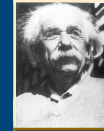




RELATIVITÀ - Albert Einstein (1879-1955)



Presentazioni

I - La teoria della Relatività ristretta

II - La teoria della Relatività generale

III - La ricerca dell' unificazione

IV - Questioni scientifico-filosofiche

La Relatività si è sviluppata secondo due tappe successive che costituiscono, anche dal punto di vista epistemologico due teorie vere e proprie:

- . la teoria della RELATIVITÀ "RISTRETTA" (o "speciale", o "particolare") e
- . la teoria della RELATIVITÀ "GENERALE"

La seconda, tuttavia, non può essere intesa come una semplice estensione della prima: la costruzione delle due teorie, infatti, fu guidata da
due EPISTEMOLOGIE molto diverse

I. La teoria della **RELATIVITÀ RISTRETTA**

1. Approccio fisico

2. Approccio geometrico

1. L'APPROCCIO FISICO

La teoria della Relatività "ristretta" (1905)
nasce per un'esigenza che potremmo chiamare
"SPERIMENTALE"

Bisognava dare una spiegazione coerente e soddisfacente del risultato del celebre

ESPERIMENTO di MICHELSON-MORLEY (1881 e 1887)

con il quale si era ripetutamente cercato di rivelare

la **composizione della velocità della LUCE**
con quella del moto di traslazione della **TERRA** attorno al sole

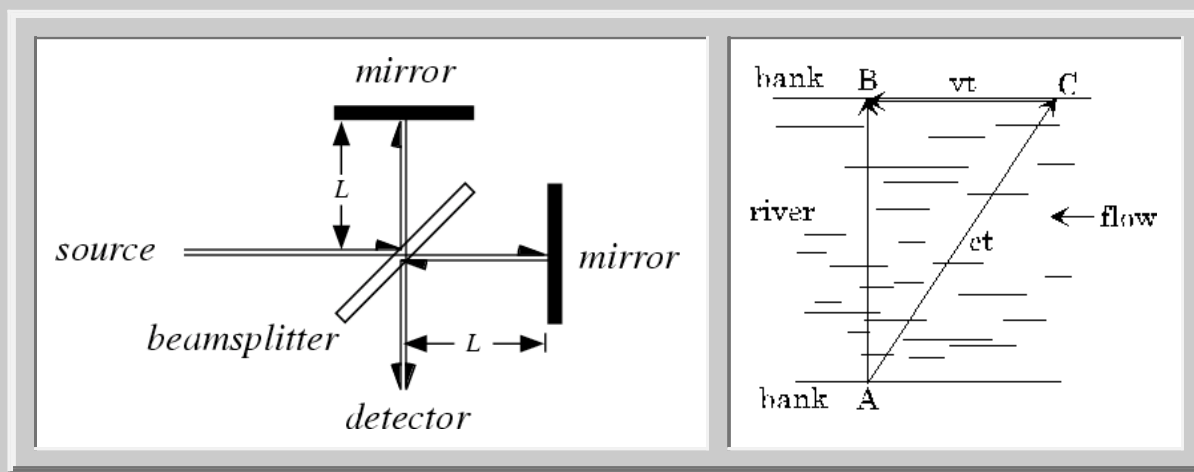
(cfr. Pais, 1986, pp. 123-132)



L'esperimento di Michelson-Morley (1881-1887)

L'esperimento cercava di misurare la velocità della Terra rispetto all'etere, in cui si sarebbero propagate le onde elettromagnetiche della luce.

La misura si basava sulla figura di interferenza prodotta dalle onde luminose riflesse e trasmesse lungo i due bracci dell'interferometro.



Tale figura d'interferenza avrebbe dovuto essere diversa dopo aver ruotato l'apparato di 90 gradi, a causa della differente velocità, della luce lungo il braccio parallelo al moto della Terra [$c \pm v$] e lungo il braccio ad esso ortogonale [$\sqrt{c^2 - v^2}$]. La precisione della misura, che questo metodo consentiva era altissima.

Ma l'esperimento dava figure d'interferenza sempre uguali, indipendentemente dall'orientamento dell'apparato. La Terra sembrava ferma rispetto all'etere.

