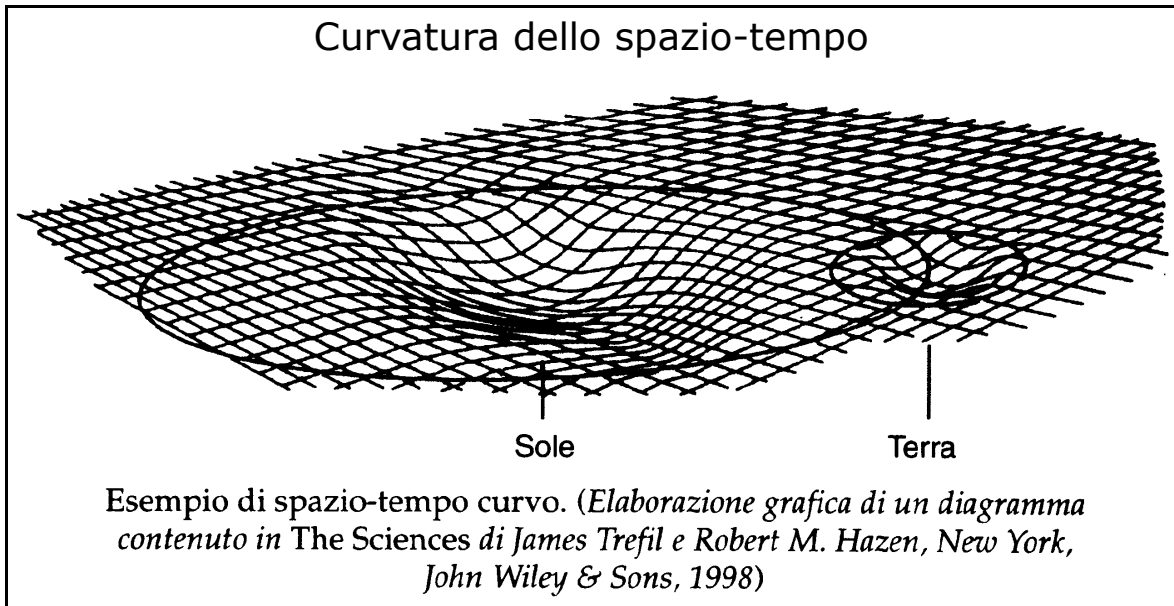


Albert Einstein

Nel 1905 il fisico tedesco Albert Einstein pubblicò i primi lavori sulla teoria della relatività ristretta e nel 1916 enunciò la teoria della relatività generale. Attraverso la ridefinizione dei concetti di spazio e tempo, Einstein rivoluzionò il pensiero scientifico e contribuì alla nascita della fisica moderna.

La Relatività

Prima di addentrarci nello studio delle rivoluzionarie teorie di Einstein, vi presento due esempi concreti (e già ampiamente dimostrati) di quanto la fisica moderna è arrivata a concepire, stravolgendo il nostro modo consueto di intendere ciò che esiste: lo spazio e il tempo, non più entità assolute, sono adesso manifestazioni dell'energia, misurabili e dipendenti.

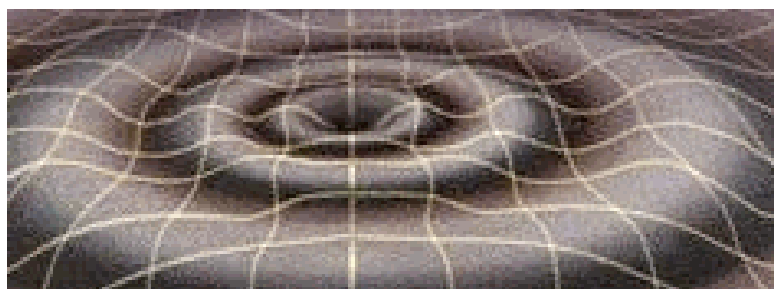


Buchi neri e bianchi: cunicoli spazio-temporali

Il concetto di buco nero venne sviluppato intorno al 1916 dall'astronomo tedesco Karl Schwarzschild sulla base della teoria della relatività generale di Albert Einstein.

Secondo la relatività generale, in prossimità di un buco nero la forza gravitazionale altera in maniera sensibile lo spazio-tempo. In particolare, il tempo rallenta man mano che ci si avvicina e si ferma completamente sul confine ideale e sferico del buco nero. Un corpo, all'interno del buco nero, collassa in una singolarità dello spazio-tempo, cioè in un oggetto senza dimensioni e di densità infinita.

La materia risucchiata da un buco nero, dopo aver percorso il cunicolo spazio-temporale, ha anche la possibilità di sbucare in un buco bianco (il quale è un corpo fino ad oggi esistente solo nelle formule matematiche, con proprietà opposte e simmetriche a quelle dei buchi neri).



