

>>

# EINSTEIN 1905 IL GENIO ALL'OPERA

Mostra realizzata da  
Euresis

Coordinamento di  
Mario Gargantini

Curatori  
Enrico Gamba, Giorgio Guidi, Michele Isacchini,  
Lorenzo Mazzoni, Luca Signorini

Consulenza scientifica  
Silvio Bergia

Collaboratori  
Lorenzo Caggioni, Valentina Di Pietro, Francesca  
Giovacchini, Davide Locatelli, Elisabetta Planori,  
Marilena Sigismundi, Erika Taribello

Progetto e allestimento  
Andrea Valentini, Laura Gabbiani

Con la collaborazione di  
Alessandro Gerosa, Benedetto Luoni,  
Maria Respeghini, Giovanni Brioschi

Coordinamento progettazione  
Enrico Magistretti

Immagine grafica  
Unica Progetti di Comunicazione RSM  
[www.unica.sm](http://www.unica.sm)

Stampa  
Millennium - Rn

Noleggio della mostra a cura di  
I.E.S. (International Exhibition Service)  
[www.meetingmostre.com](http://www.meetingmostre.com)

Catalogo a cura di  
ITACAlibri - [www.itacalibri.it](http://www.itacalibri.it)

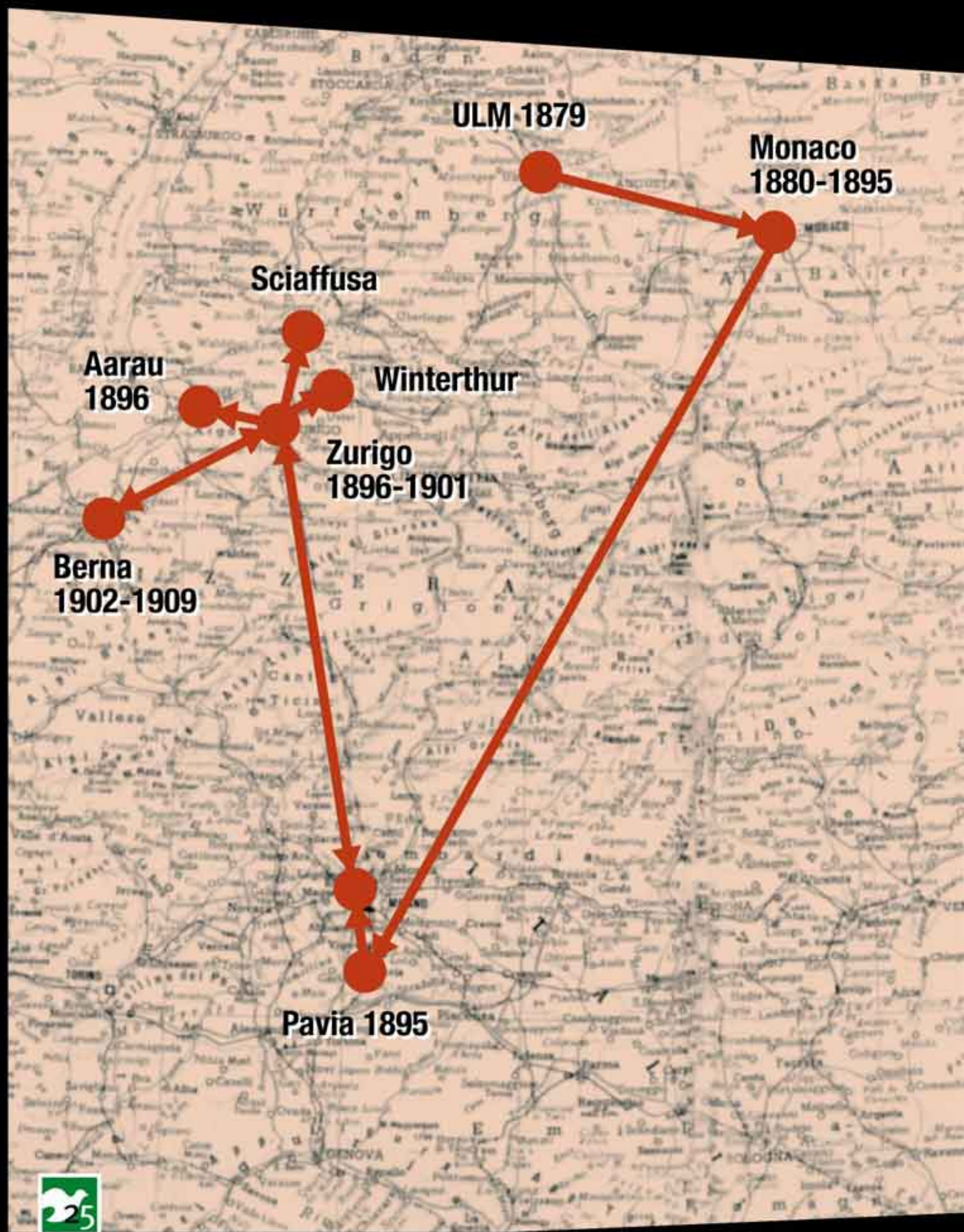
Un vivo ringraziamento a:  
Dipartimento di Matematica - Università di Bologna  
Elitalia - Pasco (Milano)  
Glomanet (Cesena)  
Italia in Miniatura (Viserba)  
Lab - Trek (Bologna)  
National Instruments Italia (Milano)

Mostra realizzata e organizzata da  
Meeting per l'Amicizia fra i Popoli  
[www.meetingrimini.org](http://www.meetingrimini.org)





# I VIAGGI DEL GIOVANE EISTEIN







# EINSTEIN 1905 IL GENIO ALL'OPERA

L'imminenza dell'anniversario dell'*Annus Mirabilis* di Albert Einstein (1905) è un'occasione per esplorare una vicenda scientifica e umana che presenta indubbiamente i tratti della genialità.

L'incontro con una esperienza eccezionale non è però pretesto per una fuga dalla quotidianità; anzi, è un'opportunità in più per cogliere motivi, significati, atteggiamenti che possono aiutare a vivere meglio la normalità dell'esperienza.

L'avventura di Einstein è stata quella di un grande scienziato, protagonista di un radicale capovolgimento della visione della realtà fisica e simbolo, di fatto, dello scienziato moderno.

Per comprendere l'esperienza di uno scienziato tuttavia non basta studiare i risultati delle sue ricerche: anche la scienza infatti, e in Einstein è più che mai evidente, è una conoscenza "personale", dove tutto il soggetto è coinvolto nel rapporto con la realtà.

Bisogna quindi osservarlo "in azione", individuare le domande che hanno orientato la sua indagine, seguirlo nel drammatico dialogo delle congetture e dei controlli

sperimentali. Immergersi (cercando di superare le difficoltà del linguaggio) nello specifico dei problemi che ha affrontato.

Per questo abbiamo dato la parola ad Einstein stesso, che ci condurrà attraverso gli anni della formazione per poi invitarci a visitare l'Ufficio Brevetti di Berna, dove ha concepito i tre celebri lavori scientifici del 1905, e da lì entrare "nel cuore" di quelle sue ricerche sul moto browniano, sull'effetto fotoelettrico e sulla relatività speciale.

Potremo così vedere all'opera i criteri di semplicità, armonia, rigore e unità che hanno guidato il "libero gioco dei concetti" di una mente vivace e mai appagata. E sorprendere il lavoro di una ragione sostenuta da una profonda passione per la realtà e mossa continuamente da quella che lui stesso definiva "sacra curiosità".



# LA FISICA È FINITA?

Nel 1871, in occasione dell'inaugurazione del Cavendish Laboratory di Cambridge, **James Clerk Maxwell** affermava: *"È opinione comune che entro pochi anni tutte le grandi costanti fisiche saranno state valutate e la sola cosa che resterà da fare agli scienziati sarà quella di raffinare la loro misura di un altro decimale"*.

Vent'anni dopo, parlando alla Società Britannica per lo Sviluppo delle Scienze, **Lord Kelvin** ribadiva:

*"Abbiamo scoperto tutto ciò che si poteva scoprire nel campo delle scienze fisiche."*

*Il resto non comporta altro che misurazioni sempre più perfezionate".*



Il più autorevole  
fisico tedesco  
del primo Novecento  
**Max Planck**  
(1858-1947)

Lo scenario però non era tutto così roseo, come osserverà più tardi **Max Planck**:

*"Negli ultimi cinquant'anni il volto della fisica si è completamente trasformato. Quando io iniziavo i miei studi il mio maestro Philipp von Jolly mi descriveva la fisica come una scienza giunta ad un alto grado di sviluppo e quasi completamente matura che, avendo ormai avuto il suo coronamento con la scoperta del principio della conservazione dell'energia, avrebbe presto assunto una forma stabile e definitiva."*

*In qualche angolo, diceva, c'era forse ancora qualche quisquiglia da ordinare e da studiare, ma il sistema nel suo complesso era abbastanza sicuro, e la fisica teorica si stava avvicinando a quel grado di compiuta perfezione che la geometria aveva raggiunto da secoli."*

*Tali, or è mezzo secolo, le opinioni di un fisico all'altezza dei tempi."*

*Non mancavano nemmeno allora, a dire il vero, alcuni punti oscuri che avrebbero dovuto meglio essere chiariti, e che in quel gradevole stato di sazietà recavano una nota di inquietudine".*

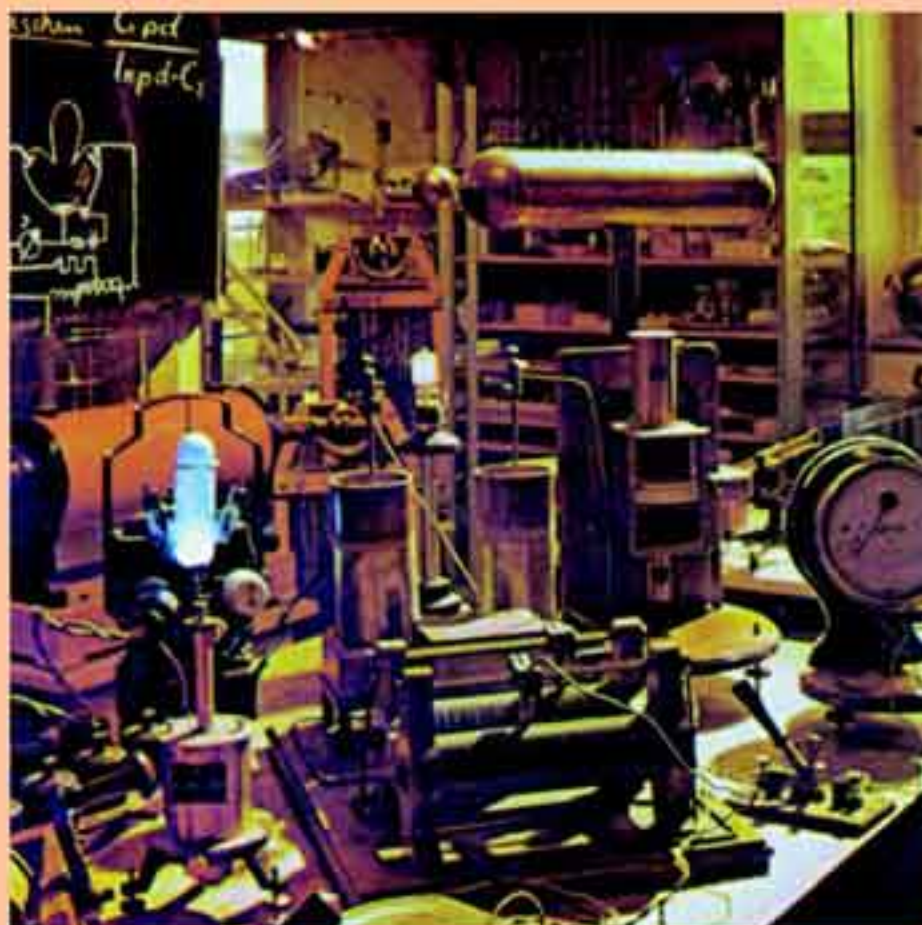


Il grande fisico inglese William Thomson detto **Lord Kelvin**  
(1824-1907)

Lo stesso **Lord Kelvin**, nell'aprile del 1900, tenne una conferenza alla Royal Institution of Great Britain dal titolo significativo: *"Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light"*.

Le due nubi alle quali si riferiva riguardavano una il cosiddetto teorema di equipartizione dell'energia, che sembrava inconciliabile con il comportamento sperimentale dei sistemi molecolari; l'altra toccava il problema del moto relativo dei corpi rispetto al fantomatico etere.

Ma un nuovo vento stava arrivando a dischiudere **orizzonti impensati** per la fisica.



Il laboratorio dell'Istituto di fisica del Politecnico di Zurigo frequentato da Einstein negli ultimi anni dell'800



# L'INCALZARE DELLE SCOPERTE

Lo sviluppo della fisica dell'Ottocento consegnava al nuovo secolo un quadro teorico robusto e ben compaginato. La grande sintesi alla quale era pervenuto **Maxwell** (1873), non solo aveva unificato i fenomeni elettrici e magnetici sulla base del concetto di **campo**, ma consentiva anche di spiegare i fenomeni ottici interpretando la luce come il propagarsi di onde elettromagnetiche.

Molti problemi venivano così risolti, ma nuovi interrogativi si aprivano e stimolavano la instancabile curiosità degli scienziati. Le domande vertevano principalmente sulla teoria della materia, sull'interazione tra materia e radiazione, sull'effettiva natura di quell'elettrone che **J. J. Thomson** aveva finalmente scoperto nel 1897, sulle proprietà dell'etere che lo stesso **Thomson** considerava *"altrettanto essenziale quanto l'aria che respiriamo"*, tanto da proclamare che *"lo studio di questa sostanza onnipervadente è forse il primo, e più affascinante, dovere del fisico"*.



Joseph John Thomson (1856-1940) con l'apparecchiatura utilizzata per la scoperta dell'elettrone

Nel frattempo nei laboratori della vecchia Europa si stavano accumulando una serie impressionante di risultati, inimmaginabili appena qualche anno prima.

A dispetto delle profezie di fine secolo, il periodo che va dal 1895 al 1905 registra **una sequenza esaltante di novità** sia teoriche che sperimentali. Il clima che domina la comunità scientifica è ben espresso da **Ernest Rutherford** in una lettera alla madre: *"Devo continuare ad avanzare, come se qualcuno mi inseguisse. Devo pubblicare prima possibile quello che sto facendo per poter vincere la sfida"*.



Lord Rutherford con Hans Geiger nel laboratorio Cavendish di Cambridge

ANNO	AUTORI	SCOPERTA
1895	Röntgen	Raggi X
1896	Becquerel	Radioattività naturale
1896	Wien	Legge della radiazione termica
1896	Zeeman	Effetto del campo magnetico sulla lunghezza d'onda della luce
1897	Wilson, Thomson	Camera a nebbia e rivelazione dell'elettrone
1898	Marie e Pierre Curie	Nuovi elementi radioattivi: radio e polonio
1899	Rutherford	Individuazione raggi $\alpha$ e $\beta$
1899	Thomson	Misura del rapporto carica/massa dell'elettrone
1900	Rayleigh	Altra legge della radiazione termica
1900	Villard	Individuazione raggi $\gamma$
1900	Planck	Irraggiamento del corpo nero e quanto d'azione
1902	Gibbs	"Principi elementari di meccanica statistica"
1904	Thomson	Modello atomico (senza nucleo)
1904	Lorentz	Trasformazioni relativistiche delle coordinate
1904	Fleming	Invenzione del diodo



Una dei primi apparati sperimentali per lo studio dei raggi X, in una illustrazione apparsa sulla rivista *Nature* nel 1896



# ANNUS MIRABILIS

*"Caro Habicht! Fra noi regna un silenzio solenne, al punto che mi sembra una profanazione venire a romperlo per qualche ciarla di scarso significato. Ma al sublime non succede sempre così a questo mondo? [...] Ma perché non mi ha ancora spedito la Sua dissertazione? Ma non lo sa miserabile, che io sarei uno degli 1 e 1/2 individui che se la leggerebbero tutta con interesse e piacere?*

*Le prometto in cambio quattro lavori, il primo dei quali Le potrei inviare entro breve, dato che riceverò tra pochissimo le copie omaggio. Tratta della radiazione e delle proprietà energetiche della luce, ed è molto rivoluzionario, come vedrà se prima mi spedisce il suo lavoro. Il secondo lavoro è una determinazione della grandezze degli atomi a partire dalla diffusione e dall'attrito interno delle soluzioni diluite di sostanze neutre. Il terzo dimostra che, nel presupposto [della validità] della teoria molecolare del calore nei liquidi, particelle in sospensione già dell'ordine di grandezza di 1/1000 di mm devono compiere un moto disordinato percettibile che è generato dall'agitazione termica; sono moti "inesplicati" di piccoli corpi inanimati in sospensione - in effetti sono stati osservati dai fisiologi -, che sono stati da loro chiamati "moto molecolare browniano". Il quarto lavoro esiste solo in abbozzo ed è un'elettrodinamica dei corpi in movimento [ottenuta] mediante l'utilizzazione di una modificazione della dottrina dello spazio e del tempo; la parte puramente cinematica di questo lavoro La interesserà di sicuro".*

Con questa lettera all'amico **Konrad Habicht** nel maggio 1905 Einstein preannuncia la performance che sta realizzando con gli articoli inviati agli *Annalen der Physik*.



Einstein a 26 anni



Frontespizio degli Annalen der Physik

Un altro gigante della fisica aveva vissuto un analogo *Annus Mirabilis*, **Isaac Newton**, che tra il 1665 e il 1666 aveva elaborato:

- il metodo di approssimazione delle serie,
- lo sviluppo del binomio (che porta il suo nome),
- il metodo delle tangenti,
- il calcolo differenziale,
- la teoria dei colori,
- il calcolo integrale,
- la prima intuizione della legge di gravitazione universale.

17 marzo	Su un punto di vista euristico sulla generazione e la trasformazione della luce
30 aprile	Su una nuova determinazione delle dimensioni molecolari (tesi di dottorato)
11 maggio	Sul moto di particelle in sospensione in un fluido in quiete, come previsto dalla teoria cinetica del calore
30 giugno	Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento
27 settembre	L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?
19 dicembre	Sulla teoria del moto browniano



Il cottage di Woolsthorpe dove Newton era nato nel 1642 e dove elaborò, nel suo *Annus Mirabilis*, le scoperte che poi confluiranno nel *Principia*



# LA PRIMA MERAVIGLIA

*"Figlio di genitori ebrei, sono nato il 14 marzo 1879 a Ulm. Mio padre era commerciante; si trasferì poco dopo la mia nascita a Monaco di Baviera e poi nel 1894 in Italia, dove rimase fino alla morte, nel 1902. Non ho fratelli, solo una sorella residente in Italia".*

*Autopresentazione alla Accademia Kaiser Leopold, Halle, 1932.*



Einstein, a 5 anni, con la sorella Maia

**1880]** **Hermann Einstein** e il fratello **Jakob** costituiscono a Monaco un'azienda di impianti elettrici.

Lo zio **Jakob**, ingegnere, intuisce il talento scientifico del nipote e gli sottopone problemi matematici che Albert risolve.

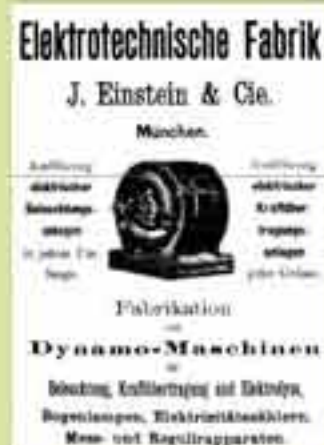
*"Probabilmente accadono nella vita di tutti eventi esterni capaci di determinare la direzione del pensiero e del comportamento di una persona. Per quel che mi*

*riguarda, ricordo che quando ero ancora ragazzino mio padre mi mostrò una piccola bussola e l'enorme impressione che mi fece allora ha senz'altro avuto conseguenze molto importanti nella mia vita".*

*Lettera ad un americano del Colorado, maggio 1936*

*"Il fatto che quell'ago si comportasse in quel certo modo, non si accordava assolutamente con la natura dei fenomeni che potevano trovar posto nel mio mondo concettuale di allora, tutto basato sull'esperienza diretta del toccare. Ricordo ancora - o almeno mi sembra di ricordare - che quella esperienza mi fece un'impressione durevole e profonda. Dietro alle cose doveva esserci un che di profondamente nascosto".*

*"Autobiografia scientifica", 1949*



Manifesto pubblicitario della ditta Einstein



Un'immagine della officina Einstein a Monaco



**La classe di Einstein** - il terzo in basso da destra - al Reale Ginnasio Luitpold a Monaco. "In realtà si trovava a disagio in quella scuola, il modo di insegnare lo sconcertava. Per di più aveva quasi sempre l'impressione che qualche professore gli fosse ostile. Il metodo militaresco adottato in quella scuola, l'educazione sistematicamente rivolta verso il culto dell'autorità, gli erano fortemente ripugnanti. Inoltre era terrorizzato di dover indossare la divisa per compiere il servizio militare" (Testimonianza della sorella).

**1889-1894]** La famiglia Einstein ospita uno squattrinato studente in medicina, **Max Talmud**, che gli propone la lettura di libri di "scienza popolare" e di filosofia. Seguono vive discussioni tra i due.

