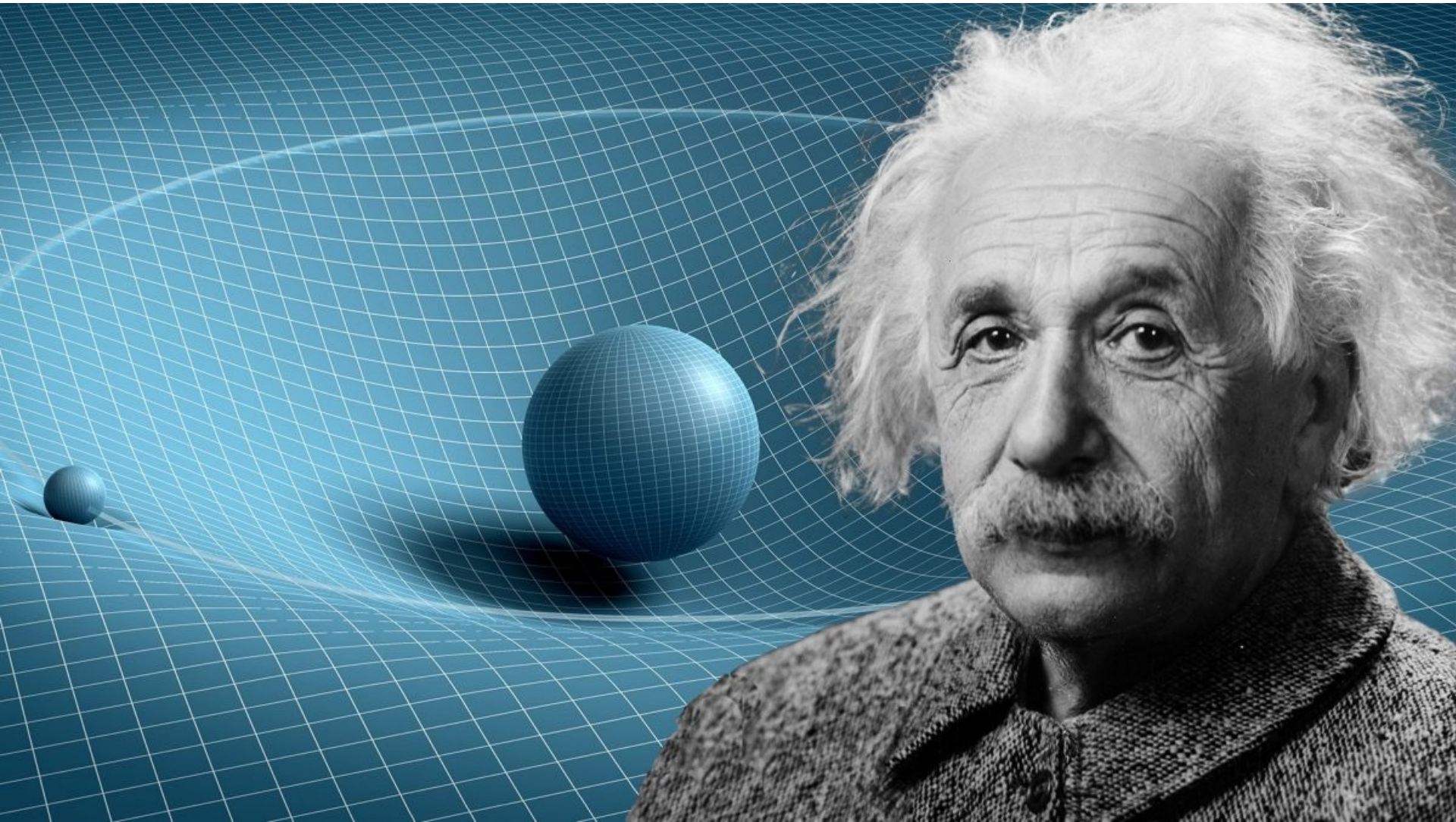


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

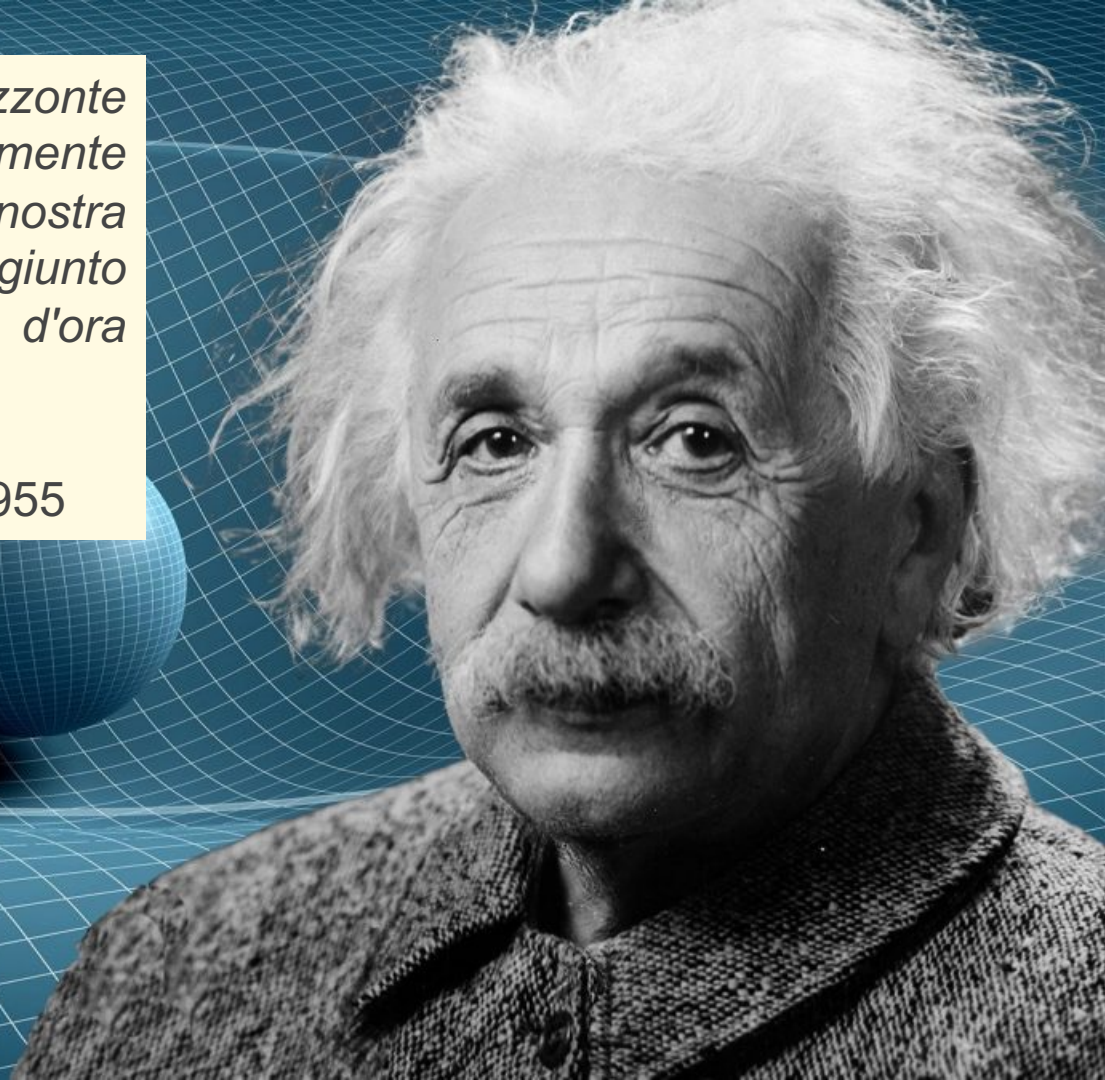


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Grazie all'opera di Einstein, l'orizzonte dell'umanità è stato infinitamente ampliato, e al tempo stesso la nostra immagine del mondo ha raggiunto un'unità e un'armonia mai prima d'ora sognate.

Niels Bohr, su New York Times, 1955

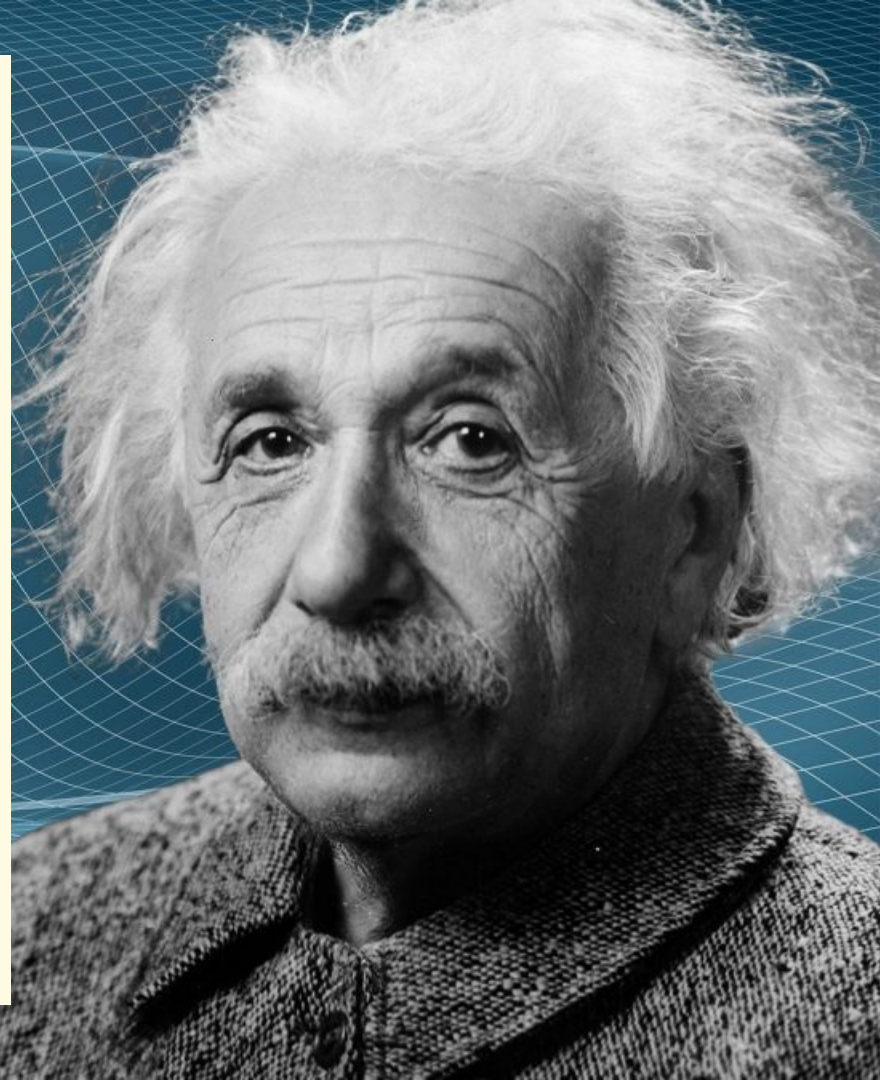


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Per tutti gli uomini colti, siano essi o meno votati a qualche ramo della Scienza, il nome di Albert Einstein evoca lo sforzo intellettuale geniale, che capovolgendo i dati più tradizionali della fisica, è riuscito a stabilire la relatività delle nozioni di spazio e di tempo, l'inerzia dell'energia e l'interpretazione in qualche modo puramente geometrica delle forze di gravitazione. È questa un'opera ammirevole, paragonabile alle più grandi opere che s'incontrano nella storia delle scienze, ad esempio quella di Newton; di per sé stessa, basterebbe ad assicurare al suo autore una gloria imperitura.

Louis de Broglie (fonte sconosciuta)

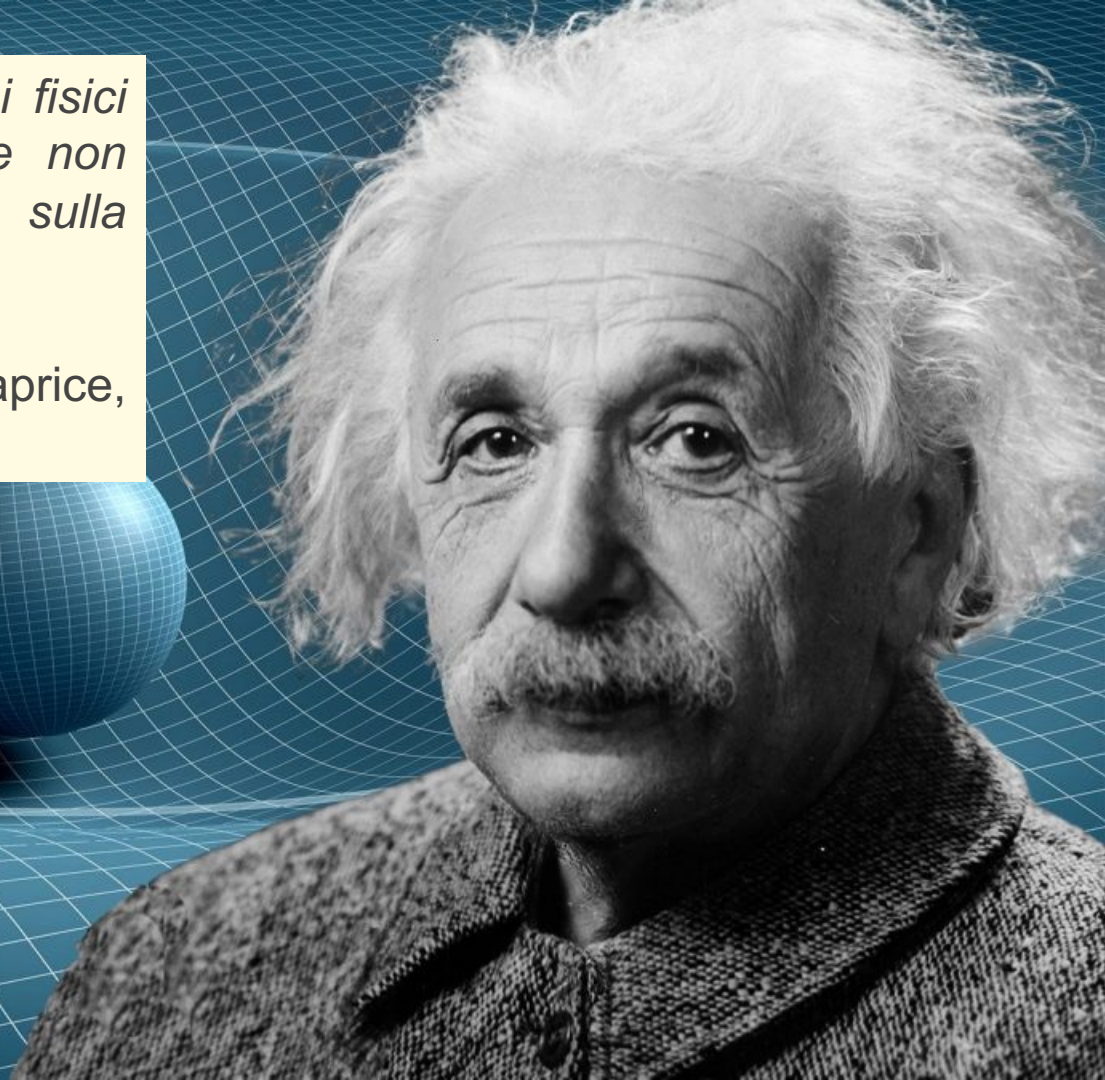


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Einstein sarebbe uno dei massimi fisici teorici di tutti i tempi anche se non avesse scritto una sola riga sulla relatività.

Max Born, Citato in Alice Calaprice, Pensieri di un uomo curioso, 1996

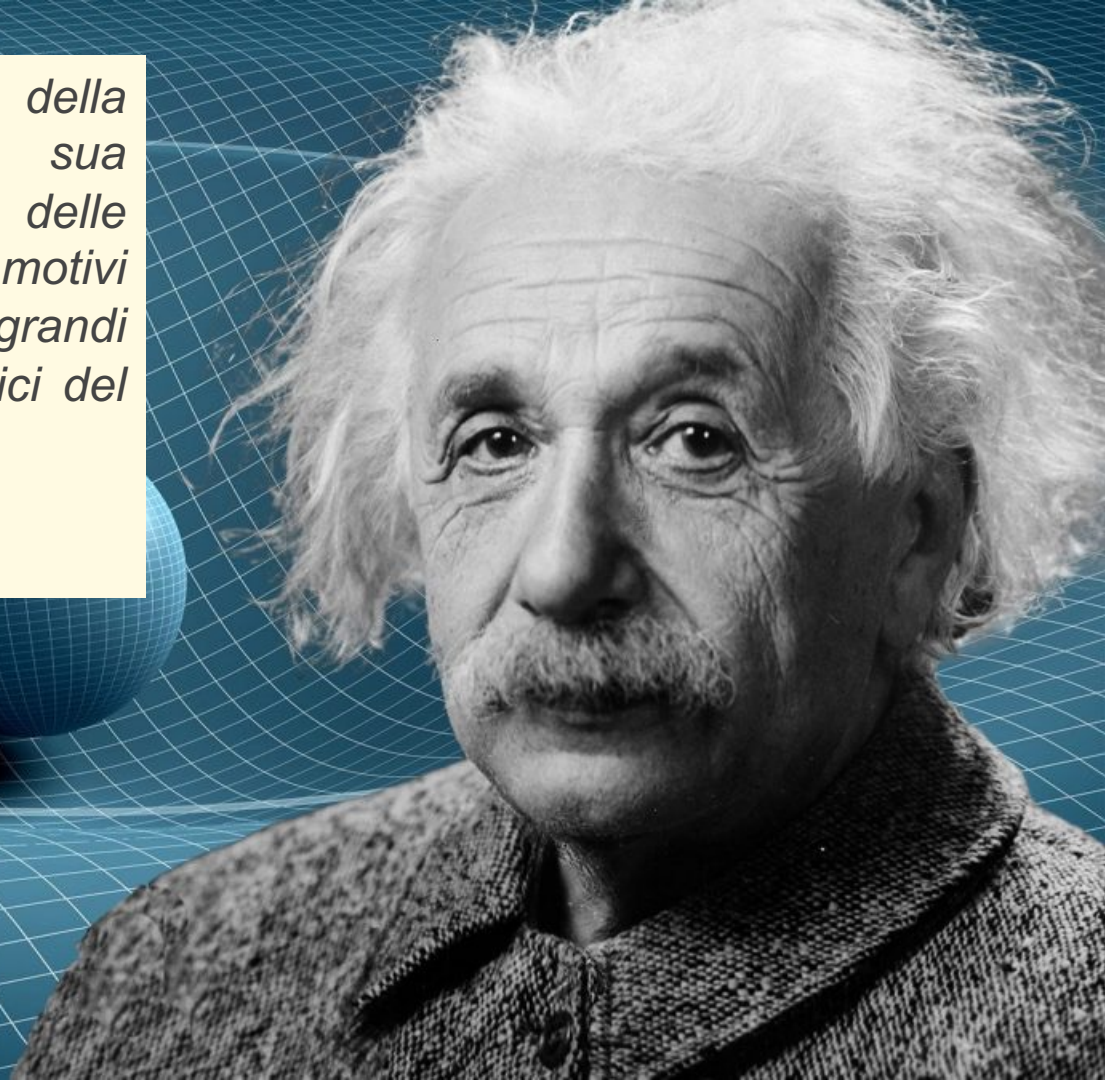


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Ho potuto apprezzare la lucidità della sua mente, l'ampiezza della sua documentazione e la profondità delle sue conoscenze... Ci sono buoni motivi per considerarlo un fisico di grandi speranze e uno dei massimi teorici del futuro.

Marie Curie, 1911

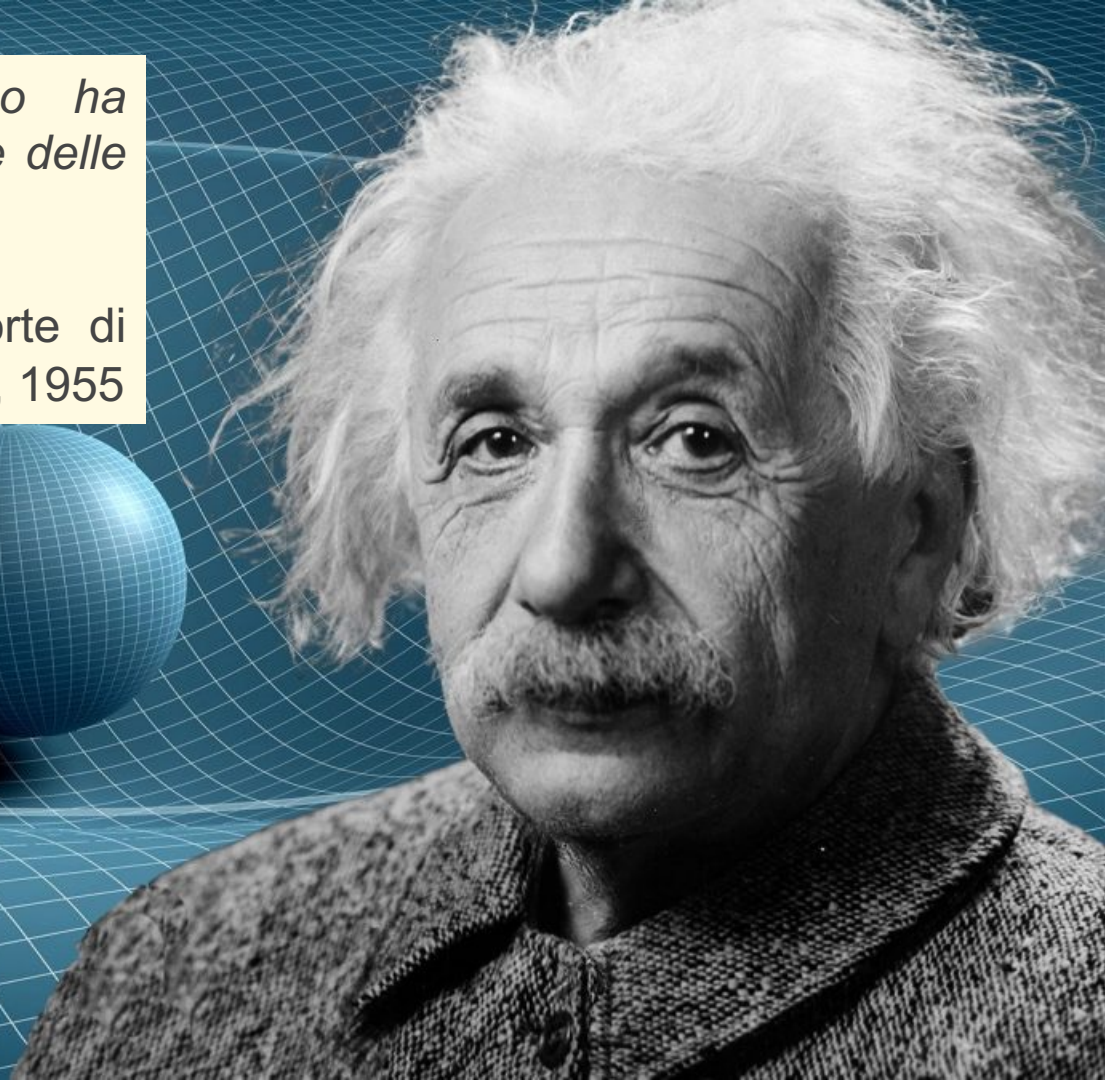


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Nel ventesimo secolo, nessuno ha contribuito come lui all'espansione delle nostre conoscenze.

Dwight D. Eisenhower, alla morte di Einstein, citato su New York Times, 1955

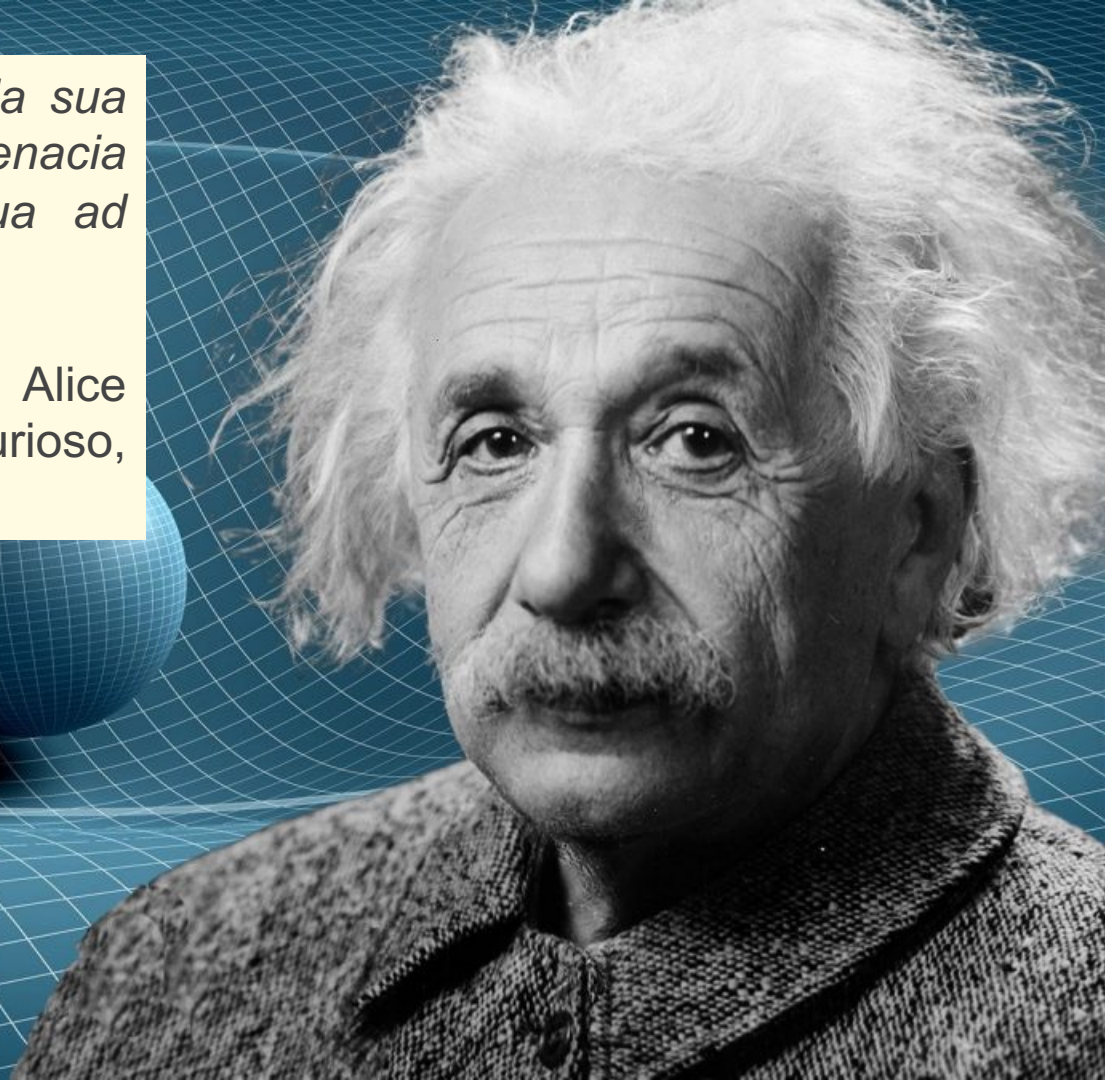


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

La grandezza di Einstein sta nella sua stupenda immaginazione e nella tenacia incredibile con la quale continua ad affrontare i problemi

Leopold Infeld, Citato in Alice Calaprice, Pensieri di un uomo curioso, 1996

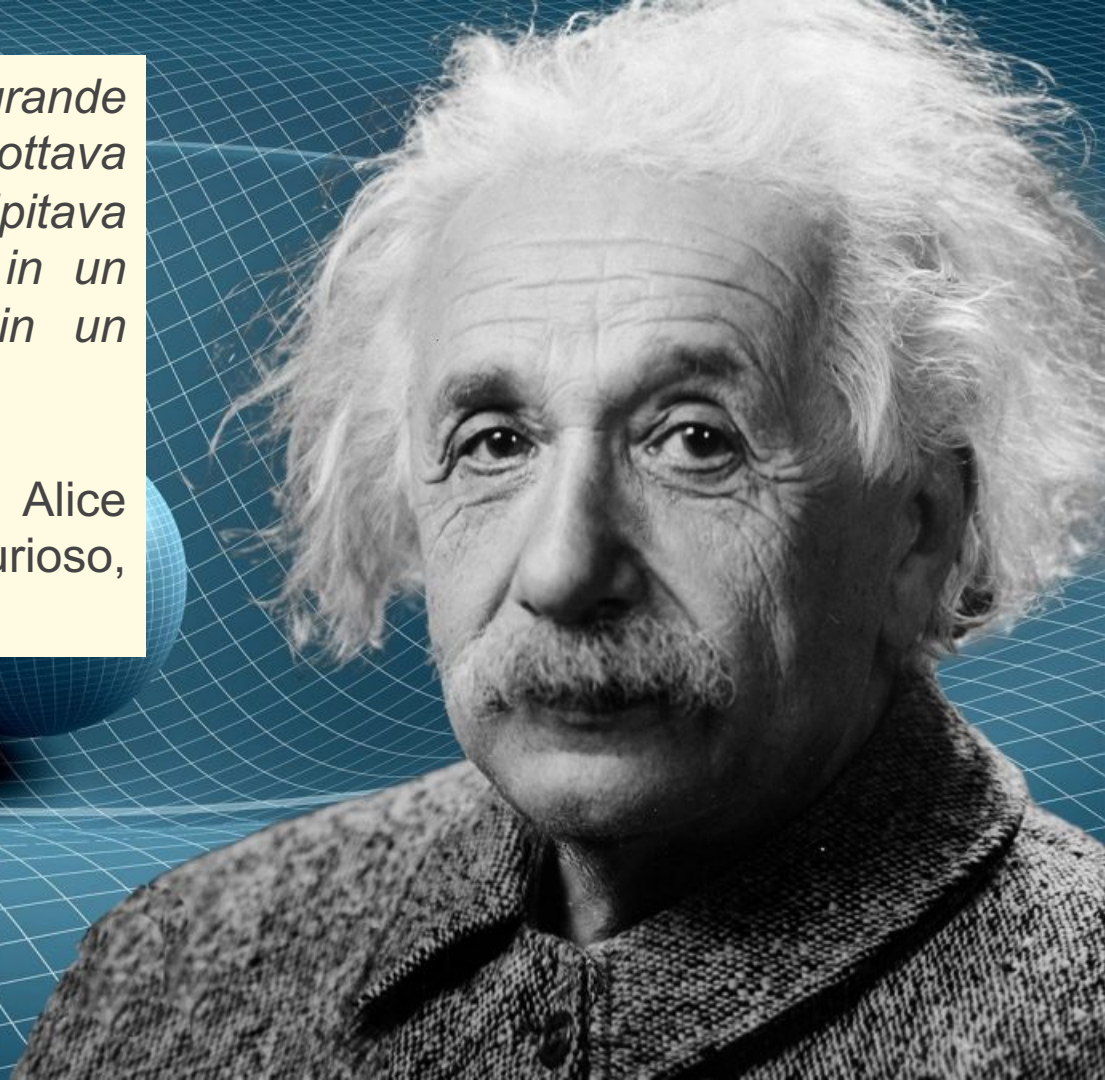


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Einstein non era soltanto un grande scienziato, era un grande uomo. Lottava per la pace in un mondo che precipitava verso la guerra. Rimase lucido in un mondo impazzito, e tollerante in un mondo di fanatici.