IL CONCETTO DI RELATIVITÀ

Le teorie formulate all'inizio del XX sec. da Albert Einstein avevano inizialmente lo scopo di spiegare certi aspetti anomali delle leggi fisiche in determinati contesti, ma le diverse e varie ramificazioni che hanno avuto in seguito hanno condotto alla definizione di principi completamente estranei alla fisica classica, come l'equivalenza tra massa ed energia, tra spazio e tempo, tra gravitazione e accelerazione.

L'ultima conquista di Einstein non è, come comunemente si crede, il "semplice" concetto di relatività espresso da $E=mc^2$, ma bensì la teoria unificata del mondo fisico, che parte dal presupposto che tutta la "massa-energia" in un'area sia associata a tutto lo "spazio-tempo" vicino o, simbolicamente, che "energia-massa=spazio-tempo". La "E" e la "m" di " $E=mc^2$ " ora sono solo elementi su un unico lato di questa nuova equazione ben più profonda.

Senza addentrarci in complesse spiegazioni matematiche (peraltro lo stesso Einstein non fece in tempo a pervenire alla formula matematica che dimostrasse l'attendibilità della sua rivoluzionaria teoria), le conquiste del grande scienziato sono pur sempre dei concetti e, come tali, verranno qui considerate, spiegandole con prove sperimentali facilmente comprensibili.

Prima di dar corso all'argomento, vorrei prima sottolineare, al di là di ogni altra considerazione, quello che è il significato profondo dell'opera di Einstein.

Diffidare da ciò che sembra vero...

La prima deduzione, conseguente alle conquiste scientifiche di Einstein e dei grandi che l'hanno preceduto, a cominciare da Galileo, consiste nel fatto che gli esseri viventi vedono i fenomeni che accadono attorno ad essi e che essi stessi sono, non come questi fenomeni accadono, ma come sono interpretati dagli stessi esseri viventi. Ad esempio, molti animali e tutta la flora "percepiscono" quello che noi chiamiamo "luce" in modo diverso dal nostro che, a sua volta, è un modo tutto nostro di percepire quello che noi chiamiamo luce. Noi vediamo il Sole girare attorno alla Terra e non la Terra attorno a se stessa. Ci vediamo fermi in un universo che si muove attorno a noi, mentre, come ormai è noto, siamo anche noi che vortichiamo velocissimi per varie direzioni come ogni cosa esistente. Il primo messaggio dell'opera di Einstein e di Galileo ai loro contemporanei e ai posteri, compresi gli esperti delle loro scoperte, può essere così esplicito: *"Diffidate di quanto vedete, scoprite o possa sembrarvi vero, perché siamo terribilmente soggettivi nei nostri modi di percepire e quindi di intendere"*.

Tempo e spazio non esistono e non sono mai esistiti...

Tutta la materia è solo energia...

La relatività generale è un concetto fondamentalmente semplice: *tempo*, *spazio* e *massa* sono relativi, cioè non possono essere definiti rispetto ad un sistema di riferimento assoluto, poiché *nulla mantiene dimensioni stabili neppure per la più piccola frazione di quello che noi chiamiamo tempo*. Ogni "cosa" esistente nell'universo ci attira e noi attiriamo quella cosa, anche se si tratta della più piccola particella elementare, distante da noi miliardi di anni luce. Sole e Luna ci allungano, ci raccorciano, ci deformano, ci fanno aumentare o diminuire di peso rispetto ad ogni punto dell'Universo, e noi provochiamo in ogni punto dell'Universo variazioni della stessa natura.

Adesso tenteremo un approccio al significato di *energia*, *massa*, *tempo*, e *spazio* in modo da poter affrontare in maniera corretta il concetto di *relatività*.

Cosa è l'energia? Non lo sappiamo, e forse non lo sapremo mai, a noi è concesso soltanto di capire quali sono i suoi comportamenti. Per poter parlare dell'energia, abbiamo dovuto definirla in base al suo effetto principale, quindi: *"Dicesi energia ciò che può produrre un lavoro"*. Per poter lavorare con l'energia, le abbiamo dato un'unità di misura: il Watt. Ma questa e altre unità di misura (metro, grammo, secondo, ecc.), non sono altro che riferimenti arbitrari, nati solo dall'esigenza di metterci tutto d'accordo su ciò di cui stiamo parlando.

