

LE LUNGHEZZE SI CONTRAGGONO

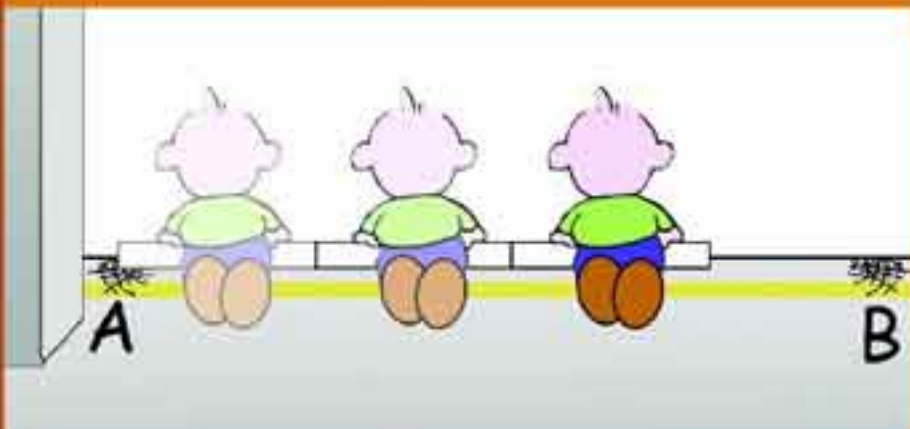
Come si misura una lunghezza? Per esempio la lunghezza del vagone del treno che transita per la stazione?

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.

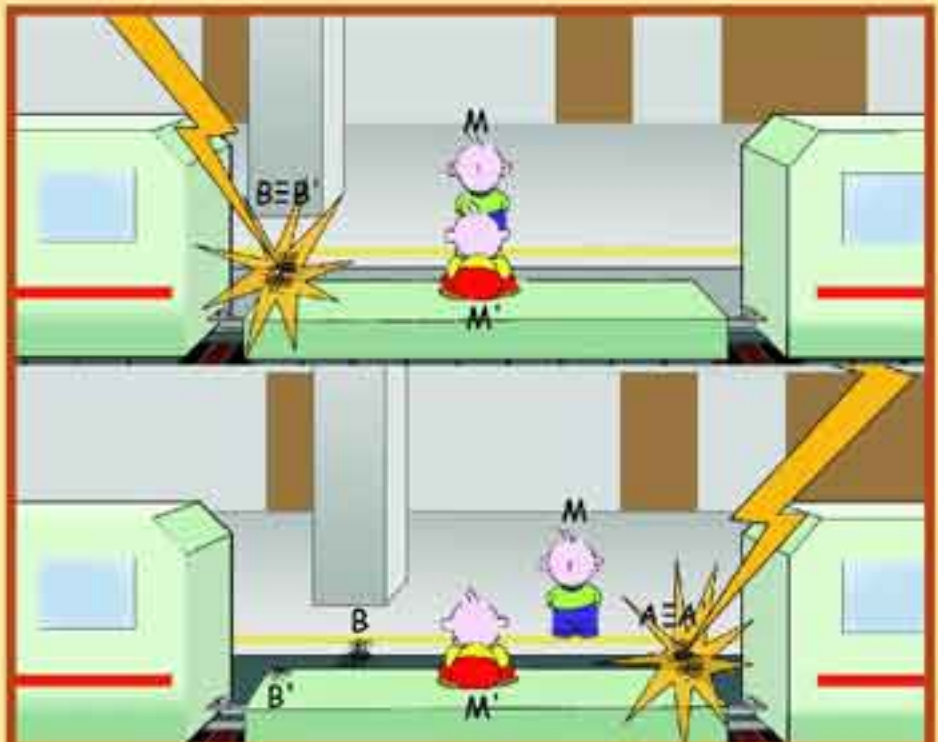
Se ci troviamo sulla banchina...



...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 sui 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**.