I. La teoria della **RELATIVITÀ RISTRETTA**

1. Approccio fisico

2. Approccio geometrico

1. L'APPROCCIO FISICO

La teoria della Relatività "ristretta" (1905)
nasce per un'esigenza che potremmo chiamare
"SPERIMENTALE"

Bisognava dare una spiegazione coerente e soddisfacente del risultato del celebre

~~ESPERIMENTO di MICHELSON MORLEY (1881 e 1887)~~

con il quale si era ripetutamente cercato di rivelare

la composizione della velocità della LUCE
con quella del moto di traslazione della **TERRA** attorno al sole

(cfr. Pais, 1986, pp. 123-132)

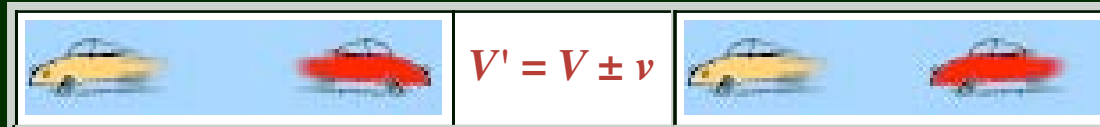


Composizione delle velocità

SECONDO LA MECCANICA PRIMA DI EINSTEIN

Secondo la cinematica "classica" le due velocità si sarebbero dovute

- sommare se la Terra "andava incontro" o "si allontanava" dalla sorgente luminosa
- sottrarre se "la rincorreva" o "veniva rincorsa" da essa



E questo avrebbe permesso di misurare la velocità con la quale la Terra si muoveva nello spazio assoluto di Newton, e cioè rispetto all'"etere" che lo riempiva e attraverso il quale la luce viaggiava.

Ma l'esperimento aveva rivelato, con un margine di errore di misura molto accurato, come la velocità della luce nel vuoto fosse sempre identica a

$$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{sec}$$

indipendentemente dal moto della Terra. Per trovare una spiegazione a questo stato di cose Einstein seguì una metodologia ben precisa, secondo la quale i concetti della Meccanica newtoniana dovevano essere riveduti.



I. La teoria della **RELATIVITÀ RISTRETTA**

1. Approccio fisico

2. Approccio geometrico

1. L'APPROCCIO FISICO

La teoria della Relatività "ristretta" (1905)
nasce per un'esigenza che potremmo chiamare
"SPERIMENTALE"

Bisognava dare una spiegazione coerente e soddisfacente del risultato del celebre

~~ESPERIMENTO di MICHELSON-MORLEY (1881 e 1887)~~

con il quale si era ripetutamente cercato di rivelare

~~la composizione della velocità della LUCE~~
con quella del moto di traslazione della **TERRA** attorno al sole

(cfr. Pais, 1986, pp. 123-132)



La metodologia della Relatività ristretta

L'OPERAZIONISMO

La "filosofia-metodologia" che guida la Relatività ristretta è considerata alla base di quello che fu chiamato

"l'operazionismo" da Bridgman (1882-1961)

secondo cui

nella fisica devono entrare in gioco solo quelle grandezze che si possono definire in base al metodo con il quale possono essere osservate o misurate sperimentalmente



La metodologia della Relatività ristretta

Bridgman (1882-1961)



« Esaminiamo ciò che fece Einstein nella teoria particolare.

In primo luogo egli riconobbe che il significato di un termine dev'essere cercato nelle operazioni che si compiono quando si applica quel termine.

Se il termine è tale da potersi applicare a situazioni fisiche, come il termine di "lunghezza" o di "simultaneità", allora il significato dev'essere cercato nelle operazioni con le quali si determina la lunghezza di oggetti fisici concreti, o nelle operazioni con le quali si stabilisce se due eventi fisici concreti sono o non sono simultanei.

Questi concetti sono espressi chiaramente dal seguente passo di Einstein relativo alla discussione sulla simultaneità di due segnali luminosi:

"Il concetto non esiste per il fisico, finché non gli sia possibile scoprire se esso sia o non sia soddisfatto in un caso reale. Ci è necessaria, quindi, una definizione di simultaneità capace di fornirci i mezzi con i quali, nel caso concreto, si possa decidere mediante l'esperienza se entrambi i segnali luminosi avvengono simultaneamente" ».

(P.W. Bridgman, "Le teorie di Einstein e il punto di vista operativo", in Schilpp, 1958, p. 281)



La metodologia della Relatività ristretta

1. IL PRINCIPIO DI COSTANZA DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE

Questa metodologia dell'operazionismo, alla base della Relatività ristretta trova come un ampliamento epistemologico nell'idea di:

Assumere proprio come principi, dai quali partire per l'elaborazione della teoria, quei "FATTI" che sembrano resistere ad ogni tentativo di falsificazione osservativa.