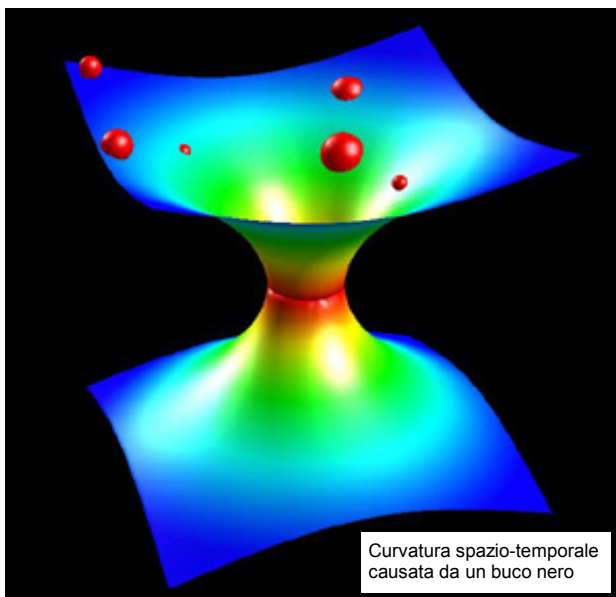
La "massa" viene definita come la misura della quantità di materia di un corpo, definita dal rapporto tra una generica forza impressagli e l'accelerazione che ne consegue. La relazione $E=mc^2$, equiparando energia e massa, ci permette di dedurre che quello che noi chiamiamo materia è un nostro modo di percepire l'energia o, più precisamente, un nostro modo di percepire il "comportamento dell'energia". Tutti i fenomeni che accadono attorno a noi e che noi stessi siamo sono "comportamenti dell'energia", i quali sono dovuti a squilibri dell'energia stessa in sistemi chiusi e, come tali, tendenti all'equilibrio (questo, tra l'altro, è il principio su cui si fonda la vita, infatti un sistema perfettamente equilibrato è un sistema statico, fermo, morto...). In base a queste considerazioni, possiamo dire che *la massa è la quantità di materia, cioè di energia, di un corpo*.

Il tempo e lo spazio: il punto più difficile per accedere alla relatività è costituito dal fatto che, nella vita di tutti i giorni, noi consideriamo il tempo e lo spazio delle entità, cioè delle "cose", a sé stanti e indipendenti da ogni altra cosa. In realtà, come ci inse-

gna la teoria unificata del mondo fisico ("energia-massa=spazio-tempo"), il tempo e lo spazio sono delle manifestazioni dell'energia o, più precisamente, delle dimensioni dell'energia e, in quanto dimensioni, non sono indipendenti, non sono delle entità, non sono delle cose. Ciò equivale a dire che le misure, e quindi il tempo e lo spazio, non esistono e non sono mai esistiti, ma al massimo fanno parte del nostro modo di percepire la realtà.

Credo che questi primi approcci alla relatività siano sufficienti per far emergere una realtà molto diversa da come la vediamo o da come ce la immaginiamo. Vediamo, nelle pagine successive, quali sono le due teorie fondamentali elaborate da Einstein e come si giunge sperimentalmente alla loro dimostrazione.

A titolo di curiosità, riporto qui in basso un articolo tratto dal giornale online "Mosac".



ATTRAVERSO UN BUCO NERO

Fonti di radiazione non compatte genererebbero distorsioni finite e non distruttive

Una astronave, passando attraverso un buco nero, potrebbe raggiungere un altro universo: forse sembrerà improbabile, ma è qualcosa che non può essere escluso del tutto, almeno secondo un articolo pubblicato sulla rivista "Physical Review Letters" che esplora il concetto di "singolarità ibrida".

Come sanno sia i fisici sia i lettori di fantascienza, se si volesse passare all'interno di un buco nero si dovrebbe attraversare una "singolarità dello spazio-tempo". Con questo si intende tradizionalmente una regione di densità infinita che esercita una distorsione distruttiva su qualsiasi oggetto non

puntiforme, ovvero con una propria estensione nello spazio, che si tratti di un'astronave o di una semplice molecola.

Ma ora alcuni fisici sospettano che questo quadro sia incompleto e che possa esistere un secondo tipo di singolarità, molto meno pericoloso. Questa "singolarità dell'orizzonte di Cauchy", impartirebbe solamente distorsioni finite sugli oggetti estesi e si svilupperebbe solo quando un flusso regolare di materia o di energia cade nel buco. Gli studi precedenti avevano preso in considerazione esclusivamente brevi "lampi" di energia, ma nel buco nero potrebbero cadere anche flussi di radiazione "non compatti" e di lunga durata, come il fondo cosmico a microonde.

Lior Burko, dell'Università dello Utah, ha preso in considerazione queste sorgenti non compatte e ha esplorato il modo in cui l'interno di un buco nero reagirebbe a questo tipo di radiazione. Se le sorgenti non compatte sono deboli, secondo Burko si formerebbe una singolarità ibrida, con un settore forte (inevitabilmente distruttivo) e uno debole (con distorsioni di marea finita). In teoria, un'astronave che entrasse nel settore debole potrebbe viaggiare fino a un'altra regione dello spazio-tempo.

TEORIA DELLA RELATIVITÀ RISTRETTA

Nel 1905, Einstein pubblicò il primo di due importanti studi sulla teoria della relatività, in cui negava l'esistenza del moto assoluto. Egli sosteneva che nessun oggetto dell'universo potesse rappresentare un sistema di riferimento universale, fisso rispetto al resto dello spazio.

Einstein elaborò inoltre una severa disamina del concetto di contemporaneità mettendo in dubbio, accanto al concetto di moto assoluto, la possibilità di definire un tempo e una massa assoluti.