Bertrand Russell, Citato in Alice Calaprice, *Pensieri di un uomo curioso*, 1996

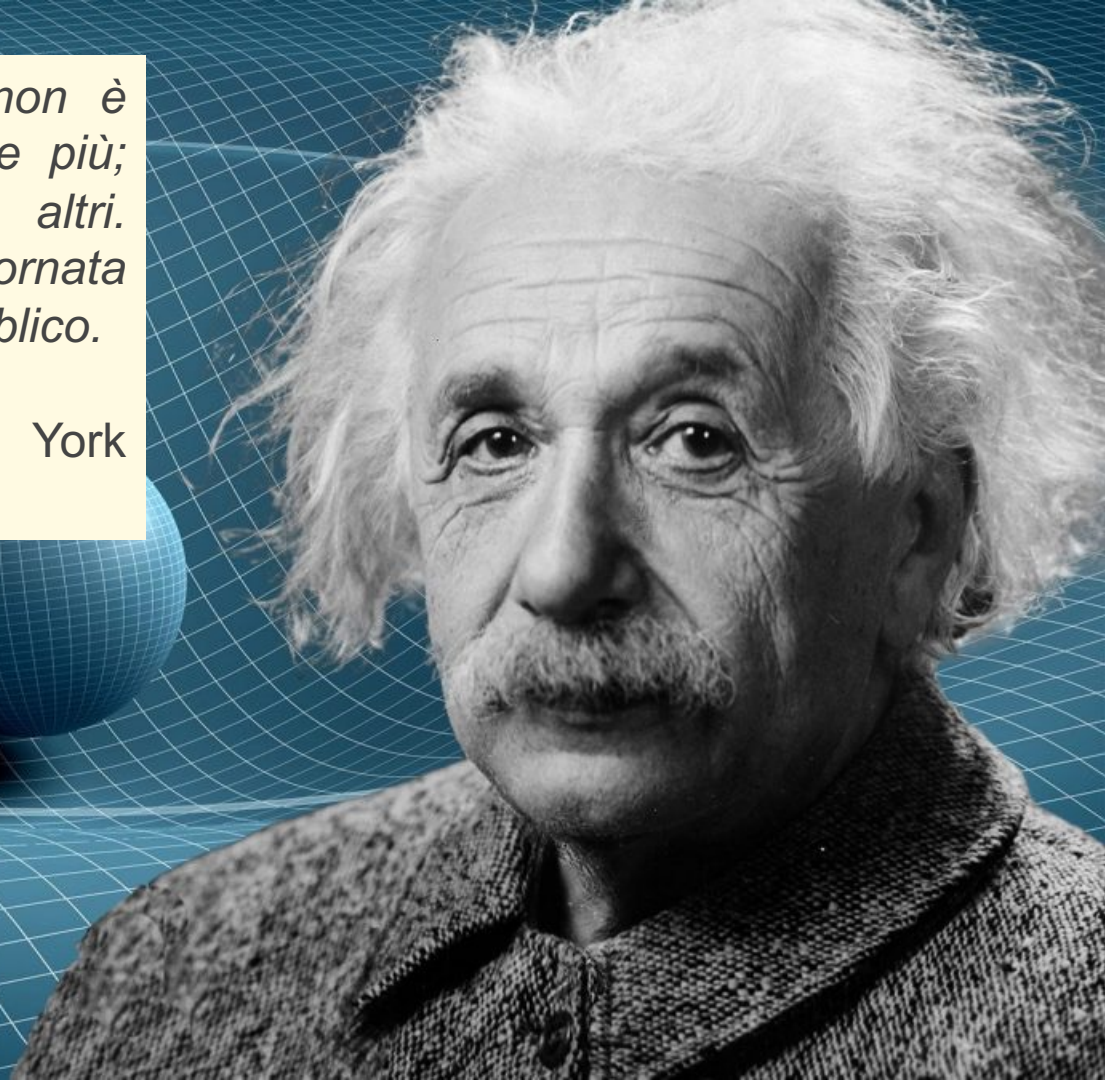


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Essere la moglie di un genio non è l'ideale. La vita non ti appartiene più; sembra appartenere a tutti gli altri. Dedico quasi ogni minuto della giornata a mio marito, il che significa al pubblico.

Elsa Einstein, citato su New York Times, 1936

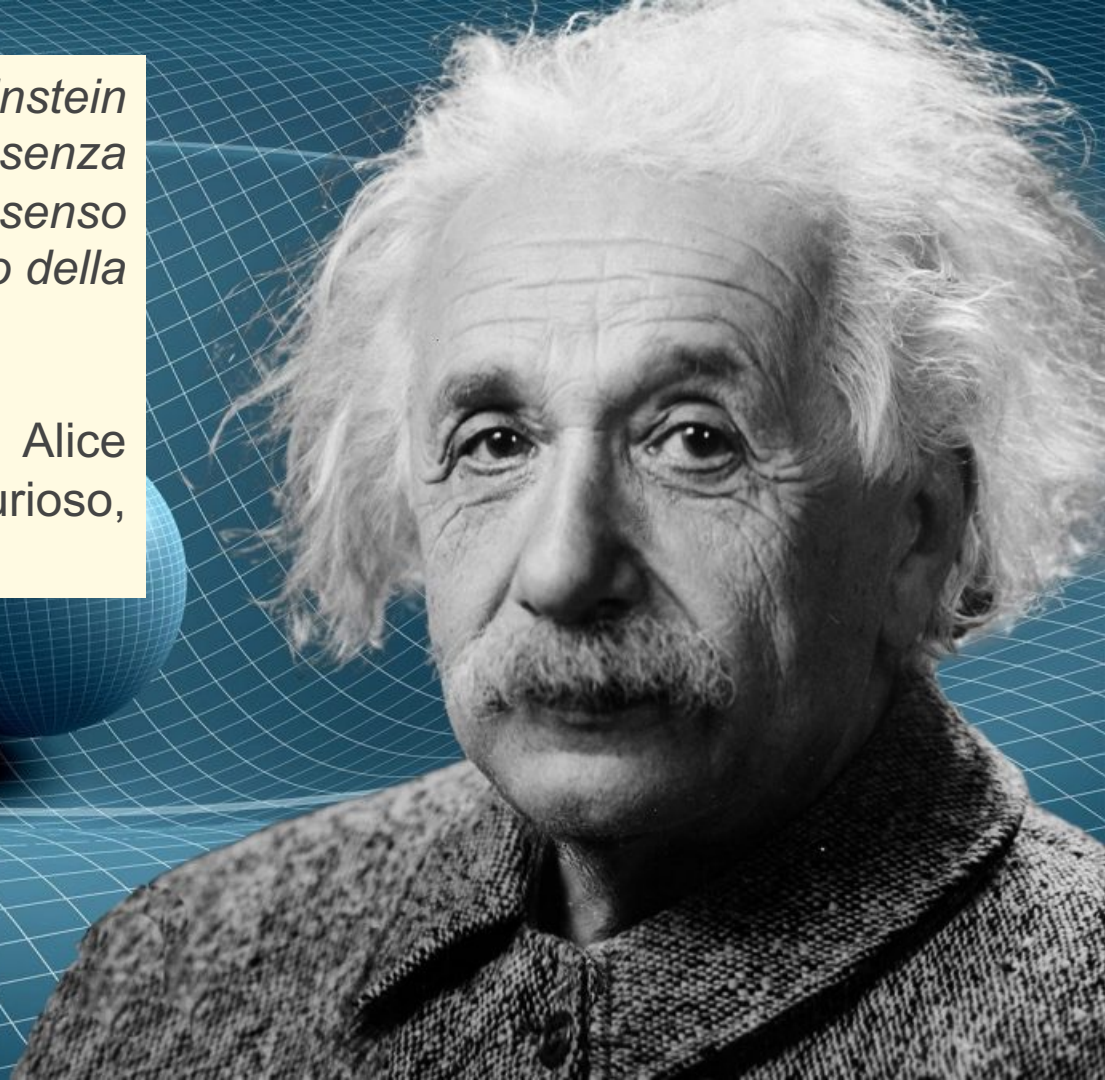


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

L'essenza della profondità di Einstein stava nella sua semplicità; e l'essenza della sua scienza stava nel suo senso artistico, nel suo fenomenale senso della bellezza.

Banesh Hoffmann, Citato in Alice Calaprice, *Pensieri di un uomo curioso*, 1996

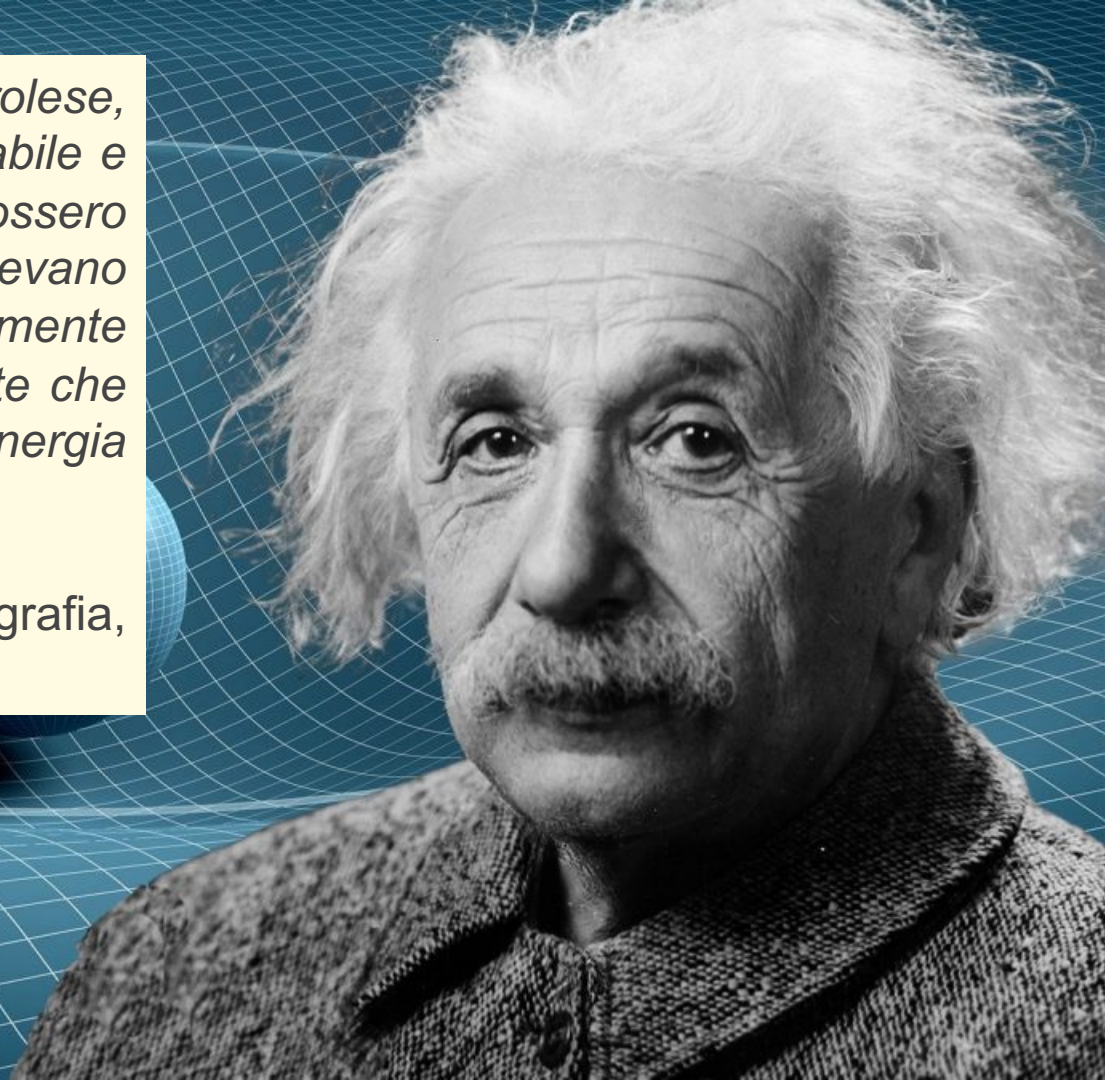


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Einstein aveva l'aria del tipico tirolese, nel miglior senso della parola, affabile e gioviale. E benché i suoi modi fossero calmi e gentili, sentii che nascondevano un temperamento estremamente emotivo, e che era da questa fonte che proveniva la sua straordinaria energia intellettuale.

Charlie Chaplin, La mia autobiografia, 1964

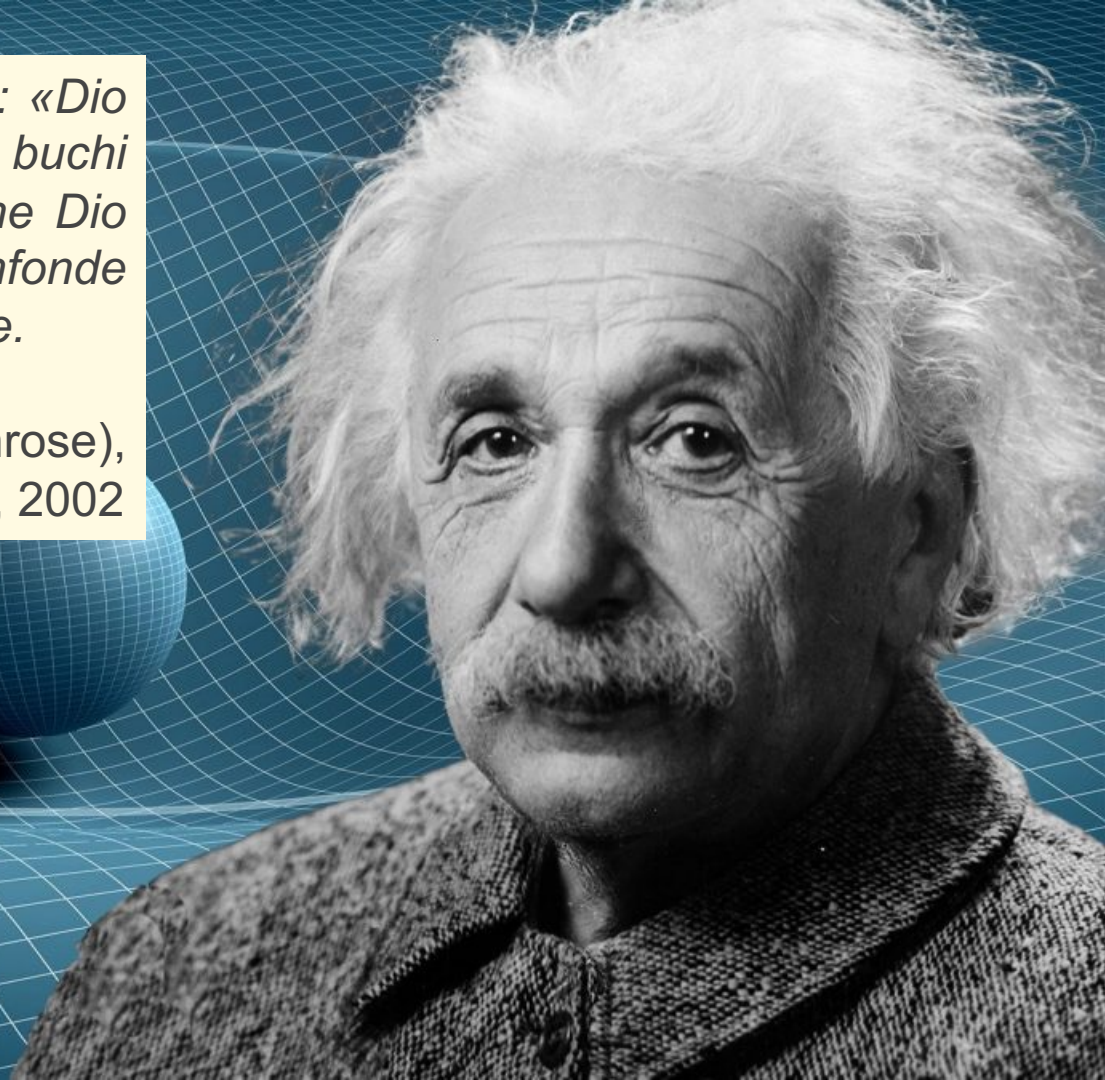


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Einstein [...] sbagliò quando disse: «Dio non gioca a dadi». L'esistenza dei buchi neri suggerisce infatti non solo che Dio gioca a dadi, ma che a volte ci confonde gettandoli dove non li si può vedere.

Stephen Hawking (e Roger Penrose),
La natura dello spazio e del tempo, 2002

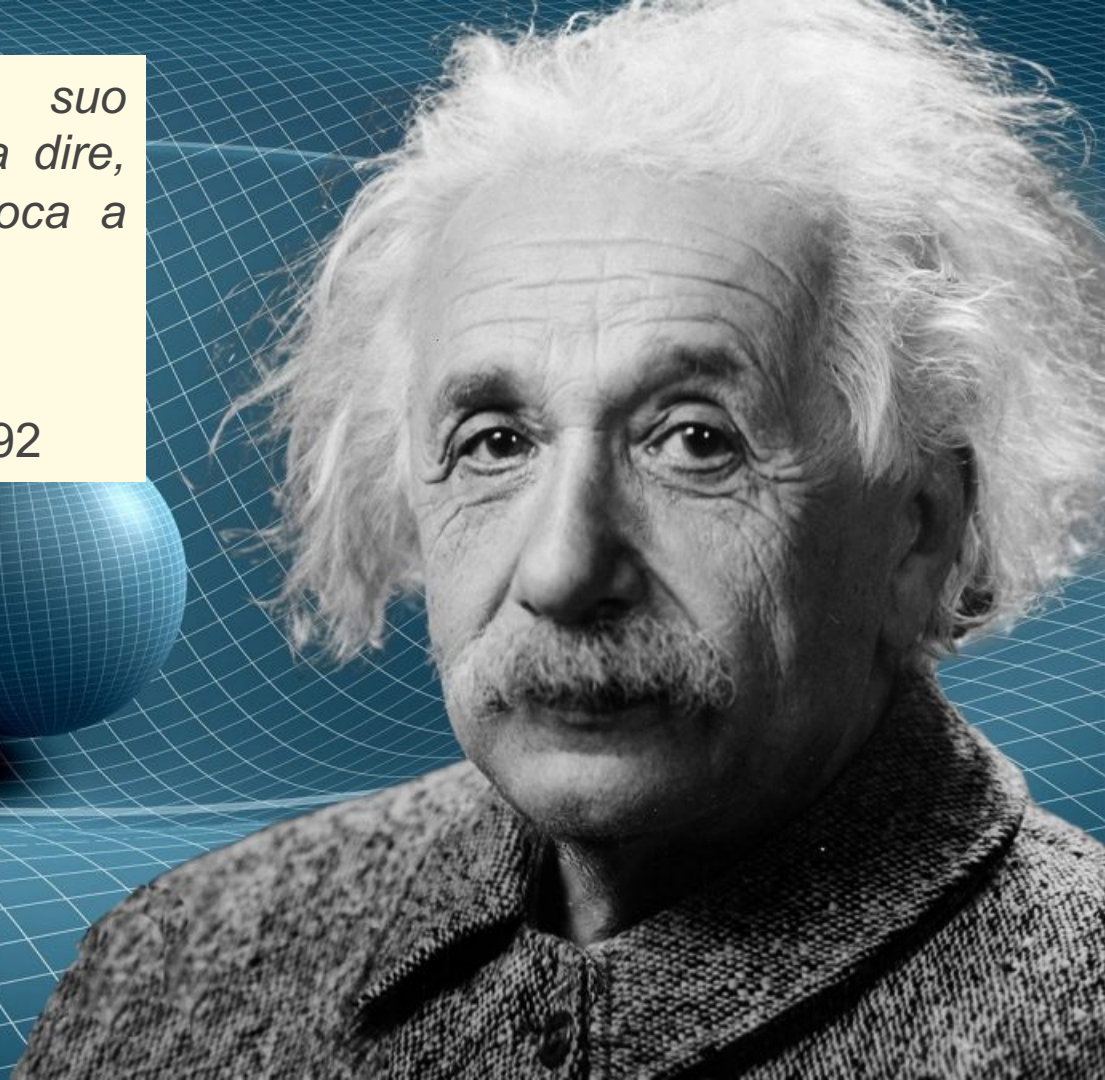


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

- *Einstein, alla festa per il suo settantesimo compleanno, ebbe a dire, facendo un brindisi: "dio non gioca a dadi con l'universo".*
- *No, gioca solo a nascondino.*

Woody Allen, in *Mariti e mogli*, 1992

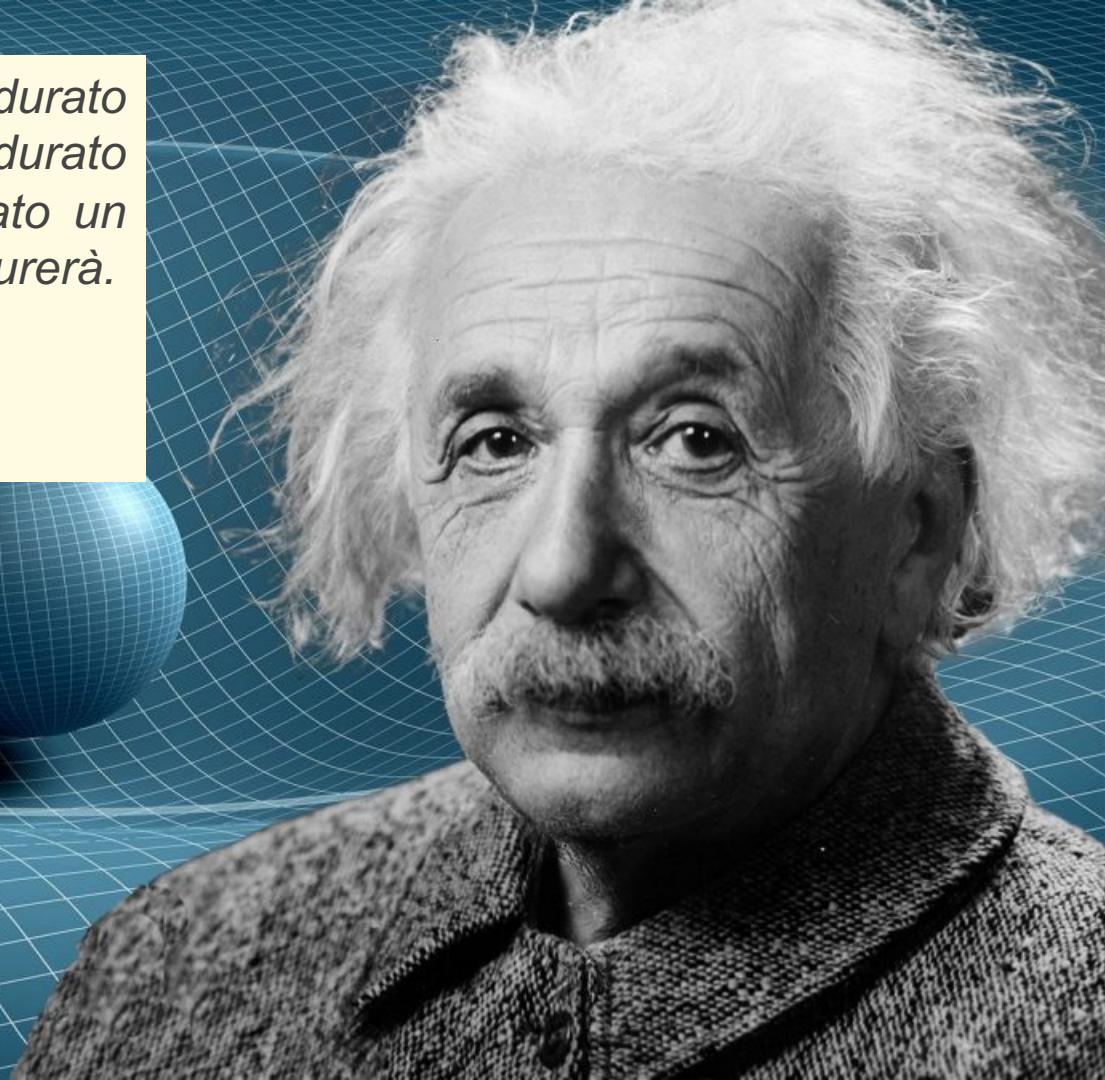


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Tolomeo ha costruito un universo durato 1400 anni e Newton un universo durato 300 anni. Anche Einstein ha creato un universo, ma non so dirvi quanto durerà.