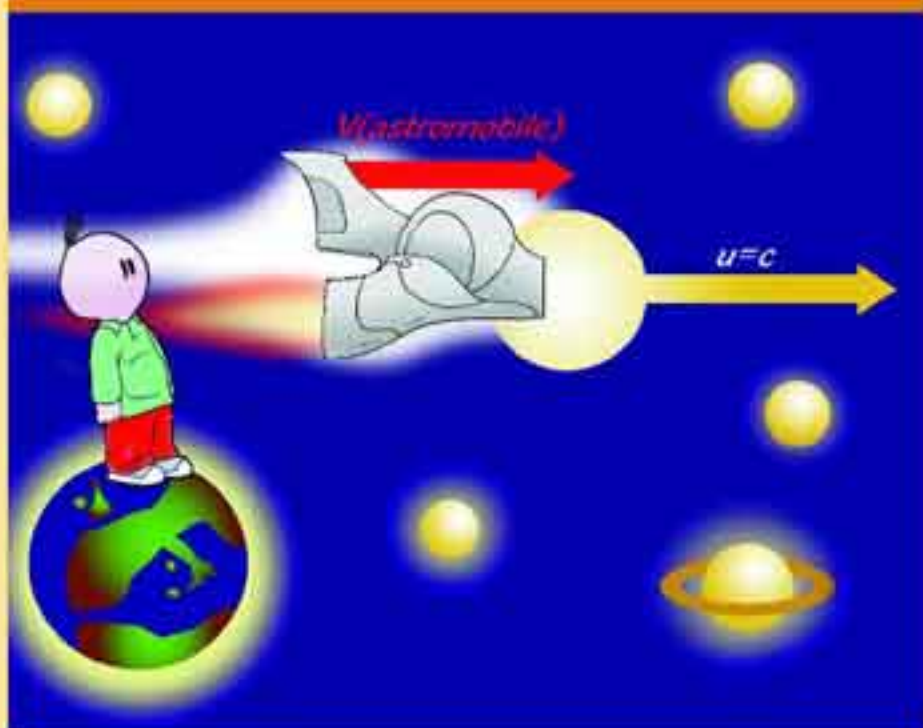
NON AGGIUNGERAI MAI NULLA ALLA VELOCITÀ DELLA LUCE

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.

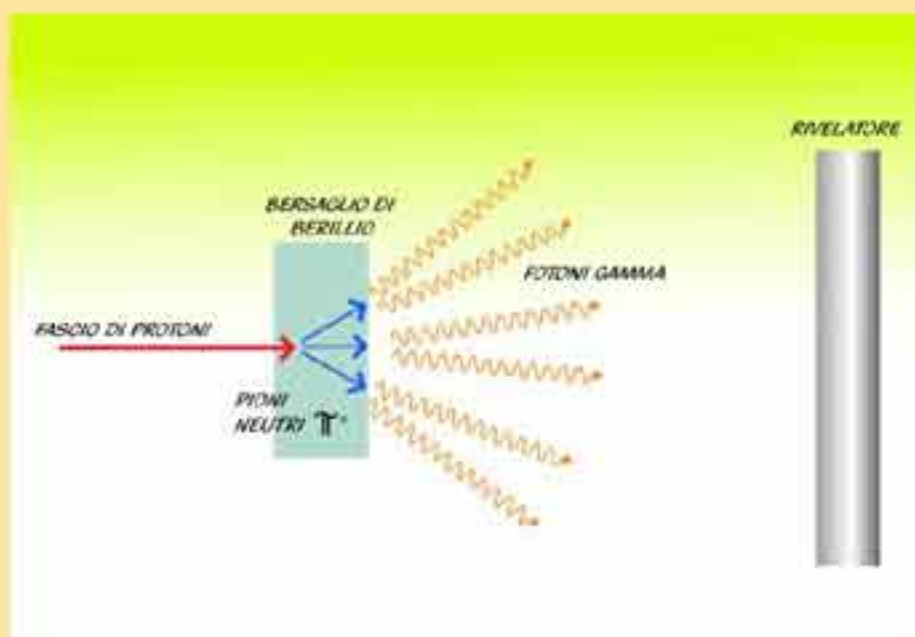
Occorre dunque una nuova formula, che è un po' più complicata...

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

... 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 ad alta 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?