Ecco che allora, proprio il "fatto" osservato che

la velocità della luce nel vuoto non si compone con nessun'altra velocità

(né quella della sorgente che la emette né quella dell'osservatore che la riceve, rispetto ad un ipotetico "etere" nel quale la luce viaggerebbe)

diviene, in Relatività, uno dei due pilastri su cui si fonda la teoria intera,

Il principio di "costanza della velocità della luce nel vuoto"



La metodologia della Relatività ristretta

2. IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ

L'altro principio guida sarà

il Principio di Relatività

- già formulato da Galileo per la **Meccanica**
- e che Einstein estenderà, oltre che alla **Meccanica** anche ai **Fenomeni Elettromagnetici** e, più in generale, a **tutte le leggi fisiche**

A partire da questi due principi l'autore della Relatività (come egli stesso spiega)

• dedurrà facilmente, con una matematica elementare le

Leggi di trasformazione cinematica (TRASFORMAZIONI DI LORENTZ)

già ottenute da Voigt, Lorentz e Fitzgerald (cfr. Pais, p. 134) ma non comprese nella loro reale portata e soprattutto non adeguatamente spiegate dal punto di vista concettuale

• e **si sbarazzerà del residuo meccanicista** con cui si ipotizzava **l'etere** come una sorta di **mezzo elastico**, che riempiva lo "spazio assoluto" di Newton, attraverso il quale si sarebbe propagata la luce



Principio di Relatività (meccanica) di Galileo

**Le leggi della meccanica hanno la stessa forma
rispetto a tutti gli osservatori
in moto relativo traslatorio uniforme**

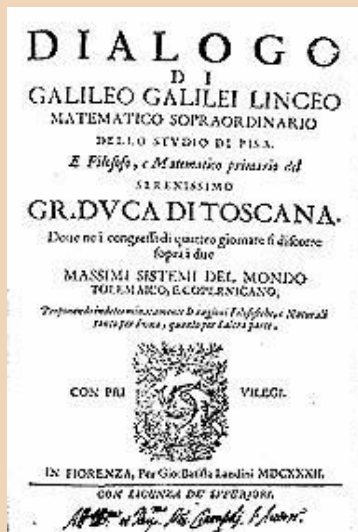
. Secondo l'esperienza ideale della nave di Galileo (*Dialogo sui Massimi Sistemi*)

. Secondo la successiva formulazione newtoniana della Meccanica

Einstein ritiene insoddisfacente, dal punto di vista epistemologico:

- . il fatto che **le sole leggi della Meccanica siano invarianti** nel passaggio da un sistema **inerziale** ad un altro (questa considerazione condurrà alla **Relatività ristretta**)
- . il fatto che **le leggi della Meccanica newtoniana cambino formulazione** nel passaggio da un sistema **inerziale** ad uno non inerziale (questa considerazione condurrà alla **Relatività generale**)





« **Salviati:**

Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; **siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti**; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso **stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti 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; **e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali**; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti.

Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità, **ché (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 o pure sta ferma**: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; **e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito**; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; **i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso**; e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; **e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso si farà un poco di fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nugoletta trattenervisi, e indifferentemente muoversi non più verso questa che quella parte.**

E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora... »

(Galileo, *Dialogo sui massimi sistemi del mondo*, Gioranta seconda, nn. 212-213)

Principio di Relatività (meccanica) di Galileo

Le leggi della meccanica hanno la stessa forma
rispetto a tutti gli osservatori
in moto relativo traslatorio uniforme

- . Secondo l'esperienza ideale della nave di Galileo (*Dialogo sui Massimi Sistemi*)
- . Secondo la successiva formulazione newtoniana della Meccanica ←

Einstein ritiene insoddisfacente, dal punto di vista epistemologico:

- . il fatto che le sole leggi della Meccanica siano invarianti nel passaggio da un sistema inerziale ad un altro (questa considerazione condurrà alla Relatività ristretta)
- . il fatto che le leggi della Meccanica newtoniana cambino formulazione nel passaggio da un sistema inerziale ad uno non inerziale (questa considerazione condurrà alla Relatività generale)



Invarianza della Meccanica Newtoniana per Trasformazioni Galileiane

Le **trasformazioni di Galileo**

$$x' = x - V t, \quad t' = t$$

legano le coordinate misurate in due sistemi di riferimento in moto traslatorio uniforme

Di conseguenza le velocità si trasformano secondo il teorema di addizione Galileiano. E le accelerazioni rimangono invariate