*"All'età di 12 anni provai una nuova meraviglia di natura completamente diversa; e fu leggendo un libretto sulla geometria piana euclidea. C'erano delle asserzioni, ad esempio quella che le tre altezze di un triangolo s'intersecano in un solo punto, che pur non essendo evidenti, potevano tuttavia essere dimostrate con tanta certezza da eliminare qualsiasi dubbio. Questa lucidità e certezza mi fecero un'indescrivibile impressione".*

*"Autobiografia scientifica", 1949*

*"... Fuori c'era questo enorme mondo che ci sta di fronte come un grande, eterno enigma, accessibile solo parzialmente alla nostra osservazione e al nostro pensiero. Il possesso intellettuale di questo mondo mi balenò alla mente, in modo più o meno consapevole, come la meta più alta fra quelle concesse all'uomo".*

*"Autobiografia scientifica", 1949*

**1888-1895]** Einstein frequenta il Luitpold Gymnasium a Monaco. La scuola non ebbe un ruolo positivo nella sua formazione.

**1894]** il padre **Hermann** e lo zio **Jakob** trasferiscono in Italia l'azienda di impianti elettrici. Albert rimane a Monaco per completare gli studi.



# IL FASCINO DELLA NATURA



Einstein a 15 anni, poco prima di lasciare la Germania

**1895]** Einstein presenta un certificato medico attestante disturbi nervosi, ottiene l'autorizzazione a lasciare il Luitpold Gymnasium, interrompendo gli studi. Raggiunge la famiglia a Milano.

*"Quando lo videro giungere i suoi familiari rimasero stupefatti per l'audacia del gesto, ma il giovane ribelle disse loro a chiare lettere che non avrebbe mai più rimesso piede a Monaco, e per assicurare tutti sul suo avvenire, promise che si sarebbe preparato da sé per il concorso di ammissione al Politecnico di Zurigo".*

Testimonianza della sorella, 1924

**Ottobre 1895]** Viene bocciato all'esame di ammissione al Politecnico nonostante le buone prove nelle discipline scientifiche.



La classe di Einstein alla scuola cantonale di Aarau

**1895-1896]** Frequenta la Scuola cantonale di Aarau, dove ottiene il diploma per iscriversi al Politecnico di Zurigo.

*"Se avessi la fortuna di superare gli esami, andrei al Politecnico di Zurigo a studiarvi per quattro anni matematica e fisica. Penso a me come a un futuro insegnante di queste branche della scienza, preferibilmente nei loro aspetti teorici. Quanto alle ragioni che mi hanno indirizzato verso tale progetto metterei al primo posto una certa attitudine al pensiero astratto e matematico, e poi la mia poca fantasia e il mio scarso senso pratico. E' stata una scelta dettata anche da un interesse genuino. Il che è naturale: si preferisce sempre fare le cose per le quali si hanno le capacità. Nella professione scientifica vi è poi una certa libertà che mi attira non poco".*

Tema "I miei progetti per il futuro" svolto da Einstein presso la Scuola cantonale di Aarau.



Einstein con Grossman e altri studenti a Zurigo

La prima intuizione della relatività nasce nella mente di Einstein proprio ad Aarau.

*"Un siffatto principio risultò da un paradosso nel quale m'ero imbattuto all'età di sedici anni: se io potessi seguire un raggio di luce a velocità  $c$  (la velocità della luce nel vuoto), il raggio di luce mi apparirebbe come un campo elettromagnetico oscillante nello spazio, in stato di quiete. Ma nulla del genere sembra possa sussistere sulla base dell'esperienza o delle equazioni di Maxwell".*

"Autobiografia scientifica", 1949

**1896-1900]** Frequenta il Politecnico di Zurigo.

*"Lavoro accanito e contemplazione della natura di Dio sono gli angeli che, concilianti, fortificanti e tuttavia spietatamente severi, mi guideranno attraverso il tumulto della vita".*

Lettera a Rosa Winteler, 3 giugno 1897



# GENITORI, AMICI E MAESTRI

**1897]** Einstein incontra **Michele Besso**, l'amico di tutta una vita. Fu **Besso** ad indirizzare Einstein alla lettura di **Mach**.

*"Riconosco la grandezza di Mach nel suo scetticismo incorruttibile e nella sua indipendenza. La sua 'Storia della meccanica', quand'ero studente, esercitò una profonda influenza su di me [...] Mach combattè e demolì il dogmatismo della fisica del XIX secolo".*

Il dogmatismo consisteva nel considerare la meccanica come fondamento di tutta la fisica e di postulare l'esistenza di uno spazio e di un tempo assoluti.



Michele Besso con la moglie

Gravi difficoltà dell'azienda paterna, il giovane Albert comprende l'inadeguatezza imprenditoriale del padre e gli dà non ascoltati consigli.



Il padre Herman Einstein e la madre Pauline Koch

*"Se il babbo avesse seguito secondo quanto gli indicavo già da due anni, di cercarsi un impiego da qualche parte, avrebbe risparmiato molte disavventure sia a lui, sia a noi".*  
Lettera alla sorella, 1898

Einstein è oppresso per la situazione familiare.

*"Ciò che più mi affligge è la malasorte dei miei poveri genitori. Sono profondamente addolorato dal fatto che io, ormai adulto, devo starmene a guardare con le mani in mano senza poter essere del benché minimo aiuto. Non sono altro che un peso, sarebbe stato meglio se non fossi mai nato. A volte l'unico pensiero che mi conforta è che ho fatto tutto il poco che potevo: non mi sono mai permesso né svaghi, né divertimenti, tranne quelli forniti dallo studio".*  
Lettera alla sorella, 1898.



L'Istituto di Fisica del Politecnico di Zurigo

Segue un temporaneo miglioramento.

*"Di tanto in tanto ho qualche ora libera per girare nei bei dintorni di Zurigo. Inoltre sono felice di pensare che le peggiori preoccupazioni dei miei genitori sono ormai svanite. Se tutti vivessero come me, non si sarebbe mai inventato il romanzo".*

Lettera alla sorella, 1898.

**28 luglio 1900]** Ottiene il diploma al Politecnico di Zurigo. I voti sono 5,5 su 6 in Teoria delle funzioni; 5 su 6 in Fisica teorica, Fisica sperimentale, Astronomia; 4,5 su 6 nella tesi di diploma.

Non gli viene però concesso un posto di assistente all'Istituto di Fisica.



# LE PRIME PUBBLICAZIONI DI UNO SCONOSCIUTO SUPPLENTE

**1900-1901]** È supplente presso l'Istituto tecnico di Winterthur, poi presso una scuola privata di Sciaffusa. Inizia intanto un'intensa attività di studio e di ricerche di fisica teorica.



L'Ufficio federale svizzero per la proprietà intellettuale, ovvero Ufficio Brevetti, a Berna

*"Dà una sensazione meravigliosa il riconoscere i caratteri unificanti di un complesso di fenomeni che si presentano come del tutto incorrelati alla diretta esperienza dei sensi".*  
Lettera all'amico matematico Marcel Grossman, aprile 1901

**1901]** Sui prestigiosi *Annalen der Physik* appare il primo articolo di Einstein, sulla teoria della capillarità. Questo lavoro non fa prevedere niente di eccezionale nel futuro dell'autore.

**1902]** Sempre sugli *Annalen* appare un articolo sulla elettrolisi, dove Einstein avanza l'ipotesi di una forza molecolare universale analoga alla forza attrattiva di Newton. L'ipotesi è sbagliata, ma mostra come Einstein fosse già alla ricerca di principi unificanti per la fisica.

**23 giugno 1902]** Prende servizio presso l'Ufficio brevetti di Berna, con la qualifica di tecnico di III classe e stipendio annuo di 3.500 franchi.



Einstein al tavolo dell'Ufficio Brevetti

**6 gennaio 1903]**  
Sposa **Mileva Maric**.

*"Caro Michele, grazie infinite per la tua cara lettera. Dunque adesso sono un uomo sposato e conduco con mia moglie una vita deliziosa e molto piacevole. Lei pensa a tutto in modo eccellente, cucina bene ed è sempre di buon umore".*  
Lettera a Besso, 22 gennaio 1903

**14 maggio 1904]** Nasce il figlio **Hans Albert**.

*"La porta d'ingresso era spalancata perché il pavimento lavato da poco e la biancheria appesa lungo il corridoio si asciugassero. Entrai nella stanza di Einstein, con tutta calma faceva dondolare con una mano la culla dove stava il figlioletto, nell'altra reggeva un libro aperto. Fumava un sigaro di qualità scadente, la stufa mandava un fumo soffocante. Non so come facesse a resistere".*

Testimonianza di David Reichinstein, 1934.

**1902-1904]** pubblica articoli sui fondamenti della meccanica statistica che costituiscono le premesse alla teoria del moto browniano.



Foto di matrimonio di Einstein e Mileva Maric

Einstein, Mileva e il primo figlio



A Berna, Einstein discute spesso di fisica e di filosofia con Maurice Solovine (al centro) e Conrad Habicht (a sinistra), con i quali fonda l'Accademia Olimpica

Lezioni private di matematica e fisica a studiosi e scolari impartisce coscienziosamente  
Albert Einstein,  
titolare del diploma del Politecnico federale.  
Una lezione di prova gratis.

Annuncio sul "Berliner Stadtanzeiger", 1902

Riproduzione dell'annuncio

Franz Ammer, Malerweg 9 (Längg.)  
u. Vervielfachungs-  
Guss von Zeichnungen für Miniaturen.

**Vermischtes**

Verständnisse in  
**Mathematik u. Physik**  
für Studierende und Schüler erteilt  
gründlich  
Albert Einstein, Inhaber des eigentl.  
solist. Fachdiploms.  
Gerechtigkeitssache 22. 1. Stad.  
Verständnisse gratis. 1902

**Kapital-Geist.**  
4983 Ein innere. strebender Mensch.



# ESISTONO VERAMENTE GLI ATOMI?

La pubblicazione del *New System of Chemical Philosophy* (1808) di **John Dalton** segna di fatto la nascita della **chimica moderna**, i cui sviluppi, nel corso dell'Ottocento portarono una schiera sempre maggiore di scienziati a postulare la composizione dei corpi in termini di piccolissime particelle elementari.

Le stesse leggi di **Dalton** dei rapporti definiti e delle proporzioni multiple, verificate sperimentalmente, si spiegano facilmente se si accetta l'ipotesi dell'esistenza degli atomi.

**Legge delle proporzioni multiple:** quando due elementi formano più composti, le diverse masse di uno che si combinano con la medesima massa dell'altro sono in un rapporto di piccoli numeri interi.

1g Fe + 0,574g S = 1,574g FeS	Rapporto Atomico
Fe + S = FeS	1 Fe / 1 S
1g Fe + 1,148g S = 2,148g FeS <sub>2</sub>	1,148g / 0,574g = 2/1
Fe + S + S = FeS <sub>2</sub>	1 Fe / 2 S
Fe + Fe + S = Fe <sub>2</sub> S	2 Fe / 1 S
Fe + Fe + S + S + S = Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2 Fe / 3 S

**Legge dei rapporti definiti:** quando due elementi si combinano, entrano nel composto in ben definiti rapporti di peso.

Ad esempio: il solfuro ferroso (FeS) si ottiene combinando ferro (Fe) e zolfo (S) secondo un ben definito rapporto delle quantità. Si possono avere cioè solo situazioni del tipo:

$$2g \text{ Fe} + 1,148g \text{ S} = 3,148g \text{ FeS} \quad 2/1,148 = 1,742$$

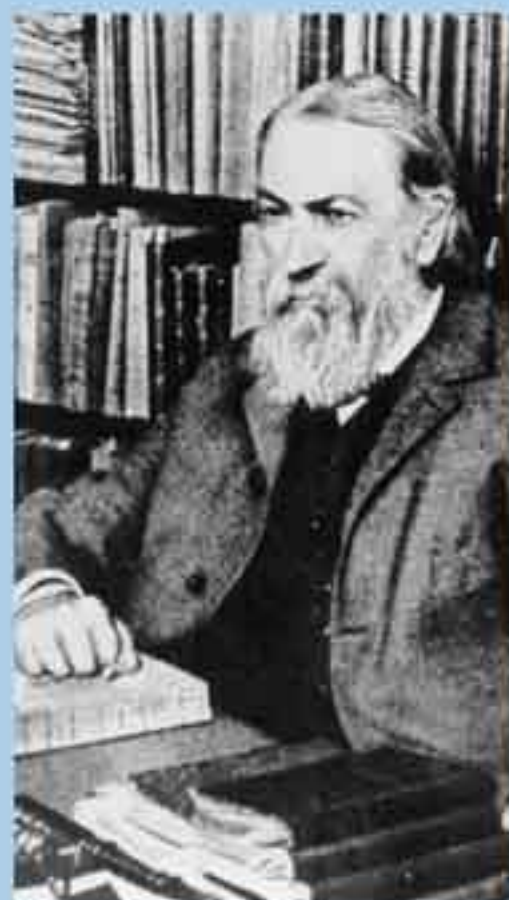
$$1g \text{ Fe} + 0,574g \text{ S} = 1,574g \text{ FeS} \quad 1/0,574 = 1,742$$

Quindi, partendo da piccole quantità di ferro e zolfo e moltiplicandole per un qualsiasi numero intero si possono ottenere tutte le possibili quantità di composto. Ma qual è il valore più piccolo che si può prendere? Si potrebbe ipotizzare l'esistenza di particelle, gli atomi appunto, che si legano per formare la molecola FeS. Così il rapporto 1,742 deriva necessariamente dal fatto che per ottenere FeS dobbiamo unire numeri uguali di atomi di ferro e di zolfo.

Tuttavia ancora nell'Ottocento le concezioni relative alla struttura fondamentale della materia non erano molto più evolute rispetto a quelle dei filosofi greci. In particolare non si era mai riusciti a fornire le **prove** dell'esistenza degli atomi, tanto è vero che scienziati positivisti come **Ernst Mach** consideravano gli atomi come una **pura ipotesi matematica**, senza riscontro con la realtà.

ELEMENTS	
Hydrogen 1	Strontian 46
Nitrogen 5	Barytes 68
Carbon 5	Iron 50
Oxygen 7	Zinc 56
Phosphorus 9	Copper 56
Sulphur 13	Lead 90
Magnesia 20	Silver 190
Lime 24	Gold 190
Soda 28	Platina 190
Potash 42	Mercury 167

I simboli di Dalton per gli elementi chimici; in seguito si è scoperto che alcuni di essi sono composti e non elementi



Secondo Mach: "Sappiamo che fenomeni chimici, elettrici, ottici sono spiegati dagli atomi. [...] Gli atomi non possono essere recepiti dai sensi, poiché, come tutte le sostanze, sono enti mentali. [...] La teoria atomica ha nella fisica una funzione analoga a quella di certe rappresentazioni ausiliarie: è un modello matematico per la riproduzione dei fatti. [...] Ma gli scienziati, per i quali sono valide le regole metodologiche newtoniane, considerano teorie di questo genere come espedienti provvisori, e cercano di sostituirle con altre più vicine alla natura".



# UN NUMERO MOLTO SPECIALE

Ma se l'ipotesi degli atomi è così perfettamente inserita nelle varie teorie, perché non ritenere addirittura che gli atomi esistano realmente?

Perché fermarsi a "registrare" la natura così come essa si presenta e non invece spingersi oltre, fino al punto di ammettere che tutte le leggi fisico-chimiche

derivino dalla struttura atomica della materia?

**Amedeo Avogadro** era di questo parere ed infatti la sua famosa legge (1811) è la prima, in ordine di tempo, che si basa sull'ipotesi esplicita della realtà molecolare.

Il ritardo con il quale tale legge venne accettata dai chimici fu un indice evidente

della diffusa resistenza all'idea della realtà molecolare.

La determinazione del **numero di Avogadro** era infatti di fondamentale importanza per il successo della teoria atomica tanto è vero che essa fu riconosciuta una volta per tutte grazie allo straordinario accordo tra i valori di questo

numero ottenuti con metodi differenti.

Einstein stesso ne propone tre in meno di due mesi, tra marzo e maggio 1905, tutti diversi fra loro.



Studiando la diffrazione della luce nell'aria, nel 1899, **Lord Rayleigh** aveva proposto una formula per calcolare il rapporto tra l'intensità della luce solare diretta e di quella diffusa nel cielo a causa del pulviscolo: il rapporto dipende dal numero di particelle presenti in atmosfera e quindi nella formula compare  $N$ . Il controllo sperimentale non era facile: richiedeva scienziati alpinisti, in grado di compiere osservazioni a grande altezza, con cielo molto limpido. I primi calcoli furono eseguiti da **Lord Kelvin** in base ai dati raccolti da **Quintino Sella** sulla vetta del Monte Rosa: egli stimò un valore compreso tra  $3$  e  $15 \cdot 10^{23}$ .



Amedeo Avogadro (1776-1856)

## >> LA LEGGE DI AVOGADRO >>

*Volumi eguali di gas diversi, a parità di pressione e temperatura, contengono lo stesso numero di molecole.*

**Numero di Avogadro  $N = 6,023 \cdot 10^{23}$**  è il numero di atomi contenuti in 1 g di idrogeno.

$N$  costituisce il legame tra la macrofisica e la microfisica permettendo di calcolare le masse degli atomi in unità di massa e non solo in termini relativi.

**Mole** = quantità di materia contenente un numero di oggetti uguale  $N$ .

**Grammolecola** = massa in grammi di una mole di oggetti.

La massa di 1 mole di H contiene  $N$  atomi di H e pesa 1 g. La massa di 1 mole di  $H_2$  contiene  $2N$  atomi di H e pesa 2 g. La massa di 1 mole di  $O_2$  contiene  $N$  molecole di  $O_2$  e pesa 32 g: questo perché una molecola di ossigeno pesa 32 volte un atomo di H.



# DAL POLLINE AGLI ATOMI

Su un punto tutti gli scienziati concordavano: gli atomi, ammesso che esistessero, dovevano essere **troppo piccoli** per essere visibili. Nemmeno lo sviluppo dei microscopi sembrava infatti portare un valido aiuto (immagini dirette degli atomi si otterranno solo negli anni '50, con il microscopio ionico a emissione di campo). Tuttavia l'esistenza degli atomi poteva essere provata anche ricorrendo a misure indirette.

In un articolo del 1828, il botanico scozzese **Robert Brown** riferiva di avere osservato il moto caotico di varie specie di particelle abbastanza piccole da restare in sospensione nell'acqua.

Egli aveva esaminato il comportamento di frammenti di particelle di polline, del "pulviscolo o fuliggine che si deposita su tutti i corpi in così gran quantità, specie a Londra", e di particelle di roccia polverizzata, incluso un frammento della Sfinge, e di altri materiali.

Che cos'aveva di così strano questo moto da attirare l'attenzione dello scienziato? Le particelle esaminate al microscopio da Brown, anziché cadere regolarmente come un qualunque oggetto immerso in un liquido meno denso, erano animate da un movimento vivace e completamente disordinato: volteggiavano, andavano e venivano, salivano, scendevano, risalivano ancora, senza tendere in alcun modo verso la quiete.

È il **moto browniano**, così chiamato in ricordo dello scopritore. Esso sembra dar conferma dell'ipotesi molecolare: ogni granello, urtato senza sosta dalle molecole vicine, ne riceve degli impulsi che non si equilibrano e che lo sballottano irregolarmente.



Robert Brown  
(1773-1858)

*"In base alla teoria cinetico-molecolare del calore, corpi di dimensione microscopicamente visibile in sospensione in liquidi debbono compiere, in conseguenza del moto di agitazione termica delle molecole, movimenti di ampiezza tale che li si può agevolmente osservare al microscopio. È possibile che i movimenti (...) siano identici al cosiddetto 'moto molecolare browniano'.*

*Se il moto (...) può essere di fatto osservato insieme alle leggi cui ci si aspetta che obbedisca, la termodinamica classica non può più essere considerata valida già per regioni distinguibili con un microscopio, e un'esatta determinazione delle reali dimensioni degli atomi diventa possibile. Viceversa, se la previsione di questo moto si dimostrasse errata, ciò fornirebbe un solido argomento contro la concezione cinetico-molecolare del calore".*  
(dall'introduzione di Einstein al primo articolo sul moto browniano)



Osservando dalla spiaggia col cannocchiale un battello in lontananza, ci accorgiamo facilmente che esso sembra fermo ma in realtà oscilla. Il movimento è provocato dalle onde che lo urtano in continuazione; noi non riusciamo a vedere le onde ma solo il loro effetto: ciò è però sufficiente a farci concludere che il mare è agitato.



## Il moto browniano è:

- perfettamente disordinato: ogni particella si muove in modo casuale, e nel suo insieme il sistema è descrivibile utilizzando le consuete leggi della probabilità
- spontaneo e incessante: non s'arresta mai; all'interno di una cella chiusa (in modo da evitare l'evaporazione) lo si può osservare nel corso di giorni, mesi, anni.

Qui è riprodotta la vista al microscopio di particelle sospese in un liquido, che si addensano verso il basso per gravità; nel riquadro è schematizzato il percorso a zig-zag di una particella.



# LA PRIMA INTUIZIONE



Se dell'acqua pura è in contatto con una soluzione acquosa di granuli uguali si produrrà una diffusione dei granuli nell'acqua, tanto più rapida quanto più attivo sarà il loro movimento. Ma come studiare questa diffusione?