George Bernard Shaw
(fonte sconosciuta)



Albert Einstein

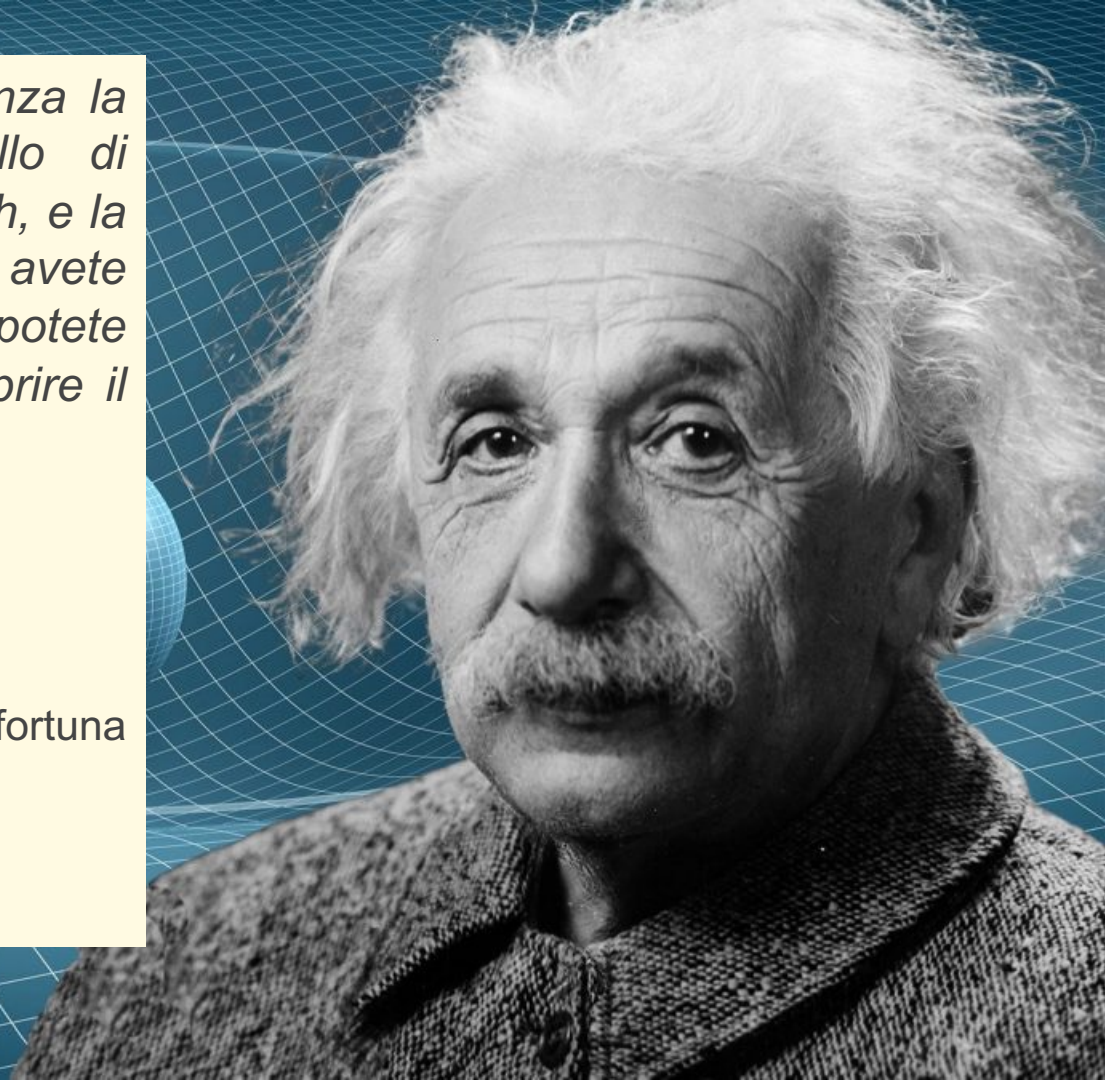
Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Nessuno può avere successo senza la fortuna. Potete avere il cervello di Einstein, l'astuzia di Barney Baruch, e la saggezza di Thoreau, ma se non avete dalla vostra parte la dea bendata potete pure chiudervi in una stanza e aprire il rubinetto del gas.

Groucho Marx, XX sec.
(fonte sconosciuta)

Per approfondimenti sul ruolo della fortuna nel raggiungimento del successo:

<http://www.pluchino.it/talent-vs-luck-book.html>

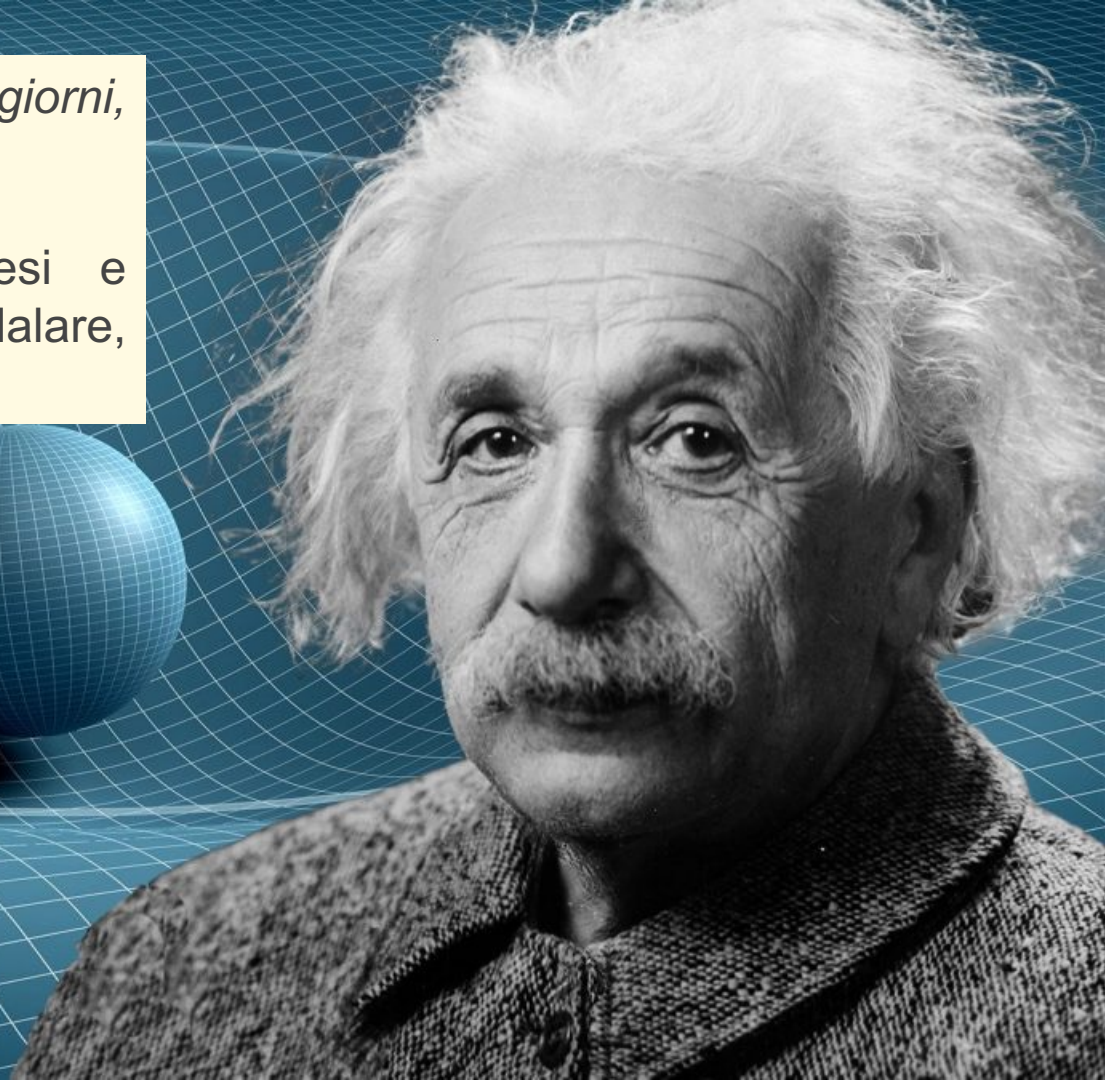


Albert Einstein

Crisi della Meccanica Classica e Relatività

Anche Einstein, intervistato tutti i giorni, farebbe la figura del cretino.

Michel Platini, Marco Pastonesi e Giorgio Terruzzi, Palla lunga e pedalare, 1992



Ma chi era Albert Einstein?

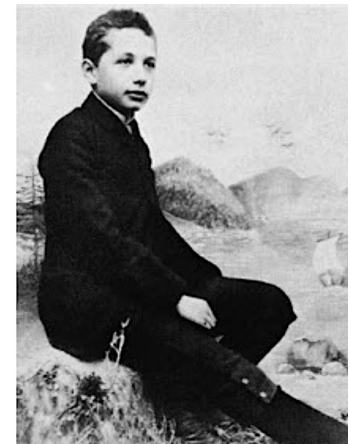
Albert Einstein nacque ad Ulm (Württemberg, Germania) il 14 marzo 1879 da modesta famiglia ebraica. Non si trovano nella sua fanciullezza indizi di facoltà straordinarie: invano si cercherebbero i segni premonitori di quella genialità che poi proruppe, come un fulmine a ciel sereno, nella sua giovinezza. All'età di cinque anni il padre gli mostrò una bussola tascabile ed Einstein si rese conto che qualcosa nello spazio "vuoto" agiva sull'ago spostandolo in direzione del nord; avrebbe descritto in seguito quest'esperienza come una delle più rivelatrici della sua vita. I suoi primi studi furono nel ginnasio a Monaco di Baviera ed apprese i primi rudimenti matematici da uno zio ingegnere. Pur manifestando una spiccata attitudine alle scienze esatte, non si distinse per meriti singolari. *«Sembra che abbia ottime qualità, non è però molto incline allo studio»*, questo fu il giudizio di uno dei suoi professori...



La madre **Pauline Kock** (1858-1920) e il padre **Hermann Einstein** (1847-1902)



Einstein bambino con sua sorella **Maja**



In uno studio fotografico di **Monaco** all'età di quattordici anni, 1893

Gli studi e l'amore per Mileva

Il **fallimento all'esame d'ingresso al Politecnico di Zurigo** nel **1895**, tentato nonostante non avesse l'età minima richiesta e non superato per un'insufficienza nel test di francese, fu una dura battuta d'arresto. Pertanto per concludere gli studi superiori **fu mandato dalla famiglia ad Aarau, ospite della famiglia Winteler**, dove riuscì a conseguire il **diploma** nel **1896**. Nell'ottobre dello stesso anno ritentò l'esame di ammissione al politecnico, superandolo. Durante il primo anno di **studi al politecnico**, nel **1896**, **conobbe Mileva Marić**, sua compagna di studi, di cui s'innamorò. Mileva era l'unica donna ammessa a frequentare il politecnico federale svizzero.



Mileva Maric (1875-1948)

Studente alla **scuola di Aarau**, ispirata alla pedagogia del riformatore Pestalozzi, con i suoi compagni di corso, 1896. Nella cittadina svizzera fu ospite della **famiglia Winteler** cui rimase legato per tutta la vita. Einstein è il primo in basso a sinistra.

La cittadinanza Svizzera

Einstein **concluse gli studi al politecnico** nel luglio del **1900**, superando gli esami finali con la votazione di 4,9/6 e classificandosi quarto su cinque promossi. Egli fu l'unico dei laureati a non ottenere un posto come assistente. Dopo essere stato apolide per più di cinque anni, **assunse la cittadinanza svizzera** nel **1901**, che tenne per il resto della sua vita. In quel periodo Einstein **discuteva dei suoi interessi scientifici** con Mileva e con un ristretto gruppo di amici, tra cui l'inseparabile **Michele Besso** e **Marcel Grossman**.



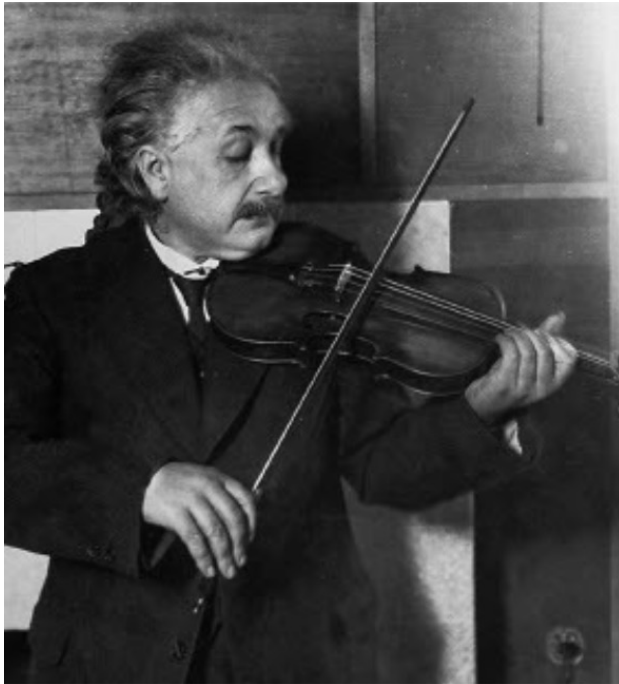
Michele Besso con al moglie **Anna Winteler**. Einstein conobbe quello che sarebbe diventato il suo miglior amico a Zurigo, lo chiamò a lavorare con lui all'Ufficio brevetti di Berna e ne fece il suo primo referente, **l'unico menzionato nella memoria del 1905 sulla Relatività Ristretta**.



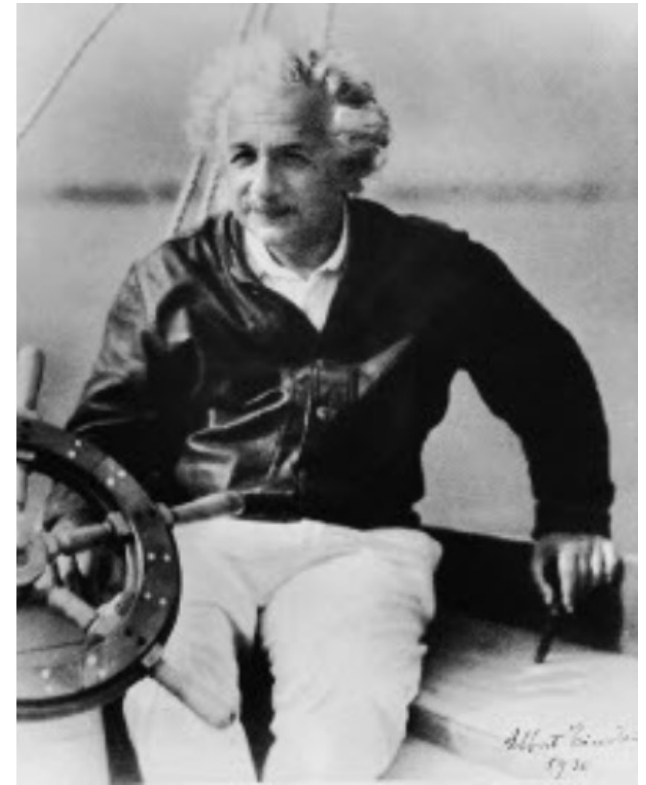
Marcel Grossmann (1878-1936), che lo aiutò con la matematica all'università e in seguito, come vedremo, soprattutto con riferimento alla **Relatività Generale**.

I suoi affezionati svaghi...

Nel frattempo, mentre studiava per ottenere il **dottorato di ricerca** presso l'Università di Zurigo, quando ne aveva l'occasione, **suonava il violino** (che la madre gli aveva fatto studiare sin da piccolo) e amava **andare in barca a vela** sugli splendidi laghi alpini intorno a Zurigo...



Einstein suonò il violino per tutta la vita, da solo o in compagnia, esibendosi anche in pubblico nelle più svariate occasioni, dalle manifestazioni di beneficenza alle serate organizzate per le sue conferenze in giro per il mondo.



Anche quella della vela fu una passione che non lo abbandonò mai...

La Famiglia e l'Ufficio Brevetti

Nel gennaio **1902 Mileva ebbe una figlia**, Lieserl, che morì presumibilmente di scarlattina. Quel parto illegittimo compromise gli studi della giovane che decise di sacrificarsi per la famiglia e la carriera accademica di Albert. Nel **1903 Albert e Mileva si sposarono** in municipio. In seguito Mileva avrebbe dato alla luce altri due figli: **Hans Albert (1904)**, che sarebbe diventato ingegnere ed **Eduard (1910)**, con ottime capacità nella musica e negli studi, che poi fu però travolto dalla malattia mentale e trascorse gran parte della sua vita tra la casa materna di Zurigo e un ospedale psichiatrico. **Intanto, per mantenere la famiglia, nel 1902 Einstein accetta un lavoro presso l'ufficio brevetti di Berna...**



Eduard, Mileva e Hans Albert



La Torre dell'orologio di Berna, fonte giornaliera di ispirazione per il giovane impiegato all'Ufficio Brevetti.

1905: L'Annus Mirabilis

Il **1905** fu un **anno di svolta nella vita di Einstein e nella storia della fisica**. Nel giro di sette mesi, mentre lavorava all'Ufficio Brevetti, pubblicò ben **sei lavori**:

1. Un articolo, ultimato il **17 marzo**, che spiegava l'effetto fotoelettrico in base alla composizione della radiazione elettromagnetica di quanti discreti di energia (poi denominati fotoni), secondo il concetto di quanto ipotizzato nel 1900 da Max Planck. Questo studio gli avrebbe valso il Premio Nobel per la fisica nel 1921 e avrebbe contribuito allo sviluppo della meccanica quantistica;
2. La tesi di dottorato sul tema "*Nuova determinazione delle dimensioni molecolari*", pubblicata il **30 aprile**. Sarebbe diventato lo scritto di Einstein più citato nella letteratura scientifica degli anni Settanta;
3. Un articolo, datato **11 maggio**, sul moto browniano, che costituiva uno sviluppo della sua tesi di dottorato;
4. Una prima memoria, in data **30 giugno**, dal titolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento) che aveva come oggetto l'interazione fra corpi carichi in movimento e il campo elettromagnetico vista da diversi osservatori in stati di moto differenti. La teoria esposta nell'articolo, nota successivamente con il nome di **Relatività Ristretta** (o **Speciale**), risolveva i contrasti tra teoria meccanica e teoria elettromagnetica della luce, che avevano caratterizzato la fisica dell'Ottocento, con una revisione dei concetti di spazio e di tempo assoluti;
5. Un'altra memoria sulla relatività ristretta, datata **27 settembre**, che conteneva la nota formula $E=mc^2$;
6. Un altro articolo sul moto browniano, pubblicato il **19 dicembre**.

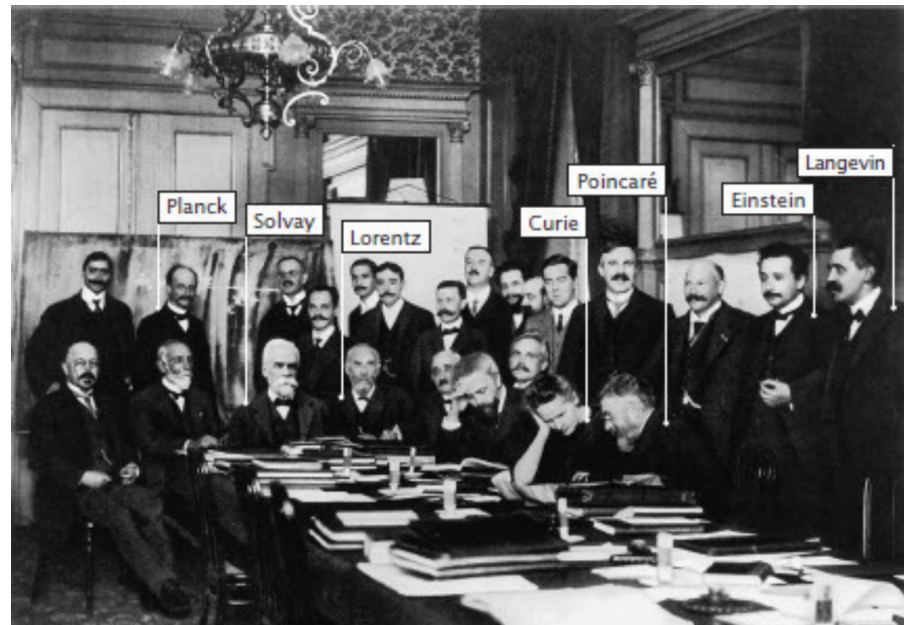
**Dei lavori del 1905 ne
riparleremo tra poco...**

L'insegnamento e la vita privata

Einstein **ottenne il dottorato** il 15 gennaio del **1906** e insegnò a **Berna** a partire dal **1908**. Nel **1909** pubblicò *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung*, sulla quantizzazione della luce. In questo e in un precedente scritto dello stesso anno dimostrò che **l'energia dei quanti di Max Planck deve avere una quantità di moto ben definita**. Questo scritto **introdusse il concetto di fotone** (anche se il termine "fotone" fu usato come tale da Gilbert Lewis nel **1926**) e **ispirò la nozione di dualismo onda-particella nella meccanica quantistica** (De Broglie **1924**). Nel **1911** si trasferì a **Praga** e nel **1914** fu nominato direttore dell'Istituto di Fisica dell'Università di **Berlino**, dove rimase fino al **1933**.



Nello studio di casa sua a **Berlino**



Primo **Congresso Solvay**. Bruxelles, 1911

L'insegnamento e la vita privata

Intanto, sin dal marzo **1912**, Einstein aveva iniziato una **relazione con la cugina trentaseienne divorziata Elsa Löwenthal** e della moglie diceva che era come una dipendente che non poteva licenziare. Per incontrare Elsa spariva per giorni finché andò via da casa, accettando poi di tornarci solo se la moglie avesse rispettato alcune **severissime condizioni**:

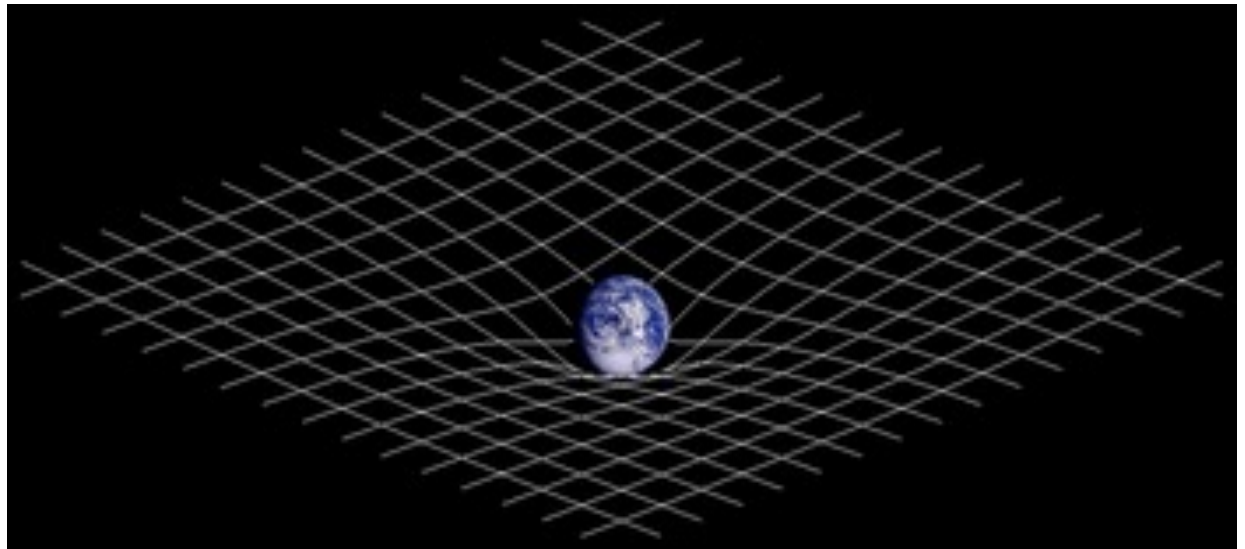
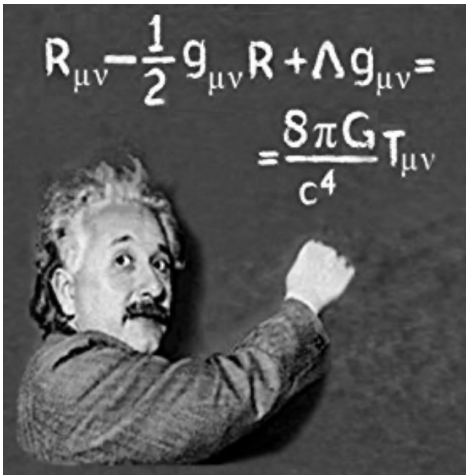


1. che i suoi vestiti e la biancheria fossero mantenuti in ordine e in buono stato;
2. che egli ricevesse i suoi tre pasti regolarmente nella sua stanza;
3. che la sua camera da letto e lo studio fossero sempre puliti e, in particolare, che sulla sua scrivania potesse mettere le mani solo lui. Mileva avrebbe anche dovuto rinunciare a ogni rapporto personale, astenersi dal criticarlo sia a parole sia con azioni davanti ai figli, e quanto ai rapporti personali con Einstein:
4. Non doveva aspettarsi intimità;
5. Doveva smettere immediatamente di rivolgersi a lui se lo richiedeva;
6. Doveva uscire all'istante dalla stanza e senza protestare se egli lo richiedeva

Mileva accettò comunque ed egli tornò a casa, ma dopo pochi mesi lei tornò con i figli a Zurigo e nel **1919 i due divorziarono**, a fronte di un **accordo economico** (pensione di reversibilità, aumentare i versamenti e ricevere tutto il denaro del futuro premio Nobel). **Nello stesso anno Einstein sposò in seconde nozze la cugina**, a cui restò legato fino alla morte di lei per malattia nel **1936**.

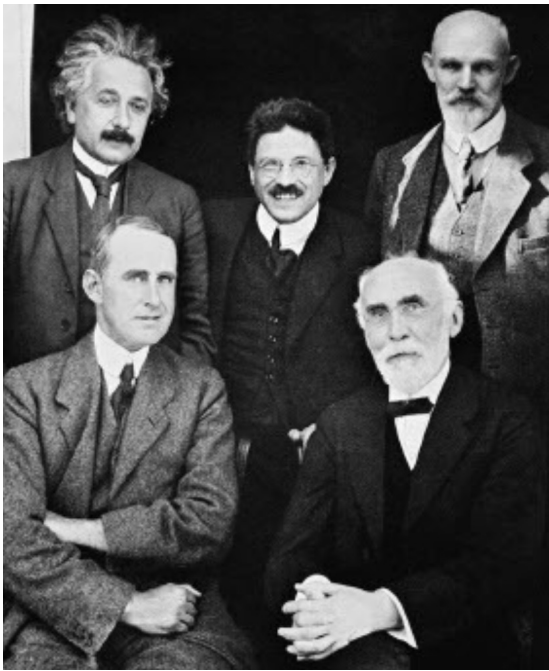
La Relatività Generale

Nel **1915**, dopo otto anni di duro lavoro e notevolissimo stress psicofisico, Einstein riuscì finalmente a proporre una teoria relativistica della gravitazione che descriveva le proprietà dello spaziotempo a quattro dimensioni: secondo tale teoria la gravità non è altro che la manifestazione della **curvatura dello spaziotempo**. Come vedremo meglio tra poco, Einstein dedusse le sue famose equazioni del campo gravitazionale partendo da quelle della relatività speciale, valide localmente solo per i sistemi inerziali, **imponendo l'equivalenza delle leggi fisiche per ogni possibile sistema di riferimento**, da cui il nome di "**Relatività Generale**". Alla pubblicazione, nel **1916**, la teoria venne accolta con **scetticismo** da parte della comunità scientifica, perché derivata unicamente da ragionamenti matematici e analisi razionali, e non da esperimenti e osservazioni.