$$u' = u - V \quad a' = a$$

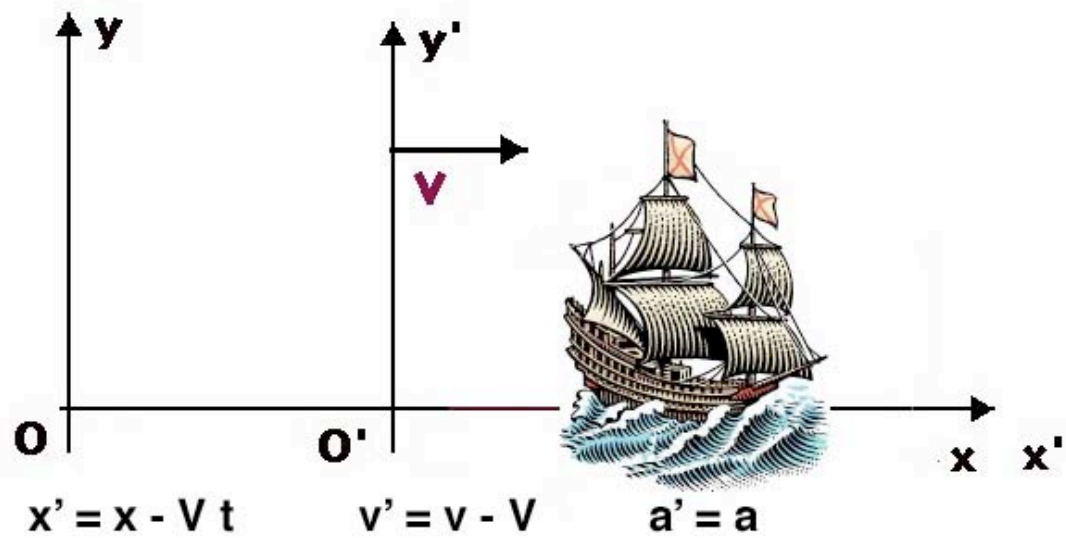
Le forze, che dipendono solo dalle distanze tra i corpi, sono invarianti per trasformazioni di Galileo e la massa m è, uno scalare invariante

$$F' = F \quad m' = m$$

Di conseguenza la legge fondamentale della Meccanica Newtoniana rimane invariante per trasformazioni di Galileo

$$F = m a \quad \iff \quad F' = m a'$$





La metodologia della Relatività ristretta

2. IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ

L'altro principio guida sarà

il Principio di Relatività

- già ~~formulato da Galileo~~ per la ~~Meccanica~~
- e che **Einstein estenderà**, oltre che alla **Meccanica** anche ai **Fenomeni Elettromagnetici** e, più in generale, a **tutte le leggi fisiche**

A partire da questi due principi l'autore della Relatività (come egli stesso spiega)

• dedurrà facilmente, con una matematica elementare le

Leggi di trasformazione cinematica (TRASFORMAZIONI DI LORENTZ)

già ottenute da Voigt, Lorentz e Fitzgerald (cfr. Pais, p. 134) ma non comprese nella loro reale portata e soprattutto non adeguatamente spiegate dal punto di vista concettuale

- e **si sbarazzerà del residuo meccanicista** con cui si ipotizzava **l'etere** come una sorta di **mezzo elastico**, che riempiva lo "spazio assoluto" di Newton, attraverso il quale si sarebbe propagata la luce



Principio di Relatività (speciale) di Einstein

**Le leggi della fisica hanno la stessa forma
rispetto a tutti gli osservatori
in moto relativo traslatorio uniforme**

- Questo rappresenta un'estensione del principio di relatività di **Galileo** che stabiliva la stessa cosa ma limitatamente alle sole leggi della **Meccanica**
- Con **Einstein** anche **l'Elettromagnetismo** (e in futuro ogni teoria di campo) viene incluso.

Rispetto alla sua futura generalizzazione con la Relatività generale, in questa formulazione, tale principio è comunque ancora ristretto ai soli sistemi (inerziali) in moto relativo traslatorio uniforme e non in moto qualunque.



La metodologia della Relatività ristretta

2. IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ

L'altro principio guida sarà

il Principio di Relatività

- già formulato da Galileo per la **Meccanica**
- e che Einstein estenderà, oltre che alla **Meccanica** anche ai **Fenomeni Elettromagnetici** e, più in generale, a **tutte le leggi fisiche**

A partire da questi due principi l'autore della Relatività (come egli stesso spiega)

• dedurrà facilmente, con una matematica elementare le

Leggi di trasformazione cinematica (TRASFORMAZIONI DI LORENTZ)

già ottenute da Voigt, Lorentz e Fitzgerald (cfr. Pais, p. 134) ma non comprese nella loro reale portata e soprattutto non adeguatamente spiegate dal punto di vista concettuale

• e **si sbarazzerà del residuo meccanicista** con cui si ipotizzava **l'etere** come una sorta di **mezzo elastico**, che riempiva lo "spazio assoluto" di Newton, attraverso il quale si sarebbe propagata la luce



La metodologia della Relatività ristretta



Einstein (1879-1955)

« Secondo le regole di connessione del tempo e delle coordinate spaziali degli eventi, usate nell'**fisica classica** quando si passa da un sistema inerziale a un altro, **le due ipotesi**,

1. **costanza della velocità della luce**
2. indipendenza della leggi (compresa quindi, in particolare, la legge di costanza della velocità della luce) dalla scelta del sistema inerziale (**principio di relatività particolare**)

sono fra loro **incompatibili**
(anche se entrambe, prese separatamente, si basano sull'esperienza).