*“Guardando nell'acqua, anche con i più potenti microscopi, non riusciamo a distinguere né le molecole, né il loro moto così come viene rappresentato dalla teoria cinetica della materia. Dobbiamo inferire che se la teoria considerante l'acqua come un aggregato di particelle, è corretta, le dimensioni delle particelle stesse debbono essere inferiori ai limiti di visibilità dei migliori microscopi. Continuiamo ciò malgrado ad appoggiarci alla teoria cinetica e ad ammettere che essa ci offra una raffigurazione coerente della realtà. Le particelle browniane, visibili al microscopio vengono bombardate da quelle molto più piccole di cui si compone l'acqua. Il movimento browniano si verifica*

*sempreché le particelle bombardate siano abbastanza piccole. Il movimento si produce perché il bombardamento non è uniforme su tutti i lati e non può venir compensato per motivo del suo carattere irregolare e casuale. Il moto osservabile è dunque il risultato di un moto invisibile. Il comportamento delle particelle immerse rispecchia, fino a un certo punto, quello delle molecole d'acqua e ne costituisce, per così dire, un ingrandimento tale, da renderlo visibile al microscopio”.*

L'innovazione fondamentale di Einstein – come osserva **Max Born** – consiste nell'elevare la teoria cinetica della materia da semplice ipotesi a **utile a oggetto**

**d'osservazione**; indicando un caso, il moto browniano, in cui i movimenti delle molecole e il loro carattere statistico potevano essere visibili. Fino a quel momento infatti la teoria cinetica veniva valutata in base agli effetti macroscopici, determinabili dagli esperimenti; con Einstein invece gli stessi moti molecolari **sono visibili**. La sua scelta di ricorrere alle particelle in sospensione porta a un radicale capovolgimento di prospettiva nello studio della teoria cinetica della materia. Nessuno si era accorto prima di lui che il fenomeno di diffusione delle particelle in sospensione poteva fornire una fondamentale pietra di paragone per la teoria molecolare del calore.



Einstein venne a conoscenza della controversia sulla teoria molecolare del calore quando era ancora studente e fu molto colpito dalla lettura della Gastheorie in cui **Boltzmann** (a sinistra), in polemica con **Ostwald** (a destra) e **Helm**, sosteneva di essere il solo a credere nella teoria cinetica. Einstein era fermamente convinto della validità di tale teoria, ma criticava Boltzmann per lo scarso interesse che questi riservava al confronto con l'osservazione.





# SEMPLICITÀ E CHIAREZZA

Prima di Einstein ci si era sforzati di definire una "velocità media d'agitazione" seguendo il più esattamente possibile la traiettoria di un granello. Le valutazioni ottenute però erano grossolanamente erranee: le variazioni della traiettoria sono infatti così numerose e rapide che è impossibile seguirle; il tragitto registrato è infinitamente più semplice di quello reale e la velocità media di un granello varia enormemente.

## 7. Zur Theorie der Brownschen Bewegung; von A. Einstein.

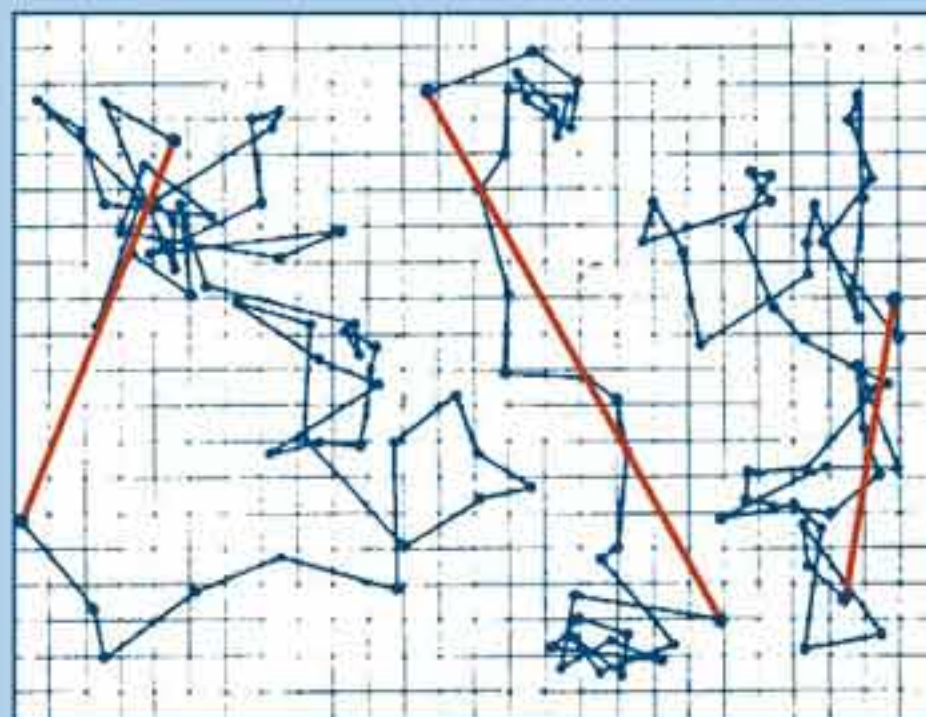
Kurz nach dem Erscheinen meiner Arbeit über die durch die Molekulartheorie der Wärme geforderte Bewegung von in Flüssigkeiten suspendierten Teilchen<sup>1)</sup> teilte mir Hr. Siedentopf (Jena) mit, daß er und andere Physiker — zuerst wohl Hr. Prof. Gouy (Lyon) — durch direkte Beobachtung zu der Überzeugung gelangt seien, daß die sogenannte Brownsche Bewegung durch die ungeordnete Wärmebewegung der Flüssigkeitsmoleküle verursacht sei.<sup>2)</sup> Nicht nur die qualitativen Eigenschaften der Brownschen Bewegung, sondern auch die Größenordnung der von den Teilchen zurückgelegten Wege entspricht durchaus den Resultaten der Theorie. Ich will hier nicht eine Vergleichung des mir zur Verfügung stehenden dürftigen Erfahrungsmaterials mit den Resultaten der Theorie anstellen, sondern diese Vergleichung denjenigen überlassen, welche das Thema experimentell behandeln.

Die nachfolgende Arbeit soll meine oben genannte Arbeit in einigen Punkten ergänzen. Wir leiten hier nicht nur die fortschreitende, sondern auch die Rotationsbewegung suspendierter Teilchen ab für den einfachsten Spezialfall, daß die Teilchen Kugelgestalt besitzen. Wir zeigen ferner bis zu wie kurzen Beobachtungszeiten das in jener Abhandlung gegebene Resultat gilt.

Für die Herleitung wollen wir uns hier einer allgemeineren Methode bedienen, teils um zu zeigen, wie die Brownsche Bewegung mit den Grundlagen der molekularen Theorie der Wärme zusammenhängt, teils um die Formeln für die fortschreitende und für die rotierende Bewegung durch eine einheitliche Untersuchung entwickeln zu können. Es sei nämlich  $\alpha$  ein beobachtbarer Parameter eines im Temperatur-

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17, p. 549, 1905.

2) M. Gouy, Journ. de Phys. (3) 7, p. 561, 1888.



Einstein **cambia approccio** e sceglie come grandezza caratteristica dell'agitazione il segmento che unisce il punto di partenza al punto di arrivo, e che è, in media, tanto più grande quanto più l'agitazione è viva.

Tale segmento misura lo spostamento  $X$  del granello nel tempo considerato. Partendo sempre dall'ipotesi che il moto browniano sia perfettamente irregolare, Einstein scopre che  $X$  raddoppia quando il tempo di osservazione diventa quadruplo, triplica quando tale tempo diventa nonuplo, e così via. Vale quindi una formula del tipo:

$$X^2/t = \text{costante}$$

Ecco che così si ottiene un metodo per **quantificare** l'attività del moto browniano, mediante il coefficiente di diffusione  $D$  contenuto nella costante. Utilizzando altre ben note leggi fisiche, Einstein ottiene infine la **legge** che esprime lo spostamento quadratico  $X^2$  nel tempo  $t$  in funzione di quantità misurabili (temperatura, raggio della particella, viscosità del liquido) e del numero di Avogadro. Einstein commenterà nel 1917:

*"Dal momento che si è compresa l'essenza del moto browniano, improvvisamente sono svaniti tutti i dubbi sulla correttezza dell'interpretazione di Boltzmann delle leggi della termodinamica".*

Frontespizio dell'articolo sul moto browniano: "Per la sua semplicità e chiarezza - secondo Max Born - questo articolo è diventato un'opera classica della nostra scienza"

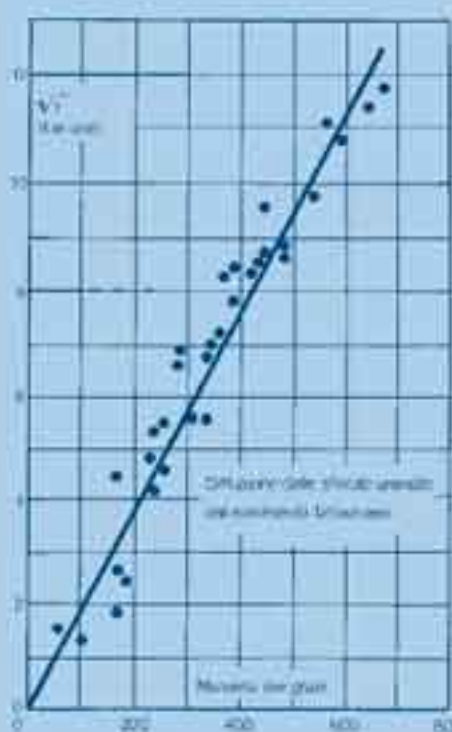
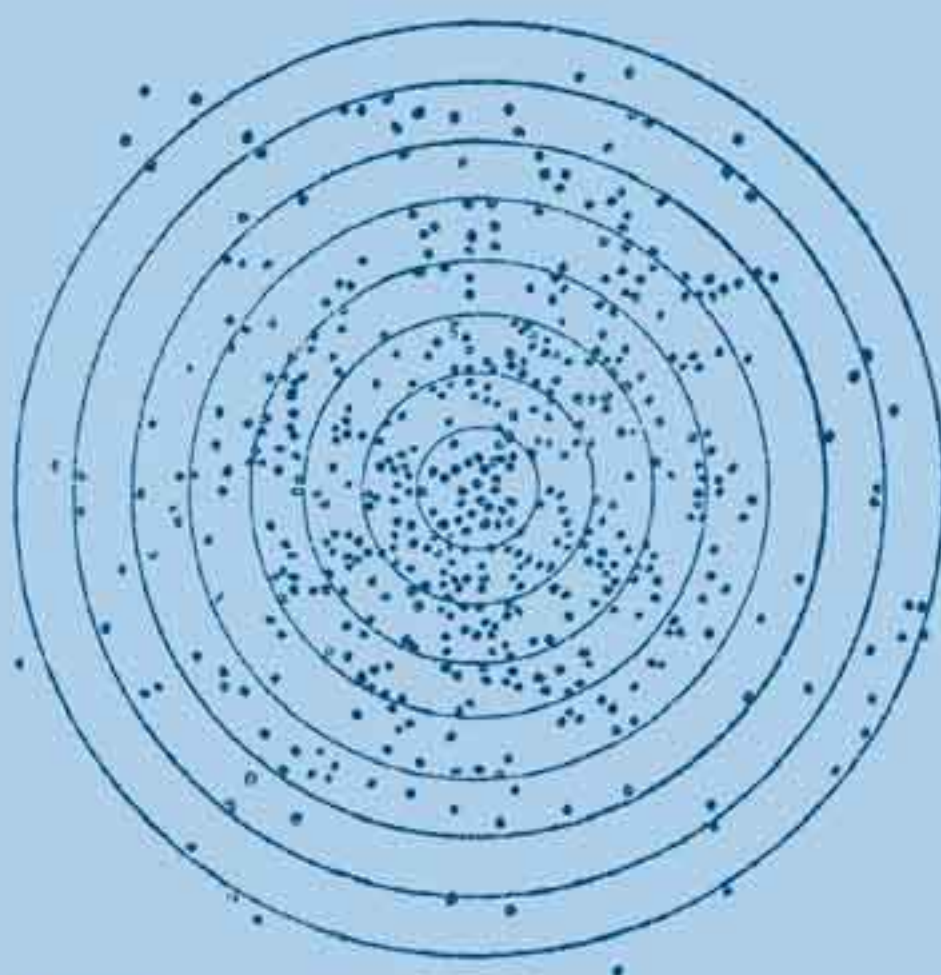


# PERRIN "VEDE" GLI ATOMI

Nel frattempo, vengono messe a punto tecniche di nuova concezione per l'indagine sperimentale del moto browniano: come l'ultramicroscopio, col quale **Theodore Svedberg** esegue accurate misure per verificare l'interpretazione einsteiniana. I risultati però sono insoddisfacenti e Einstein stesso, in articolo scritto probabilmente per correggere i malintesi di fondo contenuti nei lavori di **Svedberg**, esprime la convinzione che la velocità delle particelle ultramicroscopiche non possa essere direttamente osservata: uno scetticismo peraltro giustificato dalla mancanza di un accordo quantitativo tra tutti i lavori sperimentali disponibili. Tale situazione durerà fino al 1908, anno in cui **Jean Baptiste Perrin** pubblica i risultati di una serie di esperimenti con i quali era riuscito a confermare quasi tutte le predizioni di Einstein con una **precisione** fino ad allora mai raggiunta. Ecco i due passaggi principali del lavoro di **Perrin**.

## Verifica della perfetta irregolarità del moto browniano

Considerando la traiettoria già nota del granello e riportando ogni segmento al punto iniziale si ottiene una distribuzione circolare e di intensità decrescente allontanandosi dal centro. L'immagine è simile a quella di un tiro al bersaglio e dimostra che nessuna direzione è privilegiata, così come richiesto dalle leggi della probabilità.



## Verifica della legge di diffusione

**Perrin** considera dei granelli di gommagutta messi in sospensione nella glicerina. Inserisce poi nel liquido una parete perfettamente assorbente, che cattura tutti i granelli che per la casualità del moto browniano vengono a contatto. La variazione del numero di granelli incollati rispetto al tempo determina il coefficiente di diffusione.

L'anno seguente Einstein scrive a **Perrin**:

*"Ritenevo fosse impossibile studiare il moto browniano in maniera così precisa; è davvero una fortuna che Lei abbia deciso di occuparsene".*

Il dibattito sulla realtà degli atomi giungeva quindi a una **prima conclusione**. Restava aperto il grande interrogativo su quale fosse la reale natura degli atomi e se essi fossero veramente "indivisibili" o se celassero una struttura interna ancor più misteriosa.



Il fisico francese  
**Jean Baptiste Perrin**  
(1879 – 1942),  
coetaneo di Einstein



# LA NATURA DELLA LUCE: ONDA O CORPUSCOLO?

Cosa sia la luce e quale sia la sua vera natura è una domanda che ha sempre incuriosito ed appassionato l'uomo e alla quale, fin dall'antichità, filosofi e sapienti hanno tentato di dare una risposta.

Nel XVII secolo, il tentativo di applicare a questo interrogativo il nascente metodo scientifico sperimentale portò alla nascita di due principali scuole di pensiero rappresentate da **Christiaan Huygens**, secondo il quale la luce era un **fenomeno ondulatorio** come il suono, e da **Isaac Newton**, che invece la riteneva composta da un **fascio di particelle**.

*“Se oltre ciò, il passaggio della luce richiede tempo, il che non tarderemo a vedere, ne conseguirà che questo movimento impresso alla materia interposta sarà progressivo e pertanto si propagherà, come fa il suono, per superfici sferiche e per onde; le chiamo onde per la loro somiglianza con quelle che vediamo formarsi nell'acqua allorché vi si getta un sasso [...]”.*  
(Christiaan Huygens, “Trattato sulla Luce”, 1690)



Il fisico olandese **Christian Huygens** (1596-1648)

Alla fine del Seicento, nessuna delle due teorie era in grado di spiegare completamente tutti i fenomeni ottici conosciuti; nonostante questo, la maggior fama ed il prestigio scientifico di **Newton** fecero prevalere all'interno della comunità scientifica, per circa un secolo, il suo punto di vista.

*“Possiamo immaginarla [la luce] come una moltitudine di corpuscoli incredibilmente piccoli e veloci, di diverse dimensioni che si sprigionano da corpi luminosi a grande distanza l'uno dall'altro, ma tuttavia senza un sensibile intervallo di tempo, e vengono continuamente proiettati in avanti da un principio di movimento che all'inizio li accelera”.*  
(Relazione di Newton alla Royal Society, 1675)



Sir **Isaac Newton** (1642-1727)



# LA LUCE E I FENOMENI DI INTERFERENZA



Ritratto di **Thomas Young**  
(1773-1829)

Nel 1801 **Thomas Young**, nel tentativo di risolvere la disputa relativa alla natura della luce, cercò di riprodurre nell'ambito dell'ottica un fenomeno

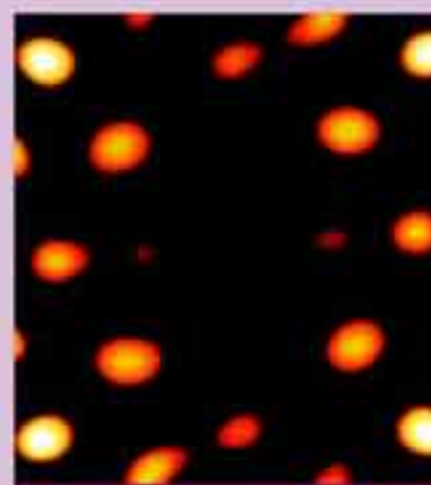
tipicamente ondulatorio come l'**interferenza**. Era infatti già noto come due onde meccaniche, prodotte ad esempio da due sassi gettati in un lago, potessero interagire rafforzandosi (interferenza costruttiva) o smorzandosi a vicenda (interferenza distruttiva).

**Young**, attraverso un apparato sperimentale che oggi prende il suo nome, riuscì a sovrapporre su di uno schermo la luce prodotta da due sorgenti fra loro coerenti e dotate delle medesime caratteristiche.

In tal modo riuscì effettivamente a produrre una serie di frange d'interferenza in cui luce ed ombra si alternavano.

L'esperimento di **Young** sembrava avere una valenza indiscutibile: se la luce fosse composta da un fascio di particelle, non sarebbe possibile ottenere una regione d'ombra dalla sovrapposizione di due raggi luminosi.

Siamo dunque costretti ad ammettere che la luce ha una natura **ondulatoria**, ma **che tipo di onda è?**



Un altro fenomeno ottico tipicamente ondulatorio è la **diffrazione** (qui ottenuta con un reticolo di diffrazione cubico)



Interferenza fra onde meccaniche all'interno di un ondoscopio.

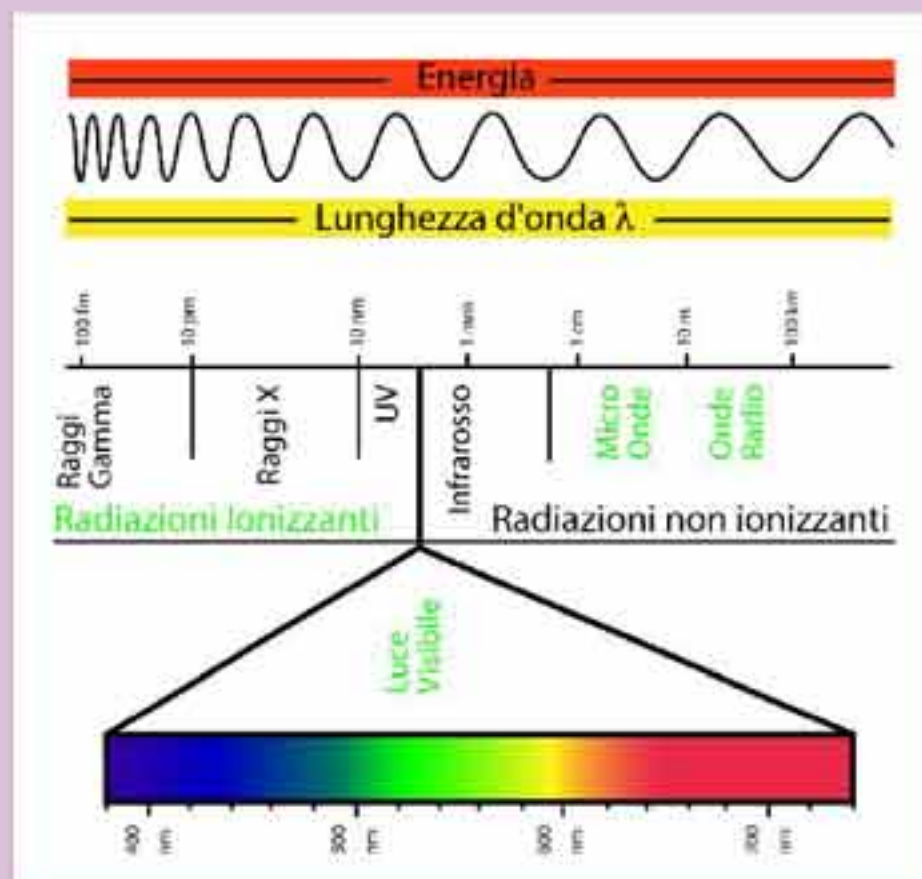


# MAXWELL E L'AFFERMAZIONE DELL'ELETTROMAGNETISMO

La metà del XIX secolo ha visto la nascita di una concezione capace di riunire in un'unica teoria tutte le conoscenze sull'elettricità e sul magnetismo. Si deve a **James C. Maxwell** l'intuizione che i fenomeni elettrici e quelli magnetici non sono che due aspetti di uno stesso ente fisico: il **campo elettromagnetico**. In particolare, in base alle equazioni che portano il suo nome, **Maxwell** predisse che il campo elettromagnetico e l'energia in esso contenuta si propagano nello spazio attraverso onde trasversali che si muovono con velocità finita: **le onde elettromagnetiche**.