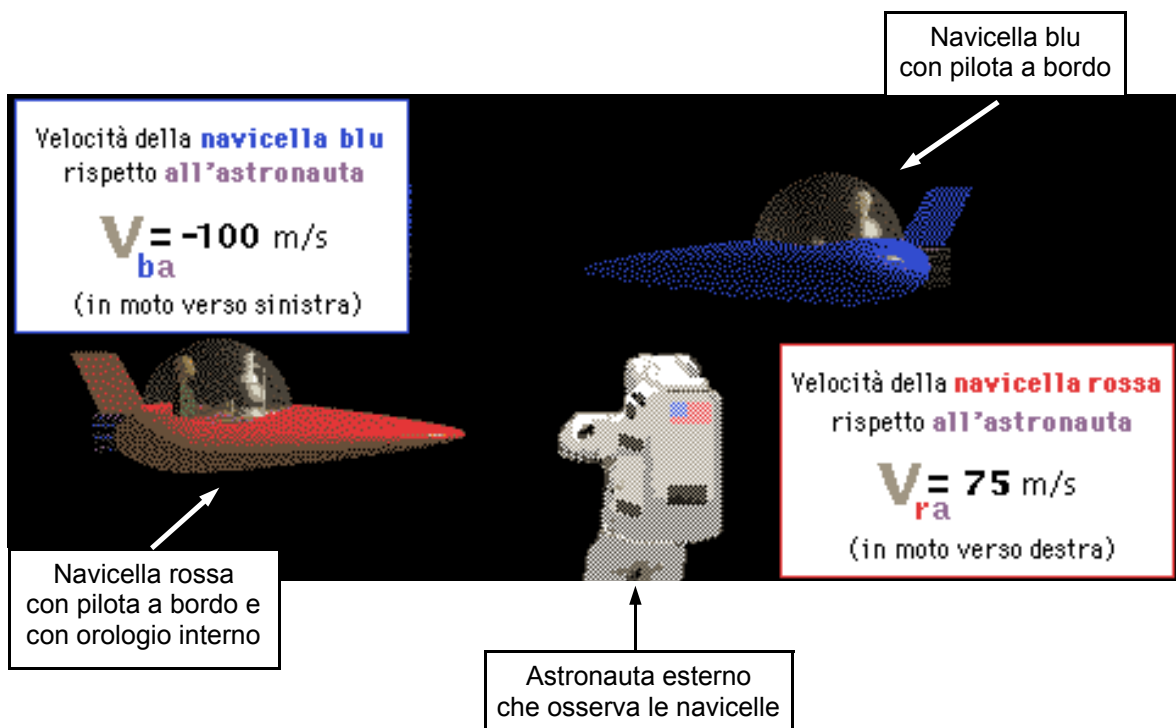
L'abbandono del concetto di simultaneità comporta che due eventi registrati come simultanei da un osservatore non risultino tali rispetto a un secondo osservatore in moto rispetto al primo. In altre parole, non ha senso assegnare l'istante in cui avviene un evento senza definire un riferimento spaziale.

Il tempo è quindi un riferimento relativo e variabile.

DIMOSTRAZIONE DELLA VARIABILITÀ DEL TEMPO

Uno dei risultati più sorprendenti di questa teoria è che un orologio, su un sistema di riferimento in moto, rallenta. Questo risultato scaturì dagli studi sul valore della velocità della luce, misurato in sistemi di riferimento inerziali (cioè in moto ad una determinata velocità).

Presupponendo che la velocità di un oggetto sia sempre riferita ad un particolare sistema di riferimento, si supponga che, rispetto ad un astronauta esterno (il quale sarà quindi il nostro sistema di riferimento), due navicelle siano in moto con le seguenti velocità:



Tenendo conto che le due navicelle si muovono con verso opposto, la velocità della navicella blu rispetto a quella rossa sarà determinata dalla differenza delle due velocità rilevate dall'astronauta esterno. Il principio con cui abbiamo eseguito il calcolo si basa sul fatto che cambiando il sistema di riferimento (prima l'astronauta esterno, adesso la navicella rossa) cambiano anche i valori delle misure. Oltre tutto, questa semplice applicazione del principio della relatività può essere estesa alla vita di tutti i giorni, per esempio considerando la velocità di un treno, che avrà un valore rispetto alla stazione (supponiamo 200 km/h), un altro valore rispetto ad un altro treno (più grande o più piccolo del precedente, a seconda del verso con cui i due treni si muovono), e un altro valore ancora, ma stavolta uguale a zero, rispetto ai suoi passeggeri seduti o comunque "fermi" (i quali, muovendosi insieme al treno, ne assumono la stessa velocità).