L'**idea fondamentale** su cui poggia la teoria della relatività particolare è questa:

le ipotesi 1) e 2) sono fra loro compatibili solo se si postulano relazioni di nuovo tipo trasformazioni di Lorentz) per la conversione delle coordinate e dei tempi degli eventi;

il che [...] non equivale affatto ad una semplice convenzione, ma implica certe ipotesi sul comportamento effettivo delle aste di misura e degli orologi in movimento, che l'esperienza può convalidare o confutare »

(Schilpp, 1958, p. 30)



Le Trasformazioni di Lorentz

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Si ottengono:

- da una generalizzazione delle trasformazioni galileiane

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

- richiedendo la validità, del principio di relatività

$$x' = \gamma (x - vt) \Rightarrow x = \gamma (x' + vt')$$

- richiedendo la validità del principio di costanza della velocità della luce

$$x' = ct' \Rightarrow x = ct$$



Le Trasformazioni di Lorentz - Calcoli

Combinando le

$$x' = \gamma(x - vt) \Rightarrow x = \gamma(x' + vt')$$

si ottiene la

trasformazione dei tempi

$$x = \gamma^2(x - vt) + \gamma vt' \Rightarrow t' = \gamma t - \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma v} x$$

da cui:

$$\underbrace{\gamma(x - vt)}_{x'} = c \underbrace{\left(\gamma t - \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma v} x \right)}_{t'}$$

Richiedendo la validità del principio di

costanza della velocità della luce

$$x' = ct' \Rightarrow x = ct$$

otteniamo:

$$\left(\gamma + \frac{c}{v} \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma} \right) x = \gamma \left(1 + \frac{v}{c} \right) ct$$

Quindi:

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



(Calcoli completi)


Conseguenze della Relatività ristretta

Le conseguenze di queste due semplici principi furono strabilianti e a prima vista incredibili.

DAL PUNTO DI VISTA DELLA CINEMATICA

- Anzitutto la **demolizione dei concetti newtoniani di spazio e di tempo "assoluti"** come **contenitori autonomi** rispetto ai corpi e ai campi che in essi si muovono.

Lo spazio e il tempo vengono misurati in maniera diversa a seconda della velocità con cui si muovono i regoli e gli orologi, subendo

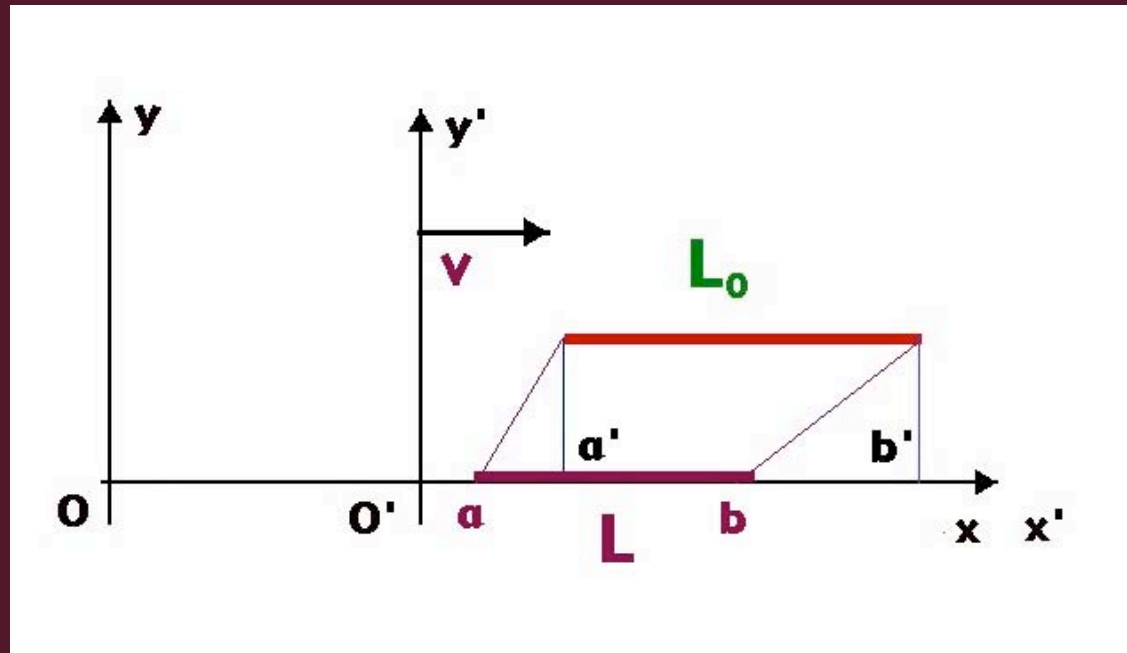
- una **contrazione delle lunghezze** e 
- una **dilatazione del tempo**
- La **relatività della simultaneità** di due eventi che avvengono in due punti diversi dello spazio
- Di conseguenza anche **le velocità**, se prossime a quella della luce, non **si sommano** e sottraggono nel modo galileiano-newtoniano, ma **in modo tale che la velocità della luce nel vuoto non possa mai essere superata** (**Composizione relativistica delle velocità**).