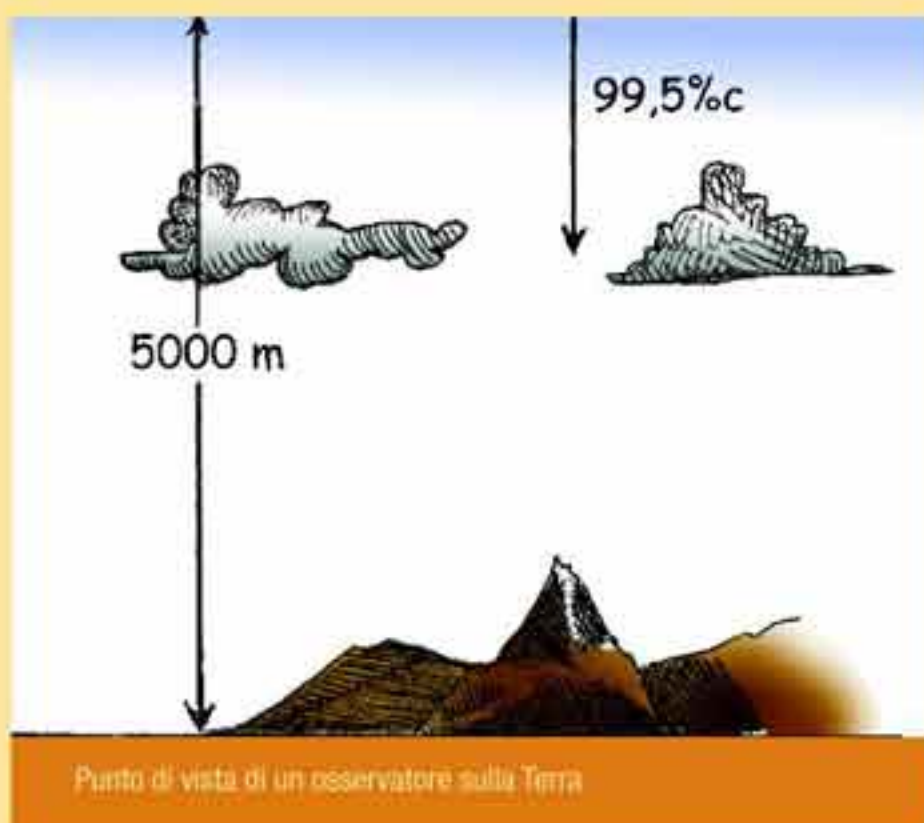
Nel 1941 **Bruno Rossi** e **David B. Hall** verificarono l'effetto relativistico della dilatazione dei tempi analizzando alcune particelle prodotte dalla radiazione cosmica.

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.



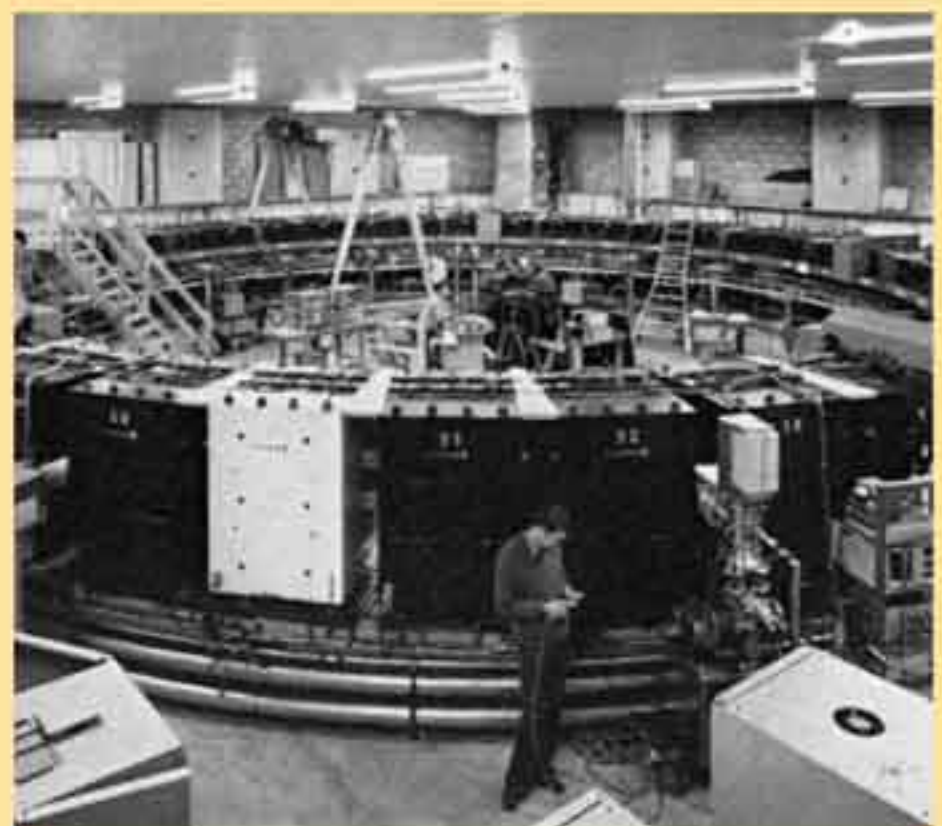
Punto di vista di un osservatore sulla Terra