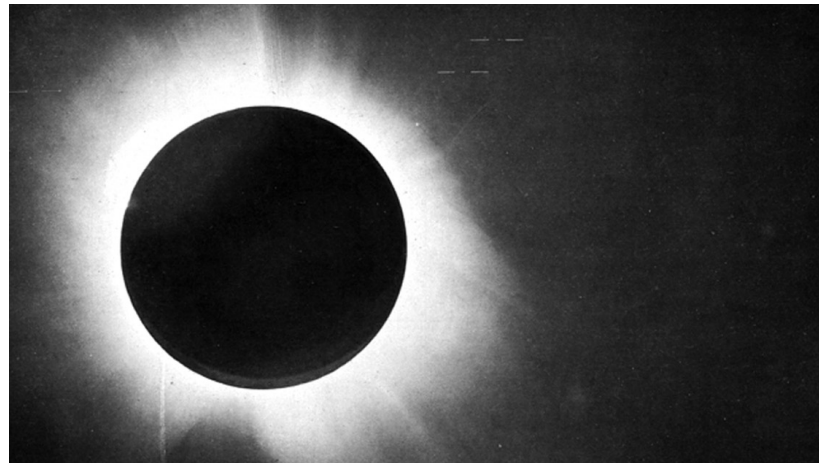
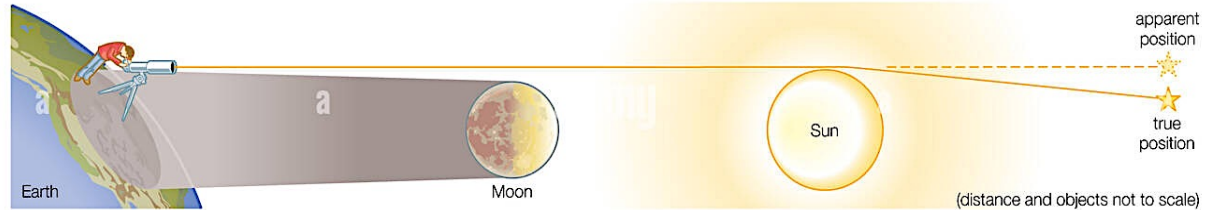


La Relatività Generale

Ma qualche anno più tardi, **nel 1919**, le predizioni della relatività generale furono **confermate dalle misurazioni dell'astrofisico Arthur Eddington** effettuate durante un'eclissi solare, che verificarono che la luce emanata da una stella era **deviata dalla gravità del Sole**. Da allora esperimenti sempre più precisi hanno ulteriormente confermato le predizioni della teoria, prevalentemente nell'ambito dell'astronomia e della cosmologia (ne ripareremo in dettaglio più avanti...).



A Leida, settembre 1923. In seconda fila, **Einstein**, **Ehrenfest** e **de Sitter**; davanti, **Eddington** e **Lorentz**.



L'eclissi del 1919 che fornì una prova a sostegno della teoria della **Relatività Generale**.

Finalmente il Premio Nobel...

Nel frattempo, nel **1917** Einstein aveva mostrato il **legame tra la legge di Bohr e la formula di Planck** dell'irraggiamento del corpo nero. Nello stesso anno aveva introdotto la nozione di **emissione stimolata**, che sarebbe poi stata applicata alla concezione del **laser**. A causa **dell'avversione** di alcuni suoi influenti colleghi, primo fra tutti l'avversario di sempre **Philip von Lenard**, il **Premio Nobel** gli fu assegnato solo nel **1921** (sebbene recapitato nel **1922**) e non per la Relatività ma per il suo lavoro del **1905** sulla spiegazione dell'effetto fotoelettrico, specificando nella motivazione che veniva riconosciuto *"senza tener conto del valore che verrà accordato alle sue teorie della relatività e della gravitazione una volta che in futuro saranno state confermate"*. Einstein **non ritirò** personalmente il premio e, come da accordi pregressi, destinò il denaro annesso all'ex moglie.



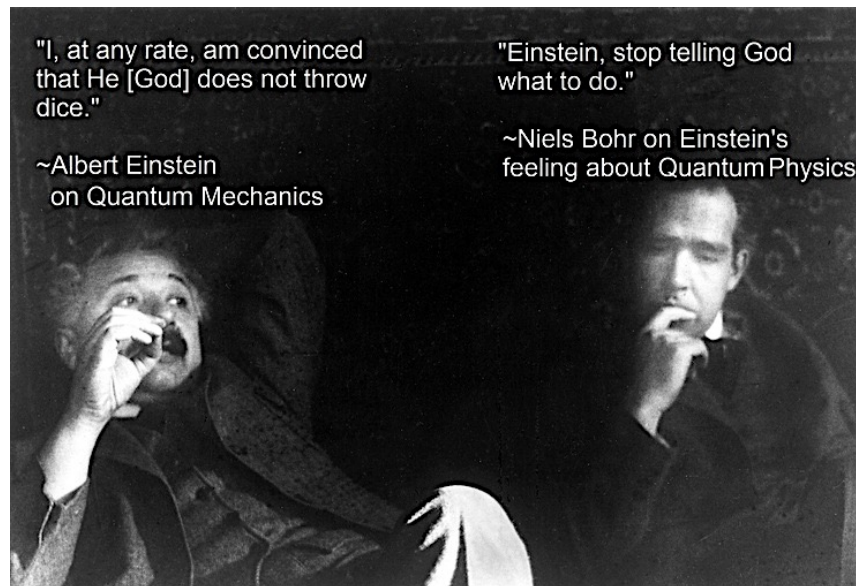
Einstein riceve la «**medaglia Planck**» dalle mani di **Planck** nel **1929**. Spesso questa foto viene spacciata per la consegna del Nobel...

Il suo rapporto con Niels Bohr

In quegli anni, oltre che alla **meccanica statistica** (distribuzione quantistica di Bose-Einstein del **1924** e ipotesi del «condensato», poi osservato nel **1995**), cominciò a dedicarsi alla **ricerca di teorie di campo unificate**, argomento che lo appassionò fino alla fine, assieme ai tentativi di **spiegazioni alternative dei fenomeni quantistici**; infatti la sua **concezione realista** del mondo fisico mal si conciliava con le interpretazioni probabilistiche della meccanica quantistica. Il più celebre tentativo in questo senso fu **l'elaborazione del paradosso EPR** (*Einstein-Podolsky-Rosen*) elaborato con **Boris Podolsky** e **Nathan Rosen**, che lo mise in contrapposizione con **Niels Bohr**. Il fisico danese, anche lui premio Nobel **1922** e creatore della interpretazione di Copenaghen, fu per tutta la vita **amico, avversario e interlocutore privilegiato di Einstein**.

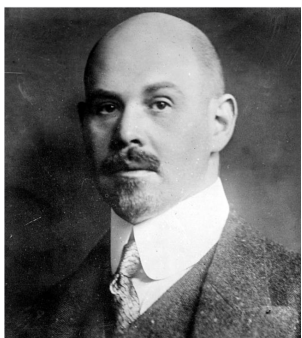


Niels Bohr (1885-1962)



Avvento del Nazismo e fuga negli USA

Sin dagli **anni Venti**, il crescente **antisemitismo** in Germania aveva creato un ambiente particolarmente scomodo per i tedeschi di origine ebraica, scienziati compreso. Einstein aveva cominciato a ricevere **lettere minatorie e ingiurie** mentre usciva dal suo appartamento o dall'ufficio. Il clima era diventato particolarmente caldo quando il 24 giugno **1922 era stato assassinato il ministro degli esteri Walther Rathenau**, che era ebreo e suo amico. Ma Albert ed Elsa avevano resistito ed erano rimasti a Berlino. Durante gli **anni Trenta**, con i nazisti al potere, **i premi Nobel Philipp von Lenard e Johannes Stark condussero una strenua campagna atta a screditare i lavori di Einstein**, etichettandoli come "fisica ebraica", in contrasto con la "fisica tedesca" o "ariana". Nel **1933**, anno in cui **Hitler** divenne **Cancelliere**, venne promulgata la "**Legge della Restaurazione del Servizio Civile**", a causa della quale tutti i professori universitari di origine ebraica furono licenziati. Fu solo allora che **Einstein decise di trasferirsi definitivamente negli Stati Uniti**, dove era già stato più volte per lavoro e dove acquisì la cittadinanza nel **1940**, non rientrando più in Europa fino alla morte.



I roghi di libri sono stati decisi **in Germania nel 1933 dal governo nazista**. Tutti i libri non in linea con l'ideologia nazista vennero bruciati: gettati dalle finestre, accumulati per strada, trasformati in falò.

Walther Rathenau Philip von Lenard

Gli anni di Princeton

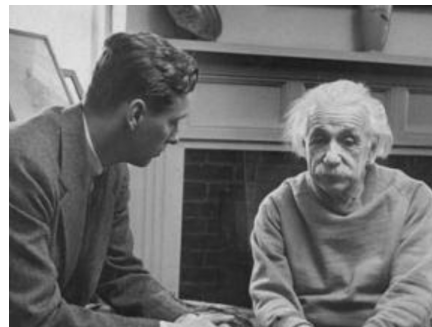
Presso l'**Institute for Advanced Study di Princeton**, oltre all'insegnamento e alle apparizioni in pubblico, Einstein proseguì le sue ricerche dedicandosi anche alcuni problemi cosmologici e alle probabilità delle transizioni atomiche. Negli ultimi anni di vita **tentò di unificare la gravità e l'elettromagnetismo**, le due forze fondamentali allora conosciute, sebbene fosse già iniziato lo studio della forza nucleare forte e della forza nucleare debole, quest'ultima per opera di Enrico Fermi. Nel **1950** descrisse la sua **teoria di unificazione, rivelatasi poi parzialmente errata**, in un articolo sulla rivista *Scientific American*. Durante la sua permanenza a Princeton negli **anni Cinquanta** Einstein strinse amicizia con il matematico austriaco **Kurt Gödel**, pur avendo un temperamento estremamente diverso da lui, mentre ebbe come vicino di stanza in Dipartimento il fisico-matematico ungherese **John von Neumann** dal carattere guascone ed estroverso. Incontrava anche regolarmente il giovane fisico **David Bohm**, poi autore della più celebre interpretazione alternativa della meccanica quantistica.



La casa di Einstein a **Princeton** (New Jersey), dove visse dal 1935 al 1955.



Einstein e Gödel



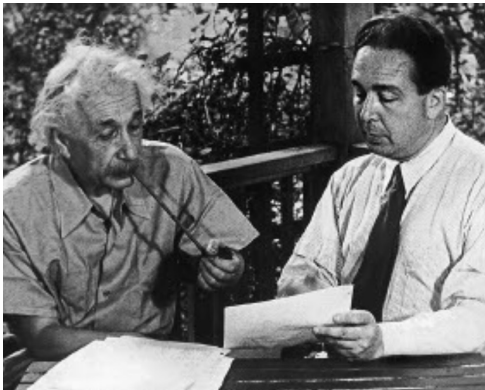
Einstein e Bohm



John von Neumann

Einstein e l'Atomica

In principio fu favorevole alla realizzazione della bomba atomica al fine di prevenirne la costruzione da parte di Hitler. Per questo scrisse una lettera (il 2 agosto del **1939**, su pressione di **Leó Szilárd**) al presidente **Roosevelt**, incoraggiandolo a iniziare un programma di ricerca scientifico-tecnologica per sfruttare l'energia nucleare a scopi civili e dichiarando che essa poteva essere utilizzata anche per creare delle bombe molto potenti. Roosevelt rispose creando un comitato per studiare la possibilità di usare l'uranio come arma nucleare, poi assorbito dal **Progetto Manhattan** (diretto da Robert Oppenheimer). Successivamente Einstein cambiò posizione e, insieme con **Albert Schweitzer** e **Bertrand Russell**, combatté contro i test e le sperimentazioni militari della bomba atomica, facendo pressioni per il disarmo nucleare. Non fu ascoltato quando, nel **1945**, si oppose al lancio della stessa bomba sul Giappone. Viene attribuita a lui la celebre frase: «*Non so con quali armi verrà combattuta la terza guerra mondiale, ma la quarta verrà combattuta con clave e pietre*».



Einstein con Leó Szilárd

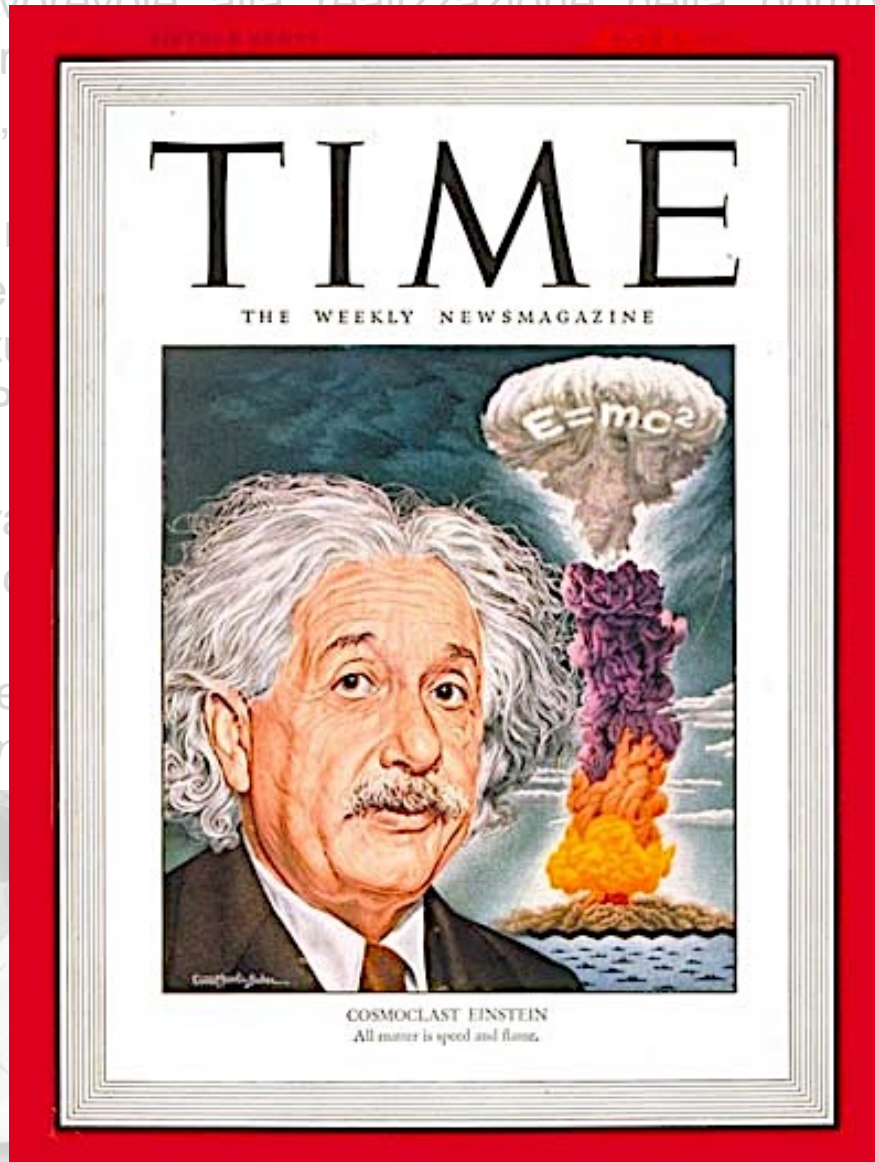


Con Robert Oppenheimer



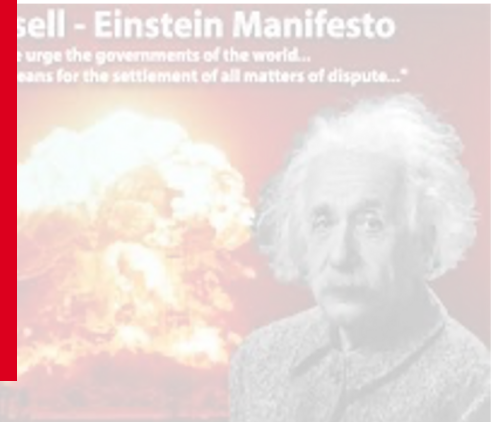
Einstein e l'Atomica

In principio fu favorevole alla realizzazione della bomba atomica al fine di prevenirne la costruzione. Il 2 agosto del 1939, incoraggiandolo a sfruttare l'energia atomica, Roosevelt rispose creando un comitato per studiare l'assorbimento del plutonio. Successivamente, Einstein e Robert Oppenheimer, insieme con Albert Einstein, sperimentazioni militari. Non fu ascoltato sul Giappone. Viene combattuta la terza guerra mondiale, m



Einstein con Leò Szilard

Con Robert Oppenheimer



La Morte

Il 17 aprile del **1955** fu colpito da una **improvvisa emorragia** causata dalla rottura di un aneurisma dell'aorta addominale, arteria che era stata già rinforzata precauzionalmente con un'operazione chirurgica nel **1948**. Fu ricoverato **all'ospedale di Princeton**, dove **morì nelle prime ore del mattino** del giorno dopo (ore 1:15 del **18 aprile 1955**) **a 76 anni**.



Di ritorno dal suo ufficio **all'Institute for Advanced Study**. Princeton, 1953

Aveva espresso verbalmente il **desiderio di essere cremato**, ma Thomas Stoltz Harvey, il patologo che effettuò l'autopsia, di propria iniziativa rimosse il cervello per conservarlo e studiarlo. Quando i parenti di Einstein furono messi al corrente, per il bene della scienza acconsentirono al **sezionamento del suo cervello in 240 parti** da consegnare ad altrettanti ricercatori; la parte più grossa è custodita nell'ospedale di Princeton. **Il resto del corpo fu cremato** e le ceneri furono disperse in un luogo segreto.

Lo **studio di Einstein a Princeton** come lo lasciò. Einstein continuò a lavorare nel suo ufficio all'università fino alla fine: sono visibili le sue carte, i suoi libri, le sue formule

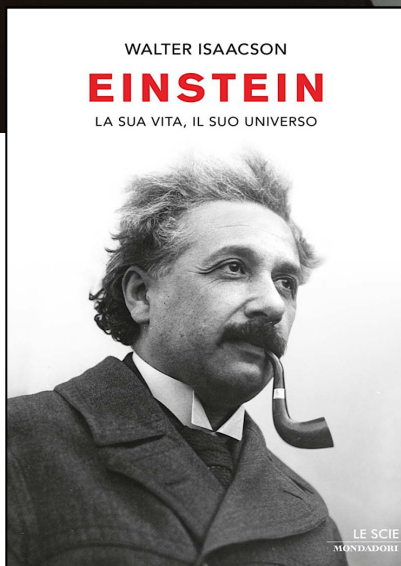
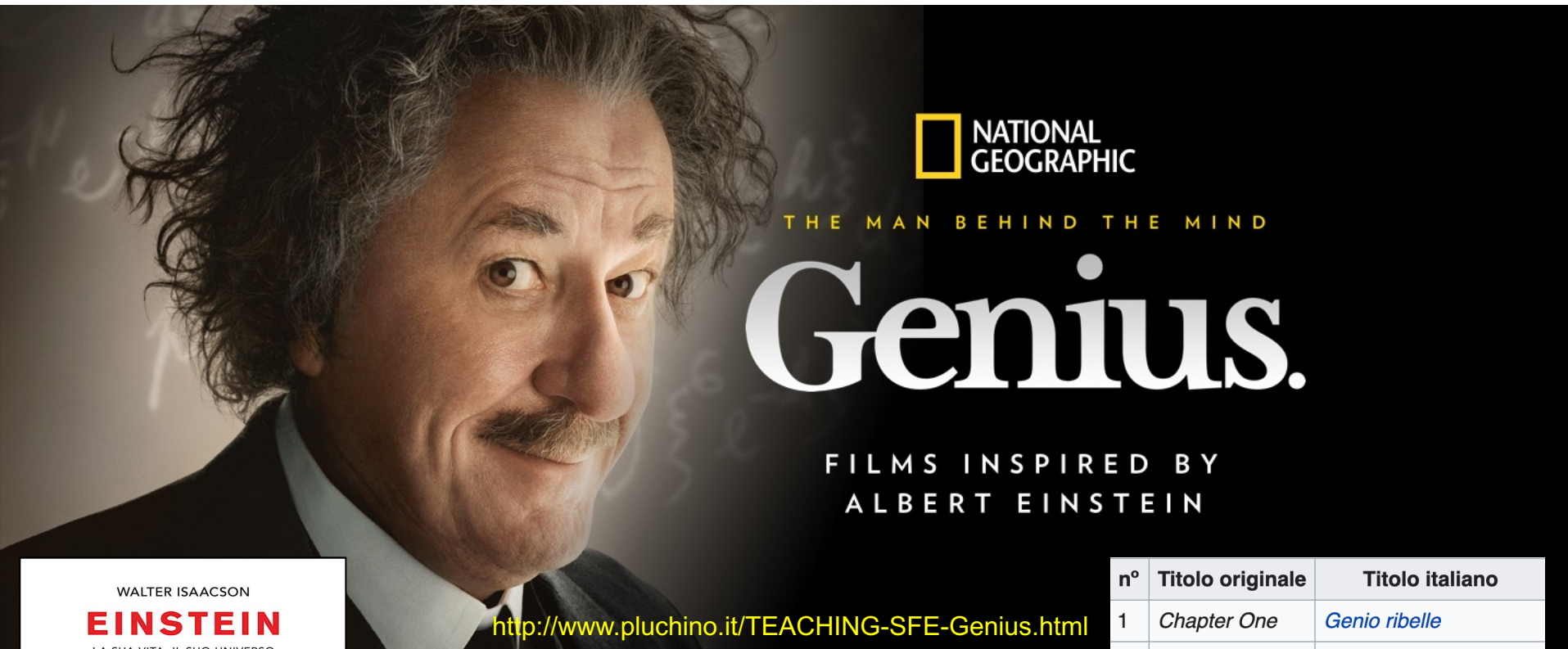


La Morte

Il 17 aprile del **1955** fu colpito da una **improvvisa emorragia** causata dalla rottura di un aneurisma dell'aorta addominale, arteria che era stata già rinforzata precauzionalmente con un'operazione chirurgica nel 1948. Fu ricoverato **all'ospedale di Princeton**, dove **morì nelle prime ore del mattino** del giorno dopo (ore 1:15 del **18 aprile 1955**) **a 76 anni**.



Serie TV su vita e opera di Einstein



n°	Titolo originale	Titolo italiano
1	Chapter One	<i>Genio ribelle</i>
2	Chapter Two	<i>L'amore per Mileva</i>
3	Chapter Three	<i>I primi passi</i>
4	Chapter Four	<i>L'anno del miracolo</i>
5	Chapter Five	<i>La teoria della relatività</i>
6	Chapter Six	<i>Un nuovo amore</i>
7	Chapter Seven	<i>Gli anni della guerra</i>
8	Chapter Eight	<i>In fuga dalla Germania</i>
9	Chapter Nine	<i>In esilio</i>
10	Chapter Ten	<i>Gli ultimi anni</i>

Torniamo al 1905: L'Annus Mirabilis

«Caro Habicht,

*tra noi è scesa una cappa di silenzio così solenne che mi sembra quasi di commettere un sacrilegio spezzandola con qualche ciarla insignificante ... Allora, che stai combinando, balena congelata, razza di spirito affumicato, rinsecchito, inscatolato? ... Perché non mi hai ancora mandato la tua dissertazione? Non sai, miserabile, che sono una delle 1 1/2 persone che la leggerebbero con interesse e piacere? **Ti prometto in cambio quattro articoli. Il primo ha per oggetto la radiazione e le proprietà energetiche della luce ed è decisamente rivoluzionario, come vedrai se prima mi mandi il tuo lavoro. Il secondo articolo è una determinazione delle dimensioni effettive degli atomi ... Il terzo dimostra che corpi dell'ordine di grandezza di 1/1000 di millimetro, in sospensione nei liquidi, devono già compiere un moto casuale osservabile che è causato dall'agitazione termica. Tale movimento dei corpi in sospensione è stato effettivamente osservato dai fisiologi che lo chiamano moto molecolare browniano. Il quarto articolo è soltanto un abbozzo iniziale a questo punto, ed è un'elettrodinamica dei corpi in movimento che fa ricorso a una modificazione della teoria dello spazio e del tempo.»***

Lettera a Conrad Habicht, matematico svizzero e amico personale di Einstein, 18 o 25 maggio 1905

Torniamo al 1905: L'Annus Mirabilis



EFFETTO FOTOELETTRICO

MOTO BROWNIANO

RELATIVITA' RISTRETTA

Torniamo al 1905: L'Annus Mirabilis



EFFETTO FOTOELETTRICO

Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (1905), in *Annalen der Physik*, **17**, p. 132-148.

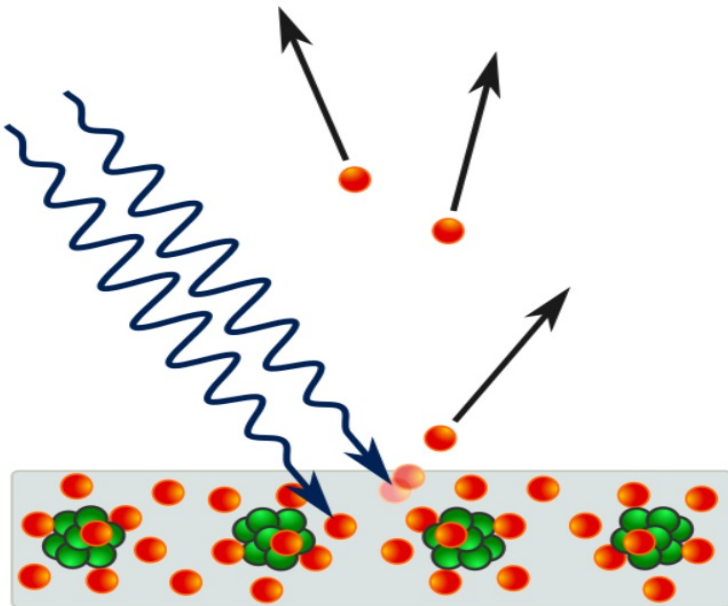
Trad. It. *Un punto di vista euristico sulla produzione e la trasformazione della luce*

Effetto Fotoelettrico

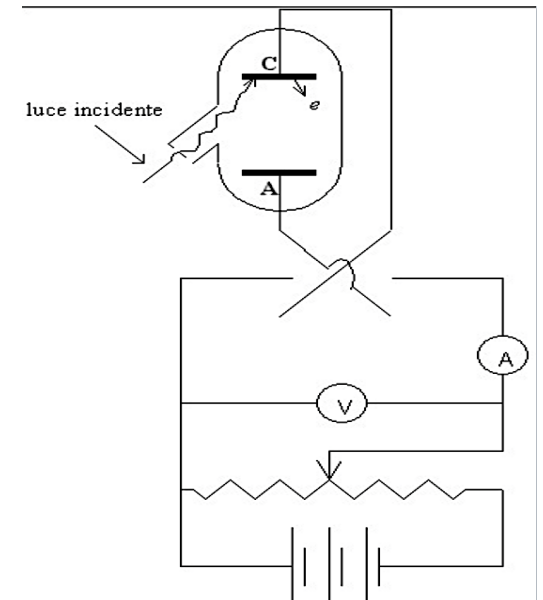
L'Effetto fotoelettrico è un **fenomeno quantistico** consistente nell'emissione di **elettroni** da una superficie **metallica** quando viene colpita da una **radiazione elettromagnetica di frequenza** non inferiore a un certo valore soglia caratteristico di ogni metallo (**soglia fotoelettrica**).

L'effetto fotoelettrico era stato rivelato da **Hertz** nel **1887** nell'ambito dell'esperimento ideato per generare e rivelare le **onde elettromagnetiche**

Nel **1902** **Lenard** aveva studiato tale effetto, trovando che la luce incidente su una superficie metallica provoca appunto **l'emissione di elettroni**, la cui energia non dipende dall'intensità della luce, come vorrebbe la fisica classica, **ma solo dalla sua frequenza**.



Philip von Lenard
Nobel 1905



Effetto Fotoelettrico

Come comprese Einstein, riprendendo la teoria di Planck, l'effetto fotoelettrico evidenzia la natura quantistica della luce. Nella radiazione elettromagnetica, l'energia non è distribuita in modo uniforme sull'intero fronte dell'onda ma è concentrata in singoli quanti (pacchetti discreti) di energia, i fotoni (termine che, come già detto, verrà però coniato solo nel 1926). **Un solo fotone per volta**, e non l'intera onda nel suo complesso, **interagisce singolarmente con un elettrone, al quale cede la sua energia**.