Velocità della **navicella blu** rispetto alla **rossa**

$$V_{br} = -175 \text{ m/s}$$

FORMULA:

$$V_{br} = V_{ba} - V_{ra}$$

$$V_{br} = -100 - 75 = -175$$

Il principio di relatività della velocità, però, non vale per la luce. Se, ad esempio, vogliamo determinarne la velocità, misurata dal pilota della navicella rossa, supponendo che per l'astronauta la velocità della luce sia 300 000 km/sec e che la navicella rossa viaggi, rispetto all'astronauta, a 240 000 km/sec, prima di Einstein tutti avrebbero risposto, erroneamente, 540 000 km/sec.

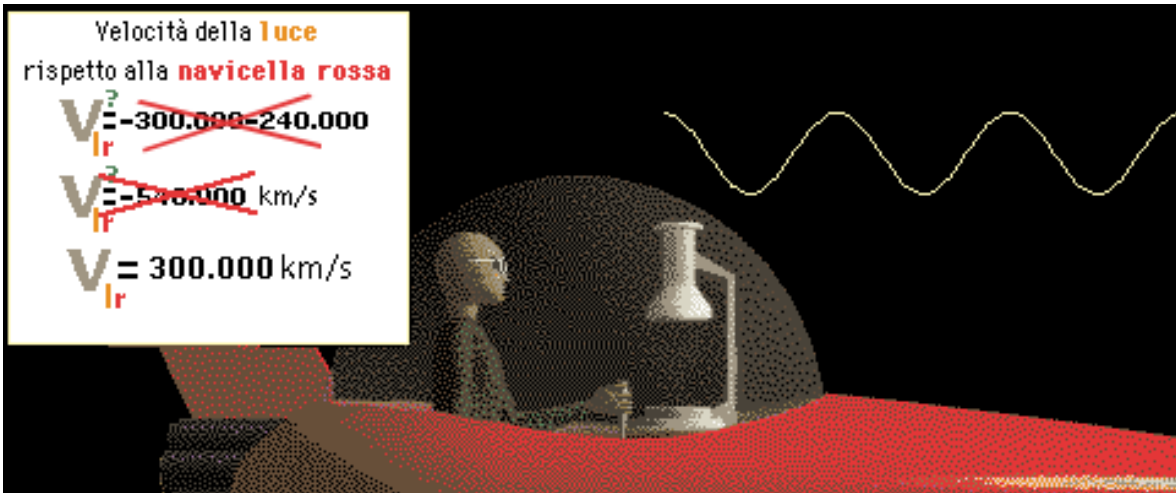
Prove di laboratorio, dimostrano invece che il nostro ipotetico pilota misurerebbe la stessa velocità: 300 000 km/sec (o 0,3 m/ns). Quindi la velocità della luce è sempre la stessa, anche cambiando il sistema di riferimento.