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.



Punto di vista del muone



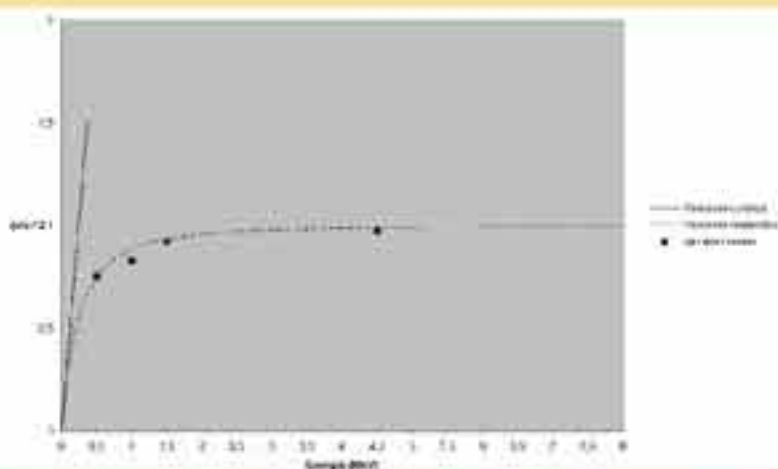
Un'altra eloquente conferma della dilatazione relativistica del tempo è stata ottenuta nel 1976, sempre con i muoni, in un esperimento condotto al Cern di Ginevra.

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:

$$E = m c^2$$

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	c	t	$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$	mediatori di forze
	d	s	b	$\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$	
lepton	ν_e	ν_μ	ν_τ	W	
	e	μ	τ	Z	
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**.

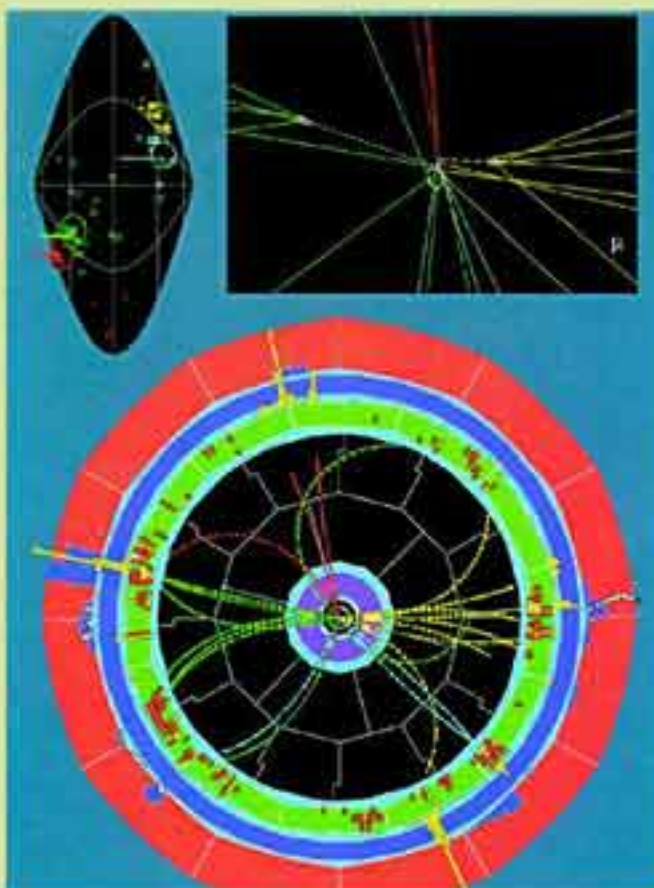
Poi però le cose si sono

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.