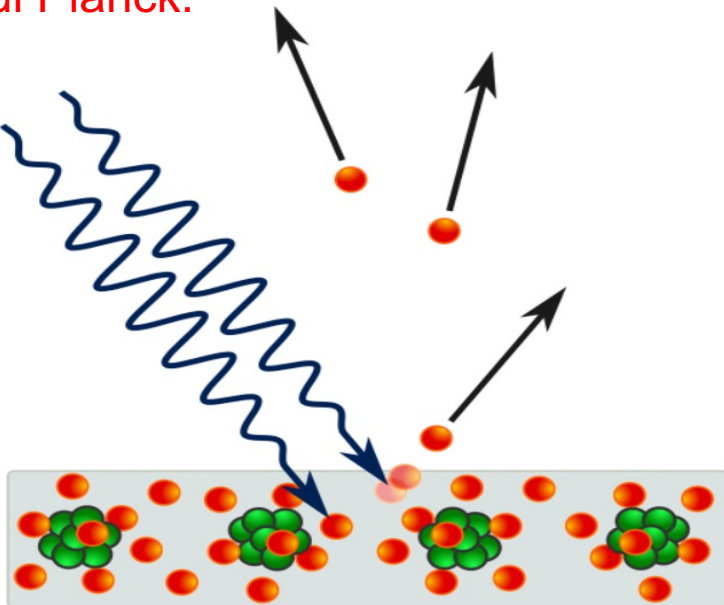
Affinché ciò si verifichi è necessario che il singolo fotone abbia **un'energia sufficiente a rompere il legame elettrico** che tiene legato l'elettrone all'atomo. Questa "**soglia minima**" di energia del fotone si determina in base alla **relazione di Planck**:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda},$$

In altri termini, l'elettrone può uscire dal metallo **solo se l'energia del fotone è almeno uguale al "lavoro di estrazione"**:

$$hf \geq W_e$$

che rappresenta quindi una «soglia minima» tipica di ogni metallo e **dipendente solo dalla frequenza del fotone incidente**..



Torniamo al 1905: L'Annus Mirabilis



MOTO BROWNIANO

Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen (1905),
in *Annalen der Physik*, **17**, p. 549–560.

Trad. It. *Il moto di piccole particelle sospese in liquidi in quiete, secondo la teoria cinetico-molecolare del calore*

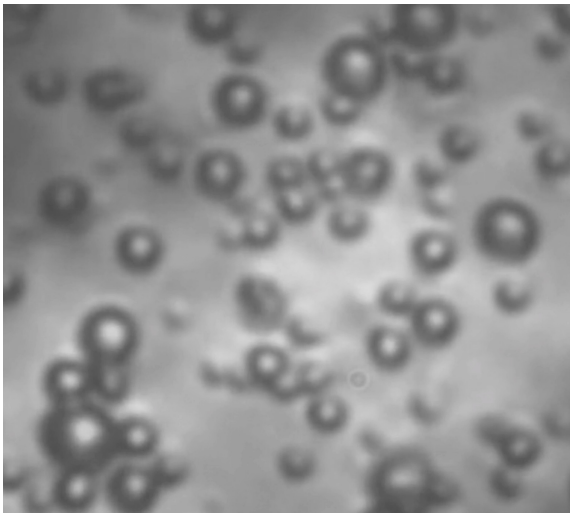
Moto Browniano

Con il termine **moto browniano** si fa riferimento al moto disordinato di particelle sufficientemente piccole (aventi diametro dell'ordine del micrometro) da essere sottoposte a una forza di gravità trascurabile, presenti in fluidi o sospensioni fluide o gassose, e osservabile al microscopio. **Il fenomeno fu scoperto agli inizi dell'Ottocento dal botanico scozzese Robert Brown.**

Robert Brown
(1773-1858)

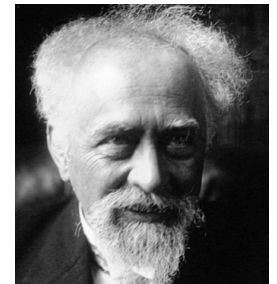


Moto browniano al microscopio delle particelle di grasso dello yogurt (diluito in acqua)



Alla fine del XIX secolo, il chimico francese **Leon Gouy** ipotizzò per primo che il moto osservato da Brown fosse dovuto all'agitazione termica degli atomi costituenti la materia, ma non sviluppò una teoria verificabile del fenomeno. **Nel suo articolo del 1905 Einstein fornì una spiegazione fisica del moto browniano, attribuendone la causa agli urti dei granuli di polline con le molecole d'acqua, a loro volta mosse dall'agitazione termica.** Egli riuscì inoltre a dare una descrizione quantitativa del fenomeno, che poteva essere sperimentalmente verificata.

La prima **verifica sperimentale** dei risultati di Einstein sarà dovuta a **J. B. Perrin**, che per questo, e altri risultati, ottenne nel **1926** il premio **Nobel**.



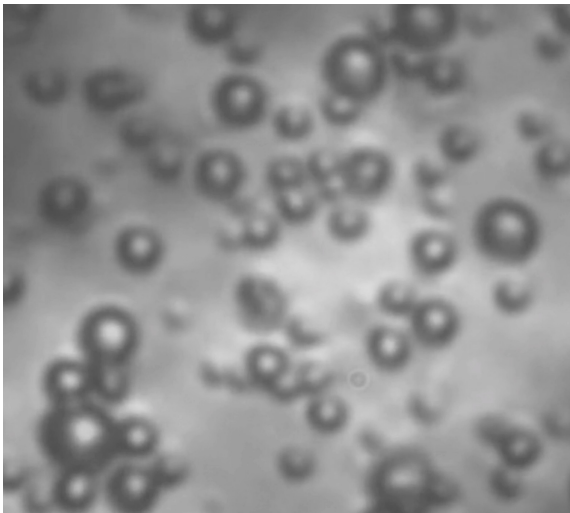
Moto Browniano

Con il termine **moto browniano** si fa riferimento al moto disordinato di particelle sufficientemente piccole (aventi diametro dell'ordine del micrometro) da essere sottoposte a una forza di gravità trascurabile, presenti in fluidi o sospensioni fluide o gassose, e osservabile al microscopio. **Il fenomeno fu scoperto agli inizi dell'Ottocento dal botanico scozzese Robert Brown.**

Robert Brown
(1773-1858)

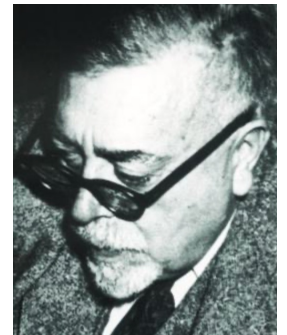


Moto browniano al microscopio delle particelle di grasso dello yogurt (diluito in acqua)



Da un punto di vista teorico, il lavoro di Einstein fu ulteriormente sviluppato da **M. Smoluchowski e P. Langevin**. I loro contributi sono all'origine del nuovo campo dei **processi stocastici e delle equazioni differenziali stocastiche**, che estendono gli strumenti matematici inizialmente sviluppati per il moto browniano alla rappresentazione di una vasta classe di fenomeni, di interesse, oltre che della **fisica**, anche della **chimica, della teoria delle telecomunicazioni e della finanza**.

Tra gli sviluppi matematici della trattazione dei moti browniani successivi al lavoro di Einstein è particolarmente noto anche quello proposto da **N. Wiener** nel **1923**, noto come **processo di Wiener** (→ **rumore gaussiano bianco**)



Torniamo al 1905: L'Annus Mirabilis



RELATIVITA' RISTRETTA

Zur Elektrodynamik bewegter Körper (1905), in *Annalen der Physik*, **17**, p. 891–921.

Trad. It. *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*

Relatività Ristretta

«Nella cultura di massa, la Teoria della Relatività Ristretta o Speciale è vista come la creazione solitaria e istantanea di Einstein. In realtà è il frutto di un processo storico complesso a cui hanno contribuito molti scienziati, sia teorici che sperimentali, con risultati positivi e con errori, sia prima che dopo il 1905»

(A.Bettini)



Relatività Ristretta

«Nella cultura di massa, la Teoria della Relatività Ristretta o Speciale è vista come la creazione solitaria e istantanea di Einstein. In realtà è il frutto di un processo storico complesso a cui hanno contribuito molti scienziati, sia teorici che sperimentali, con risultati positivi e con errori, sia prima che dopo il 1905»

(A.Bettini)



Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)



Jules Henri Poincaré (1854-1912)



Albert Einstein (1879-1955)

Nel 1905 **Einstein** era un giovane e sconosciuto impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna, **Poincaré** un importante scienziato e un brillante docente di matematica della Sorbona e dell'École Polytechnique, e **Lorentz** un'autorità scientifica e morale universalmente riconosciuta, considerato il grande vecchio della fisica teorica.

H.A.Lorentz, «Fenomeni elettromagnetici in un sistema in moto con una velocità arbitraria minore della velocità della luce», maggio 1904

J.H.Poincaré, «Sulla dinamica dell'elettrone», luglio 1905 (prima versione gennaio 1905)

A.Einstein, «L'elettrodinamica dei corpi in movimento», giugno 1905

Cosa si sapeva nel giugno 1905

-Il «Principio di Relatività» (Poincaré 1895-1904): «Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali».



«Quale sarà dunque la nostra posizione di fronte a queste nuove/ idee? Saremo costretti a modificare le nostre conclusioni? Certamente no: abbiamo adottato una convenzione perché ci sembrava comoda, e affermiamo che nulla può costringerci ad abbandonarla.

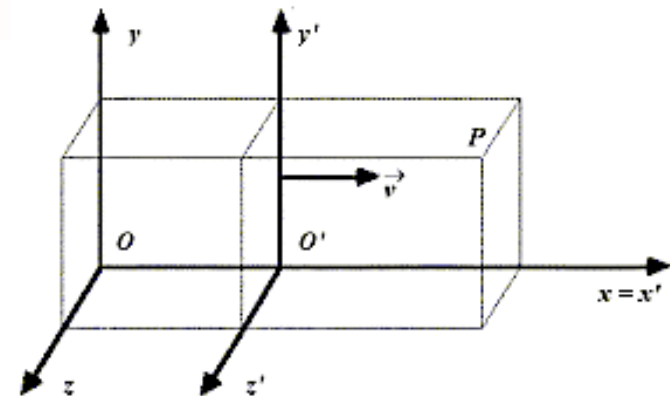
Oggi certi fisici vogliono adottare una nuova convenzione. Essi non sono costretti a questo cambiamento: semplicemente, giudicano più comoda la nuova convenzione; e quelli che non condividono questa opinione possono in pieno diritto mantenere la vecchia per non turbare le loro antiche abitudini.

Io credo, sia detto tra noi, che sia proprio questo che essi faranno per molto tempo ancora.»

Poincaré, Ultimi pensieri, 1913



Il Principio di Relatività galileiano affermava che **le leggi della meccanica** hanno sempre la stessa forma nei sistemi di riferimento inerziali



Cosa si sapeva nel giugno 1905

-Il «Principio di Relatività» (Poincaré 1895-1904): «Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali».

-Asimmetrie elettromagnetiche. Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo ma lo sono rispetto a quelle di Lorentz.

-Le trasformazioni di Lorentz (Voigt 1887, Lorentz 1895, 1899, 1904, Poincaré 5/6/1905).



Trasformazioni di Lorentz

$$t' = \frac{\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{(x - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$v \ll c$

Trasformazioni di Galileo

$$t' = t$$

$$x' = (x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$



Cosa si sapeva nel giugno 1905

-Il «Principio di Relatività» (Poincaré 1895-1904): «Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali».

-Asimmetrie elettromagnetiche. Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo ma lo sono rispetto a quelle di Lorentz.

-Le trasformazioni di Lorentz (Voigt 1887, Lorentz 1895, 1899, 1904, Poincaré 5/6/1905).

-L'invarianza della velocità della luce: nessun esperimento ne aveva messo in luce la dipendenza da un SR. La velocità della luce nel vuoto è insuperabile.

$$t' = \frac{\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{(x - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

c è la velocità della luce nel vuoto

ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto

μ_0 la permeabilità magnetica del vuoto.

Cosa si sapeva nel giugno 1905

-Il «Principio di Relatività» (Poincaré 1895-1904): «Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali».

-Asimmetrie elettromagnetiche. Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo ma lo sono rispetto a quelle di Lorentz.

-Le trasformazioni di Lorentz (Voigt 1887, Lorentz 1895, 1899, 1904, Poincaré 5/6/1905).

-L'invarianza della velocità della luce: nessun esperimento ne aveva messo in luce la dipendenza da un SR. La velocità della luce nel vuoto è insuperabile.

$$t' = \frac{\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{(x - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

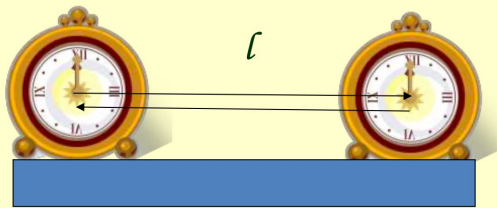
$$c' = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} < c$$

c' è la velocità della luce in un mezzo
 ϵ_r è la costante dielettrica relativa
 μ_r è la costante dielettrica relativa

Cosa si sapeva nel giugno 1905

- Il «Principio di Relatività» (Poincaré 1895-1904): «Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali».
- Asimmetrie elettromagnetiche. Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo ma lo sono rispetto a quelle di Lorentz.
- Le trasformazioni di Lorentz (Voigt 1887, Lorentz 1895, 1899, 1904, Poincaré 5/6/1905).
- L'invarianza della velocità della luce: nessun esperimento ne aveva messo in luce la dipendenza da un SR. La velocità della luce nel vuoto è insuperabile.
- Velocità della luce=c rispetto a quale riferimento? Si pensava a quello dell'Etere Luminifero.

Calcolo della differenza nei tempi di andata e ritorno nei casi di apparato fermo e in moto rispetto all'etere.



Sistema fermo rispetto all'etere

$$t = \frac{2l}{c}$$

Sistema in moto rispetto all'etere

$$t' = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} > \frac{2l}{c}$$

La differenza nei tempi di percorso nei due casi è

$$t' - t = \frac{2lc}{c^2 - v^2} - \frac{2l}{c} = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{1 - \beta^2} - 1 \right) \cong \frac{2l}{c} (1 + \beta^2)$$

Effetto del secondo ordine

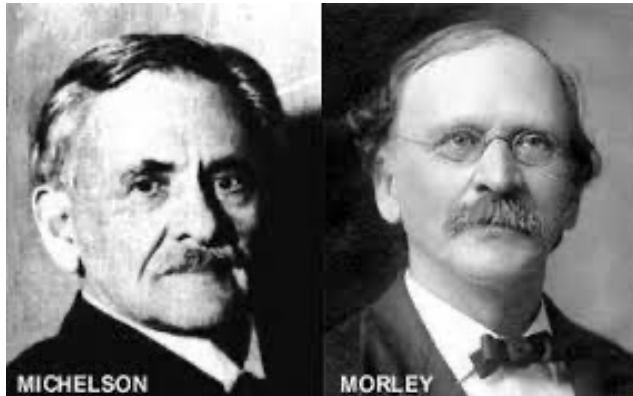
$$\beta^2 = \frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{3 \cdot 10^4 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \right)^2 = 10^{-8}$$

Quale apparato sperimentale è in grado di rilevarlo?

Se fosse possibile una misura in sola andata l'effetto sarebbe del primo ordine.

Cosa si sapeva nel giugno 1905

- Il «Principio di Relatività» (Poincaré 1895-1904): «Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali».
- Asimmetrie elettromagnetiche. Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo ma lo sono rispetto a quelle di Lorentz.
- Le trasformazioni di Lorentz (Voigt 1887, Lorentz 1895, 1899, 1904, Poincaré 5/6/1905).
- L'invarianza della velocità della luce: nessun esperimento ne aveva messo in luce la dipendenza da un SR. La velocità della luce nel vuoto è insuperabile.
- Velocità della luce= c rispetto a quale riferimento? Si pensava a quello dell'Etere Luminifero. L'evidenza sperimentale: non esistono effetti di trascinamento dell'etere in v/c (Fizeau 1851); non esistono effetti in $(v/c)^2$ (Michelson Morley 1887) nella misura della velocità della luce. Poincaré: non devono esistere effetti per qualunque potenza di v/c .



Michelson – Morley (1881- 1887)
Non citato da Einstein nel 1905

Michelson Morley Experiment
A famous experiment which failed. (?*)
*Nobel Prize, 1907

The diagram illustrates the Michelson-Morley experiment setup. It shows a 'Rest Frame' with two perpendicular arms of length $L = 1 \text{ m}$. The time for light to travel to the end of each arm and back is $t = \frac{2L}{c}$. A 'Moving Frame' is shown moving with velocity v relative to the Rest Frame. The time for light to travel to the end of each arm and back in the Moving Frame is $t' = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. The difference in time between the two arms is $t' - t = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{2L}{c}$. For the velocity of Earth around the Sun, $v = 3 \times 10^4 \text{ m/s}$, then $t' - t = 3 \times 10^{-17} \text{ s}$. For $T = 10^{-15} \text{ s}$, this is 3% of a fringe shift, and Michelson's instrument could detect that.

Gli effetti del moto della terra sul tempo di transito di un raggio di luce sono dell'ordine di $(v/c)^2 \sim 10^{-8}$. Le misure precise di Michelson Morley (1887) non li rilevarono.

A schematic diagram of the Michelson-Morley experiment setup. It shows a 'Source' of light, a 'Beam Splitter', a 'Compensator', a 'Movable Mirror', and a 'Fixed Mirror'. The light path is shown as a red line. The resulting 'Fringe Shift' is shown as a wavy line.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/relativ/michelson>

Cosa si sapeva nel giugno 1905

- Il «Principio di Relatività» (Poincaré 1895-1904): «Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali».
- Asimmetrie elettromagnetiche. Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo ma lo sono rispetto a quelle di Lorentz.
- Le trasformazioni di Lorentz (Voigt 1887, Lorentz 1895, 1899, 1904, Poincaré 5/6/1905).
- L'invarianza della velocità della luce: nessun esperimento ne aveva messo in luce la dipendenza da un SR. La velocità della luce nel vuoto è insuperabile.
- Velocità della luce= c rispetto a quale riferimento? Si pensava a quello dell'Etere Luminifero. L'evidenza sperimentale: non esistono effetti di trascinamento dell'etere in v/c (Fizeau 1851); non esistono effetti in $(v/c)^2$ (Michelson Morley 1887) nella misura della velocità della luce. Poincaré: non devono esistere effetti per qualunque potenza di v/c .
- La contrazione delle lunghezze (ad hoc da FitzGerald 1889 e Lorentz 1892, come conseguenza delle trasformazioni di Lorentz da Larmor 1898). Ma si riteneva fosse un fatto dinamico, di variazione delle forze interatomiche.
- La dipendenza della misura degli intervalli di tempo dal riferimento («tempo apparente» di Lorentz, «tempo locale» di Poincaré). La simultaneità deve essere definita mediante una convenzione sulla velocità della luce.
- C'è mescolamento dello spazio con il tempo (Poincaré). La legge di composizione delle velocità (Larmor 1900, 5.6.1905 Poincaré).
- La necessità di modificare la meccanica e la legge della gravitazione di Newton (Poincaré e non Einstein). La dipendenza della massa di un elettrone dalla velocità. Il fallimento della legge di Newton nel descrivere il moto di elettroni ad alta velocità.

I due postulati della Relatività Speciale

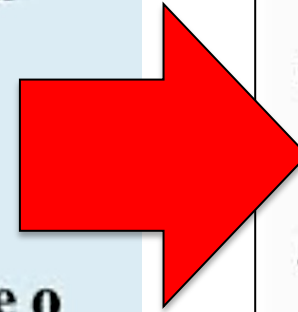
«Discutendo l'indipendenza della velocità della luce dalla direzione di propagazione Poincaré scriveva: "Questo è un postulato senza il quale sarebbe impossibile iniziare una qualsiasi misura di questa velocità. Resterà per sempre impossibile verificare sperimentalmente la validità di questo postulato". L'ultima frase potrebbe essere chiamata "la maledizione di Poincaré". Trovando impossibile risolvere il problema per via empirica, Einstein decise di risolverlo per decreto, assumendo l'invarianza della velocità della luce: questo è il secondo postulato della TRS.

(F.Selleri)

APPROCCIO ASSIOMATICO DI EINSTEIN:



- Le leggi della fisica assumono la stessa forma in ogni sistema di riferimento inerziale.
- La velocità della luce nel vuoto è indipendente dal moto dell'osservatore o della sorgente.



Trasformazioni di Lorentz

$$t' = \frac{(t - \frac{v}{c^2} x)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{(x - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

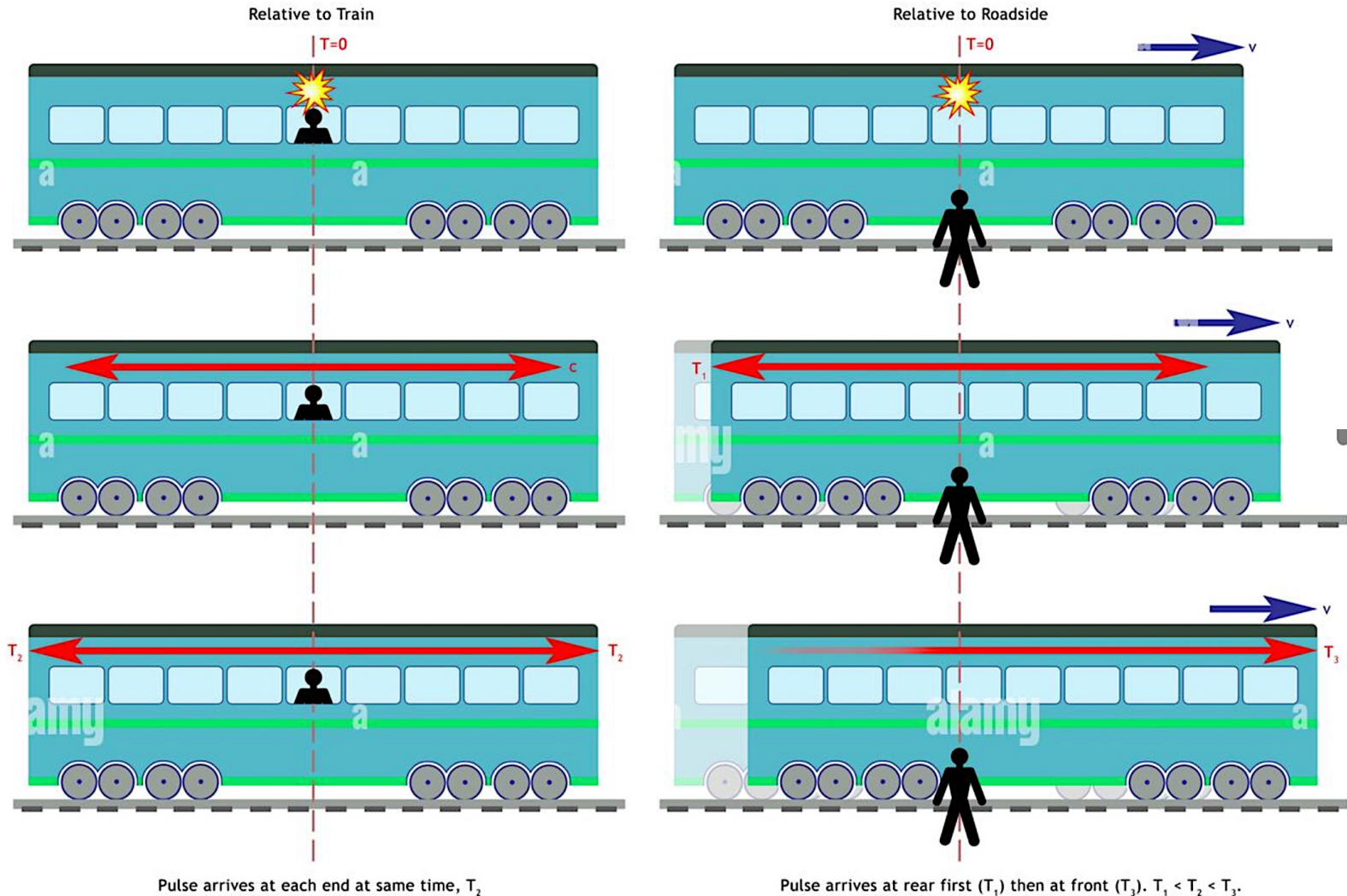
Quella dell'Etere diventa un'ipotesi non più necessaria...

I due postulati della Relatività Speciale

« ...i tentativi andati a vuoto di constatare un moto della terra relativamente al “mezzo luminoso” portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica non corrisponda ad alcuna proprietà dell’esperienza, e che inoltre per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni meccaniche debbano valere anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche, come già `e dimostrato per le quantità del prim’ordine. **Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato “principio di relatività”) come postulato, e oltre a questo introdurremo il postulato con questo solo apparentemente incompatibile, che la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata c** , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti. Questi due postulati bastano a pervenire ad un’elettrodinamica dei corpi in movimento semplice ed esente da contraddizioni, costruita sulla base della teoria di Maxwell per i corpi in quiete. L’introduzione di un “etere luminoso” si dimostra fin qui come superflua, in quanto secondo l’interpretazione sviluppata non si introduce uno “spazio assoluto in quiete” dotato di proprietà speciali, n´e si associa un vettore velocità ad un punto dello spazio vuoto nel quale abbiano luogo processi elettromagnetici. La teoria da svilupparsi si fonda - come ogni altra elettrodinamica - sulla cinematica dei corpi rigidi, poiché le affermazioni di una tale teoria riguardano relazioni tra corpi rigidi (sistemi di coordinate), orologi e processi elettromagnetici. La non sufficiente considerazione di queste circostanze `e la radice delle difficoltà, con le quali l’elettrodinamica dei corpi in movimento attualmente deve lottare.» (A.Einstein, *L’elettrodinamica dei corpi in movimento*, 1905)

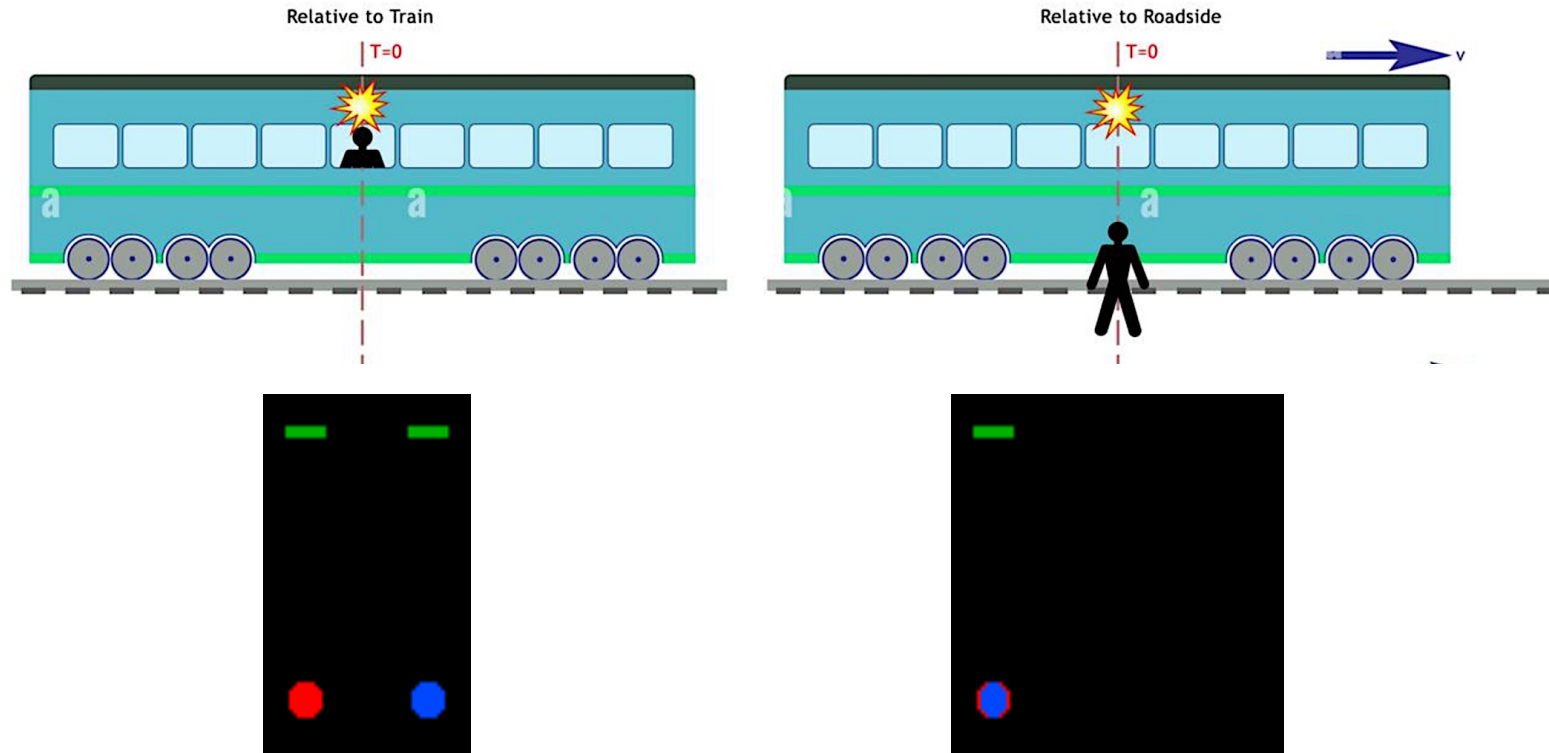
Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende innanzitutto che due eventi simultanei in un sistema di riferimento inerziale (ad es. un treno) non lo siano più in un altro (ad es. la stazione)...



Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende innanzitutto che due eventi simultanei in un sistema di riferimento inerziale (ad es. un treno) non lo siano più in un altro (ad es. la stazione)...



Due raggi di luce emessi contemporaneamente da due sorgenti ferme l'una rispetto all'altra. I raggi compiono un identico percorso e un osservatore *stazionario* li vede tornare insieme.

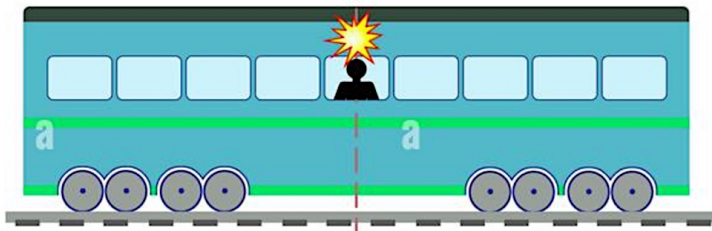
Se uno dei due raggi è emesso da una sorgente in moto (sorgente blu), l'osservatore stazionario non li vede tornare insieme perché la sorgente si muove, ma la velocità della luce è costante e quindi la luce deve fare (per l'osservatore stazionario) un cammino più lungo: impiegherebbe quindi più tempo.

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende innanzitutto che due eventi simultanei in un sistema di riferimento inerziale (ad es. un treno) non lo siano più in un altro (ad es. la stazione) ma anche una **nuova legge di composizione delle velocità**...

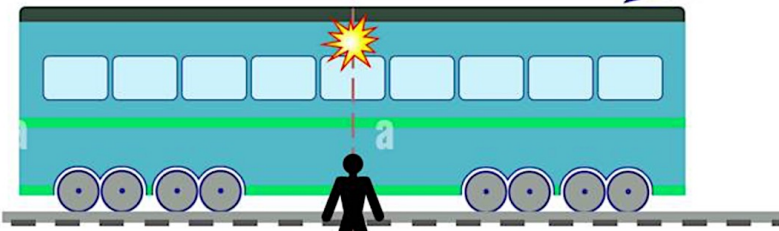
Relative to Train

$T=0$



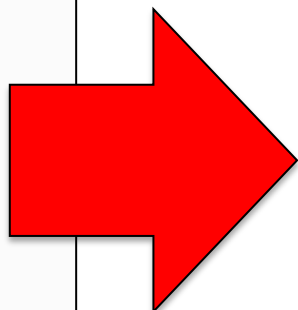
Relative to Roadside

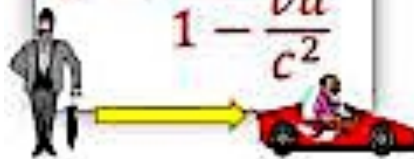
$T=0$

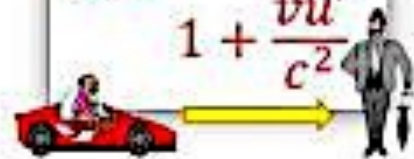


Trasformazioni di Lorentz

$$t' = \frac{(t - \frac{v}{c^2}x)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$x' = \frac{(x - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$



$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{vu}{c^2}}$$


$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$


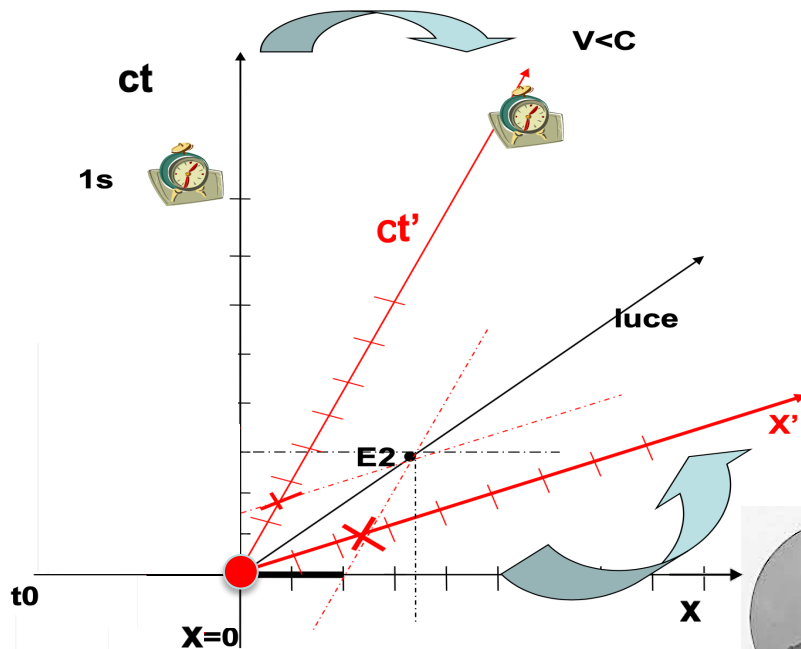


Le leggi di composizione relativistica delle velocità si riducono a quelle di Galileo quando le velocità in gioco sono piccole rispetto a "c"

Harmonia Cosmos

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come **la dilatazione del tempo** e **la contrazione delle lunghezze**, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata **cronotopo** o **spaziotempo** (Minkowski 1907).



$$\left\{ \begin{aligned} L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \\ \Delta t' &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \end{aligned} \right.$$

Fattore di dilatazione di Lorentz

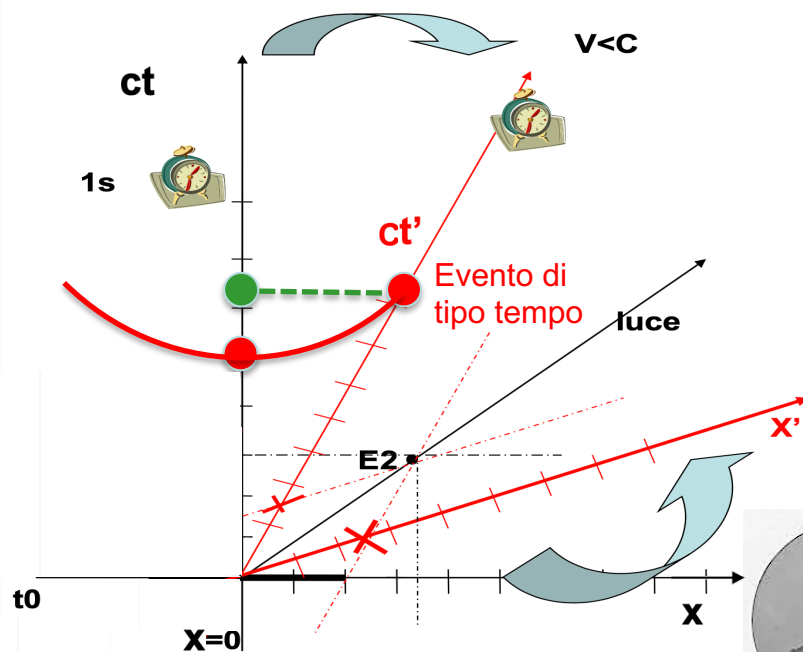


«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombra, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come **la dilatazione del tempo** e **la contrazione delle lunghezze**, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata **cronotopo** o **spaziotempo** (Minkowski 1907).



Intervallo spazio-temporale invariante

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2$$

IPERBOLE EQUILATERA
IN UNO SPAZIO 1D + TEMPO

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma}$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t$$

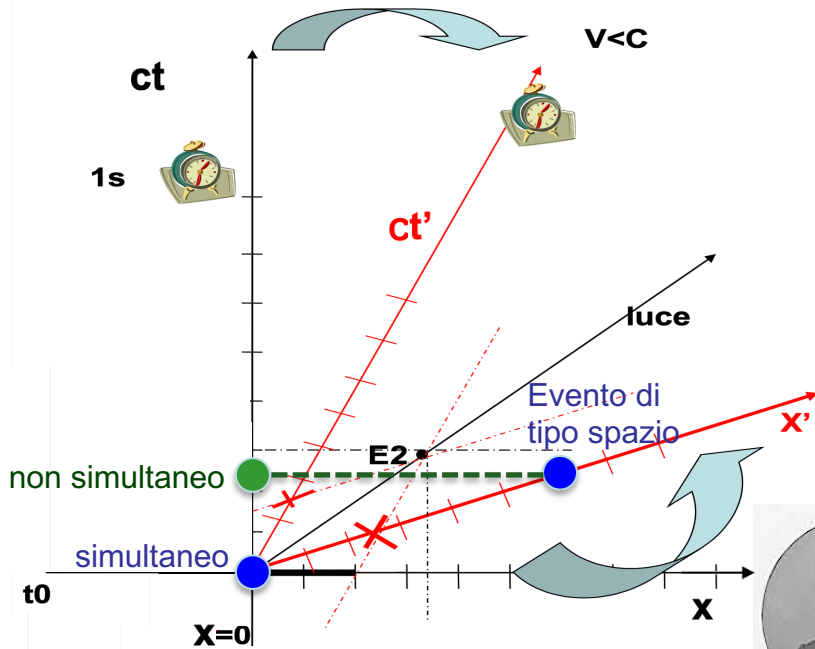
Fattore di dilatazione di Lorentz

«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombra, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come la dilatazione del tempo e la contrazione delle lunghezze, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata cronotopo o spaziotempo (Minkowski 1907).



Intervallo spazio-temporale invariante

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2$$

IPERBOLE EQUILATERA IN UNO SPAZIO 1D + TEMPO

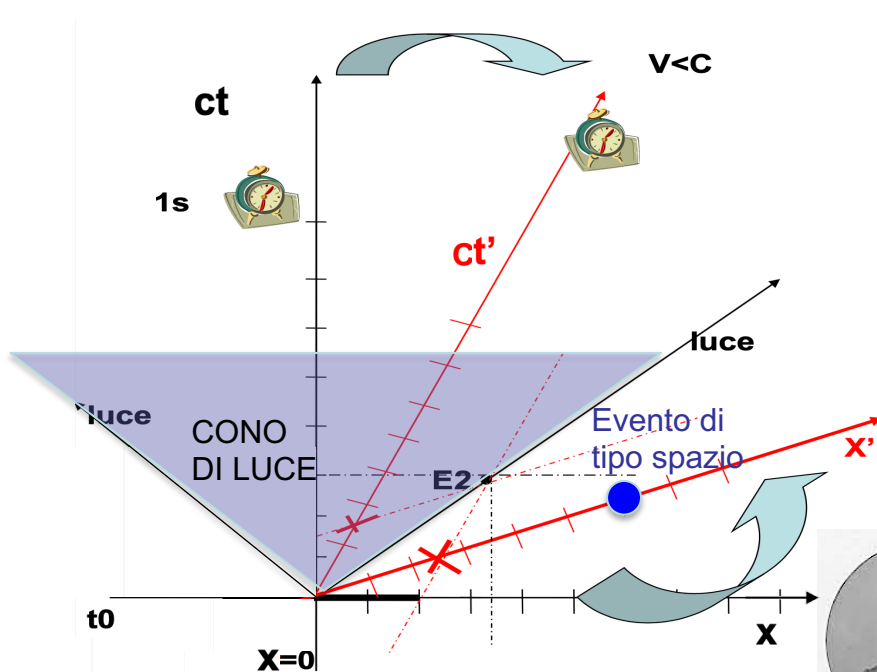
$$\left\{ \begin{aligned} L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \\ \Delta t' &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \end{aligned} \right.$$

«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombra, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come **la dilatazione del tempo** e **la contrazione delle lunghezze**, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata **cronotopo** o **spaziotempo** (Minkowski 1907).



Intervallo spazio-temporale invariante

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2$$

IPERBOLE EQUILATERA
IN UNO SPAZIO 1D + TEMPO

$$\left\{ \begin{aligned} L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \\ \Delta t' &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \end{aligned} \right.$$

Fattore di dilatazione di Lorentz

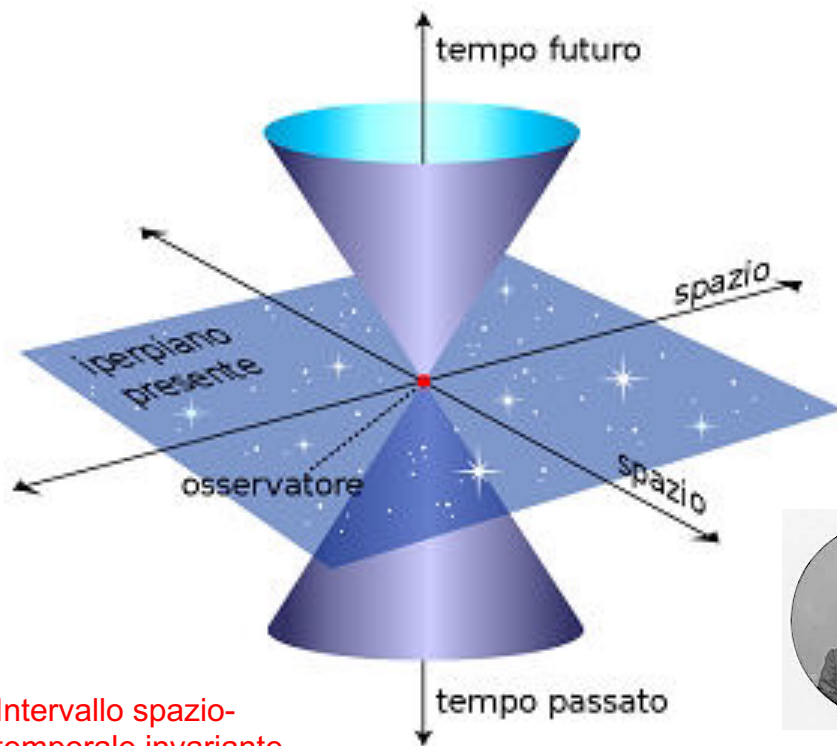


«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombra, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come **la dilatazione del tempo** e **la contrazione delle lunghezze**, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata **cronotopo** o **spaziotempo** (Minkowski 1907).



Intervallo spazio-temporale invariante

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 \quad \text{SPAZIO 2D + TEMPO}$$

$$\left\{ \begin{aligned} L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \\ \Delta t' &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \end{aligned} \right.$$

Fattore di dilatazione di Lorentz

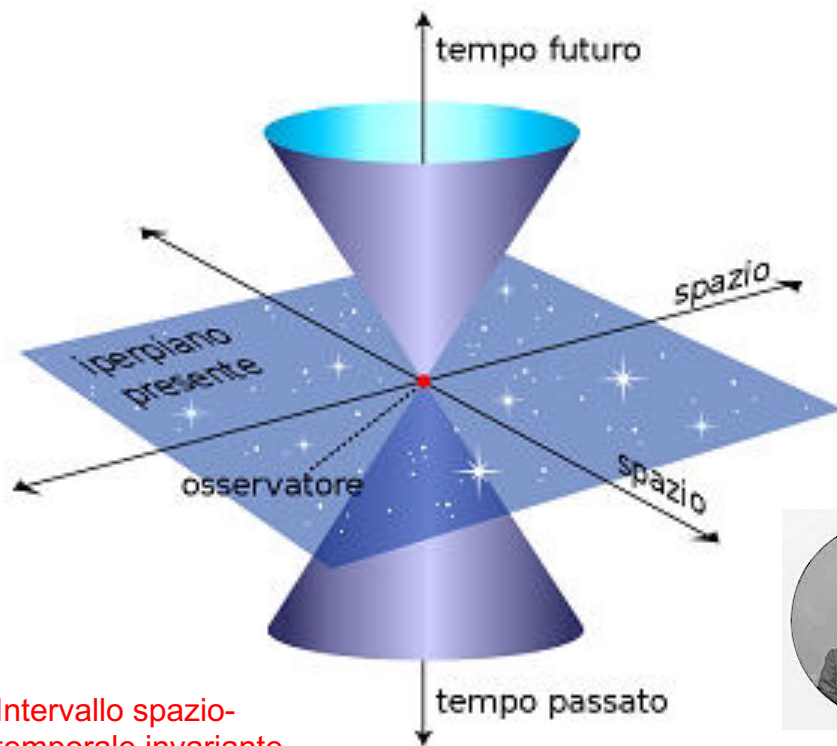


«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombre, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come **la dilatazione del tempo** e **la contrazione delle lunghezze**, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata **cronotopo** o **spaziotempo** (Minkowski 1907).



Intervallo spazio-temporale invariante

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \quad \text{SPAZIO 3D + TEMPO}$$

$$\left\{ \begin{aligned} L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \\ \Delta t' &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \end{aligned} \right.$$

Fattore di dilatazione di Lorentz



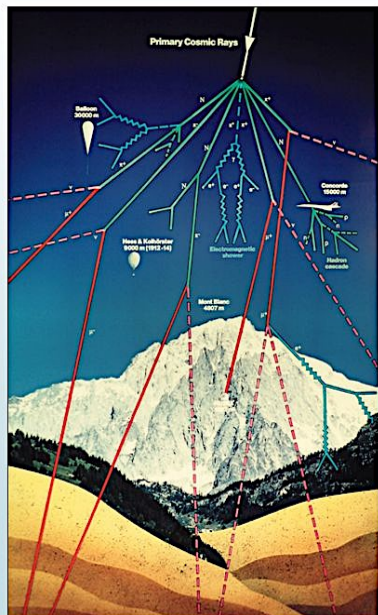
«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombre, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come **la dilatazione del tempo** e **la contrazione delle lunghezze**, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata **cronotopo** o **spaziotempo** (Minkowski 1907).

Vita media dei muoni: dilatazione relativistica



- **Muoni veloci** prodotti in alta atmosfera dai raggi cosmici
- A riposo la metà dei muoni "muore" dopo $1.56 \mu\text{s}$
- Alla velocità della luce potrebbero percorrere al massimo $\sim 650 \text{ m}$
- Eppure percorrono $\sim 10 \text{ km}$ e arrivano al suolo. Perché?

1. La dilatazione relativistica dei tempi li fa vivere di più
2. Nel loro sistema di riposo, l'atmosfera è contratta dello stesso fattore di Lorentz

$$\left\{ \begin{array}{l} L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \\ \Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \end{array} \right.$$

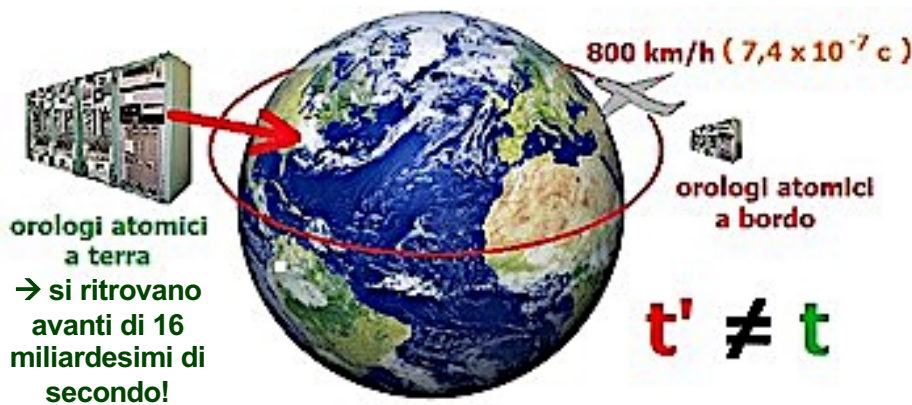
Fattore di dilatazione di Lorentz

«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombra, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Conseguenze dei due postulati...

Dai due postulati discende anche che nell'universo descritto dalla relatività speciale, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali effettuate da osservatori inerziali non corrispondono necessariamente fra loro, dando luogo a fenomeni come **la dilatazione del tempo** e **la contrazione delle lunghezze**, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale nella quale si svolgono gli eventi, chiamata **cronotopo** o **spaziotempo** (Minkowski 1907).



$$\left\{ \begin{aligned} L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \\ \Delta t' &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \end{aligned} \right.$$

Fattore di dilatazione di Lorentz

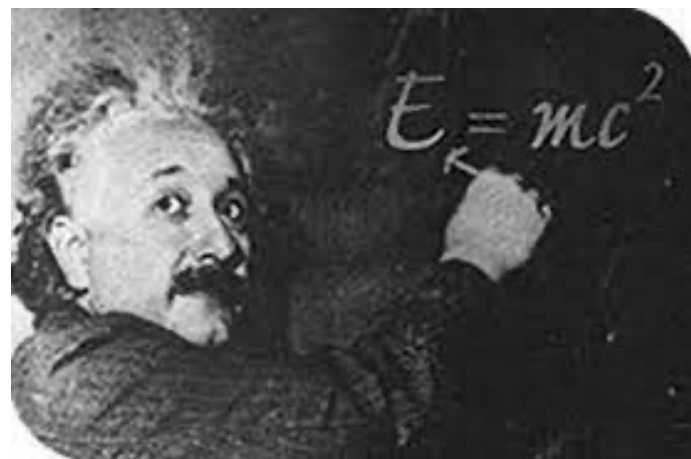
«Le concezioni di spazio e di tempo che desidero esporvi sono sorte dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò sta la loro forza. Esse sono fondamentali. D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombra, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.»

(Hermann Minkowski, 1908)

Equivalenza Massa-Energia

La **celebre formula** $E=mc^2$ non fu pubblicata nel primo articolo dedicato alla teoria ("Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento"), del giugno **1905**, ma in quello intitolato "**L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?**", del settembre dello stesso anno. **L'equivalenza massa-energia** fu però confermata sperimentalmente solo molti anni dopo, nel **1933**, dal fisico americano Kenneth **T. Bainbridge** per mezzo di uno **spettrometro di massa** ad alta precisione.

Massa a riposo	m_0
Massa relativistica	$m = \gamma m_0$
Energia a riposo	$E_0 = m_0 c^2$
Energia totale	$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2$



massa

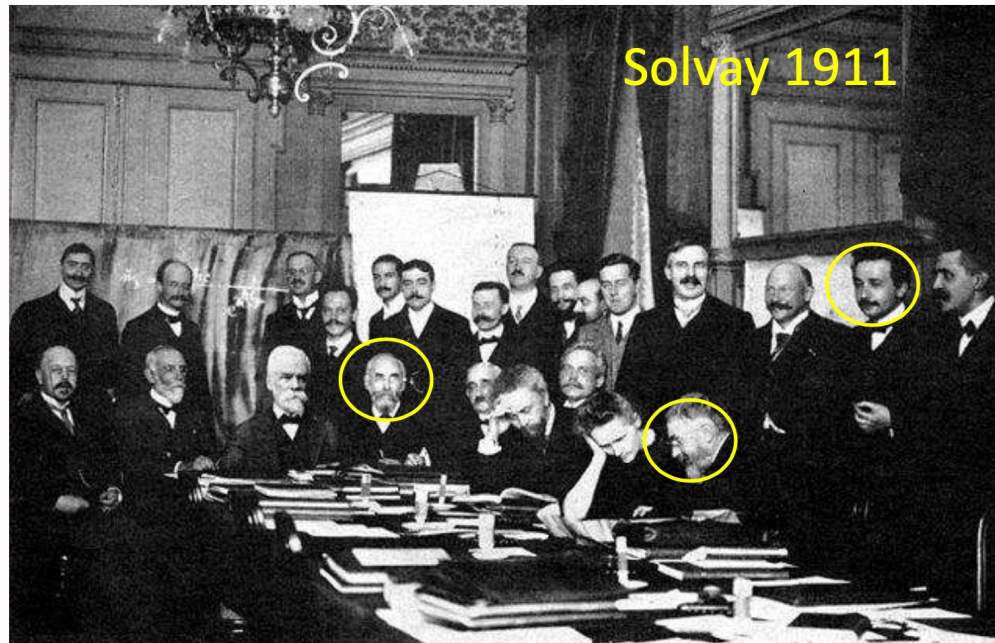
=



energia

Il debito verso Poincaré (v. lezione precedente)

Nonostante il suo innegabile **debito nei confronti delle idee di Poincaré**, nel suo articolo del **1905**, uscito pochi mesi dopo quello del matematico francese, **Einstein non lo cita**. Poincaré, dal canto suo, non riconobbe mai il lavoro di Einstein sulla relatività ristretta (alla Conferenza Solvay del **1911** parlò di 'meccanica di Lorentz'), mentre **Einstein riconobbe i contributi di Poincaré solo nel 1921**, nove anni dopo la sua morte, definendolo 'pioniere della relatività' insieme a Lorentz...



Seduti, da sinistra: W. Nernst, M. Brillouin, E. Solvay, H. Lorentz, E. Warburg, J. Perrin, W. Wien, M. Curie e H. Poincaré. In piedi, da sinistra: R. Goldschmidt, M. Planck, H. Rubens, A. Sommerfeld, F. Lindemann, M. de Broglie, M. Knudsen, F. Hasenöhl, G. Hostelet, E. Herzen, J.H. Jeans, E. Rutherford, H. Kamerlingh Onnes, A. Einstein e P. Langevin.

Verso la Relatività Generale...

Come abbiamo visto, con l'introduzione della relatività ristretta nel **1905** Einstein **rende compatibili** l'elettromagnetismo e la meccanica classica, ossia le **equazioni di Maxwell con una riformulazione del principio di relatività**:



Le leggi della fisica sono invarianti per trasformazioni di Lorentz (covarianti) in tutti i sistemi di riferimento inerziali

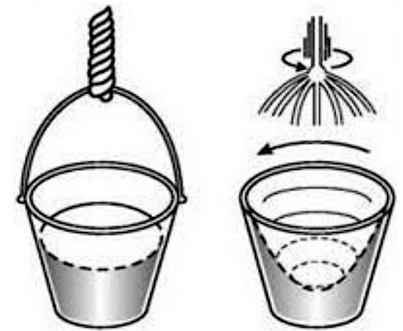
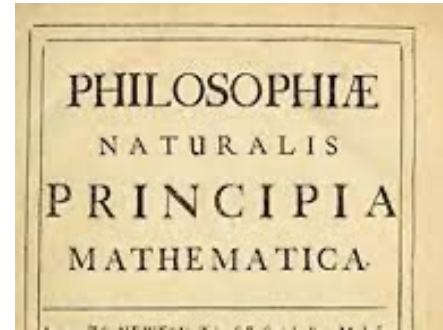
Ma la soluzione proposta creava una **nuova contraddizione**, questa volta con una teoria fisica vecchia di due secoli: la teoria della gravitazione universale. **La teoria di Isaac Newton, infatti, è compatibile con il principio di relatività galileiana, ma non con il nuovo principio di relatività di Einstein.** Le incongruenze principali erano le seguenti:



- 1) **Secondo la relatività ristretta, nessuna informazione può viaggiare più veloce della luce.** D'altro canto, secondo la teoria di Newton la forza di gravità ha effetto istantaneo: se il Sole si dovesse spostare in una direzione, la forza che esercita sulla Terra cambierebbe immediatamente, senza ritardo. L'informazione "il Sole si sposta" sarebbe quindi trasmessa istantaneamente, a velocità maggiori di c ;
- 2) **La legge di gravitazione universale non è invariante (cioè non è «covariante») rispetto alle trasformazioni di Lorentz:** la forza di gravità non rispetta quindi il (nuovo) principio di relatività.