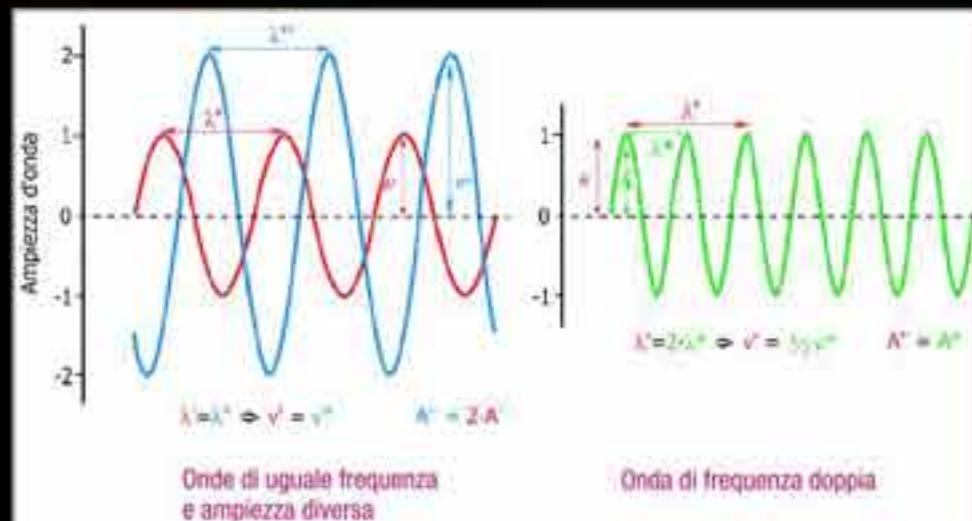


Il fisico scozzese **James Clerk Maxwell** (1831 - 1879)



Spettro elettromagnetico: classificazione della radiazione elettromagnetica in funzione della lunghezza d'onda

Basandosi sul fatto che la velocità delle onde elettromagnetiche, da lui calcolata, era uguale a quella misurata per la luce, **Maxwell** propose che la luce altro non fosse che **un'onda elettromagnetica**. Grazie alle conferme sperimentali di **Heinrich Hertz**, la teoria di **Maxwell** divenne un pilastro imprescindibile della concezione scientifica del mondo. Rimaneva aperta, però, una domanda fondamentale: **attraverso quale mezzo si propagano le onde elettromagnetiche?** Il contributo di Einstein risulterà fondamentale per rispondere a questa domanda.



## >> LE CARATTERISTICHE DI UN'ONDA ELETTROMAGNETICA >>>

- $\lambda$  è la **lunghezza d'onda**, la distanza fra due picchi o due valli successive
- **A** è l'**ampiezza d'onda**, il valore massimo raggiunto dall'onda
- **T** è il **periodo**, il tempo necessario per un'oscillazione completa
- $\nu$  è la **frequenza**, il numero di oscillazioni per unità di tempo
- **I** è l'**intensità**, rappresenta l'energia trasportata dall'onda per unità di tempo: I dipende solo da A e non da  $\nu$ .



# L'EFFETTO FOTOELETTRICO

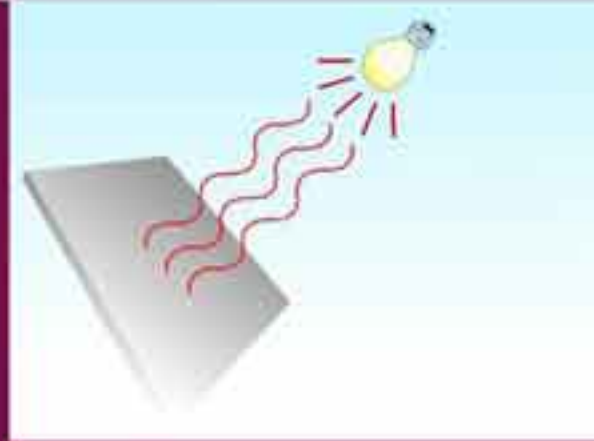
Nel primo dei suoi lavori del 1905, quello che egli stesso definiva "rivoluzionario", Einstein affronta il fenomeno fisico noto come **effetto fotoelettrico** (dal greco: *phôs* = luce ed *electron* = che scintilla, da cui anche il termine elettricità).

Si tratta dell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica quando questa è illuminata da una luce con "adequate" caratteristiche.

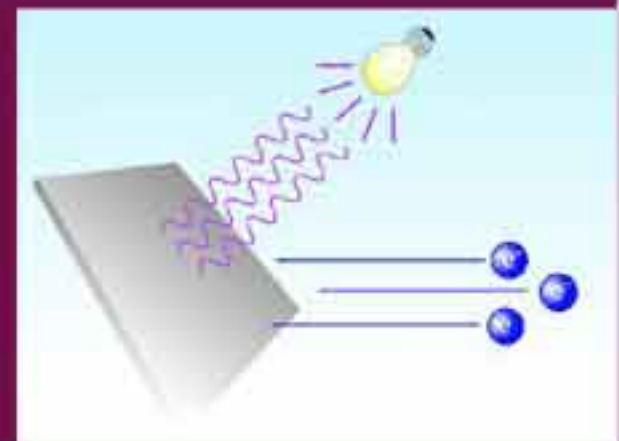
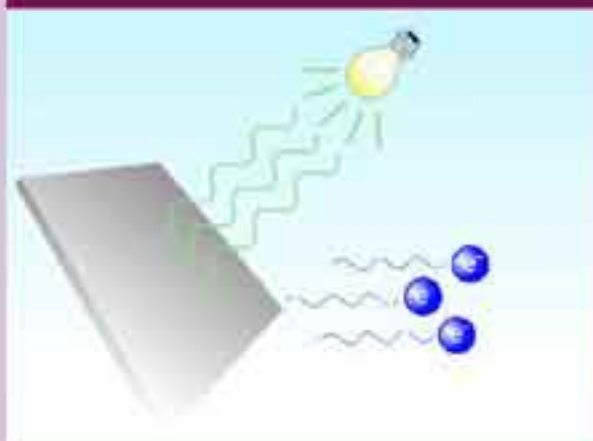
L'energia elettromagnetica trasportata dalla luce viene ceduta sotto forma di energia di movimento (cinetica) agli elettroni che riescono così a "fuggire" dal metallo a cui appartengono. Il fenomeno ha tre caratteristiche fisiche peculiari.



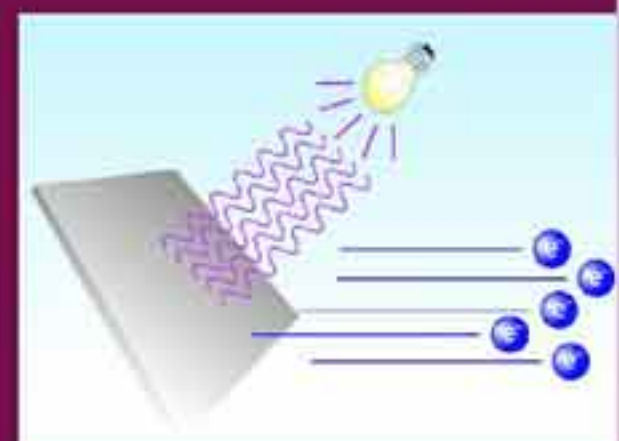
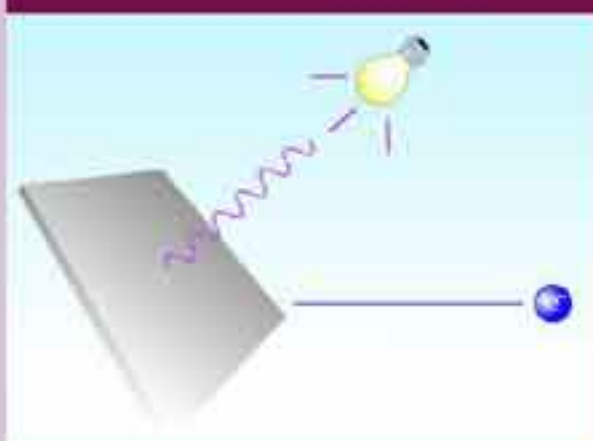
**Philippe Lenard** (1862 - 1947) fu il primo a scoprire le peculiari caratteristiche dell'effetto fotoelettrico e il suo lavoro del 1902 fu alla base dell'articolo di Einstein



a) Al di sotto di una certa frequenza detta di **soglia**, che cambia da metallo a metallo, la luce non riesce a provocare l'espulsione di elettroni neanche ad altissime intensità



b) L'energia dei singoli elettroni emessi dalla superficie metallica non dipende dall'intensità della luce, ma dalla **frequenza** di quest'ultima



c) L'aumento dell'**intensità** della radiazione provoca solamente un aumento del **flusso** dei "fotoelettroni"

Nessuna di queste tre proprietà dell'effetto fotoelettrico può essere spiegata facendo ricorso alla teoria ondulatoria di **Maxwell**.



# UNA SPIEGAZIONE INTUITIVA

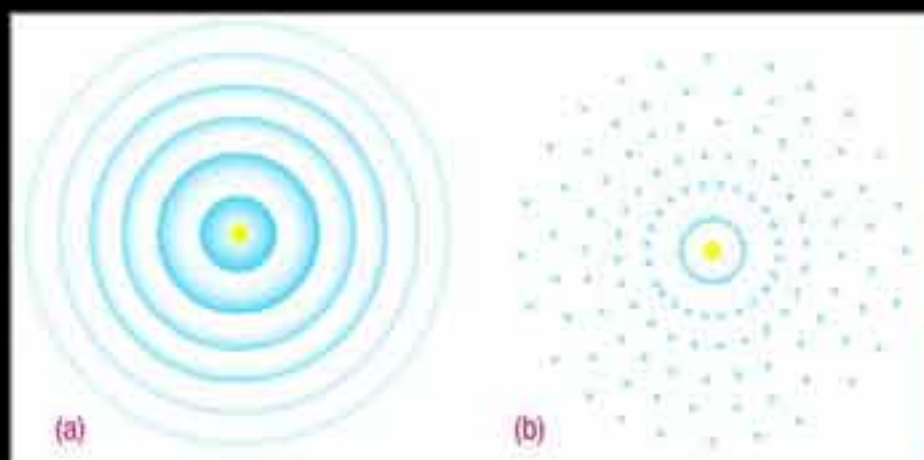
Nella sua attività di ricercatore, Einstein ha sempre cercato di individuare l'unitarietà e l'ordine profondo della realtà fisica. È per questo che, a differenza dei suoi contemporanei, ha intuito che la spiegazione dell'effetto fotoelettrico non era da ricercare in una correzione del precedente modello ondulatorio, ma in un punto di vista completamente nuovo.

*"Secondo l'ipotesi qui considerata, quando un raggio luminoso si propaga partendo da una sorgente puntiforme, l'energia non si distribuisce con continuità su volumi di*

*spazio via via crescenti, bensì consiste in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, che si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti o generati solo come unità intere".*

*(Dall'articolo del marzo 1905)*

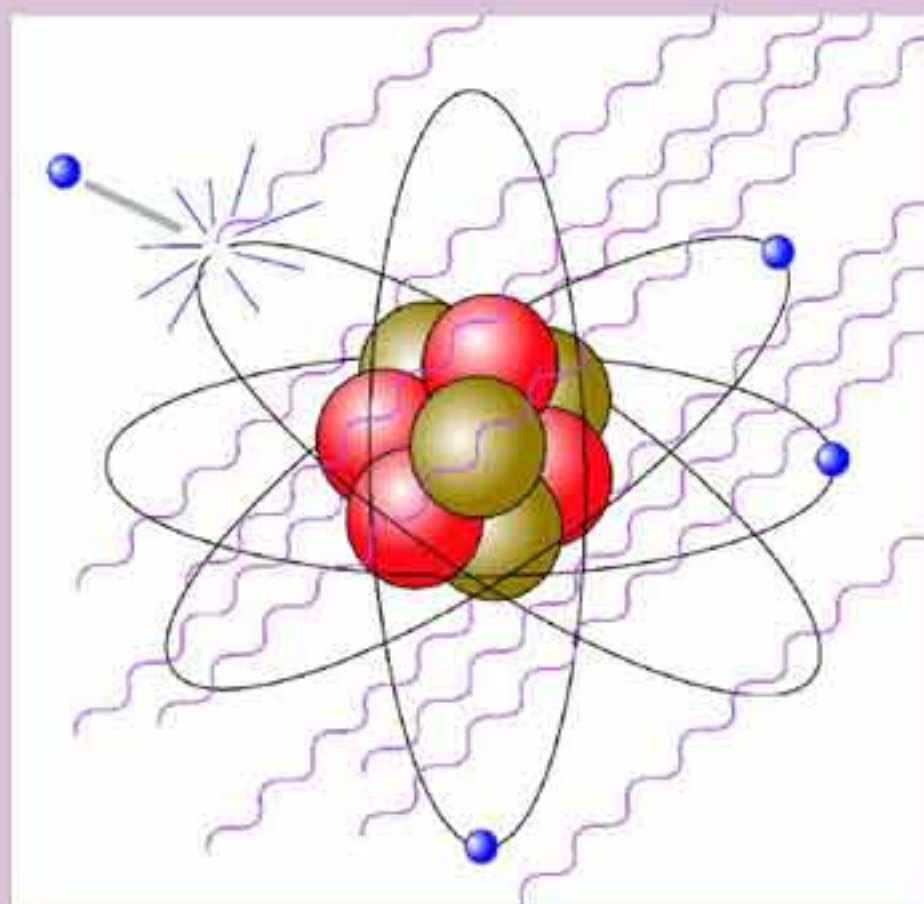
Utilizzando lo stesso termine coniato da Planck nel 1900, Einstein battezza come **"quanti"** tali quantità minime e indivisibili di energia, con quest'ultima direttamente proporzionale alla frequenza  $\nu$  della radiazione:



$$E = h \cdot \nu$$

dove  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  è la costante di Planck

Confronto fra la radiazione luminosa concepita come onda (a) o come insieme di quanti (b)



Un elettrone assorbe un fotone acquistando un'energia sufficiente ad uscire dal metallo a cui appartiene

L'effetto fotoelettrico può quindi essere così interpretato:

- un quanto di luce viene assorbito da un elettrone del metallo a cui cede tutta la sua energia;
- se l'energia assorbita è sufficiente a vincere l'attrazione elettrostatica che lo lega al metallo, ossia se la frequenza della radiazione è superiore al valore di soglia, l'elettrone viene emesso;
- l'aumento dell'intensità della radiazione, ossia del flusso di quanti, provoca semplicemente l'aumento del numero di elettroni foto-emessi nell'unità di tempo.

Con la spregiudicatezza tipica della sua personalità, il giovane Einstein si permette di elevare a principio di conoscenza la sua congettura; un principio, come egli stesso lo definisce, "euristico" ossia intuitivamente capace di spiegare i fenomeni fisici studiati, ma non ancora rigorosamente dimostrato.

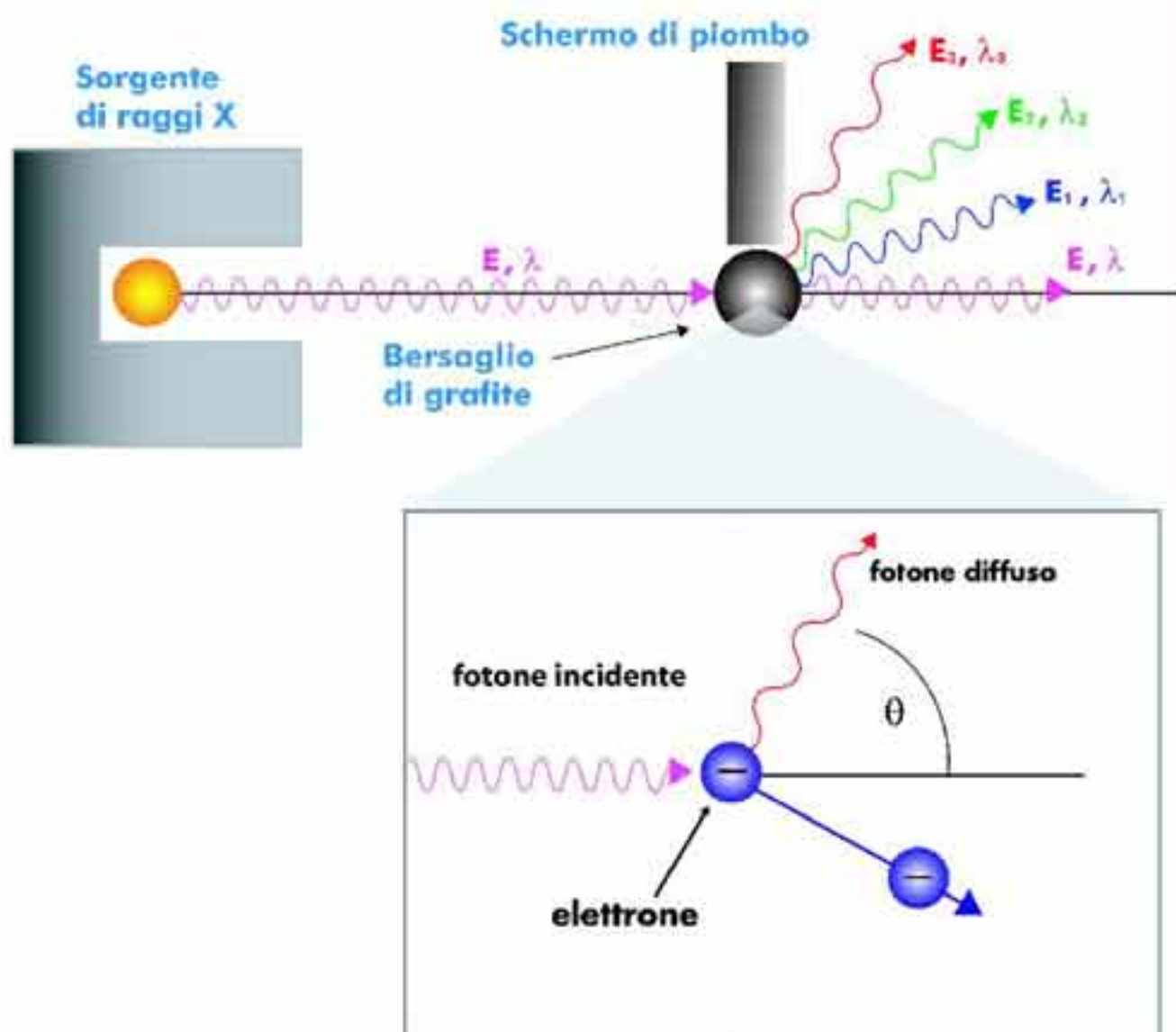


# DAL QUANTO DI LUCE AL FOTONE

La domanda circa la reale natura dei quanti di luce assillò Einstein per tutta la sua vita, senza che egli potesse mai raggiungere un punto di vista soddisfacente. Gli furono infatti necessari dodici anni di lavoro per riuscire a dimostrare rigorosamente che la propagazione dei quanti di luce avviene lungo una linea retta, secondo una direzione ben precisa. Ne conseguiva che questi ultimi sono ben più che semplici grani di energia, bensì **vere e proprie particelle** dotate di quantità di moto, ossia capaci di spostare un oggetto da loro colpito, esattamente come farebbe una comune palla da biliardo.



Arthur H. Compton (1892 - 1962)  
in laboratorio



**Effetto Compton:** un fascio di raggi X viene diffuso da un bersaglio di grafite. Si osserva che la lunghezza d'onda della radiazione diffusa varia in funzione dell'angolo di diffusione esattamente come se fosse avvenuto un urto elastico fra il fotone e un elettrone e che parte dell'energia luminosa fosse stata ceduta a quest'ultimo.

Sempre spinto dal suo desiderio di confrontarsi con la realtà, quale giudice supremo della bontà di ogni teoria, Einstein cercò di sviluppare per anni un esperimento che evidenziasse inequivocabilmente l'aspetto particellare della luce.

Fu però anticipato da **Arthur H. Compton** che nel 1922 scoprì l'effetto che porta il suo nome.

La nuova particella venne battezzata nel 1926 con il termine **fotone** dal chimico-fisico **Gilbert N. Lewis**.

Entrato nel mondo della fisica in silenzio, come ipotesi euristica e provvisoria, il quanto di luce si era ormai rivelato come una delle particelle fondamentali costituenti l'universo e nessuno scienziato, dagli anni '20 in poi, ha messo più in dubbio la sua reale esistenza.