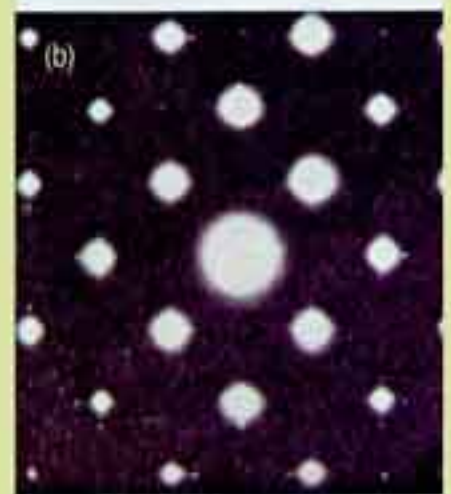
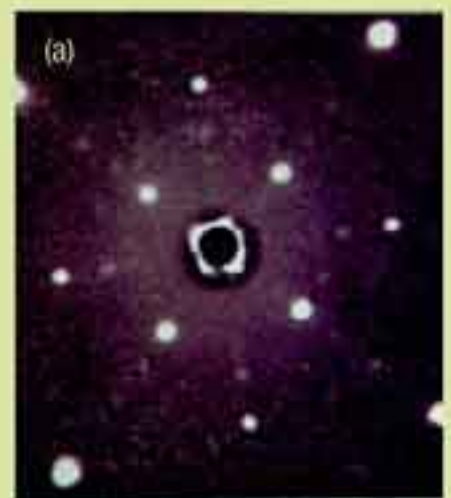
"La grande varietà di fatti

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.



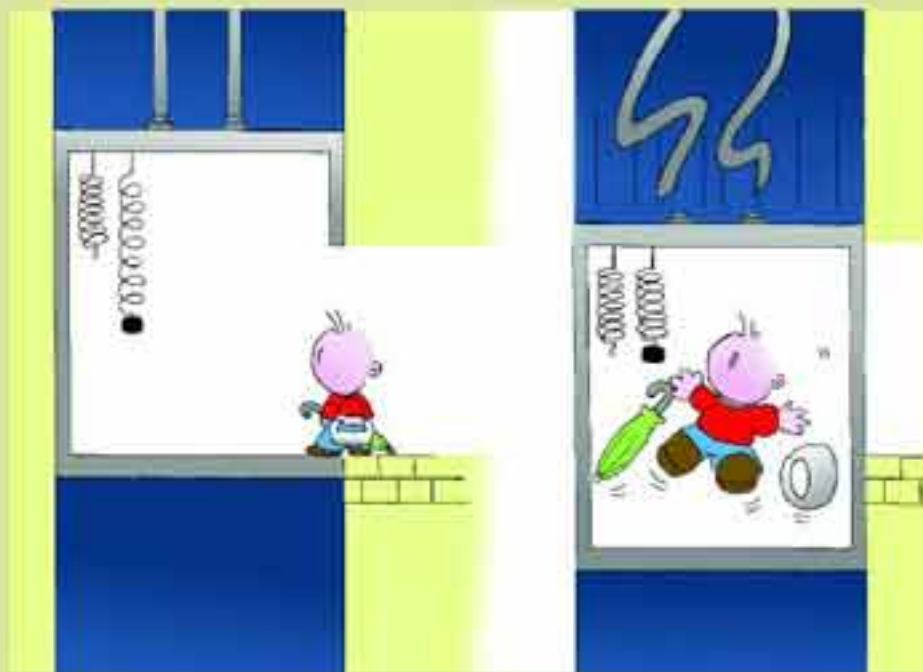
Il Congresso Solvay (Bruxelles, 1927): dal 1911 in questi congressi le più brillanti menti dell'inizio del XX secolo si confrontano (e si scontrano) sui nuovi orizzonti della fisica



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?