La Contrazione dei Regoli

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

Le misure di lunghezza compiute da un osservatore su un oggetto in moto, gli appaiono contratte nella direzione della velocità



(Calcoli completi)

Conseguenze della Relatività ristretta

Le conseguenze di queste due semplici principi furono strabilianti e a prima vista incredibili.

DAL PUNTO DI VISTA DELLA CINEMATICA

- Anzitutto la **demolizione dei concetti newtoniani di spazio e di tempo "assoluti"** come **contenitori autonomi** rispetto ai corpi e ai campi che in essi si muovono.

Lo spazio e il tempo vengono misurati in maniera diversa a seconda della velocità con cui si muovono i regoli e gli orologi, subendo

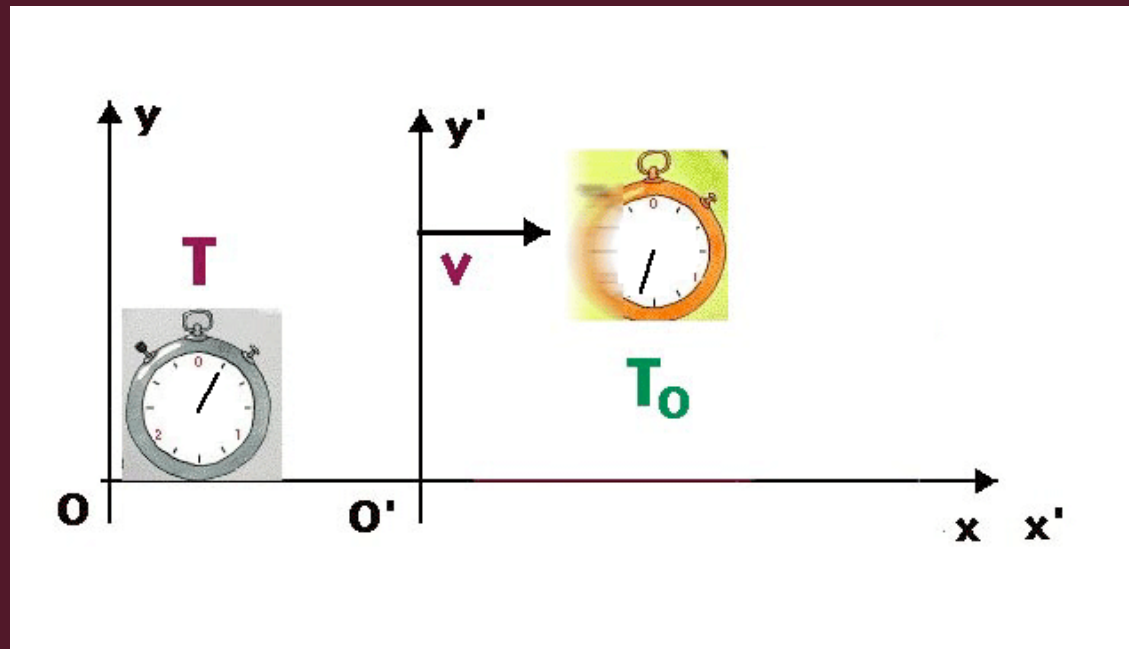
- una **contrazione delle lunghezze** e
- una **dilatazione del tempo** ←
- La **relatività della simultaneità** di due eventi che avvengono in due punti diversi dello spazio
- Di conseguenza anche **le velocità**, se prossime a quella della luce, non **si sommano** e sottraggono nel modo galileiano-newtoniano, ma **in modo tale che la velocità della luce nel vuoto non possa mai essere superata** (**Composizione relativistica delle velocità**).



La Dilatazione del Tempo

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Le misure di intervalli temporali compiute da un osservatore appaiono dilatate rispetto a quelle compiute da un orologio in moto



(Calcoli completi)

Conseguenze della Relatività ristretta

Le conseguenze di queste due semplici principi furono strabilianti e a prima vista incredibili.

DAL PUNTO DI VISTA DELLA CINEMATICA

- Anzitutto la **demolizione dei concetti newtoniani di spazio e di tempo "assoluti"** come **contenitori autonomi** rispetto ai corpi e ai campi che in essi si muovono.