# MA LA LUCE, DUNQUE, COS'È?

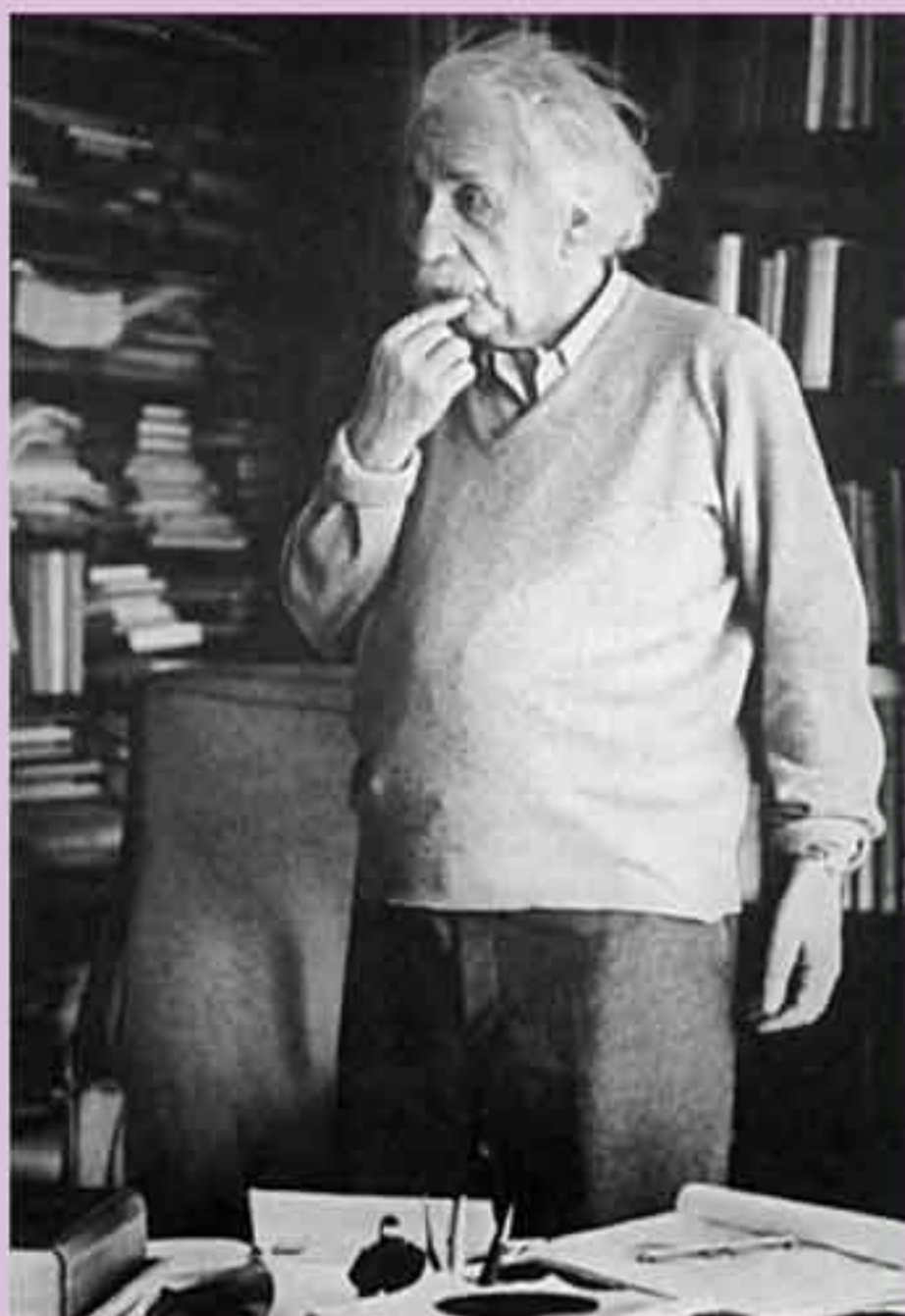
Per "la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico" ad Einstein verrà assegnato il premio Nobel per la Fisica nel 1921. Tuttavia la vera natura della luce restava un problema. Ma lasciamo che sia lo stesso Einstein a presentarci la questione:

*"Lo stato di fatto può riassumersi come segue: vi sono fenomeni spiegabili con la teoria quantistica, ma non con la teoria ondulatoria. L'effetto fotoelettrico è uno dei tanti casi del genere. Vi sono invece fenomeni spiegabili con la teoria ondulatoria, ma non con la teoria dei quanti; la diffrazione della luce intorno a piccoli ostacoli ne è un esempio tipico. Finalmente esistono fenomeni come la propagazione rettilinea della luce che possono spiegarsi tanto con la teoria quantistica come con quella ondulatoria"*

*Ma la luce, dunque, cos'è?  
È un'onda oppure un getto di fotoni?*



Nel discorso di ringraziamento per il premio Nobel, tenuto a Goteborg nel luglio 1923, Einstein non ha voluto trattare dell'effetto fotoelettrico, ma solo della teoria della relatività



*"Abbiamo due opposte rappresentazione della realtà; da sola nessuna delle due spiega totalmente i fenomeni della luce; insieme vi riescono! (...) Come combinare queste due rappresentazioni? Come capire questi due aspetti affatto diversi della luce? (...) Ci troviamo di fronte ad un problema fondamentale. (...) Ci troviamo ora di fronte ad un nuovo problema per la cui soluzione bisogna fare appello a nuovi principi".*

Siamo quindi ad un punto cruciale nel processo di conoscenza scientifica: due diversi modelli rendono parzialmente ragione di ciò che accade in natura, ma la realtà rimane lì, vicina e al tempo stesso misteriosa. In situazioni del genere Einstein era solito ripetere: "Sottile è il Signore, ma non maligno", ad indicare la sua totale fiducia nella presenza di un ordine ultimo nella realtà fisica che, per quanto misterioso, è comunque penetrabile dalla ragione umana.



# SPAZIO E TEMPO "CLASSICI"

Nella fisica classica, vige la concezione di uno **spazio vuoto assoluto** euclideo e di un **tempo** che scorre in modo anch'esso **assoluto**: questi sono, per così dire, i due contenitori di tutta la fisica. Queste idee si traducono nell'assunzione che i valori dei tempi e delle lunghezze siano gli stessi in tutti i sistemi di riferimento.

*Le misure di tempo e di lunghezza sono indipendenti dal sistema di riferimento.*

## Parola di Newton

*"Non definisco tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti. [...] Lo spazio assoluto, per sua natura privo di relazione con qualcosa di esterno rimane sempre simile a sé stesso e immobile [...]. Il tempo assoluto, vero e matematico in sé e per sua natura fluisce uniformemente".*

Un altro pilastro della fisica classica è il **principio di relatività** di Galileo: *se le leggi fisiche valgono in un sistema di riferimento, allora valgono in tutti i sistemi di riferimento in moto rettilineo con velocità costante rispetto ad esso.*

## Parola di Galileo



*"Rinviateli con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun grande navilio e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti;*

*sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso; e stando ferma la nave osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto.*

*"Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché non dubbio ci sia che mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così, fate muovere la nave con quanta si voglia velocità, chi (pur che il moto sia*

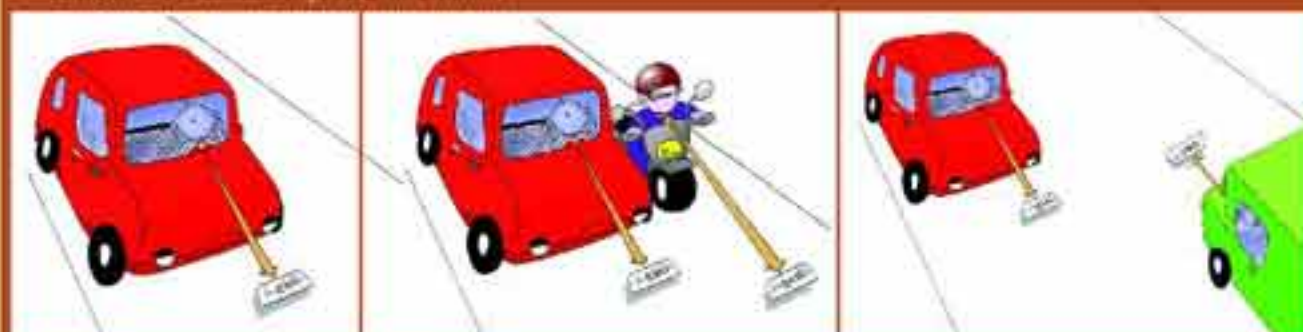


*uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina oppure sta ferma [...]. E di tutta questa corrispondenza di effetti ne è la capione l'essere il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che perciò io dissi che si stesse sotto coverta".* (Galileo Galilei, *Dialogo sui massimi sistemi*)

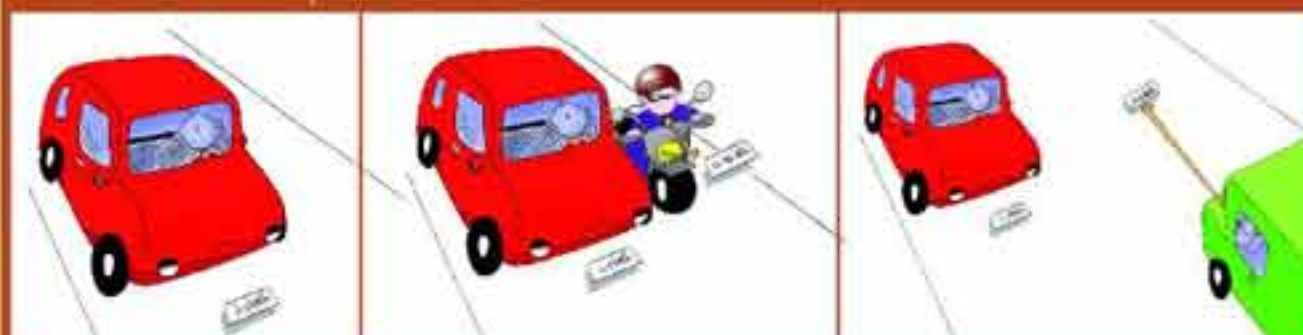
Nell'ultima frase di Galileo è implicita una importante legge della fisica classica nota come **legge di composizione delle velocità**: *se un sistema di riferimento  $S'$  (l'automobile nel disegno) si muove con una certa velocità  $v$  rispetto ad un altro sistema di riferimento  $S$  (la strada), la velocità  $u$  di un oggetto (la motocicletta o il camion) misurata in  $S$  è uguale a quella  $u'$  misurata in  $S'$  più o meno la velocità di  $S'$  rispetto a  $S$ .*

In sintesi:  $u = u' \pm v$

Velocità dei veicoli rispetto alla strada



Velocità dei veicoli rispetto all'automobile





# UN OGGETTO MISTERIOSO: L'ETERE

Era stato denominato **etere** l'ipotetico mezzo attraverso il quale si propagano le onde elettromagnetiche (e quindi la luce); i fisici di fine Ottocento avevano un gran da fare per descrivere le sue proprietà, che dovevano essere molto particolari.

Così ne parla Einstein:

*"Se la luce doveva essere interpretata come un movimento ondulatorio in un corpo elastico (etere), quest'ultimo doveva essere un mezzo che permeava ogni cosa, fondamentalmente simile a un corpo solido per la trasversalità delle onde luminose e tuttavia incompressibile, cosicché non potessero esistere onde longitudinali. Questo etere doveva condurre un'esistenza da fantasma accanto al resto della materia, poiché sembrava non offrire alcuna resistenza al moto dei corpi «ponderabili»".*



Il concetto di etere risaliva al Settecento. Questa illustrazione dell'etere fu proposta da Eulero nel XVIII secolo.

Se l'etere permea tutto l'universo, costituisce un riferimento assoluto; ad esso va quindi riferita la velocità della luce indicata con  $c$  (circa 300.000 km/s). Allora, misurando la velocità della luce in un laboratorio terrestre, si deve poter distinguere se la Terra si muove o no rispetto al riferimento assoluto.

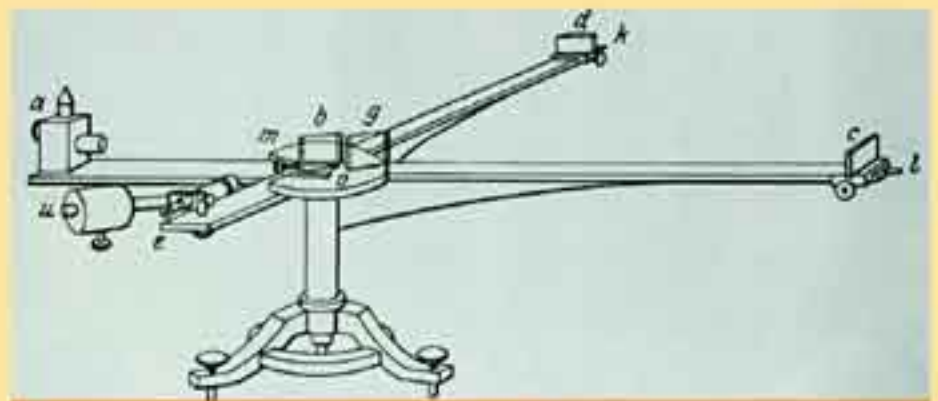
In un sistema in moto con velocità  $v$  nell'etere, la velocità della luce sarà  $c'$  con

$$c' = c \pm v$$


Misure della velocità della luce in un laboratorio terrestre in moto attraverso l'etere, a sei mesi di distanza l'una dall'altra. In quella schematizzata a sinistra si troverà  $c' = c - v$ , a destra  $c' = c + v$ .

Per verificarlo, e quindi per evidenziare un moto relativo all'etere, il fisico **Albert Michelson** e il chimico **Edward Morley** avevano ideato un accurato esperimento: utilizzando un interferometro, pensavano di misurare una variazione della velocità della luce su due percorsi diversamente orientati rispetto alla direzione del moto nell'etere.

L'esito dell'esperimento (1887) però è negativo: **nessuna differenza** viene registrata!



L'interferometro di Michelson: se la Terra è in movimento rispetto all'etere, la percorrenza dei due bracci richiede tempi diversi, e quindi le onde luminose arrivano all'osservatore con una differenza di fase che provoca un'interferenza misurabile.





# DUE IPOTESI DECISIVE

Così Einstein descrive la situazione che si era venuta a creare nella fisica a seguito dell'esito nullo dell'esperimento di Michelson e Morley.

*"Tutti i tentativi di fare dell'etere una realtà sono falliti. Esso non ha rivelato né la propria struttura meccanica, né il moto assoluto. Nulla è rimasto di tutte le proprietà dell'etere, eccetto quella per la quale esso venne inventato, ovvero la facoltà di trasmettere le onde elettromagnetiche. E poiché i nostri tentativi per scoprirne le proprietà non hanno fatto che creare difficoltà e contraddizioni, sembra giunto il momento di dimenticare l'etere e di non pronunciare più il nome. Diremo dunque che il nostro spazio possiede la facoltà fisica di trasmettere talune onde, e cesseremo di usare una parola ormai inutile".*

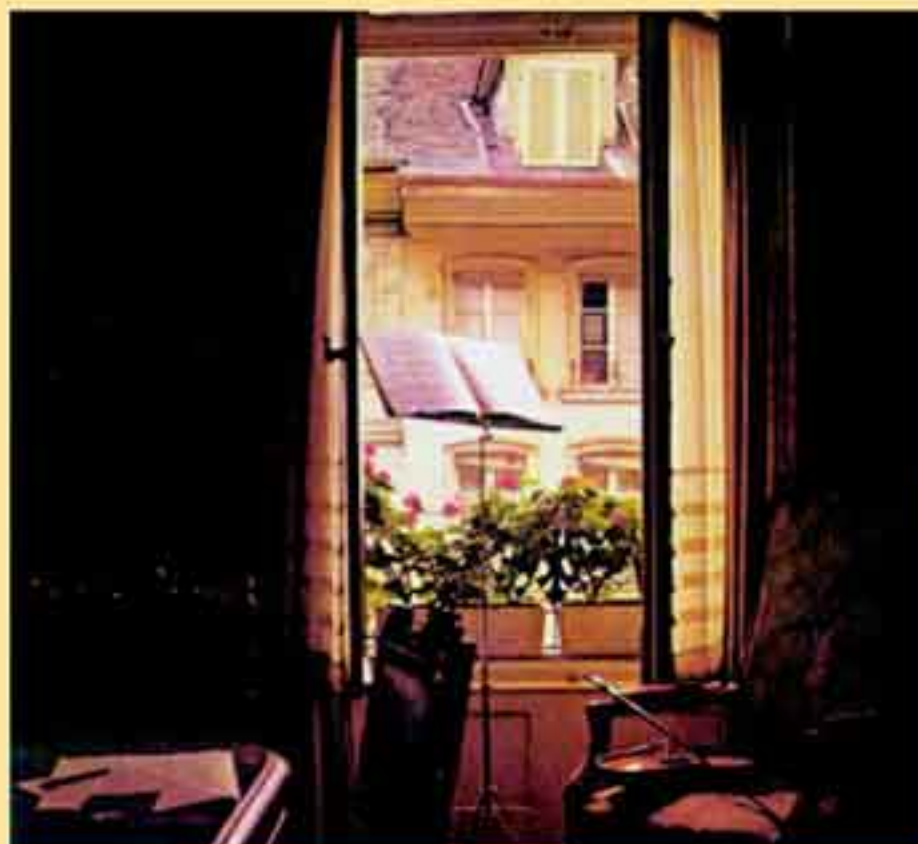
## Un dilemma da risolvere...

Gli stessi risultati hanno posto un conflitto insanabile tra queste tre affermazioni:

1. la velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore  $c$  in tutti i sistemi di riferimento (legge di propagazione della luce);
2. se le leggi della fisica valgono in un sistema di riferimento, allora valgono in tutti i sistemi di riferimento in moto rettilineo con velocità costante rispetto ad esso (*principio di relatività*);
3. velocità nel sistema  $S$  = velocità nel sistema  $S'$   $\pm$  velocità del sistema  $S'$  rispetto a  $S$  (*legge di composizione delle velocità*).

## ...in compagnia.

*"Inaspettatamente venne in mio aiuto un amico di Berna. Fu un giorno splendido quello in cui andai a trovarlo e cominciai a parlargli della cosa in questi termini: 'Ho avuto un problema, ultimamente, del quale non riesco a venire a capo. Così oggi sono venuto qui per discuterne a oltranza'. Dopo avere lungamente dibattuto la questione con lui all'improvviso la questione mi fu chiara. Il giorno dopo tornai a trovarlo e gli dissi, senza neanche averlo salutato: 'Grazie. Ho completamente risolto il problema'".*



La stanza di Einstein a Berna nel 1905

Nella conclusione dell'articolo *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento* Einstein scrive: "Mi sia concesso menzionare l'amico e collega Michele Besso per avermi assistito fedelmente mentre lavoravo ai problemi discussi qui, e ringraziarlo per i numerosi e preziosi suggerimenti".

Einstein quindi risolve la questione formulando due ipotesi e ponendole come postulati della nuova teoria:

*il principio di relatività vale per tutti i fenomeni fisici*

*la velocità della luce nel vuoto è la stessa in tutti i sistemi di riferimento*

*"Da un'analisi dei concetti di fisica di tempo e spazio, risultò evidente che nella realtà non esiste la minima incompatibilità fra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, e che attenendosi strettamente e sistematicamente a entrambe queste leggi si poteva pervenire a una teoria logicamente ineccepibile".*

11. Die Theorie eines Systems von Massen.  
Beziehungen zwischen  
den Massen.

Die Theorie eines Systems von Massen ist ein  
spezielles Beispiel der allgemeinen Theorie der  
Relativität. Sie ist ein Beispiel der Theorie der  
Relativität, die die Beziehungen zwischen den  
Massen beschreibt.

Die Theorie eines Systems von Massen ist ein  
spezielles Beispiel der allgemeinen Theorie der  
Relativität. Sie ist ein Beispiel der Theorie der  
Relativität, die die Beziehungen zwischen den  
Massen beschreibt.

Die Theorie eines Systems von Massen ist ein  
spezielles Beispiel der allgemeinen Theorie der  
Relativität. Sie ist ein Beispiel der Theorie der  
Relativität, die die Beziehungen zwischen den  
Massen beschreibt.

Die Theorie eines Systems von Massen ist ein  
spezielles Beispiel der allgemeinen Theorie der  
Relativität. Sie ist ein Beispiel der Theorie der  
Relativität, die die Beziehungen zwischen den  
Massen beschreibt.

Die Theorie eines Systems von Massen ist ein  
spezielles Beispiel der allgemeinen Theorie der  
Relativität. Sie ist ein Beispiel der Theorie der  
Relativität, die die Beziehungen zwischen den  
Massen beschreibt.