Velocità della **luce** rispetto all'**astronauta**

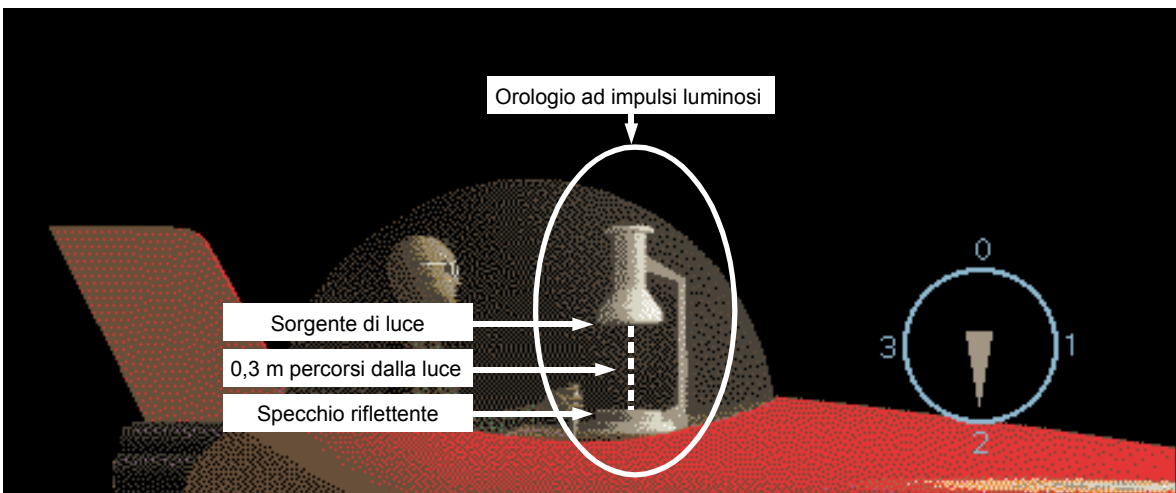
$$V_{la} = -300.000 \text{ km/s}$$

Velocità della **navicella rossa** rispetto all'**astronauta**

$$V_{ra} = 240.000 \text{ km/s}$$



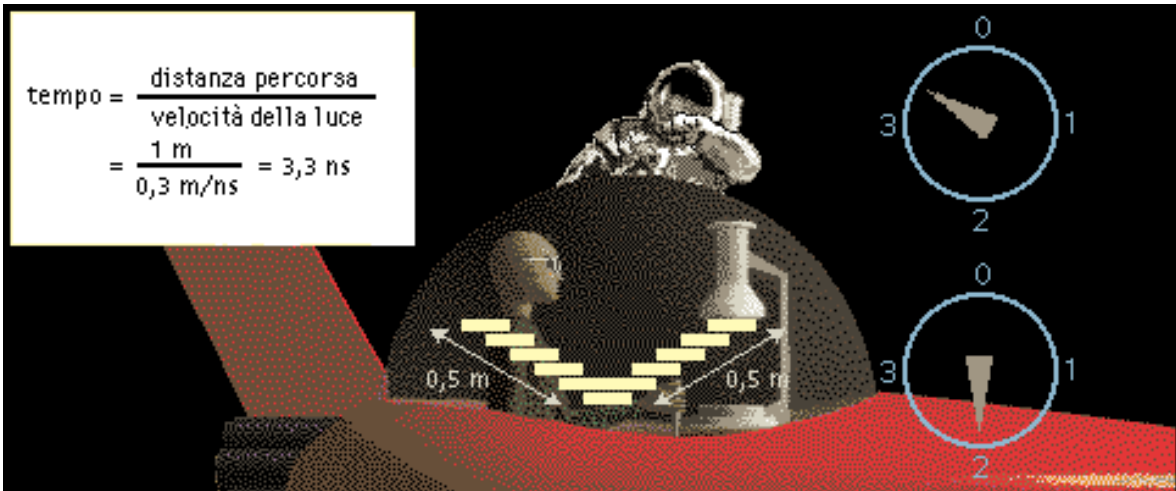
Per dimostrare la relatività del tempo, poniamo all'interno della navicella rossa un orologio che misuri il tempo sfruttando il ritardo di propagazione della luce: un impulso luminoso parte da un punto preciso della navicella e colpisce uno specchio posto a 0,3 m di distanza, per poi ritornare indietro, percorrendo complessivamente 0,6 m in 2 ns.



Rispetto al pilota della navicella, quindi, l'orologio segnerà 2 ns.

Rispetto all'astronauta esterno, però, un impulso luminoso generato all'interno della navicella non percorrerà una distanza totale di 0,6 m su una traiettoria rettilinea, bensì 1 m su una traiettoria diagonale, poiché nell'istante in cui la luce colpirà lo specchio, questo si sarà spostato rispetto all'istante in cui la luce è partita dalla sorgente (la navicella, infatti, si sta muovendo a ben 240'000 km/h, cioè circa all'80% della velocità della luce); allo stesso modo, nell'istante in cui la luce sarà tornata indietro, la sorgente si sarà spostata rispetto all'istante precedente in cui la luce aveva colpito lo specchio.

Ne consegue che, mentre l'orologio del pilota della navicella avrà misurato 2 ns, quello dell'astronauta esterno ne avrà misurati 3,3 (vedi fig. nella pag. successiva): in questo modo, abbiamo quindi dimostrato l'inesistenza di un tempo assoluto universalmente valido.



Per completezza di informazione sull'opera di Einstein, riporto qui un articolo tratto dal sito della SISSA (Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati).



EINSTEIN E LA BOMBA ATOMICA

Albert Einstein fu da sempre un pacifista convinto, come dimostrano queste vicende. Nel 1931 la Società delle Nazioni organizzò un dibattito epistolare tra gli esponenti più prestigiosi della cultura dell'epoca. La prima persona avvicinata fu Einstein che, a sua volta, fece il nome di Sigmund Freud. Freud ed Einstein si erano incontrati solo una volta, nel 1927 a Berlino, nella casa del figlio minore di Freud. In una lettera a Ferenczi, così Freud aveva spiritosamente commentato l'incontro:

"Sì, con Einstein ho chiacchierato per due ore (...) è allegro, sicuro di sé, amabile. Capisce di psicologia quanto io capisco di fisica. La nostra conversazione è stata perciò assai piacevole".

Il carteggio tra Einstein e Freud (le due lettere che si scambiarono nell'estate del 1932) fu pubblicato nel 1933 dalla Società delle Nazioni con il titolo *Perché la guerra?*

Furono proprio le sue posizioni democratiche e pacifiste che contribuirono a isolarlo anche dalla comunità scientifica e a fargli decidere il trasferimento in America proprio nel 1933. Nonostante il suo impegno pacifista, fu convinto da Leo Szilard ed Eugene Wigner, due fisici ungheresi (il primo era un suo vecchio amico) da poco arrivati in America per sfuggire al nazismo, della necessità che gli Stati Uniti avviassero gli studi sulle potenzialità belliche dell'energia nucleare per evitare che i nazisti riuscissero a sfruttarla per primi. Scrisse allora (1939) la famosa lettera al presidente Franklin D. Roosevelt per chiedergli di avviare gli studi nel settore. La figura di Einstein era circondata da grande stima e quindi la sua lettera ottenne il risultato previsto. Però, anche se la possibilità di realizzare la bomba era una diretta conseguenza della teoria della relatività (della famosa formula $E = mc^2$), Einstein non partecipò in alcun modo al Progetto Manhattan che portò alla sua realizzazione.