Lo spazio e il tempo vengono misurati in maniera diversa a seconda della velocità con cui si muovono i regoli e gli orologi, subendo

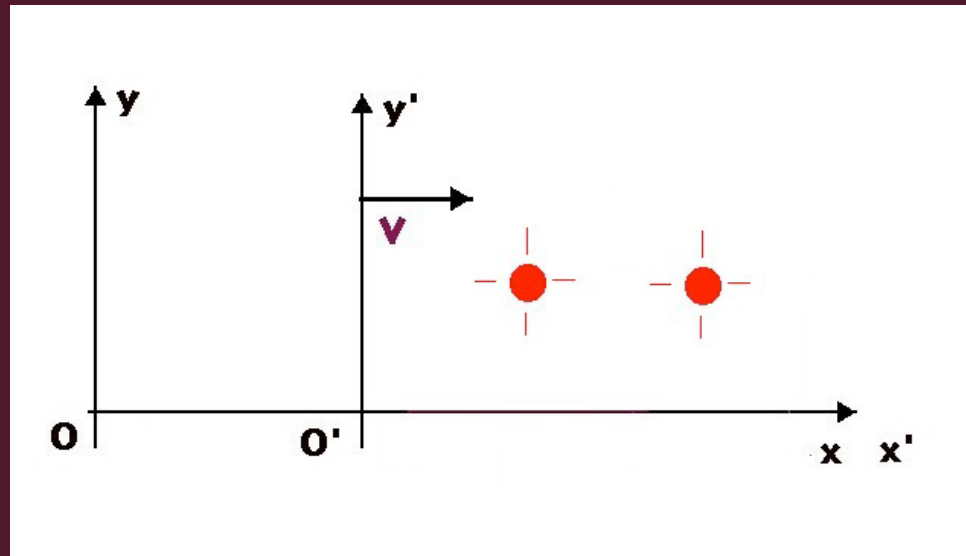
- una **contrazione delle lunghezze** e
- una **dilatazione del tempo**
- La **relatività della simultaneità** di due eventi che avvengono in due punti diversi dello spazio
- Di conseguenza anche **le velocità**, se prossime a quella della luce, non **si sommano** e sottraggono nel modo galileiano-newtoniano, ma **in modo tale che la velocità della luce nel vuoto non possa mai essere superata** (**Composizione relativistica delle velocità**).



La Relatività della simultaneità

$$t_2 - t_1 = \frac{\frac{v}{c^2} (x'_2 - x'_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Due eventi che accadono in due punti diversi dello spazio e risultano simultanei a un osservatore non sono simultanei per un osservatore in moto traslatorio uniforme rispetto al primo



Conseguenze della Relatività ristretta

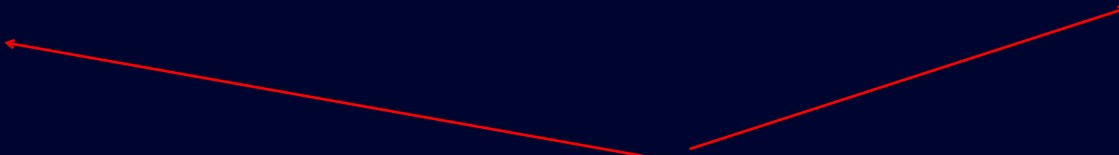
Le conseguenze di queste due semplici principi furono strabilianti e a prima vista incredibili.

DAL PUNTO DI VISTA DELLA CINEMATICA

- Anzitutto la **demolizione dei concetti newtoniani di spazio e di tempo "assoluti"** come **contenitori autonomi** rispetto ai corpi e ai campi che in essi si muovono.

Lo spazio e il tempo vengono misurati in maniera diversa a seconda della velocità con cui si muovono i regoli e gli orologi, subendo

- una contrazione delle lunghezze e
- una dilatazione del tempo
- La relatività della simultaneità di due eventi che avvengono in due punti diversi dello spazio
- Di conseguenza anche **le velocità**, se prossime a quella della luce, non **si sommano** e sottraggono nel modo galileiano-newtoniano, ma **in modo tale che la velocità della luce nel vuoto non possa mai essere superata** (Composizione relativistica delle velocità).

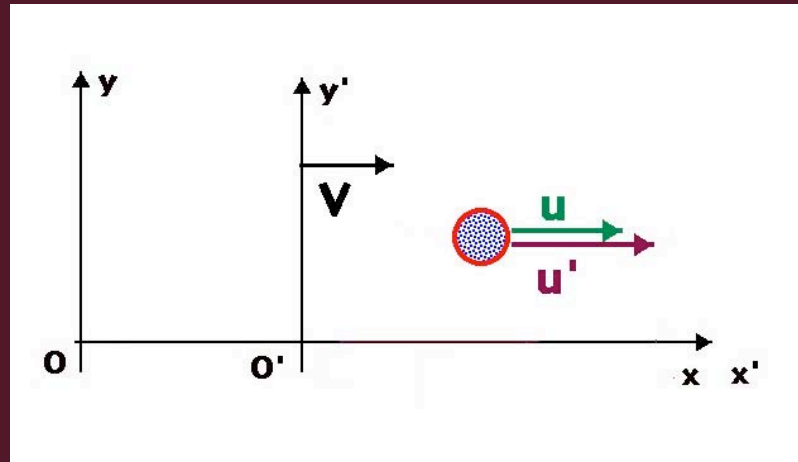


La Composizione delle Velocità

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

Le velocità, si compongono in modo che non si possa mai superare la velocità della luce nel vuoto c

Questo risultato **si ottiene** considerando un corpo che si muove di moto traslatorio uniforme con velocità u rispetto ad un osservatore e u' rispetto all'altro e tenendo conto della differenza di scala dei tempi.