Frontespizio della memoria

"Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento"

"Teoria della relatività è una denominazione data da altri. L'epistolario di Einstein prova che egli avrebbe preferito l'espressione direttamente opposta, ma molto più precisa, Teoria dell'invarianza, poiché egli si interessava prima di tutto alle costanze al di là del cambiamento" (G. Holton)



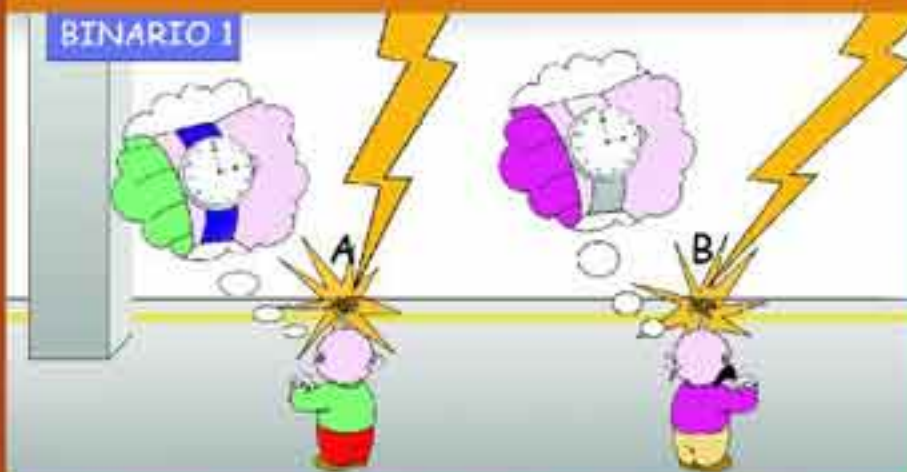
# LA SIMULTANEITÀ È RELATIVA

*"Non dobbiamo dimenticare che tutti i nostri giudizi in cui interviene il tempo sono sempre giudizi su eventi simultanei. Se, per esempio, dico che 'il treno arriva qui alle 7 in punto', ciò significa che, in pratica, il posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio sul 7 e l'arrivo del treno sono due eventi simultanei. (...) ma la definizione non è più sufficiente quando si devono correlare nel tempo eventi che avvengono in luoghi differenti.*

Per Einstein:

- il tempo di un evento deve essere misurato da un orologio posto esattamente dove l'evento accade;
- ogni sistema di riferimento in tutti i suoi punti deve possedere orologi sincronizzati.

Due eventi che accadono in due punti distanti A e B, sono simultanei se avvengono allo stesso istante secondo orologi sincronizzati posti in A e B.

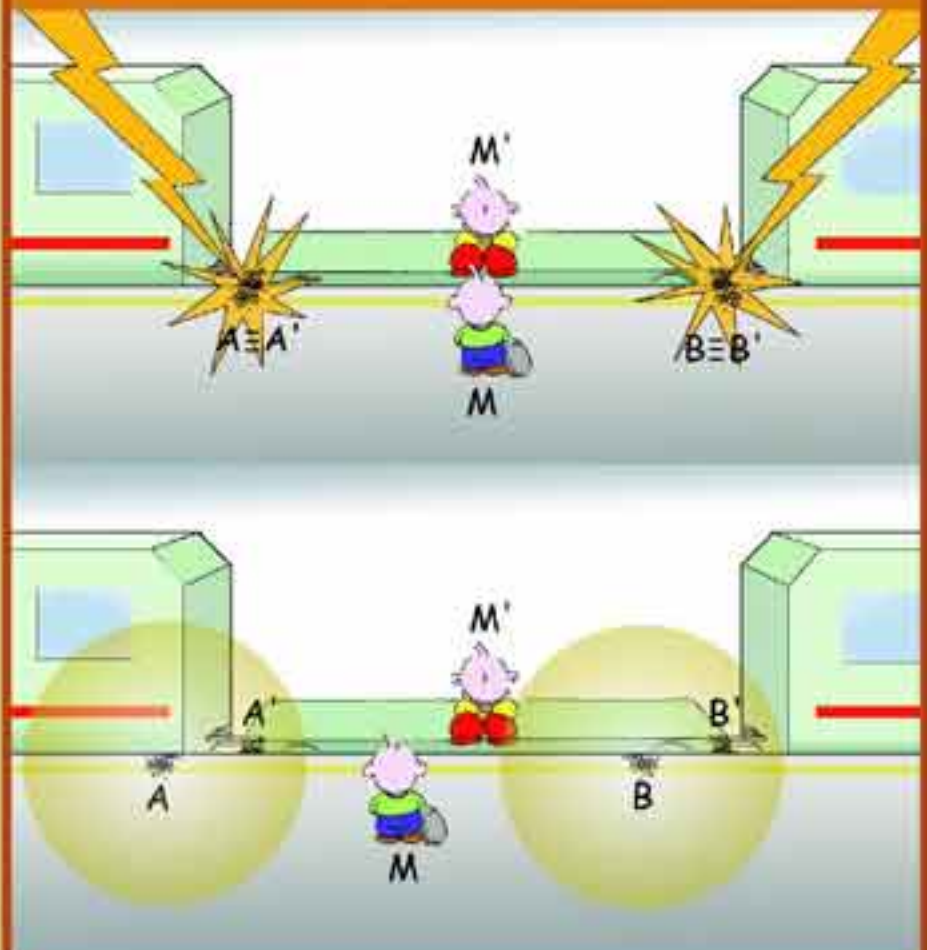


Due osservatori dotati di orologi sincronizzati situati sulla banchina di una stazione ferroviaria giudicano simultanee le cadute di due fulmini

Ma come sincronizzare gli orologi? Il metodo corretto, suggerito dal secondo postulato della teoria, è quello di utilizzare dei segnali luminosi. Gli osservatori in A e B inviano ad un terzo osservatore situato a metà strada tra essi (punto M) dei segnali luminosi quando i loro orologi indicano una stessa ora precedentemente convenuta. Se l'osservatore in M riceve i segnali nello stesso istante, gli orologi in A e B sono sincronizzati.

L'osservatore in M sincronizza due orologi distanti

Due eventi che sono simultanei rispetto ad un sistema di riferimento, lo sono anche rispetto ad un sistema in moto rispetto al primo?



Immaginiamo che due fulmini cadano colpendo la banchina nei punti A e B e il treno nei punti A' e B' lasciando su entrambi dei segni permanenti. Nel riferimento della banchina un osservatore che si trova nel punto M, equidistante da A e B, riceve contemporaneamente i bagliori dei fulmini e giudica simultanei i due eventi. Nel riferimento del treno un osservatore che si trova nel punto M', equidistante da A' e B', come giudica i due eventi?

Ecco la risposta di Einstein:

*"Tuttavia nella realtà (considerata con riferimento alla banchina ferroviaria), egli si muove rapidamente verso il raggio di luce proveniente da B mentre corre avanti al raggio proveniente da A. Pertanto l'osservatore vedrà il raggio di luce emesso da B prima di vedere quello emesso da A. Perveniamo così al seguente importante risultato: gli eventi che sono simultanei rispetto alla banchina, non sono simultanei rispetto al treno e viceversa (relatività della simultaneità); ogni corpo di riferimento (sistema di coordinate) ha il suo proprio tempo particolare: un'attribuzione di tempo è fornita di significato solo quando ci venga detto a quale corpo di riferimento tale attribuzione si riferisce".*

Quindi la simultaneità è relativa!

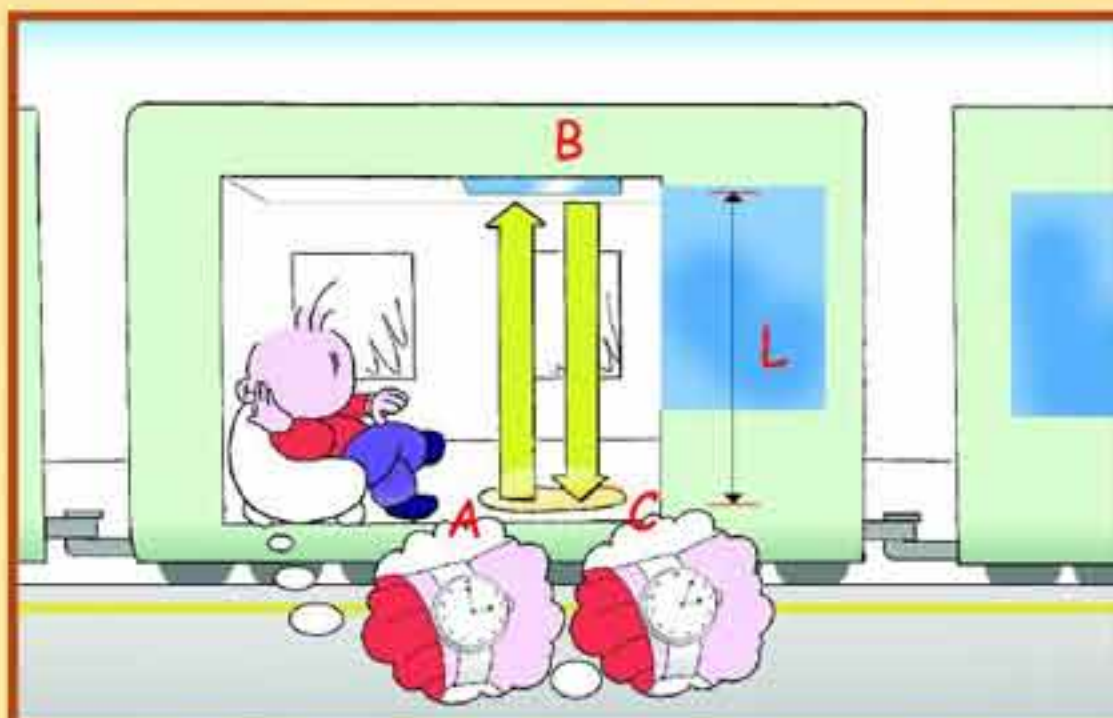


# I TEMPI SI DILATANO

Consideriamo un dispositivo costituito da una sorgente A che invia un impulso di luce, con velocità  $c$ , verso uno specchio B, distante  $L$ , che lo riflette indietro in A. Lo chiamiamo **orologio a luce**.

Immaginiamo che tale dispositivo si trovi nello scompartimento di un treno in transito per una stazione.

Come misurare il tempo impiegato dall'impulso luminoso a percorrere il tragitto da A a B e ritorno?

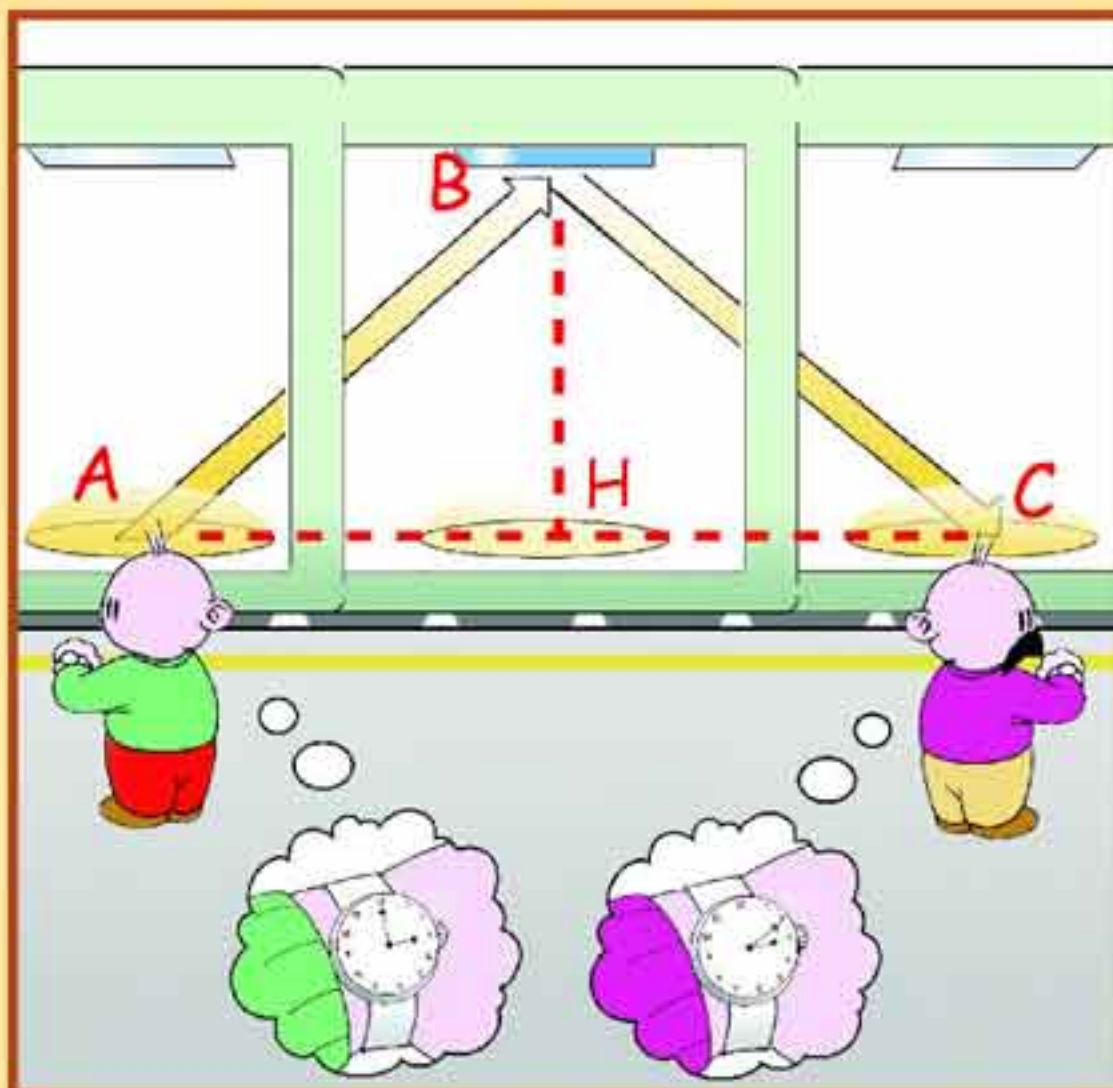


*Sul treno...*

...un osservatore determina il tempo  $t'$  mediante due letture del suo orologio: una quando l'impulso parte da A, l'altra quando ritorna in C.

Il tempo  
impiegato  
è dato da:

$$t' = \frac{2L}{c}$$



*Dalla banchina...*

...gli osservatori vedono che l'impulso luminoso ha una traiettoria diversa; infatti, mentre si propaga, il treno e lo specchio si muovono rispetto alla banchina con una velocità costante  $v$ , sicché per raggiungere lo specchio l'impulso deve propagarsi in modo obliquo (tratti AB e BC).

Essi misurano il tempo mediante le letture di due orologi: uno in A, il secondo in C.

La distanza percorsa dalla luce è ora maggiore di quella percorsa nel sistema di riferimento del treno; poiché la velocità della luce è sempre la stessa, il tempo  $t$  misurato dalla banchina è **maggiore** di  $t'$  misurato a bordo del treno!

Un semplice  
calcolo  
mostra che:

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

Al crescere della velocità del treno,  $t$  aumenta fino ad un valore teorico infinito quando  $v = c$ .

Quindi il **tempo** subisce una **dilatazione**.



# LE LUNGHEZZE SI CONTRAGGONO

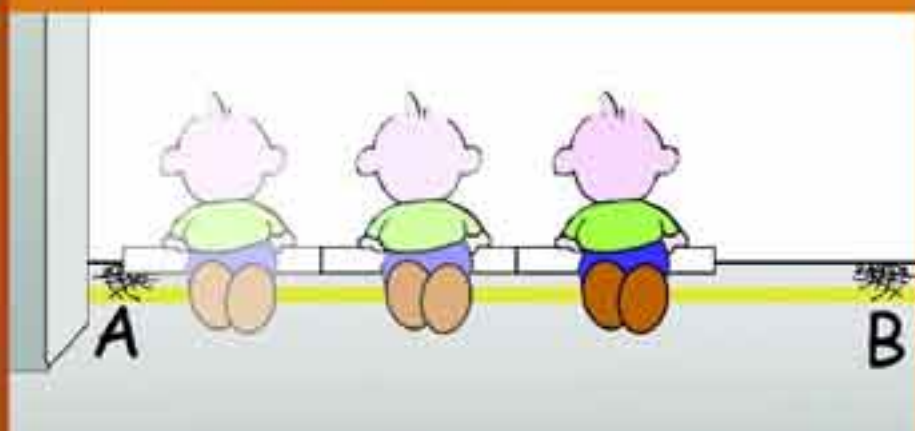
Come si misura una lunghezza? Per esempio la lunghezza del vagone del treno che transita per la stazione?

*Se ci troviamo sul treno...*



...la risposta è semplice: l'osservatore misura la distanza  $L'$  tra le estremità  $A'$  e  $B'$  del vagone riportando consecutivamente un regolo utilizzato come unità di misura.

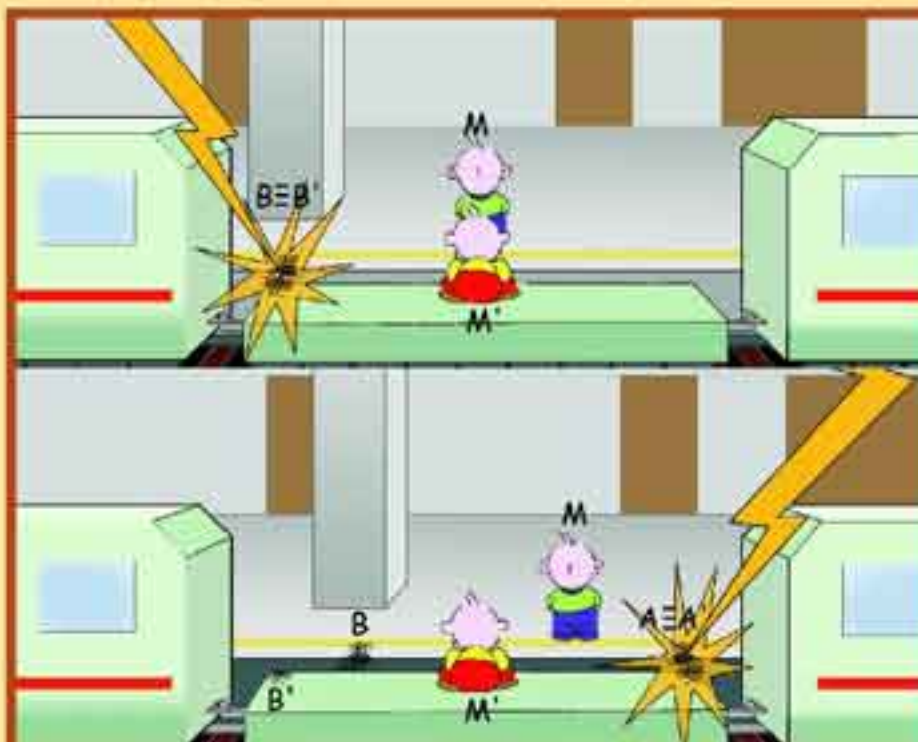
*Se ci troviamo sulla banchina...*



...la risposta ovviamente non è "inseguendo il vagone". L'osservatore deve valutare la posizione delle estremità del vagone *al medesimo istante*. A tale scopo può utilizzare le tracce lasciate dai fulmini caduti in A e B (che egli ha giudicato essere eventi simultanei) e misurare la distanza  $L$  tra essi.

Dato che i procedimenti di misura - a bordo e sulla banchina - non sono gli stessi, non è ragionevole assumere a priori che i loro risultati siano identici!

In effetti i due osservatori non sono affatto d'accordo: il disaccordo sulla simultaneità di due eventi comporta anche un disaccordo sulle misure di lunghezza.



L'osservatore sul treno vede i fulmini colpire prima la parte anteriore del treno, poi quella posteriore e grida all'osservatore sulla banchina:

*"Attento! Il tuo segno di bruciatura anteriore è stato fatto prima di quello posteriore: infatti il lampo proveniente dal primo di essi è giunto a me (che sono al centro del treno) prima dell'altro. Naturalmente nell'intervallo di tempo intercorso tra l'arrivo [della luce] di questi due fulmini, il treno si è mosso. Prima che il secondo fulmine colpisse la coda del treno, la sua testa si è spostata ben oltre il corrispondente segno di bruciatura sul binari. Perciò la tua misura della lunghezza del treno è troppo piccola. In realtà esso è più lungo di quanto tu lo abbia misurato."*

(E. F. Taylor, J. H. Wheeler, *Fisica dello spazio-tempo*, Zanichelli)

La lunghezza  $L$  misurata dall'osservatore sulla banchina risulta **minore** della lunghezza  $L'$  del vagone misurata dall'osservatore a bordo di esso.

$$L = L' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Al crescere della velocità del treno,  $L$  diminuisce fino ad annullarsi quando  $v=c$ .

Quindi le **lunghezze** subiscono una **contrazione**.



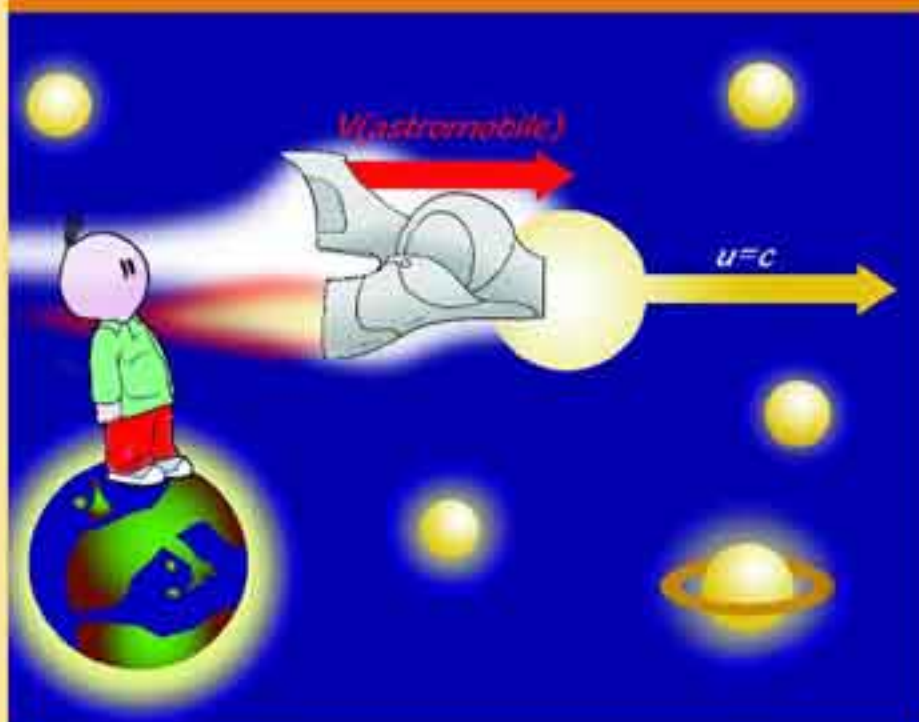
# NON AGGIUNGERAI MAI NULLA ALLA VELOCITÀ DELLA LUCE

La legge galileiana di composizione delle velocità, che sembra così evidente secondo il senso comune, nel contesto della nuova teoria non può più essere valida: in particolare, essa è in contrasto con il postulato per cui la velocità della luce ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento.