Verso la Relatività Generale...

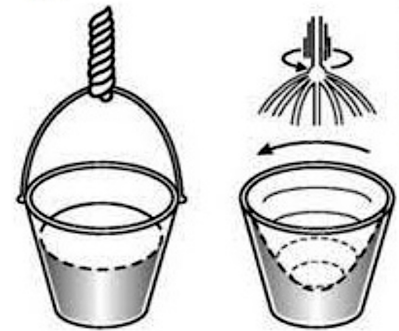
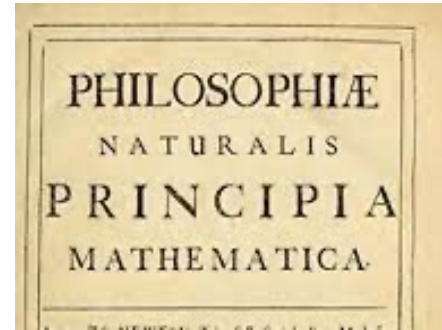
Ricorderete che, nel suo scolio introduttivo ai Principia Mathematica, **Newton utilizza il celebre esperimento mentale del secchio rotante** per dimostrare l'esistenza del moto assoluto, e dunque dello spazio assoluto. In breve, lui considera un secchio contenente acqua e messo in rotazione dall'arrotolamento della corda a cui è appeso. Dopo un po' anche **l'acqua comincia a ruotare e la spinta centrifuga la solleva lungo le pareti del secchio**. Questa spinta rimane anche quando l'acqua acquista la stessa velocità di rotazione del secchio, cioè è ferma rispetto ad esso, dunque – secondo Newton – il fenomeno non può che derivare dal **moto assoluto** dell'acqua rispetto allo **spazio assoluto**.



Ma Einstein era consapevole che, **se TUTTI i moti fossero relativi**, non solo quelli legati ai sistemi di riferimento inerziali, l'argomentazione di Newton fallirebbe: in questo caso infatti **non sarebbe possibile distinguere** tra la situazione in cui è il secchio a ruotare rispetto al resto dell'universo e quella in cui è il resto dell'universo a ruotare rispetto al secchio fermo. Naturalmente ciò portava alla bizzarra conclusione che **far ruotare ruotare l'intero universo rispetto ad un secchio fermo avrebbe come effetto quello di produrre una forza centrifuga sull'acqua contenuta nel secchio!**

Verso la Relatività Generale...

Ricorderete che, nel suo scolio introduttivo ai Principia Mathematica, **Newton utilizza il celebre esperimento mentale del secchio rotante** per dimostrare l'esistenza del moto assoluto, e dunque dello spazio assoluto. In breve, lui considera un secchio contenente acqua e messo in rotazione dall'arrotolamento della corda a cui è appeso. Dopo un po' anche **l'acqua comincia a ruotare e la spinta centrifuga la solleva lungo le pareti del secchio**. Questa spinta rimane anche quando l'acqua acquista la stessa velocità di rotazione del secchio, cioè è ferma rispetto ad esso, dunque – secondo Newton – il fenomeno non può che derivare dal **moto assoluto** dell'acqua rispetto allo **spazio assoluto**.



Questa controargomentazione al ragionamento di Newton era fortemente legata alle **tesi dell'ultraempirista Mach** (cui peraltro Einstein, in quella fase della sua vita, era molto legato), tanto da essere chiamata anche «**Principio di Mach**». Rimaneva da capire quale poteva essere il meccanismo: per eliminare del tutto lo spazio assoluto, **Einstein doveva infatti trovare una situazione in cui un osservatore che percepisce una accelerazione non sia in grado di capire chi o che cosa è accelerato...**

Verso la Relatività Generale...

Nel **novembre del 1907**, in un giorno per altri versi normalissimo **all'Ufficio Brevetti di Berna** (dove nel frattempo era stato promosso a "perito tecnico di seconda classe") **Einstein ebbe il «pensiero più felice della sua vita»**. Come raccontò in seguito lui stesso, era seduto in ufficio quando, all'improvviso, fu colto da un'idea folgorante: *«Un uomo in caduta libera non sente il proprio peso. Rimasi spiazzato. Questo semplice esperimento mentale mi aveva colpito profondamente»* (Conferenza di Tokio, 1922).

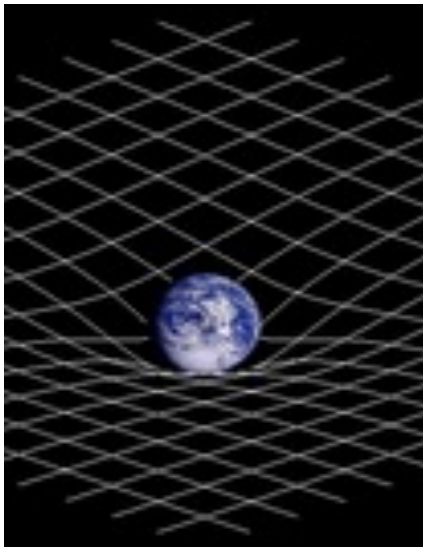
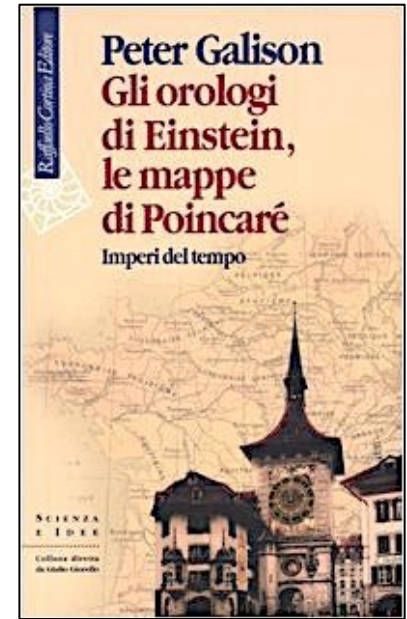


In caduta libera, infatti, non percepiamo né l'accelerazione né la gravità. Da questa semplice intuizione **Einstein si rese conto che la nostra esperienza dell'accelerazione è identica all'esperienza della gravità**: in pratica, sono la stessa cosa! Lo chiamò **«Principio di Equivalenza»** (1908). Questo significava che risolvere il problema dell'accelerazione in Relatività avrebbe potuto risolvere anche quello della gravità newtoniana. Gli ci sarebbero voluti però altri cinque anni per capire che il principio di equivalenza implicava un'altra straordinaria **connessione**, quella **tra la gravità e la geometria dello spazio-tempo**. Che però non poteva essere quella euclidea dello spazio-tempo «piatto» di Minkowski...

Verso la Relatività Generale...

In realtà già il solito Poincaré aveva intuito che la meccanica poteva essere formulata in modo diverso ricorrendo a una geometria non euclidea. Tale formulazione avrebbe potuto essere meno comoda di quella ordinaria, basata sulla geometria euclidea, e tuttavia sarebbe stata altrettanto legittima. Tempo assoluto, spazio assoluto, simultaneità assoluta, ma anche la geometria assoluta (euclidea), non potevano essere imposti alla meccanica. «*Tali assoluti non preesistono alla meccanica più di quanto la lingua francese non preesista logicamente alle verità che si esprimono in francese*».

(citato in Galison, p.199)



Ma Einstein andò oltre e capì che in uno spazio-tempo piatto, dove tutte le linee più brevi tra due punti (geodetiche) sono rette, la gravità di Newton è obbligata ad agire istantaneamente e a distanza. Ma se lo spazio-tempo fosse curvo, le geodetiche sarebbero anch'esse linee curve, e la gravità si ridurrebbe all'accelerazione di un corpo in caduta libera lungo queste curve. La grande intuizione di Einstein fu quindi quella di capire che lo spazio-tempo non è rigido e inflessibile ma è plastico, e può essere deformato da grandi masse come una bambina incurva un tappeto elastico su cui sta saltando...

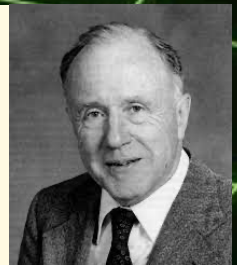
La Teoria della Relatività Generale

L'idea al centro della **Teoria della Relatività Generale** è quindi quella che **un corpo massiccio come un pianeta o una stella curva lo spazio circostante**: l'accelerazione associata alla caduta libera lungo il cammino più breve è del tutto equivalente all'accelerazione dovuta ad una apparente «forza di gravità». **La mela di Newton che cade dall'albero nel giardino di Woolsthorpe** non ha bisogno di essere attratta da una misteriosa «forza istantanea a distanza» che si protende dal suolo ma cade allegramente lungo la **curvatura dello spazio-tempo** generata dalla massa della Terra e accelera da sola!



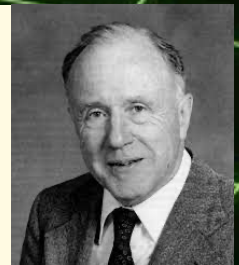
«La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi, lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi»

John Archibald Wheeler, 1998



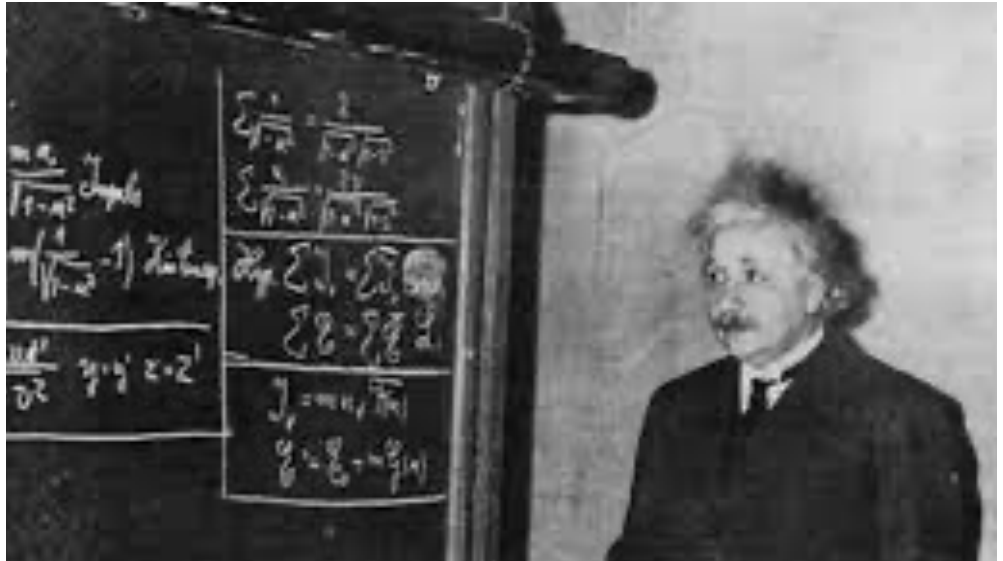
La Teoria della Relatività Generale

Il campo gravitazionale, quindi, è profondamente diverso dal campo elettrico o da quello magnetico. Non è infatti, come questi ultimi, un'entità che esiste in ciascun punto dello spazio-tempo: **il campo gravitazionale è lo spazio-tempo!** Con l'aiuto del suo amico e abile matematico **Marcel Grossman**, che lo introdusse al calcolo tensoriale, e guidato dai due principi di covarianza generale (indipendenza delle leggi della fisica dalla scelta di qualunque sistema di riferimento) e di coerenza (la sua teoria della gravità doveva ricondursi a quella di Newton per spazi-tempo piatti), dopo alcuni anni di intensissimo lavoro ed enorme stress psicofisico (anche perché era entrato in competizione col grande matematico **David Hilbert**) Einstein riuscì finalmente a trovare la giusta generalizzazione...



La Teoria della Relatività Generale

In una serie di quattro storiche lezioni, che si conclusero il 25 novembre 1915, Einstein presentò le sue equazioni all'Accademia Prussiana delle Scienze di Berlino, tra cui la famosa «equazione di campo», che tecnicamente è una equazione differenziale non lineare alle derivate parziali, per la quale non esiste una formula risolutiva generale:



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

La teoria della Relatività Generale (pubblicata nel 1916) descrive lo spazio-tempo come uno spazio pseudo-riemanniano a 4 dimensioni, di volume finito ma illimitato. L'equazione di campo lega la curvatura in un punto P dello spazio-tempo al tensore energia impulso che descrive la densità e il flusso di materia e di energia in P.

- $R_{\mu\nu}$ è il **tensore di curvatura di Ricci**,
- R è la **curvatura scalare**,
- $g_{\mu\nu}$ è il **tensore metrico**,
- $T_{\mu\nu}$ è il **tensore energia impulso**
- c è la **velocità della luce nel vuoto**,
- G è la **costante gravitazionale**.

La Teoria della Relatività Generale

In una serie di quattro storiche lezioni, che si conclusero il 25 novembre 1915, Einstein presentò le sue equazioni all'Accademia Prussiana delle Scienze di Berlino, tra cui la famosa «equazione di campo», che tecnicamente è una equazione differenziale non lineare alle derivate parziali, per la quale non esiste una formula risolutiva generale:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

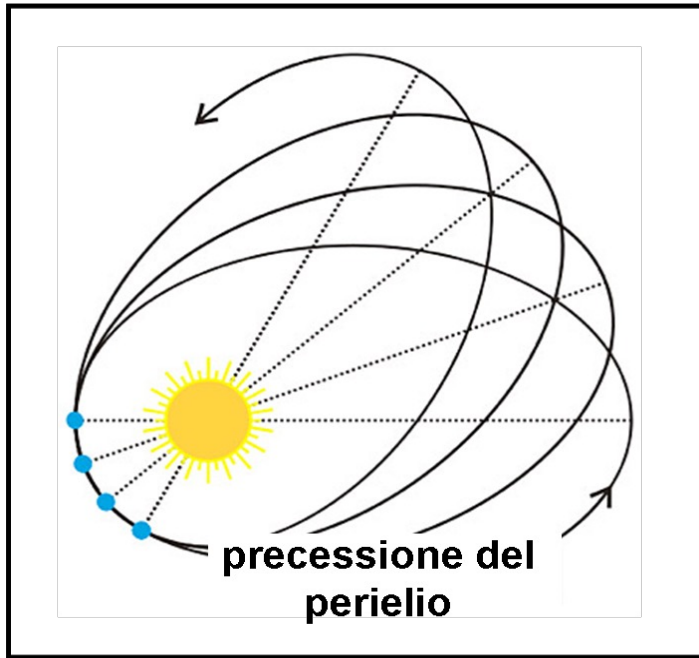
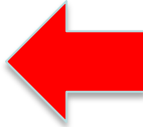
L'equazione originaria prevedeva un universo dinamico, in contrazione o in espansione, così nel 1917 Einstein, ritenendo di dover contrastare in particolare la prima possibilità, cioè quella di un collasso sotto l'effetto della gravità, propose l'inserimento nelle equazioni di una costante Λ che consentisse di avere un universo statico.



- $R_{\mu\nu}$ è il **tensore di curvatura di Ricci**,
- R è la **curvatura scalare**,
- $g_{\mu\nu}$ è il **tensore metrico**,
- $T_{\mu\nu}$ è il **tensore energia impulso**
- c è la **velocità della luce nel vuoto**,
- G è la **costante gravitazionale**.
- Λ è la **costante cosmologica**,

Previsioni della Relatività Generale

Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio



Per qualche
giorno sono stato
fuori di me per
l'eccitazione e la
gioia!

- La **teoria di Newton** prevede una precessione di circa **532** secondi d'arco per secolo
- La **precessione osservata** è di circa **574** secondi d'arco per secolo, che equivale ad un'orbita in eccesso ogni tre milioni di anni
- Lo stesso **Einstein trovò che le sue equazioni prevedono un contributo relativistico di circa 43 secondi d'arco per secolo** dovuto alla curvatura dello spazio-tempo provocata dal Sole!

$$532'' + 43'' \approx 575''$$

Previsioni della Relatività Generale

Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio

Buchi Neri



Karl Schwarzschild
(1873-1916)



- Nel **1916**, l'astrofisico **Karl Schwarzschild** trova una soluzione particolare alla equazione di campo di Einstein, oggi nota come «**spazio-tempo di Schwarzschild**»;
- Questa soluzione verrà utilizzata nei decenni successivi come **modello per descrivere i buchi neri** (termine coniato nel **1967** da **John A. Wheeler**), la cui esistenza è ormai definitivamente assodata.



Previsioni della Relatività Generale

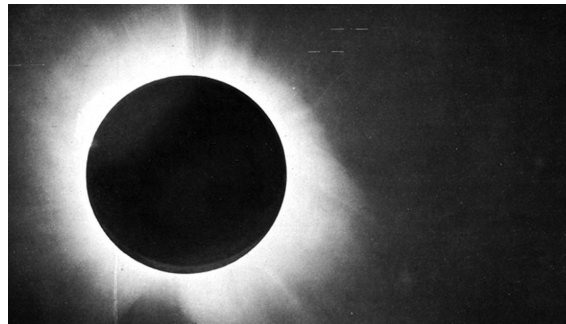
Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio

Buchi Neri

Deviazione della luce
causata dalla gravità



- Nel **1919** **Arthur Eddington** organizza una spedizione in occasione di un'eclissi di Sole all'isola di Príncipe che verifica una delle conseguenze della teoria, la **deflessione dei raggi luminosi** di una stella in presenza del forte campo gravitazionale del sole



Sir Arthur S.
Eddington
(1882-1944)



Previsioni della Relatività Generale

Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio

Buchi Neri

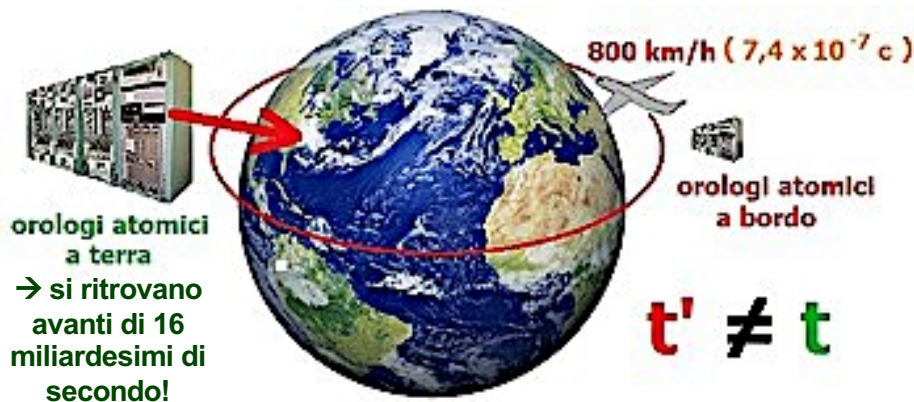
Deviazione della luce
causata dalla gravità

Dilatazione del tempo
dovuta alla gravità



Stavolta ho avuto una
fantastica botta di c....
che mi ha reso
definitivamente
famoso!

- Oltre a rimanere indietro di **16** miliardesimi di secondo a causa della relatività ristretta, **l'orologio atomico a bordo dell'aereo dovrebbe ritrovarsi avanti di circa 56 miliardesimi di secondo perché, per la relatività generale, la gravità a 10 Km di altezza è più debole. Quindi dovrebbe avere un guadagno netto di circa 40 miliardesimi di secondo: in un esperimento nel 2005 si è misurato un guadagno netto di $39 \pm 2 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.**



Previsioni della Relatività Generale

Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio

Buchi Neri

Deviazione della luce
causata dalla gravità

Dilatazione del tempo
dovuta alla gravità

Qui ho avuto una
botta di.... e sono
diventato
definitivamente
famoso!

- Potrebbe sembrare che poche decine di miliardesimi di secondo siano irrilevanti per la nostra vita quotidiana, ma non è così: **senza le sottili correzioni richieste dalla teoria della relatività (ristretta e generale) il sistema di posizionamento globale (GPS) usato dai telefonini o dai navigatori satellitari di auto, navi e aerei accumulerebbe rapidamente errori di misura del tempo che si tradurrebbero in errori di posizione di oltre 11 Km/giorno.**



Previsioni della Relatività Generale

Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio

Buchi Neri

Deviazione della luce
causata dalla gravità

Dilatazione del tempo
dovuta alla gravità

Espansione accelerata
dell'Universo

Edwin Powell
Hubble
(1889-1953)



Forse, tutto
sommato, introdurre
una costante
cosmologica non
era stato il più
grande errore della
mia vita...

- Nel **1929** le osservazioni dell'astronomo **Edwin Hubble** mostrarono che l'universo è in espansione e il **termine cosmologico** introdotto da Einstein venne rimosso dalle equazioni. L'idea di **reintrodurre la costante cosmologica** venne però riconsiderata nel **1998** per spiegare **l'espansione accelerata dell'universo** che nel frattempo era stata scoperta osservando il comportamento delle supernovae nelle galassie lontane...

Previsioni della Relatività Generale

2011: VINCE L'ASTROFISICA

 Mi piace  125  +1  1

Nobel per la Fisica all'Universo che accelera

"Per la scoperta dell'espansione accelerata dell'Universo a partire dall'osservazione di supernovae lontane" è con questa motivazione che Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Reiss vincono quest'anno il prestigioso premio. I commenti di Enrico Cappellaro e Massimo Della Valle.

di Elena Lazzaretto

04/10/2011 18:20



I tre vincitori del Nobel per la Fisica 2011. Da sinistra: Adam Reiss, Brian Schmidt e Saul Perlmutter

Non sappiamo quale sarà il suo destino, ma sappiamo che per corrergli incontro, l'Universo, ha premuto sull'acceleratore. Un comportamento inaspettato, che ha rivoluzionato la cosmologia moderna e che sorprese anche gli astrofisici che per primi lo riscontrarono: era il 1998 quando due gruppi di ricerca giunsero indipendentemente alle medesime conclusioni. Oggi, gli autori di quella rivoluzionaria scoperta vengono premiati con il più prestigioso dei riconoscimenti, il Nobel. **Saul Perlmutter**, a capo di uno dei due gruppi di ricerca, **Brian Schmidt** leader dell'altro gruppo e **Adam Reiss**, che in questo secondo team ha svolto un ruolo cruciale, sono gli scienziati che passeranno alla storia per aver vinto il Premio Nobel per la Fisica 2011. Oltre a loro, un riconoscimento, una menzione speciale, andrebbe data anche a una particolare classe di stelle, che esplodono in modo estremamente appariscente, le **supernovae di**

tipo Ia. È stato a partire dall'osservazione di questi "fari cosmici" che si è giunti alla conclusione che **l'espansione dell'Universo non avviene a un ritmo costante e nemmeno rallenta nel tempo ma al contrario, e al di là di ogni aspettativa, lo fa in maniera accelerata.**

"Questa scoperta ha due caratteristiche che la rendono particolarmente interessante" commenta **Enrico Cappellaro**, direttore dell'**INAF-Osservatorio di Padova** nonché astrofisico esperto di supernovae. "La prima è **la scoperta dell'inaspettato**". L'idea, infatti, era di capire se l'Universo si espandesse sempre con la stessa velocità, o se invece stesse rallentando: queste erano le sole due opzioni che ci si aspettava di riscontrare. Si scoprì invece che l'Universo accelera. Un fatto inaspettato che è stato capito e riconosciuto, una capacità che rappresenta uno degli aspetti più interessanti di questa scoperta. La seconda caratteristica, che penso sia la ragione vera del premio, è che ha aperto un mondo: il dato di fatto è che l'Universo accelera, ma non abbiamo idea del perché. Abbiamo tutto un mondo nuovo da scoprire, che non coinvolge solo l'astrofisica ma anche la fisica di base."

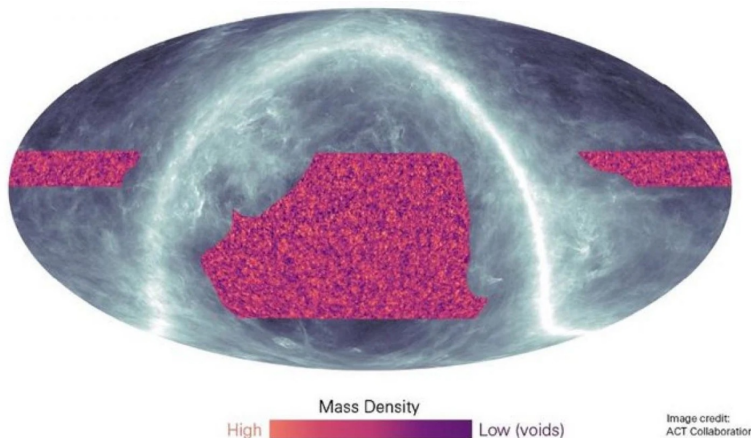
Previsioni della Relatività Generale

📅 12 APRILE 2023 ⌚ 10:43

Ottenuta la mappa più dettagliata della materia oscura nell'Universo: conferma la teoria di Einstein

Grazie ai dati raccolti in Cile è stata ottenuta la mappa più dettagliata di sempre della materia oscura. Confermata la teoria della Relatività di Albert Einstein. Cos'è questa misteriosa componente dell'Universo e perché è così importante.

A cura di **Andrea Centini**



La mappa della materia oscura in quarto di cielo. Credit: ACT Collaboration

Gli scienziati hanno realizzato la **mappa della materia oscura** nell'**Universo** più approfondita e dettagliata di sempre. L'aspetto più affascinante della ricerca risiede nel fatto che la sua distribuzione e l'aspetto grumoso sono in accordo con il **modello standard** della **cosmologia**, basato sulla **Teoria della Relatività** sviluppata dal celeberrimo fisico tedesco naturalizzato statunitense **Albert Einstein**. La materia oscura, come suggerisce l'affascinante nome, è qualcosa che non possiamo vedere, poiché [come spiegato dal fisico Pierluigi Belli](#), a differenza della **materia ordinaria** luminosa essa “non emette radiazione elettromagnetica in nessuna banda di frequenza: né nel visibile, né nell'infrarosso, né nell'ultravioletto, né nelle radiofrequenze, né nelle microonde”. L'unico modo per rilevarne la presenza è attraverso la sua **interazione gravitazionale** con la materia visibile, come ammassi globulari, galassie, stelle e altro ancora. “Per quanto ne sappiamo, la materia oscura interagisce solo con la gravità”, [hanno scritto gli autori del nuovo studio in un comunicato stampa](#). In parole semplici, non la vediamo, ma possiamo percepirne la presenza.