Val la pena di ricordare che Szilard, che era stato il primo a teorizzare la possibilità della reazione a catena, pur avendo partecipato al progetto Manhattan, si oppose all'utilizzo della bomba su obiettivi civili. Rimase però inascoltato e quindi abbandonò il progetto prima che la bomba fosse usata in Giappone. Dopo la Seconda guerra mondiale Einstein, assieme a Bertrand Russell, firmò il famoso manifesto per l'abolizione delle armi nucleari (11 aprile 1955); fu questo uno dei suoi ultimi interventi pubblici.

TEORIA DELLA RELATIVITÀ GENERALE

Definizioni:

LA GRAVITAZIONE (secondo Newton) è l'attrazione reciproca tra corpi, in misura direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra i loro centri di massa.

L'ACCELERAZIONE è la variazione di velocità nell'unità di tempo.

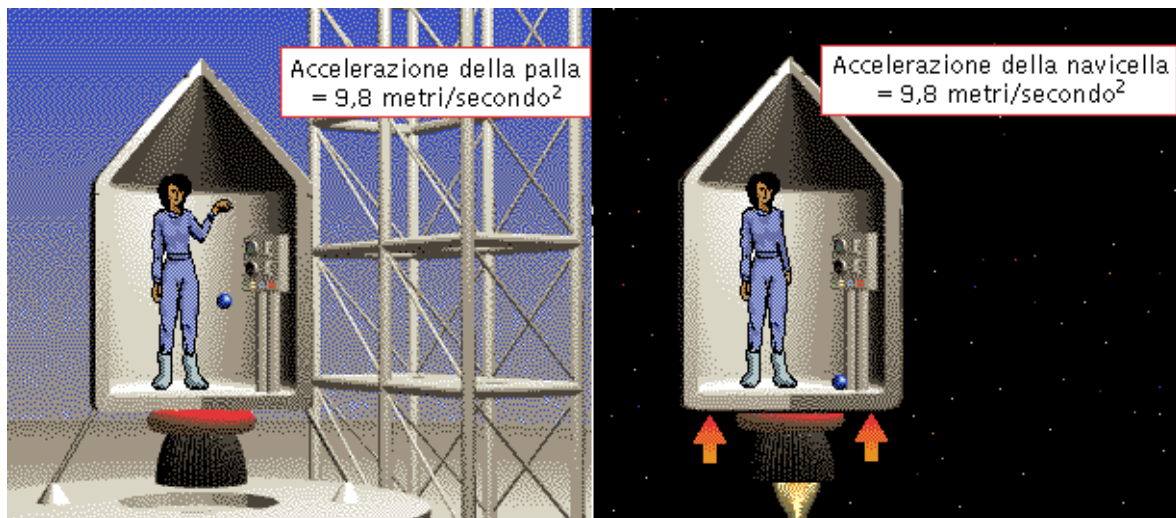
Nel 1915, Einstein formulò la teoria della relatività generale, valida anche per sistemi in moto accelerato l'uno rispetto all'altro, secondo cui le forze associate alla gravità sono del tutto equivalenti a quelle prodotte da un'accelerazione, per cui risulta teoricamente impossibile distinguere per via sperimentale i due tipi di forze.

In altre parole, la teoria della relatività ristretta stabilisce che una persona, all'interno di una macchina che viaggia a velocità costante su una strada liscia, non può in alcun modo sapere se si trova in quiete o in moto rettilineo uniforme (cioè con velocità costante); la teoria della relatività generale afferma invece che una persona all'interno della macchina in moto accelerato, decelerato o curvilineo non può dire in alcun modo se le forze che determinano il moto siano di origine gravitazionale o se si tratti di forze di accelerazione attivate da altri meccanismi.

DIMOSTRAZIONE DELL'EQUIVALENZA TRA ACCELERAZIONE E GRAVITAZIONE

Consideriamo un astronauta in piedi in una navetta ferma sulla Terra.

A causa della gravità, i suoi piedi aderiscono al pavimento con una forza pari al peso della persona. Se si considera la stessa navicella nello spazio, lontana da qualunque oggetto e non soggetta in alcun modo alla gravità, l'astronauta, se la navicella accelera, aderisce ancora al pavimento: se questa accelerazione è pari a $9,8 \text{ m/sec}^2$ (il valore dell'accelerazione di gravità sulla superficie della Terra), la forza con cui l'astronauta è ancorato al pavimento è uguale a quella a cui era sottoposto sulla Terra. Senza guardare fuori dal finestrino, l'astronauta non è quindi in grado di capire se la navicella si trovi ferma a terra o in accelerazione nello spazio.