Un osservatore, a bordo di una "astromobile", lancia un segnale luminoso nel verso del moto.



Nel sistema di riferimento dell'"astromobile" l'impulso luminoso ha velocità  $c$ .



Nel sistema di riferimento terrestre, rispetto a cui l'"astromobile" ha velocità  $v$ , l'impulso luminoso deve avere ancora velocità  $c$  e non  $c+v$  come prescritto dalla legge classica.

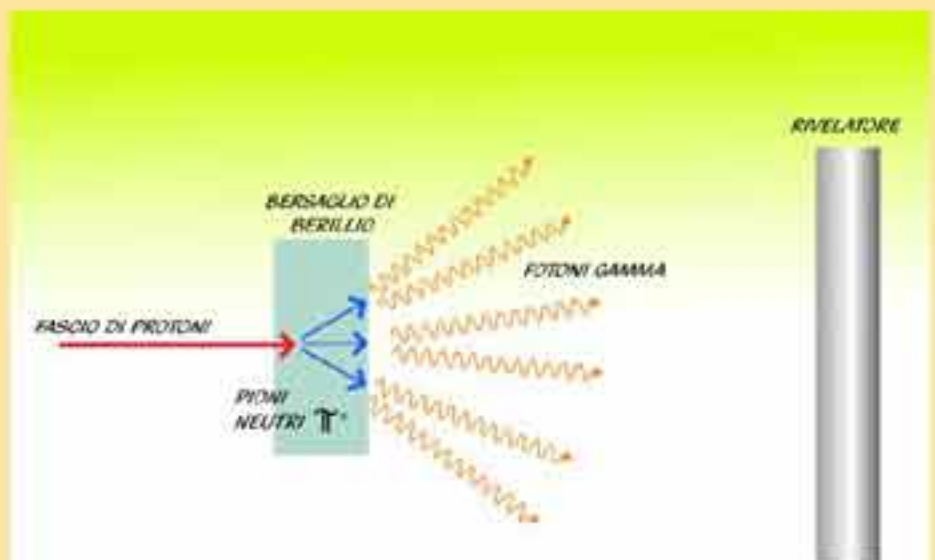
Occorre dunque una nuova formula, che è un po' più complicata...

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

... ma che è facile utilizzare:

- se  $v$  è molto inferiore a  $c$  si è ricondotti alla formula galileiana;
- se la applichiamo all'esempio della figura, sostituendo a  $u'$  il valore  $c$ , sorprendentemente otteniamo  $u=c$  e non  $c+v$  come vorrebbe la legge classica di composizione delle velocità.

La velocità della luce è quindi **insuperabile!**



Schema dell'esperimento condotto nel 1964 presso il Cern a Ginevra, che realizza la situazione di figura 1. Un fascio di protoni ad alta energia colpisce un bersaglio di berillio, producendo particelle instabili, i pioni. Questi ultimi si muovono alla velocità di  $0,99975c$  e decadono rapidamente emettendo due fotoni gamma nel verso del moto. Come vuole la relatività la velocità dei fotoni è pari a  $c$  (e non circa  $2c$  come prevede la fisica classica).



# È VERAMENTE (!?) COSÌ?

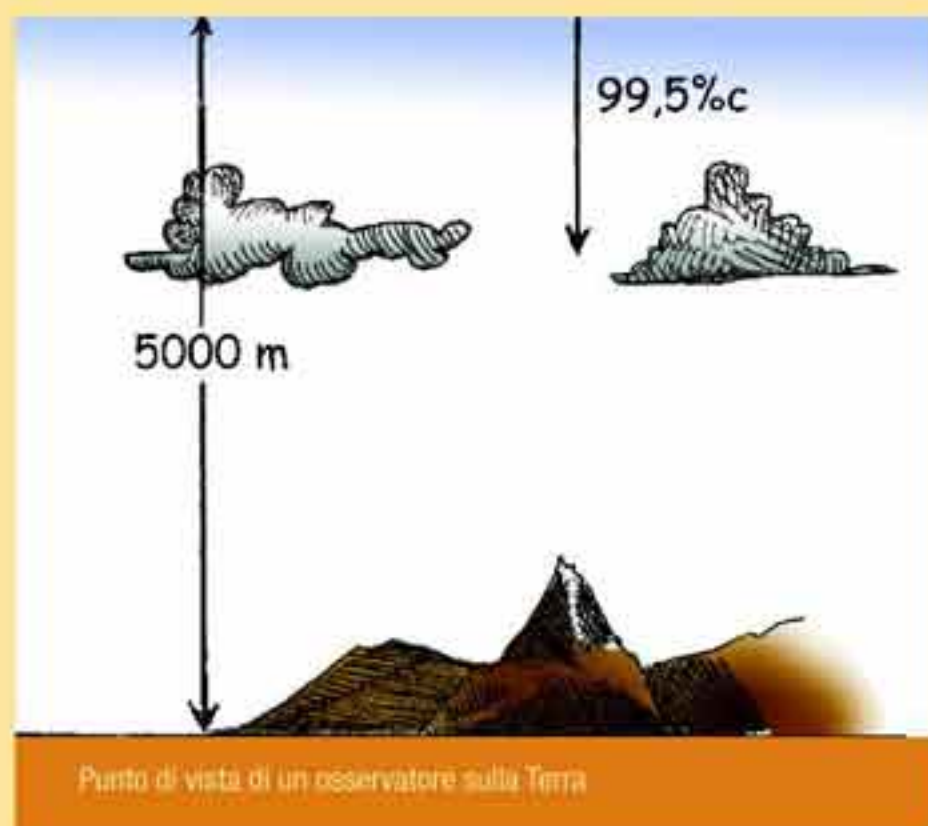
Nel 1941 **Bruno Rossi** e **David B. Hall** verificarono l'effetto relativistico della dilatazione dei tempi analizzando alcune particelle prodotte dalla radiazione cosmica.

Questa radiazione, che investe la Terra da ogni direzione, interagendo con l'atmosfera provoca la formazione di particelle instabili dette **muoni**, i quali si disintegrano in media due milionesimi di secondo dopo essere stati prodotti. Pertanto, un muone prodotto a 5.000 m sul livello del mare, muovendosi a velocità pari al 99,5% della velocità della luce, percorre circa 600 m. Dovremmo quindi prevedere che i muoni prodotti nell'atmosfera non riescano a raggiungere il livello del mare. In realtà non è così: un gran numero di muoni viene rivelato dai laboratori terrestri. Il **paradosso** si spiega facilmente con la relatività.

*La vita del muone nel sistema di riferimento della Terra.*

La vita media del muone è individuata dai due eventi della sua creazione e della sua disintegrazione. Per un osservatore sulla superficie terrestre tali eventi avvengono in un sistema di riferimento in moto relativo rispetto alla Terra: la vita media risulterà pertanto **maggiore** di quella misurata quando la particella è in quiete rispetto all'osservatore (è il caso dei muoni prodotti in laboratorio).

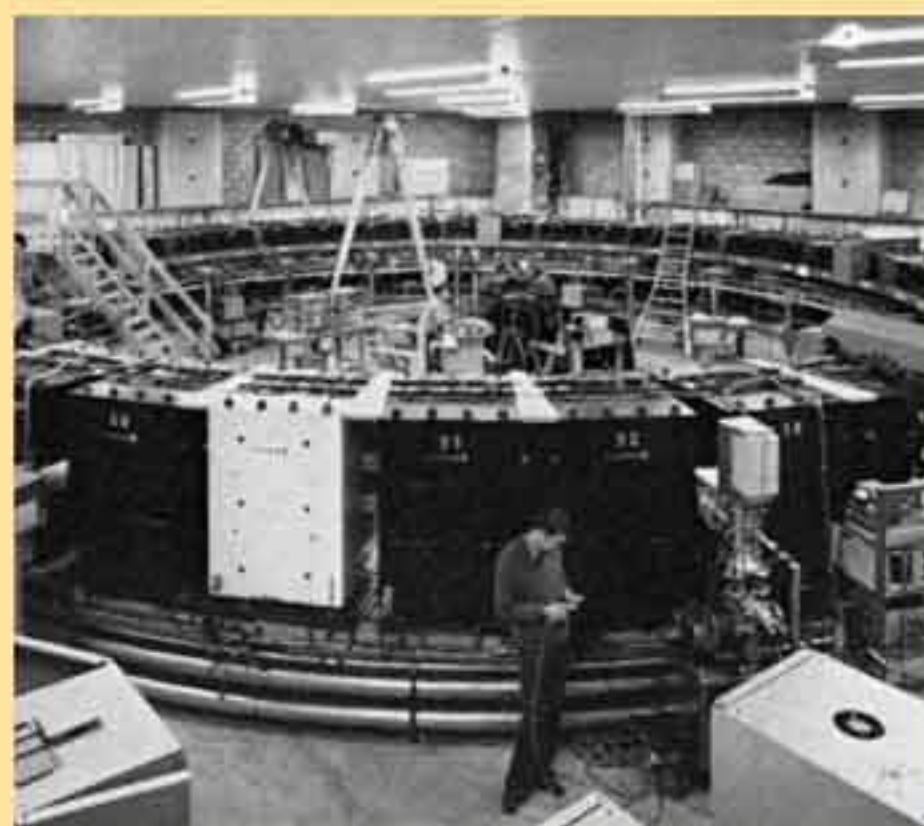
Applicando le formule della relatività si trova una durata di circa 20 milionesimi di secondo: quindi 10 volte più grande, tale da consentire alla particella di percorrere circa 6000 m e di raggiungere il suolo.



*La vita del muone nel sistema di riferimento del... muone!*

Nel sistema di riferimento del muone la vita media risulta uguale ancora a 2 milionesimi di secondo; ma il muone "vede" la Terra muoversi verso di lui ad una velocità pari al 99,5% di  $c$  e quindi, se misura la "profondità" dell'atmosfera che deve attraversare, otterrà una lunghezza **contratta** rispetto a quella misurata dall'osservatore nel laboratorio.

Applicando le formule della relatività si trova una "profondità" di soli 500 m: ovviamente anche nel sistema di riferimento del muone la particella arriverà a Terra, o meglio la Terra lo investirà prima del suo decadimento.



Un'altra eloquente conferma della dilatazione relativistica del tempo è stata ottenuta nel 1976, sempre con i muoni, in un esperimento condotto al Cern di Ginevra.

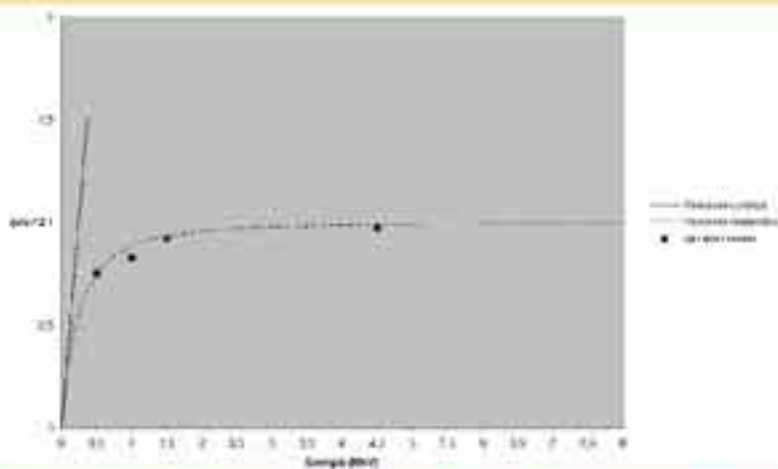


# UN ARGOMENTO "BUFFO E SEDUCENTE"

La relatività ristretta non ha solo risvolti "cinematici", riguardanti cioè la collocazione degli eventi nello spazio e nel tempo, ma anche conseguenze di tipo "dinamico". Una prima conseguenza è che la massa inerziale aumenta con la velocità. La massa misura la "resistenza" che un corpo oppone ad essere accelerato (inerzia), cioè a modificare il suo moto. Per la fisica classica la massa inerziale è costante; nella nuova teoria invece l'inerzia di un corpo cresce con la sua velocità: più un corpo è veloce più è difficile accelerarlo!

$$m = m_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$m_0$  è la cosiddetta "massa a riposo", cioè la resistenza del corpo a modificare il suo stato di quiete, che coincide con la massa inerziale classica.



Velocità di elettroni in un acceleratore lineare in funzione dell'energia cinetica loro fornita. La curva intera rappresenta la previsione classica per cui le particelle dovrebbero superare la velocità della luce. Tale curva è in accordo con i risultati sperimentali solo alle basse energie; a energie superiori la velocità delle particelle si avvicina a  $c$  senza superarla come prevede la relatività (curva tratteggiata).

La seconda è la celebre relazione tra massa ed energia:

$$E = mc^2$$

sviluppata da Einstein nel 1907 ma intravista già nel 1905, come emerge da un'altra lettera all'amico **Habicht**:

*"Mi è venuta in mente un'ulteriore conseguenza del lavoro sull'elettrodinamica [la teoria della relatività ristretta].*

*Il principio di relatività, unito alle equazioni di Maxwell, prescrive che la massa sia una misura diretta dell'energia contenuta in un corpo; la luce porta cioè con sé una massa.*

*Nel caso del radio, dovrebbe aversi una sensibile diminuzione di massa. L'argomento è buffo e seducente; ma per quanto ne so, il Signore potrebbe riderci sopra e menarmi per il naso".* Quindi l'energia porta con sé una massa e "la massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia".



Lise Meitner e Otto Hahn nel laboratorio dell'università di Berlino nel 1910

Lo stesso Einstein intuisce subito la possibilità di una conferma a livello atomico:

*"Non è escluso che tale teoria venga confermata nel caso di corpi il cui contenuto energetico è altamente variabile (per esempio, i sali di radio) [elemento radioattivo]"*.

La prima conferma sperimentale dell'intuizione di Einstein, e quindi della possibilità di **trasformare massa in energia**, arriverà nel 1932. I fisici britannici **John Cockcroft** ed **Ernest Walton**, indirizzando un fascio di protoni su un bersaglio di litio, producono una reazione nucleare in cui una porzione della massa dei reagenti viene trasformata in energia cinetica dei prodotti.



Enrico Fermi, premio Nobel per la Fisica nel 1938

Nel 1938, gli austriaci **Lise Meitner** e **Otto Frisch** interpretano i risultati sperimentali ottenuti da **Otto Hahn** e **Fritz Strassmann**, formulando l'ipotesi che l'uranio, bombardato da neutroni, si scinda in due frammenti più alcuni neutroni: in questo processo, detto di **fissione**, una piccola parte della massa del nucleo di uranio viene trasformata in energia.

Nel 1942 a Chicago, **Enrico Fermi** realizza il primo **reattore nucleare** a fissione.

Il 6 agosto 1945 viene sganciata sopra **Hiroshima** la prima **bomba atomica**.



# DALL'ATOMO ALLO ZOO DELLE PARTICELLE

Quarks	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
lepton	ν <sub>e</sub> electron neutrino	ν <sub>μ</sub> muon neutrino	ν <sub>τ</sub> tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
I II III famiglie di materia				Bosone di Higgs

Uno schema compatto delle particelle elementari comprende i quark, costituenti delle particelle pesanti, i leptoni o particelle leggere e i mediatori delle forze elettromagnetiche e nucleari

Se l'inizio del XX secolo ha visto confermare l'esistenza degli atomi come costituenti base della materia, per tutto il secolo c'è stata una *escalation* di scoperte e teorie che hanno consentito ai fisici di indagare le profondità più intime della

materia. Via via che si affinavano le tecniche di indagine e che si precisavano i modelli teorici, allo sguardo sorpreso degli scienziati si rivelava un **panorama sempre più affollato** di "personaggi" singolari, sfuggitivi e intriganti.

Nei primi decenni del secolo i contributi fondamentali di **Rutherford, Millikan, Bohr** e **Chadwick** e altri hanno portato alla descrizione della struttura semplificata dell'atomo che ormai, almeno per il nome dei suoi costituenti, è di dominio comune: ci sono gli **elettroni** che "ruotano" attorno ad un **nucleo** composti di **protoni** e **neutroni**.

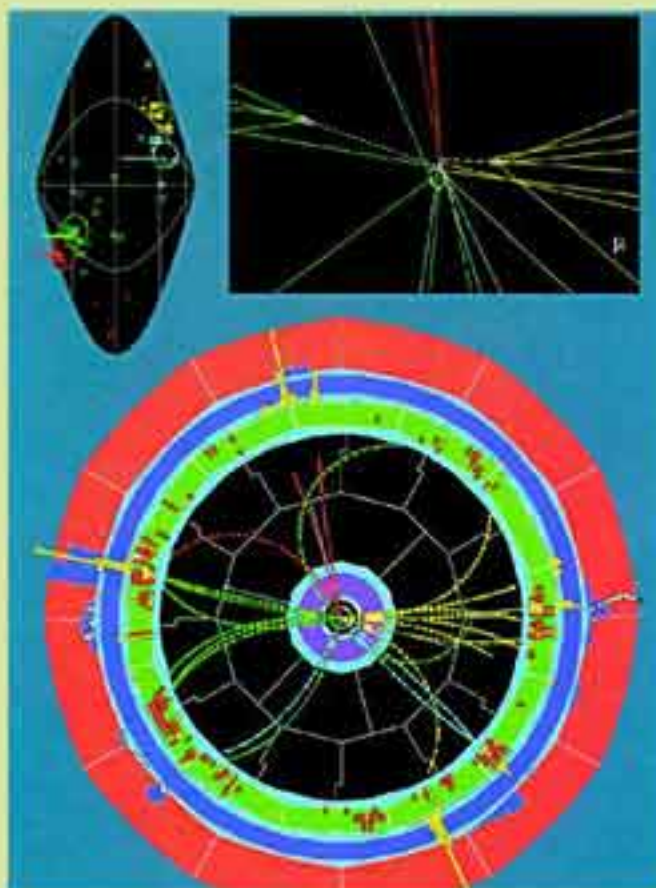
Poi però le cose si sono

complicate e il nucleo si è rivelato più ricco del previsto. Sono apparsi costituenti sempre più elementari fino alla più recente famiglia dei **quark**. Accanto alle particelle materiali si sono scoperte quelle di **antimateria** (presenti in natura solo nei primissimi istanti dell'universo e oggi producibili solo in laboratorio); e si sono sempre più affermati i modelli che implicano l'esistenza di particelle speciali che fungono da "**mediatori**" delle forze fondamentali della natura: prima fra tutte lo stesso fotone einsteiniano. Nella seconda metà del secolo, l'esuberanza delle scoperte ha indotto

qualcuno a parlare di zoo delle particelle; anche se gli sforzi dei fisici si sono sempre indirizzati nel tentativo di formulare un quadro il più possibile ordinato, compatto e unitario.

Anche coloro che non condividevano la visione fortemente realistica di Einstein, hanno implicitamente seguito il suo criterio metodologico della semplicità:

*"A mio avviso la strada giusta esiste ed (...) è possibile trovarla. Sulla base dell'esperienza fin qui raccolta, abbiamo il diritto di credere che la natura sia la realizzazione di ciò che di più matematicamente semplice è immaginabile".*



Le nuove particelle vengono studiate esaminando le tracce prodotte durante le collisioni negli acceleratori e rivelate da strumenti sofisticati



Il teatro della ricerca in fisica delle particelle sono i tunnel delle città-laboratorio come il Cern di Ginevra, il Fermilab di Chicago o lo SLAC in California



# DUALISMO E UNITARIETÀ DELLA NATURA

Con i loro lavori pionieristici sullo spettro di corpo nero e sull'effetto fotoelettrico, Planck ed Einstein avevano spalancato la porta su un mondo tutto da esplorare: quello dei fenomeni atomici, che rispondono alle leggi della fisica quantistica. Dopo il 1905, molti fisici del calibro di **Louis de Broglie, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg e Paul Dirac** si confrontano con questi nuovi interrogativi riuscendo a sviluppare un formalismo noto come meccanica quantistica. Qui, a differenza della meccanica classica newtoniana, non si può prevedere deterministicamente il comportamento di ogni ente ma si può solo calcolare la probabilità che esso si comporti in un certo modo. Il dualismo onda-corpuscolo, trova così una possibile spiegazione: in effetti la luce si può pensare composta da particelle, ma la probabilità

che i fotoni si trovino in un determinato punto ad un determinato istante è data da una funzione di tipo ondulatorio, chiamata appunto funzione d'onda. È questa caratteristica a generare il comportamento ondulatorio della luce: le frange d'interferenza non sono più da concepire come i massimi del campo elettromagnetico, bensì come la regione dello schermo su cui è più alta la probabilità che i fotoni vadano ad incidere.