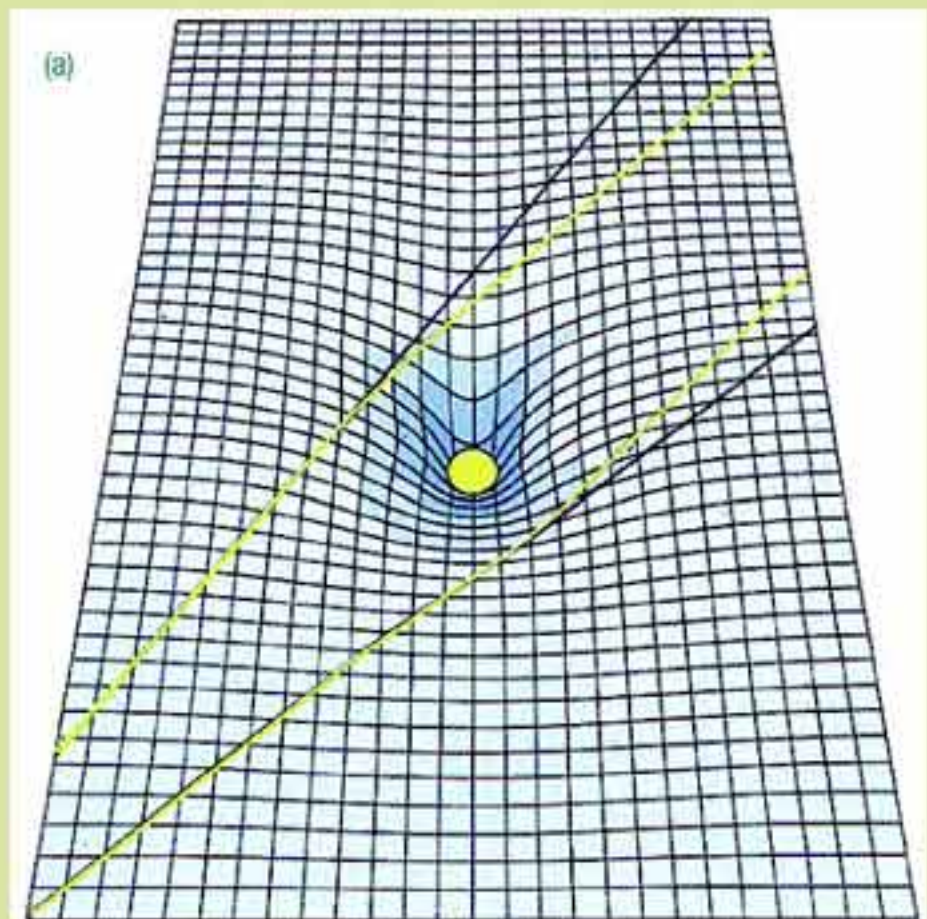
L'idea di Einstein per spiegare la gravità è quella di “eliminarla” e di concepire come moti liberi tutti i moti interpretati con essa. Non è detto che un moto libero sia necessariamente rettilineo: questo è vero nello spazio euclideo.

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

Gravitational Lens G2237+0305

“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 schematischen Theorie haben Sie mich gedanklich unerschütterlich unterstützt; andererseits habe ich mich intellektuell unzugänglich. Ich sehe die Sache schematisch so



- (1) Die ^{stabilsten} E sind mir gegeben.
- (2) A sind die Axiome, aus denen mit Folgerungen gezielte Folgerungen hervorgehen. Es gibt aber keinen logischen Weg von den E zu A, sondern nur eine intuitive Zusammenhänge, die immer „auf Widerruf“ ist.
- (3) Aus A werden auf logischem Wege Sätze / Aussagen abgeleitet welche Ableitungen diese Aussagen auf Richtigkeit prüfen können.
- (4) Die S werden mit den E im Vergleich gebracht (Prüfung an der Erfahrung). Diese Prüfung geht so genau betrachtet ebenfalls über - logische Spielerei aus, weil die Beziehung die in den S auftritt durch Vergleich zu den E hergeleitet ist 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”.