LA CURVATURA DELLO SPAZIO E DEL TEMPO

L'ipotesi di Newton, secondo cui due oggetti si attraggono con una forza di entità proporzionale alle loro masse, viene sostituita in relatività dall'ipotesi che lo spazio-tempo sia curvato nelle vicinanze dei corpi massivi.

Einstein giunse all'intuizione che più massa o energia si concentrano in un punto, più lo spazio e il tempo si curvano attorno ad esso (vedi la prima pagina, ove ho riportato un esempio di curvatura dello spazio-tempo attorno al Sole e alla Terra, più una breve introduzione sui buchi neri, nei quali la concentrazione di massa-energia è così elevata da fermare il tempo e da ridurre lo spazio a dimensioni infinitesimali).

Questa è una teoria complessa, perché ne contiene in sé molte altre.

Ad esempio, un oggetto piccolo e roccioso, come il nostro pianeta, è dotato di poca massa ed energia, quindi la struttura di spazio e tempo si curva appena attorno ad esso. Il Sole, ben più potente, determina una curva molto più accentuata.

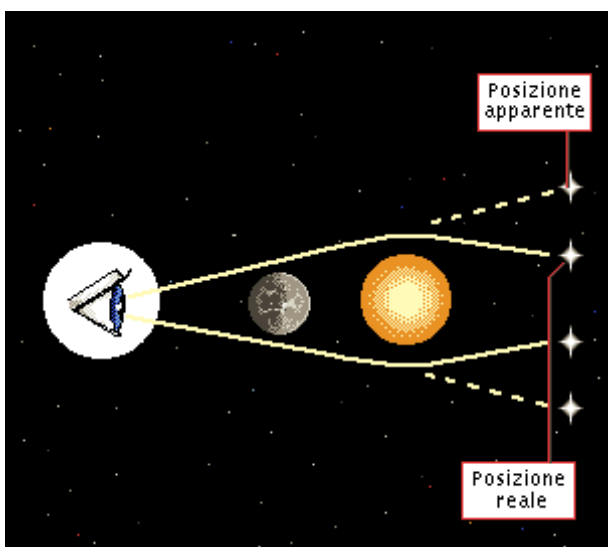
Nella nuova e più vasta teoria di Einstein si parte dal presupposto che tutta la "massa-energia" in un'area sia associata a tutto lo "spazio-tempo" vicino o, simbolicamente, che "energia-massa=spazio-tempo".

La gravità, quindi, è semplicemente quello che notiamo quando ci accade di spostarci all'interno di una particolare configurazione spazio-temporale.

DIMOSTRAZIONI DELLA CURVATURA DELLO SPAZIO E DEL TEMPO

La teoria della relatività generale può sembrare assurda e difficile da accettare, eppure ha già trovato un gran numero di conferme sperimentali.

Durante l'eclisse del 1919, infatti, gli scienziati sono riusciti a verificare la deflessione di raggi di luce stellare nelle immediate vicinanze del Sole: poiché questi raggi si sono incurvati, ne consegue che lo spazio vuoto percorso dalla luce aveva realmente una forma curva! *



Eclisse di sole

Recentemente sono stati effettuati test analoghi per misurare la deflessione delle onde radio emesse da quasar: i risultati di questi test concordano entro un margine di errore dell'1% con le previsioni della relatività generale.

Un'altra conferma sperimentale viene dal moto del perielio (il punto in cui un pianeta passa più vicino al Sole) dell'orbita di Mercurio, che si sposta intorno al Sole con un periodo di 3 milioni di anni. Tale moto, che non trova spiegazione nell'ambito della fisica classica, è invece previsto dalla teoria della relatività, e le recenti misure radar effettuate hanno confermato le previsioni della teoria con un'incertezza di solo 5 per mille.

Un altro fenomeno prescritto dalla relatività generale è lo spostamento verso il rosso della lunghezza d'onda della radiazione emessa da oggetti posti in intensi campi gravitazionali, più volte osservato mediante misurazioni astronomiche.

* (La sola gravitazione ipotizzata da Newton, infatti, non sarebbe stata sufficiente per modificare il percorso della luce, la quale, non avendo massa, non sarebbe stata sottoposta ad alcuna forza di attrazione).

BIBLIOGRAFIA:

Virgilio Girardi

Relatività e cibernetica - ed. Petruzzi (1993)

David Bodanis

E=mc², biografia dell'equazione che ha cambiato il mondo - ed. Mondadori (2001)

Enciclopedia Multimediale Encarta '99 (Microsoft)

lemma: "relatività"

Enciclopedia Multimediale 2005 (Finson)

lemma: "relatività"

Il mondo dell'astrofisica

<http://digilander.libero.it/jacopo2/>

La relatività ed Einstein

<http://digilander.libero.it/n8/>

Attraverso un buco nero

<http://www.mosac.com/astrofisica/news/leggi.php?codice=167>

Einstein e la bomba atomica

<http://www.cronologia.it/cronoein2.htm>

<http://ulisse.sissa.it/SingleQuestionAnswerProfile.jsp?questionCod=60293223>