È impressionante notare come Einstein, già nel 1905, avesse intuito, anche se in maniera ancora confusa, che il comportamento ondulatorio della luce fosse da attribuirsi al fatto che i nostri sensi percepiscono l'effetto ottico medio causato da un'infinità di singoli eventi d'interazione con i fotoni che costituiscono la luce.

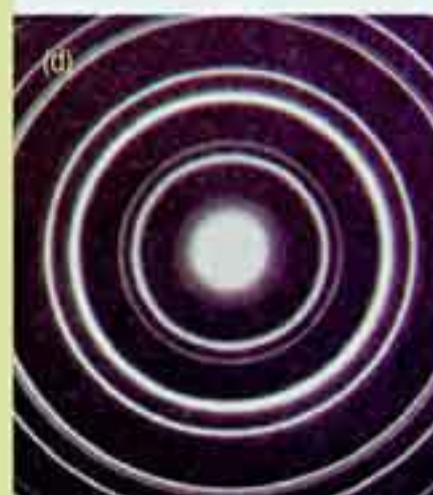
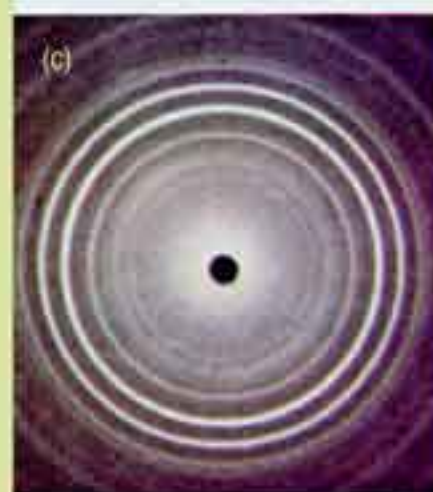
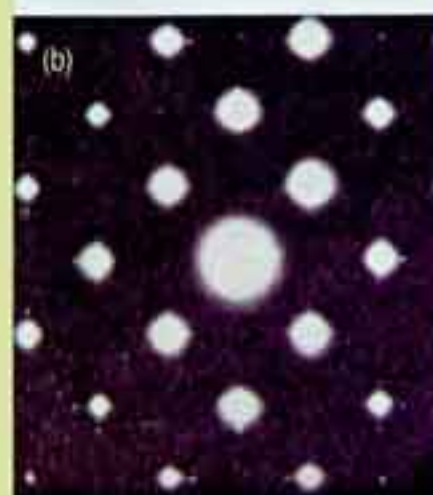
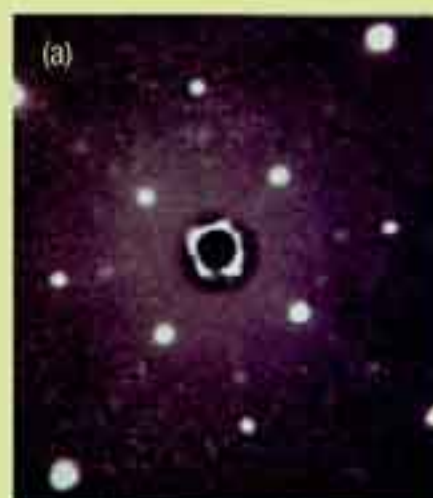
*"La grande varietà di fatti*

*nel dominio dei fenomeni atomici, ci obbliga ad escogitare ancora nuovi concetti fisici (...) La fisica dei quanti formula leggi che governano, non già gli individui, ma le moltitudini. Non sono più le proprietà, ma le probabilità che fanno oggetto della descrizione (...) Sono leggi che governano le variazioni di probabilità, nel tempo; leggi relative a grandi aggregati d'individui".*

Gli sviluppi della meccanica quantistica porteranno ad interpretare anche le particelle materiali in termini di onde di probabilità. Einstein tuttavia non è mai stato soddisfatto di un'interpretazione dualistica della realtà fisica e ha cercato fino all'ultimo, senza successo, di ricondurre tutti i fenomeni entro una teoria unitaria.



Il Congresso Solvay (Bruxelles, 1927): dal 1911 in questi congressi le più brillanti menti dell'inizio del XX secolo si confrontano (e si scontrano) sui nuovi orizzonti della fisica

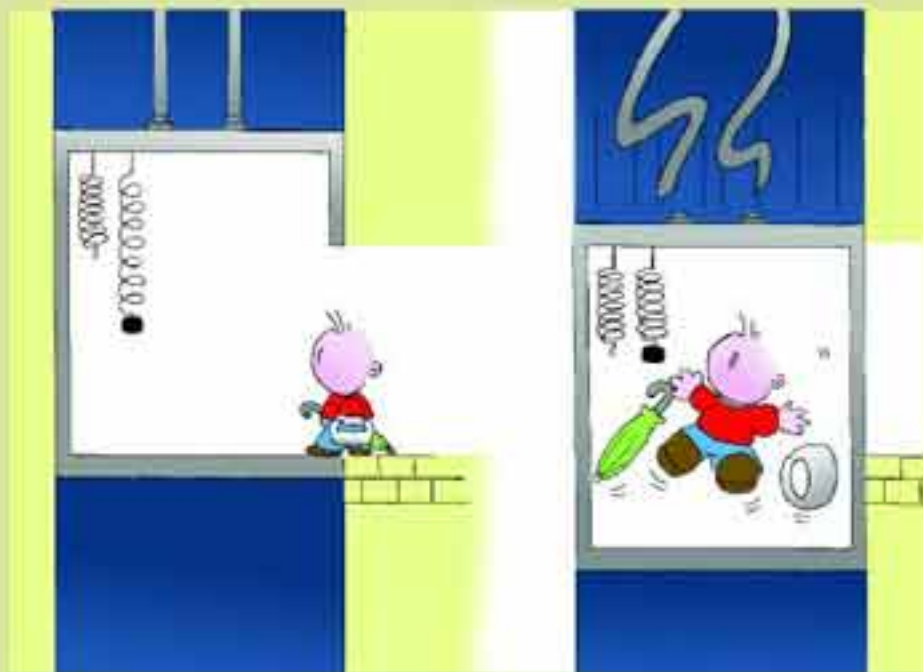


Diffrazione di raggi X (a) e di elettroni (b) da polveri di ossido di zirconio. Diffrazione di raggi X (c) e di elettroni (d) da un monocristallo di oro



# “IL PENSIERO PIÙ FELICE DELLA MIA VITA”

*“Ero seduto nella mia sedia nell'ufficio brevetti a Berna quando all'improvviso mi si presentò un pensiero: «Se una persona cade liberamente non sentirà il suo stesso peso». Ne fui colpito. Questo semplice pensiero fece su di me una profonda impressione. Mi indirizzò verso una teoria della gravitazione”.*



Una persona e tutti gli oggetti che si trovano in un ascensore in caduta libera sono privi di peso, come indicato dalla molla carica che durante la caduta libera assume la stessa lunghezza di quella scarica.

Il moto degli oggetti e dell'ascensore rispetto alla Terra è un moto accelerato. Nel sistema di riferimento dell'ascensore gli oggetti sono in quiete, poiché cadono con la stessa accelerazione della cabina. Non si riscontra quindi l'azione di alcuna forza: perché allora ostinarsi a volerne vedere l'azione in nome di nostre idee radicate? Perché non provare a speculare che ciò che appare come un moto libero sia effettivamente tale?

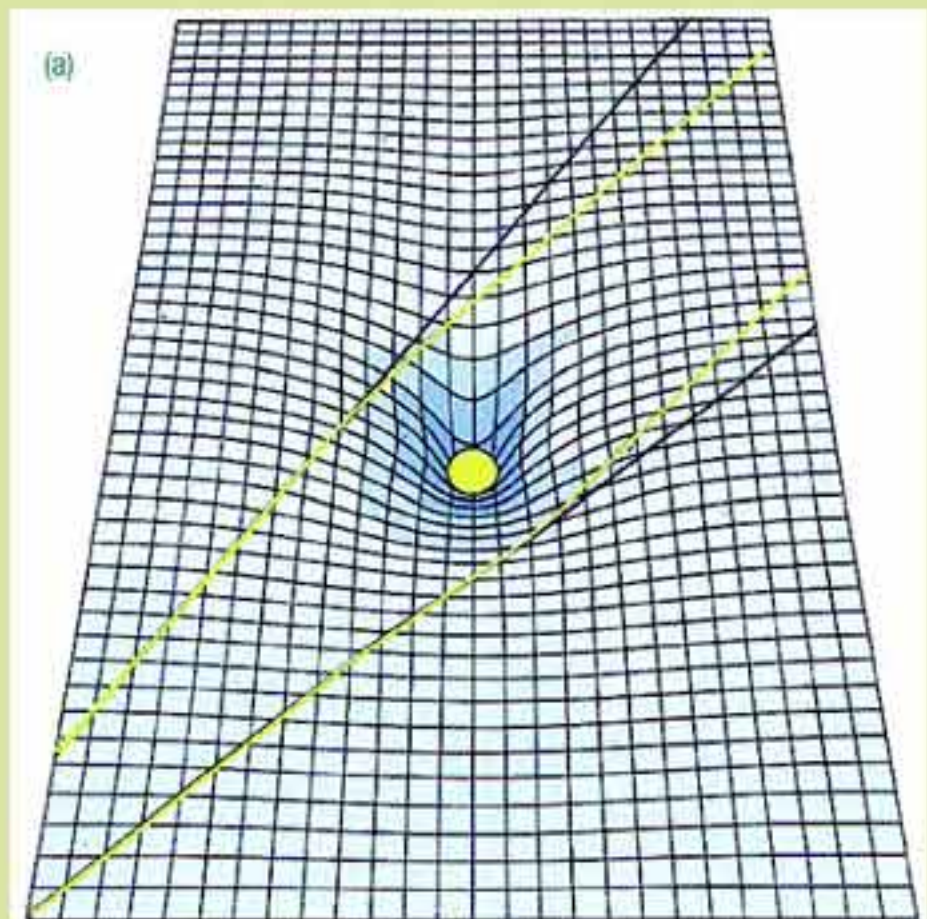
L'idea di Einstein per spiegare la gravità è quella di “eliminarla” e di concepire come moti liberi tutti i moti interpretati con essa. Non è detto che un moto libero sia necessariamente rettilineo: questo è vero nello spazio euclideo.

La visione di Einstein si può riassumere così: un corpo, per esempio il Sole, **modifica la geometria dello spazio** circostante, e quindi il moto dei corpi nelle sue vicinanze segue le “rette” della geometria modificata.

Einstein prevede che i raggi luminosi provenienti dalle stelle siano deviati nel passaggio nelle vicinanze del Sole.

Questo fenomeno sarà effettivamente osservato durante l'eclissi totale di Sole del 1919, e costituirà una **prova** spettacolare della teoria einsteiniana della gravitazione, nota come teoria della **Relatività Generale**.

*“Alla luce della conoscenza già conseguita, ciò che si è felicemente raggiunto appare quasi ovvio, e qualsiasi studente intelligente l'afferra senza grande sforzo. Ma gli anni di ansioso cercare nell'oscurità, con la loro tesa aspettativa, l'alternarsi di fiducia e stanchezza e l'erompere finale verso la verità, questo può capirlo solo chi lo ha vissuto di persona”.*



a) Schema della deflessione della luce nello spazio curvo: l'effetto è chiamato lente gravitazionale

b) Lente gravitazionale a forma di croce, nota come “croce di Einstein”, fotografata dal telescopio Spaziale Hubble



# "CHE COS'È, PRECISAMENTE, PENSARE?"

Essendo convinto che "l'intera scienza non è niente di più che un perfezionamento del pensiero quotidiano", Einstein ha sempre cercato di capire e descrivere lo straordinario lavoro della ragione umana applicata alla comprensione della "stupenda struttura della realtà".

La descrizione più efficace è contenuta in una lettera del 7 maggio 1952 all'amico **Maurice Solovine**.

Mit der Erkenntnis - theoretischen Arbeit haben Sie mich gedanklich  
unvergleichbar; unbeschreiblich habe ich mich intellektuell  
angereichert. Ich sehe die Sache schematisch so



- (1) Die <sup>intellektuelle</sup>  $A$  ist mir gegeben.
- (2) Aus der  $A$  werden, wie daraus viele Folgerungen gezogen. Psychologisch gesehen, ist die  $A$  auf  $E$ . Es gibt aber keinen logischen Weg von der  $E$  zu  $A$ , sondern nur eine intuitive (psychologische) Zusammenhang, der immer auf Widerstoß ist.
- (3) Aus  $A$  werden auf logischem Wege Sätze - Aussagen / Abgeleitet - welche Ableitungen diese Aussagen auf Richtigkeit enthalten können.
- (4) Die  $S$  werden mit der  $E$  in Beziehung gebracht (Beziehung an der Erfahrung). Diese Beziehung ist so genau betrachtet ebenfalls der extra - logischen Sphäre der, weil die Beziehung da in der  $S$  auftritt, die Beziehung zu der  $E$  binden  $E$  nicht logischer Natur sind.

In essa Einstein schematizza il pensiero scientifico in quattro passaggi.

1. Ci sono date le *E* (esperienze).
2. A sono gli assiomi dai quali traiamo conclusioni. Da un punto di vista psicologico, le *A* poggiano sulle *E*. Non c'è comunque una via logica che conduce dalle *E* alle *A*, ma solo una connessione intuitiva (psicologica), che è sempre "soggetta a revoca".
3. Da *A*, per via logica, si deducono particolari enunciati *S*: deduzioni che possono pretendere di essere vere.
4. Le *S* sono poste in relazione con le *E* (confronto con l'esperienza). A un'attenta considerazione, questa procedura appartiene pure alla sfera extra-logica (intuitiva), poiché le relazioni tra i concetti che compaiono in *S* e le esperienze *E* non sono di natura logica.

Si parte quindi dall'incontro con "le caotiche esperienze sensibili" che generano "meraviglia" e "passione per la comprensione". Così si mette in moto la ragione e si attiva

il "libero gioco della mente umana", che procede per immaginazione creativa operando quei "salti logici" che portano a fissare i concetti di base. Da lì parte un processo rigorosamente deduttivo che genera una serie di affermazioni da sottoporre poi al severo controllo sperimentale per controllarne il grado di adeguatezza alla realtà. La ripetizione ciclica di tali passaggi consente di formulare teorie sempre più solide, complete e unitarie.

"Ci si approssima al più alto obiettivo della scienza, che è quello di esaurire un massimo di contenuto sperimentale operando una deduzione logica da un minimo di ipotesi ... Si deve lasciare briglia sciolta all'immaginazione del teorico, perché, altrimenti, non vi sarebbe modo di conseguire l'obiettivo. Comunque, non si tratta di una immaginazione senza scopo, ma della ricerca delle possibilità logicamente più semplici e delle loro conseguenze".



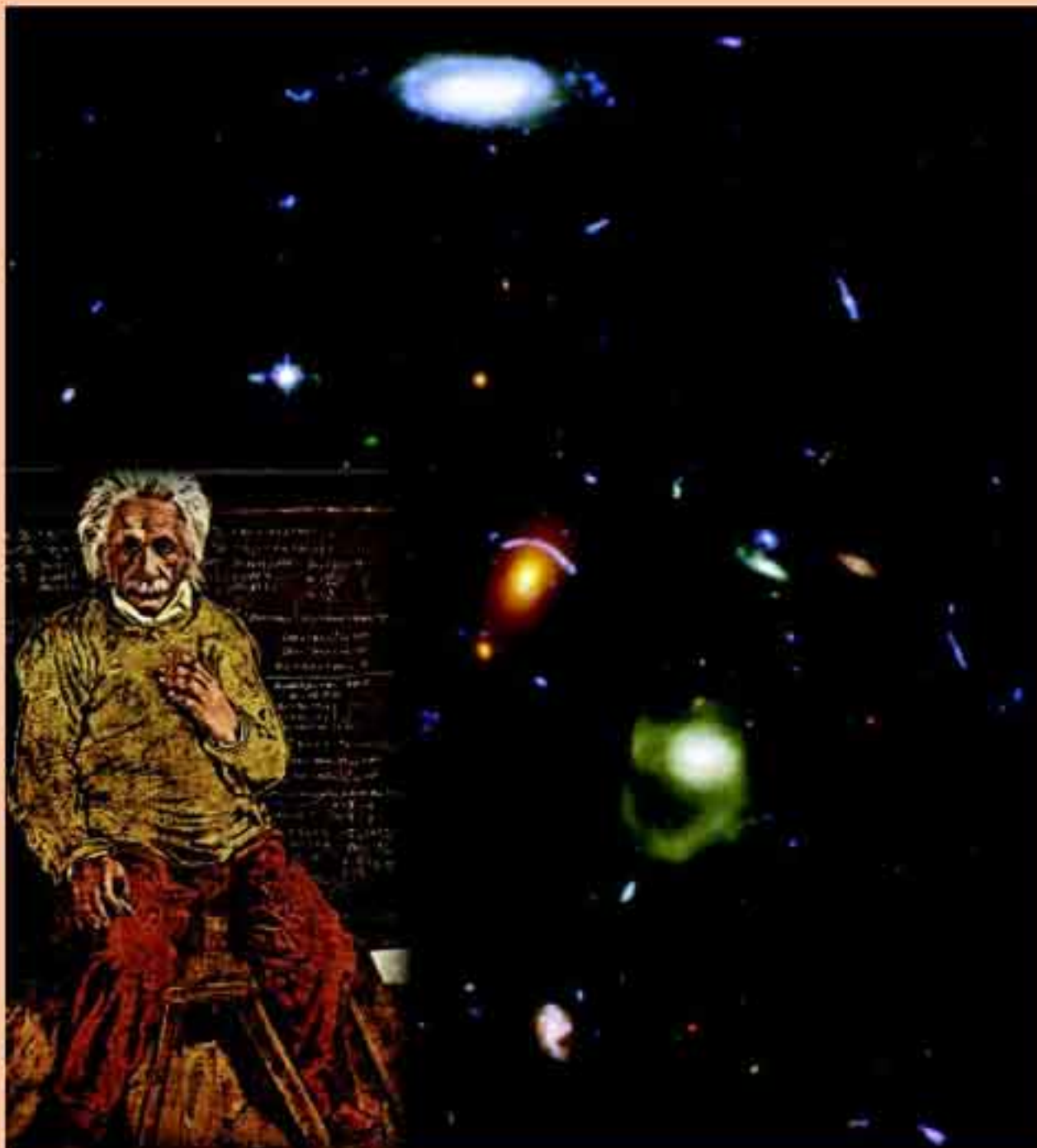
# UNA MERAVIGLIA MAI SOPITA

*"La scienza è il tentativo di trovare un coordinamento fra la caotica diversità delle nostre esperienze sensoriali ed un sistema logicamente unitario di pensiero... Da sempre è stato presente lo sforzo di trovare una base teoretica unificante di tutte le singole scienze, che consistesse in un minimo di concetti e di relazioni fondamentali, da cui, mediante un processo meramente logico, si potessero derivare tutti i concetti e relazioni delle singole discipline. È questo quel che intendiamo per ricerca della fondazione della fisica nella sua totalità. La fiduciosa speranza che questo fine*

*ultimo possa essere raggiunto è la fonte principale di quella dedizione appassionata, che ha sempre animato la ricerca".*

**È un approccio positivo alla realtà** che si rivela produttivo e fecondo anche sul piano della conoscenza scientifica. È l'espressione di un'esigenza tipicamente umana, che Einstein persegue fin dall'inizio: come si può leggere in filigrana nel modo col quale sviluppa i suoi primi lavori ma che si ritrova nel tentativo incompiuto degli ultimi decenni di elaborare una **teoria unitaria dei campi**.

Certo, il suo è stato un cammino segnato da un accento **molto personale**, che può farlo apparire come isolato e difficilmente imitabile. Ma la sua originalità non è altro che la capacità di esprimere con continuità e radicalità ciò che tutti percepiscono almeno a tratti: quella che **Thomas Torrance** ha descritto come "una profonda coscienza religiosa che coltivò e mantenne per tutta la vita, una meraviglia mai sopita per l'immensità, l'unità, l'armonia razionale e la bellezza matematica dell'universo". Einstein stesso ha sintetizzato in questi termini la sua esperienza umana.



*"Sebbene io sia un tipico solitario nella vita quotidiana, la mia consapevolezza di appartenere alla comunità invisibile di coloro che lottano per la verità, la bellezza e la giustizia, mi ha impedito di sentirmi isolato. L'esperienza più bella e profonda che un uomo possa avere è il senso del mistero; è il principio sottostante alla religiosità così come a tutti i tentativi seri nell'arte e nella scienza. Chi non ha mai avuto questa esperienza mi sembra che sia, se non morto, allora almeno cieco. È sentire che dietro qualsiasi cosa che può essere sperimentata c'è qualcosa che la nostra mente non può cogliere del tutto e la cui bellezza e sublimità ci raggiunge solo indirettamente, come un debole riflesso. Questa è la religiosità, in questo senso sono religioso. A me basta la meraviglia di questi segreti e tentare umilmente di cogliere con la mia mente una semplice immagine della sublime struttura di tutto ciò che è lì presente".*