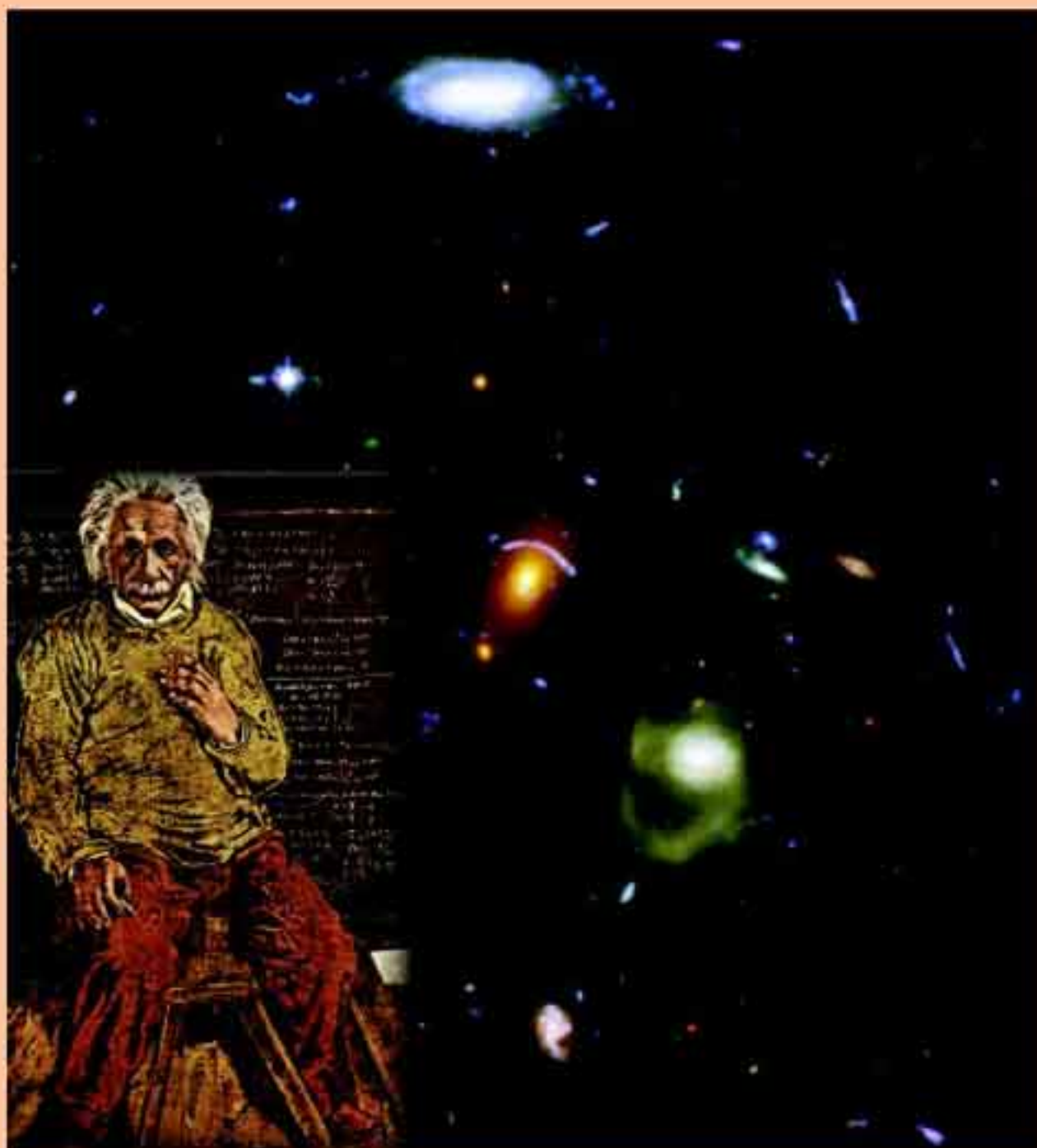
UNA MERAVIGLIA MAI SOPITA

"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".