Previsioni della Relatività Generale

Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio

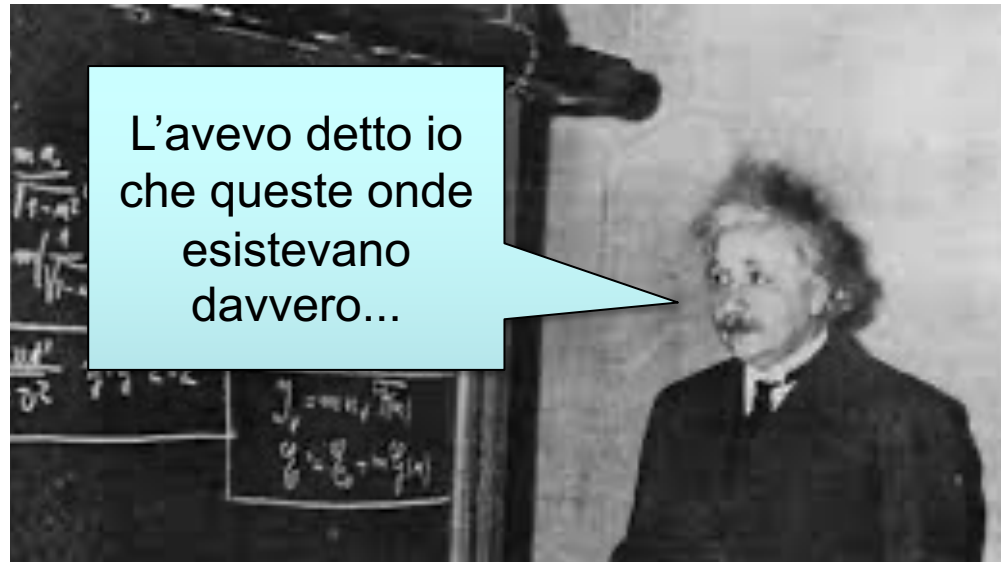
Buchi Neri

Deviazione della luce
causata dalla gravità

Dilatazione del tempo
dovuta alla gravità

Espansione accelerata
dell'Universo

Onde Gravitazionali



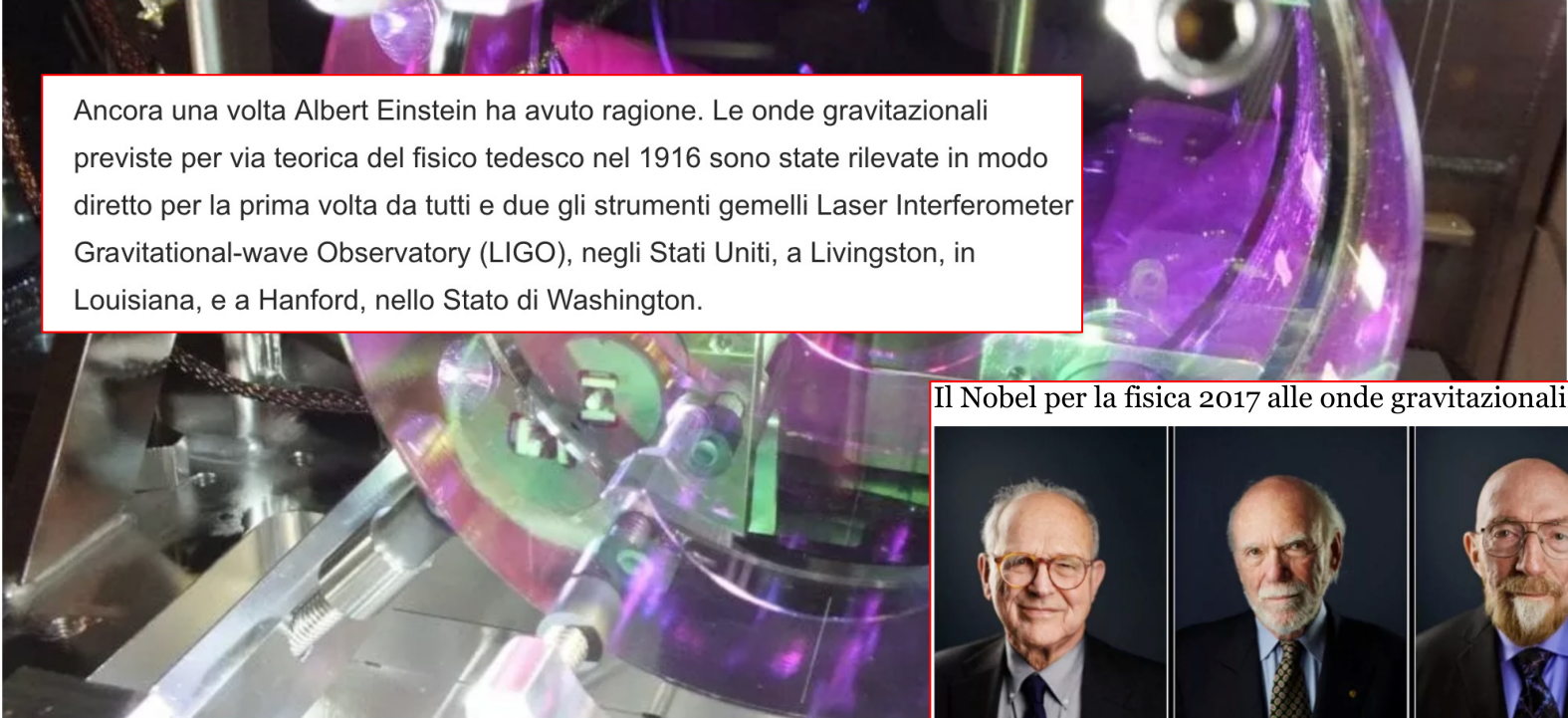
- Nel **1916** Einstein ipotizzò che le piccole fluttuazioni del campo gravitazionale avessero l'aspetto di onde, simili a quelle sulla superficie di un lago. Solo quasi cento anni dopo, nel **2015**, queste onde gravitazionali sono state effettivamente rilevate dalla collaborazione sperimentale chiamata **LIGO** (*Laser Interpherometer Gravitational-Wave Observatory*) grazie alla fusione di due grandi buchi neri.

Previsioni della Relatività Generale

11 febbraio 2016

Onde gravitazionali, confermata la rilevazione diretta

di Giovanni Spataro



Ancora una volta Albert Einstein ha avuto ragione. Le onde gravitazionali previste per via teorica del fisico tedesco nel 1916 sono state rilevate in modo diretto per la prima volta da tutti e due gli strumenti gemelli Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO), negli Stati Uniti, a Livingston, in Louisiana, e a Hanford, nello Stato di Washington.

Il Nobel per la fisica 2017 alle onde gravitazionali



Rainer Weiss, Barry C. Barish e Kip S. Thorne (© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud)

Cortesia LIGO Collaboration

Nel corso di una conferenza stampa in contemporanea ai due lati dell'Atlantico, le collaborazioni LIGO e VIRGO hanno annunciato oggi la prima rilevazione diretta delle onde gravitazionali, previste da Einstein esattamente un secolo fa. Le onde rilevate sono state generate dalla fusione di due buchi neri, osservata contemporaneamente dai due interferometri di LIGO il 14 settembre scorso

Previsioni della Relatività Generale

Precessione del perielio
dell'orbita di Mercurio

Buchi Neri

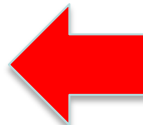
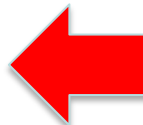
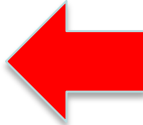
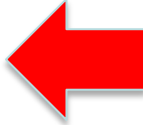
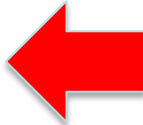
Deviazione della luce
causata dalla gravità

Dilatazione del tempo
dovuta alla gravità

Espansione accelerata
dell'Universo

Onde Gravitazionali

Trascinamento dello
spazio-tempo



- E per finire, torniamo al **principio di Mach**: se il **secchio di Newton** è fermo e il resto dell'universo gli gira intorno, **qual è la causa della forza centrifuga che spinge l'acqua contro le pareti?** La risposta della relatività generale è mozzafiato: **l'acqua subisce quella forza perché l'intero l'universo, nella sua rotazione, trascina con sé lo spazio-tempo** («effetto di trascinamento» dedotto nel **1918** da **Lense-Thirring** e dimostrato nel **2004** per la rotazione terrestre)

Previsioni della Relatività Generale

Così la Terra devia lo spazio: confermato l'effetto "Lense-Thirring"

di Nicola Nosengo - 29 Ottobre 2004



Cronaca di come un italiano può finire su Nature senza investimenti miliardari, addirittura usando dati che la potente Nasa aveva sotto il naso da anni. Sul numero di questa settimana della rivista appare uno studio del fisico dell'Università di Lecce **Ignazio Ciufolini**, scritto insieme a **Erricos Pavlis**, del Joint Center for Earth Systems Technology dell'Università del Maryland, che conferma una previsione contenuta nella teoria della relatività generale di Albert Einstein. Si tratta del fenomeno dell'**effetto "Lense-Thirring"** (dal nome dei due fisici che lo analizzarono per primi, Joseph Lense e Hans Thirring) per cui un oggetto dotato di **massa in rotazione** provoca una **distorsione** nello spazio-tempo.

Cos'è l'effetto "Lense-Thirring"

Ciufolini e Pavlis hanno dimostrato empiricamente questo effetto analizzando i dati, raccolti dalla Nasa, sulle orbite di due satelliti artificiali. Ma andiamo con ordine. Che cos'è esattamente l'effetto Lense-Thirring? Si sa, perché ce lo ha spiegato **Einstein**, che un corpo dotato di massa distorce lo spazio-tempo. Lo dimostra il fenomeno delle "**lenti gravitazionali**", per cui la traiettoria della luce che passa vicino a una galassia viene curvata dalla gravità dell'oggetto, una curvatura che può essere rilevata dai nostri strumenti di osservazione. Ma la **relatività generale** prevede anche che se un oggetto ruota, come fa la Terra, si aggiunge un'**ulteriore** curvatura. Per intenderci, questo significa che il famoso "**paradosso dei gemelli**" (quello per cui se due gemelli vengono separati e uno fa un viaggio a velocità prossime a quelle della luce al ritorno sarà più giovane dell'altro) vale anche in caso che i due gemelli viaggino **lentamente** ma in versi **opposti** attorno a un pianeta che ruota. Quando si incontreranno di nuovo, uno dei due sarà più giovane dell'altro. Per la precisione, quello che avrà girato in direzione opposta rispetto al pianeta sarà più giovane.



Ulteriori Implicazioni Epistemologiche...

Sull'esistenza dell'Etere e di un Sistema di Riferimento Privilegiato

Fisica del Seicento



Nella teoria della gravità di Cartesio il movimento dei pianeti è dovuto a dei grandi "vortici di una materia sottile che occupa gli spazi intersiderali" (Etere)

Fisica dell'Ottocento



L'Etere luminifero è l'ipotetico mezzo materiale attraverso il quale, fino al XIX secolo, si propagano le onde elettromagnetiche.

Relatività Ristretta



«L'introduzione di un etere luminifero risulta essere superflua»
A.Einstein 1905

«Non posso non considerare l'etere come dotato di un certo grado di sostanzialità, per quanto diverso possa essere dalla materia ordinaria. Per questo, sembra naturale non assumere come punto di partenza che non possa mai fare alcuna differenza se un corpo si muove rispetto all'etere o no»
(Lorentz, 1909)

Relatività Generale



«Secondo la teoria generale della relatività lo spazio è dotato di proprietà fisiche; in questo senso, allora, un etere esiste. Secondo la teoria generale della relatività uno spazio senza etere è inconcepibile».

A.Einstein, discorso a Leida 1920

Ulteriori Implicazioni Epistemologiche...

Sull'esistenza dell'Etere e di un Sistema di Riferimento Privilegiato

Ne ripareremo nella lezione su...

Il Vuoto

Un Enigma tra Fisica e Metafisica



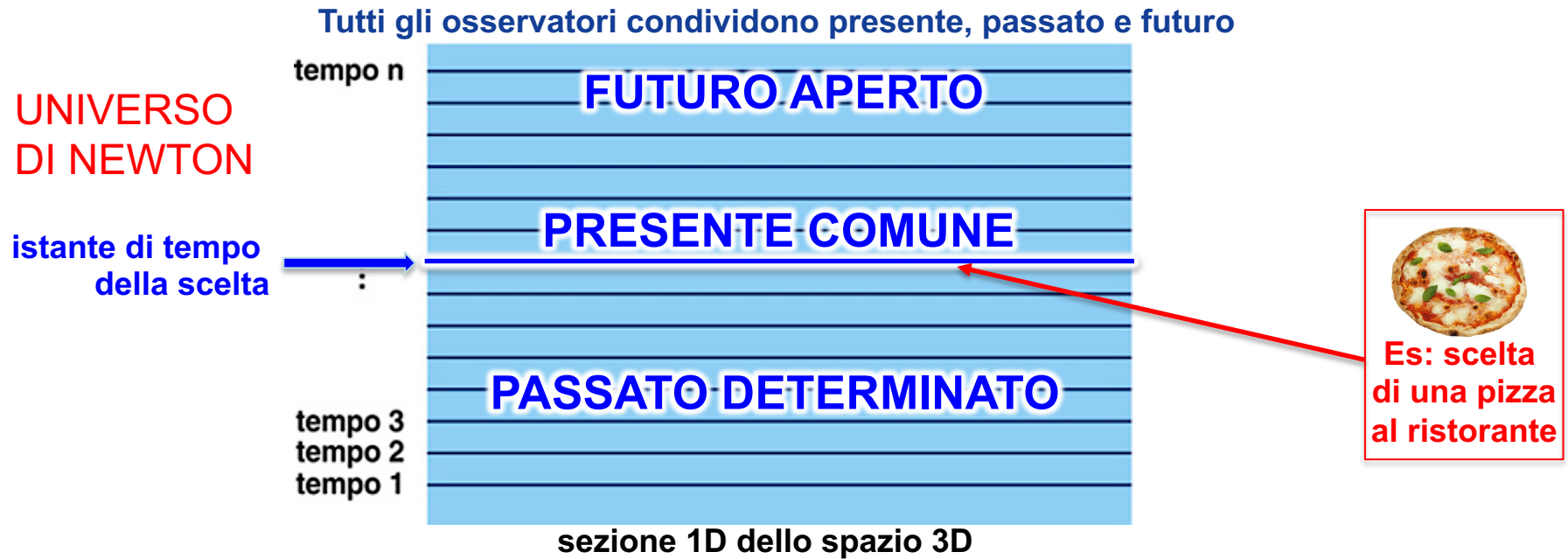
Ulteriori Implicazioni Epistemologiche...

I coni di luce e l'Universo Blocco



*"La struttura temporale dell'universo di Einstein è fatta a coni di luce. [...] La relatività speciale è la scoperta che la struttura temporale dell'universo è come le parentele: definisce un ordine fra gli eventi dell'universo che è **parziale** e non completo. [...] Il presente esteso è l'insieme degli eventi che non sono né passati né futuri. Se vogliamo rappresentare tutti gli eventi dell'universo e le loro relazioni temporali, non possiamo più farlo con un'unica universale distinzione fra passato, presente e futuro. [...] **Ogni evento ha il suo passato, il suo futuro**, e una parte di universo né passata né futura, così come ogni essere umano ha antecedenti, discendenti, e altri che non sono né antecedenti né discendenti.»*

Carlo Rovelli, «L'ordine del tempo», 2017



Ulteriori Implicazioni Epistemologiche...

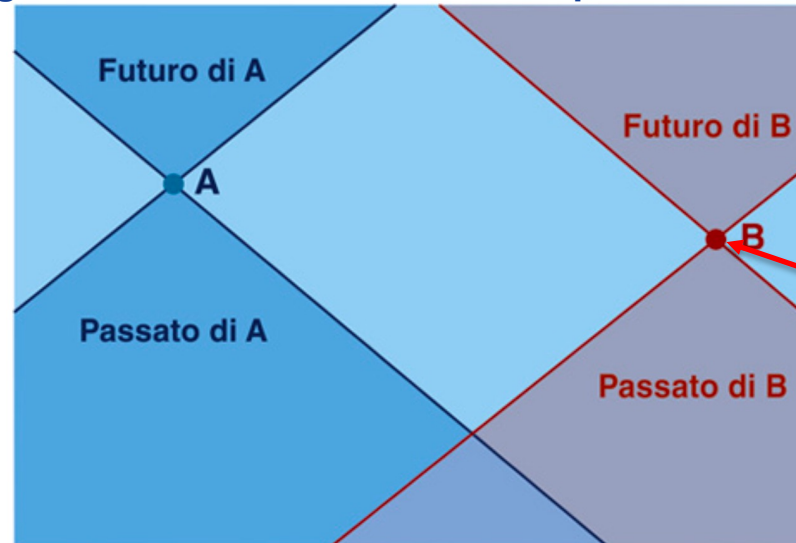
I coni di luce e l'Universo Blocco



*"La struttura temporale dell'universo di Einstein è fatta a coni di luce. [...] La relatività speciale è la scoperta che la struttura temporale dell'universo è come le parentele: definisce un ordine fra gli eventi dell'universo che è **parziale** e non completo. [...] Il presente esteso è l'insieme degli eventi che non sono né passati né futuri. Se vogliamo rappresentare tutti gli eventi dell'universo e le loro relazioni temporali, non possiamo più farlo con un'unica universale distinzione fra passato, presente e futuro. [...] **Ogni evento ha il suo passato, il suo futuro**, e una parte di universo né passata né futura, così come ogni essere umano ha antecedenti, discendenti, e altri che non sono né antecedenti né discendenti.»*

Carlo Rovelli, «L'ordine del tempo», 2017

Ogni osservatore ha i suoi coni di passato e futuro



**scelta
della pizza**

sezione 1D dello spazio 3D

Piccola Biblioteca 705

CARLO ROVELLI

L'ordine del tempo



ADELPHI

Ulteriori Implicazioni Epistemologiche...

I coni di luce e l'Universo Blocco

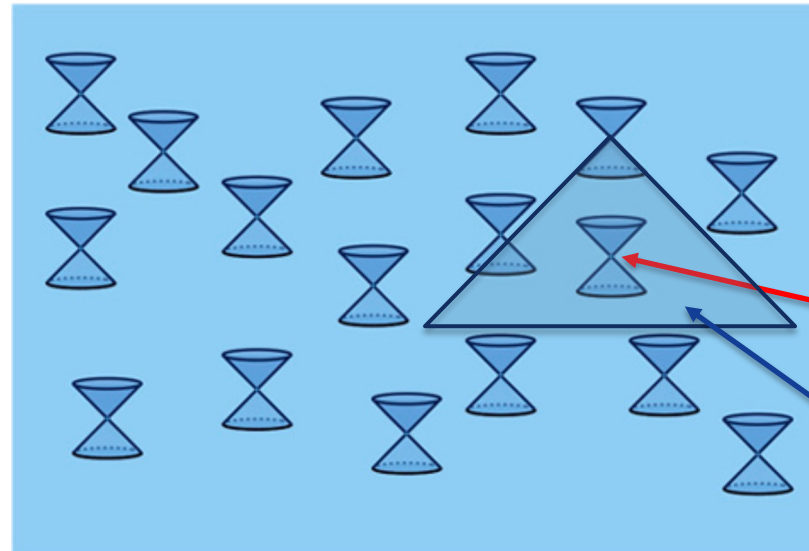


*"La struttura temporale dell'universo di Einstein è fatta a coni di luce. [...] La relatività speciale è la scoperta che la struttura temporale dell'universo è come le parentele: definisce un ordine fra gli eventi dell'universo che è **parziale** e non completo. [...] Il presente esteso è l'insieme degli eventi che non sono né passati né futuri. Se vogliamo rappresentare tutti gli eventi dell'universo e le loro relazioni temporali, non possiamo più farlo con un'unica universale distinzione fra passato, presente e futuro. [...] **Ogni evento ha il suo passato, il suo futuro**, e una parte di universo né passata né futura, così come ogni essere umano ha antecedenti, discendenti, e altri che non sono né antecedenti né discendenti.»*

Carlo Rovelli, «L'ordine del tempo», 2017

Tutti i coni di luce coesistono simultaneamente

**UNIVERSO
BLOCCO
DELLA
RELATIVITA'
SPECIALE**



**scelta
della pizza**

**cono del passato
di un altro ossevatore**

Ulteriori Implicazioni Epistemologiche...

I coni di luce e l'Universo Blocco

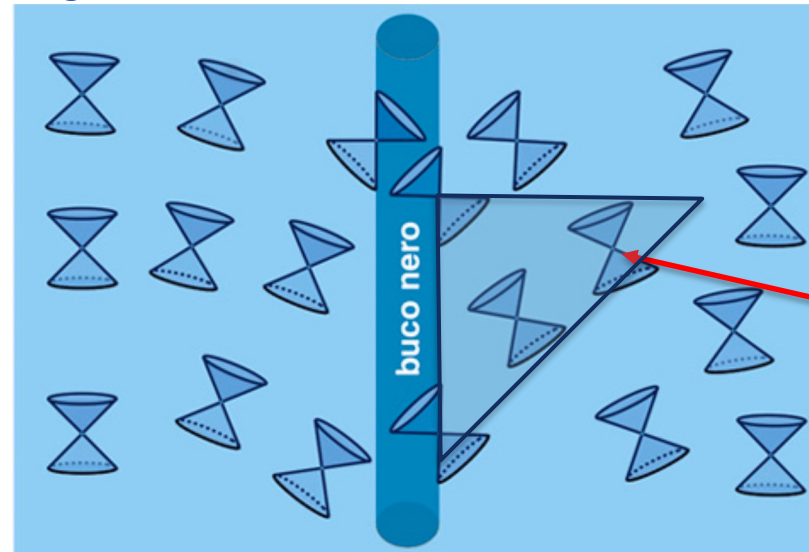


*"La struttura temporale dell'universo di Einstein è fatta a coni di luce. [...] La relatività speciale è la scoperta che la struttura temporale dell'universo è come le parentele: definisce un ordine fra gli eventi dell'universo che è **parziale** e non completo. [...] Il presente esteso è l'insieme degli eventi che non sono né passati né futuri. Se vogliamo rappresentare tutti gli eventi dell'universo e le loro relazioni temporali, non possiamo più farlo con un'unica universale distinzione fra passato, presente e futuro. [...] **Ogni evento ha il suo passato, il suo futuro**, e una parte di universo né passata né futura, così come ogni essere umano ha antecedenti, discendenti, e altri che non sono né antecedenti né discendenti.»*

Carlo Rovelli, «L'ordine del tempo», 2017

La gravità deforma la struttura dei coni di luce

UNIVERSO
BLOCCO
DELLA
RELATIVITA'
GENERALE



scelta
della pizza

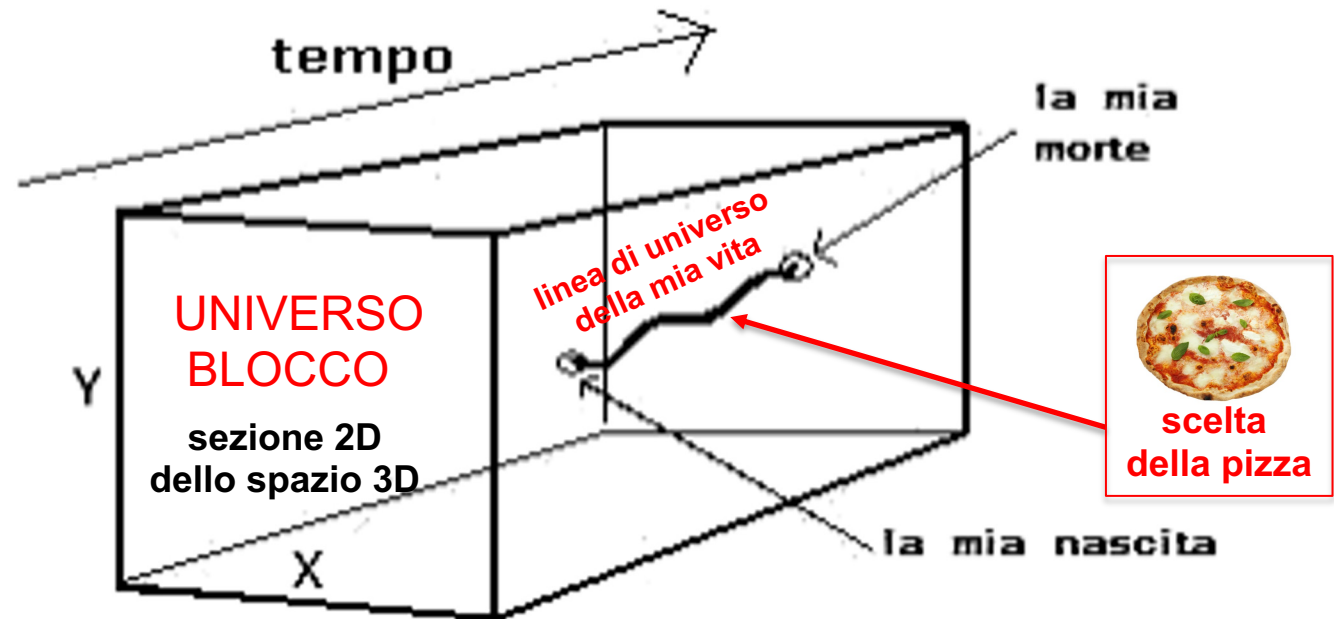
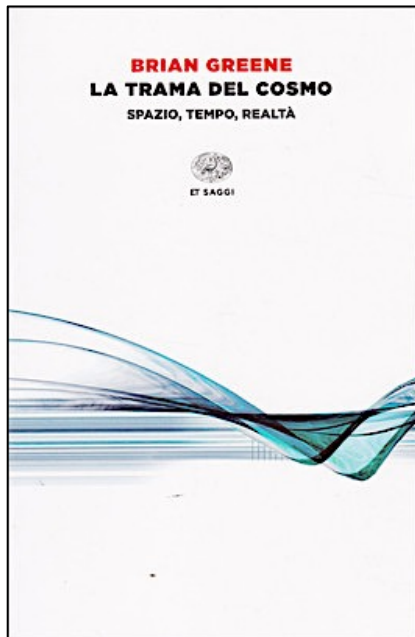
Ulteriori Implicazioni Epistemologiche...

I coni di luce e l'Universo Blocco



“[...] Esistono prove convincenti in base a cui risulta che è la totalità dello spazio tempo [universo a blocco 4D o 'filone spaziotemporale'], ad essere reale, non le sue singole sezioni tridimensionali. Un implicazione ben poco considerata del pensiero einsteiniano è che la relatività ristretta recepisce tutti i momenti in modo eguale. Ogni parte del 'filone spaziotemporale' esiste su basi identiche a quelle di altre parti, il che mostra, come riteneva Einstein, che la realtà abbraccia in egual modo passato, presente e futuro, e che il flusso che immaginiamo selezioni un fotogramma alla volta mentre gli altri scompaiono nel buio in realtà è illusorio.”

Brian Greene, «La trama del cosmo», 2006



Conclusione: (alcuni) pensieri di un uomo curioso

«La vita è come una bicicletta. Per mantenere l'equilibrio bisogna continuare a muoversi...»

«La scienza è una cosa meravigliosa... per chi non deve guadagnarsi da vivere con essa»

«Io appartengo all'unica razza che conosco: quella umana»

«La creatività è contagiosa. Trasmattila»

«La fantasia è più importante del sapere, perché il sapere è limitato»

«L'arte suprema dell'insegnante è risvegliare la gioia della creatività e della conoscenza»

«I grandi spiriti hanno sempre incontrato violente opposizioni da parte delle menti mediocri»

«Chi dice che è impossibile non dovrebbe disturbare chi ce la sta facendo»

«Due cose sono infinite: l'universo e la stupidità umana, ma riguardo l'universo ho ancora dei dubbi...»

Bibliografia consigliata

- W. Isaacson, Einstein: la sua vita, il suo universo, Mondadori (2007)
- J.H. Poincaré, La misura del tempo (1898), in «Il Valore della scienza», Dedalo
- A. Pais, Sottile è il Signore, Boringhieri (1982)
- A. Bettini, La creazione della relatività speciale, Michelson, Lorentz, Poincaré, Einstein (reperibile in rete)
- A. Einstein, L'etere e la teoria della relatività, conferenza di Leida, 1920, in Opere scelte, a cura di E. Bellone.
- L. Kostro, Einstein e l'etere, Dedalo (2001)
- L. Smolin, La rinascita del tempo, Einaudi (2014)
- P. Galison, Le mappe di Poincaré e gli orologi di Einstein, Raffaello Cortina (2004)
- J. Baggott, Quanti di Spazio, Adelphi (2022)
- C. Rovelli, L'ordine del tempo, Adelphi (2017)
- B. Greene, La trama del cosmo (2006)
- Serie TV della National Geographic su Einstein: «Genius. The man behind the mind»
<http://www.pluchino.it/TEACHING-SFE-Genius.html>