La Composizione delle Velocità

Consideriamo un corpo che trasla con velocità

- u rispetto all'osservatore O e
- u' rispetto all'osservatore O'
- essendo V la velocità di O' rispetto ad O

- per cui abbiamo $X = u T$
- per cui si ha $X' = u' T'$

Nelle trasformazioni di Lorentz si ha, di conseguenza:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

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

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

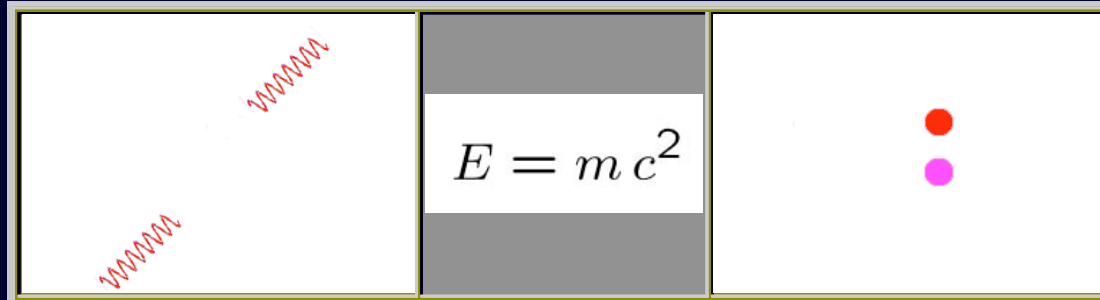
Conseguenze della Relatività ristretta

DAL PUNTO DI VISTA DELLA *DINAMICA*

Le conseguenze sono ancora più sorprendenti
con la comparsa della

Equivalenza tra massa ed energia (~~Calcoli completi~~)

contenuta nella formula più famosa della Relatività:



secondo la quale

la massa di una certa quantità di materia
può essere, in opportune condizioni, trasformata in energia (e viceversa)



I. La teoria della **RELATIVITÀ RISTRETTA**

1. Approccio fisico

2. Approccio geometrico

2. L'APPROCCIO GEOMETRICO

La Relatività ristretta subì essa stessa una sorta di riconcettualizzazione quando

Hermann Minkowski (1864-1909)

che era stato uno dei

« maestri eccellenti » di Einstein

(cfr. Note autobiografiche, in Schilpp, 1958, p. 9)

ne diede una rappresentazione in uno

spazio-tempo a quattro dimensioni (spazio di Minkowski)

in cui il tempo rappresentava la quarta dimensione che veniva ad aggiungersi alle tre dimensioni dello spazio ordinario.



Approccio geometrico alla Relatività ristretta

Minkowski (1864-1909)



Einstein

« L'importante contributo di Minkowski alla teoria sta in questo:

- prima delle ricerche di Minkowski era necessario effettuare una **trasformazione di Lorentz** su una **legge** per **accertarne l'invarianza** rispetto a tali trasformazioni
- egli invece riuscì a introdurre un formalismo tale che la **forma matematica della legge** garantisce di per sé **l'invarianza della legge stessa** rispetto alle trasformazioni di Lorentz.

Creando un calcolo tensoriale tetradimensionale [cioè in quattro dimensioni], egli ottenne per lo spazio tetradimensionale ciò che il calcolo vettoriale ordinario aveva ottenuto per le tre dimensioni spaziali »

(Note autobiografiche, in Schilpp, 1958, p. 31)



I. La teoria della **RELATIVITÀ RISTRETTA**

1. Approccio fisico

2. Approccio geometrico

2. L'APPROCCIO GEOMETRICO

La Relatività ristretta subì essa stessa una sorta di riconcettualizzazione quando

Hermann Minkowski (1864-1909)

che era stato uno dei

« maestri eccellenti » di Einstein

(cfr. Note autobiografiche, in Schilpp, 1958, p. 9)

ne diede una rappresentazione in uno

spazio-tempo a quattro dimensioni (spazio di Minkowski)

in cui il tempo rappresentava la quarta dimensione che veniva ad aggiungersi alle tre dimensioni dello spazio ordinario.



Lo Spazio di Minkowski

L'approccio geometrico alla Relatività si basa sul confronto tra

il concetto di **distanza**
in uno **spazio euclideo**

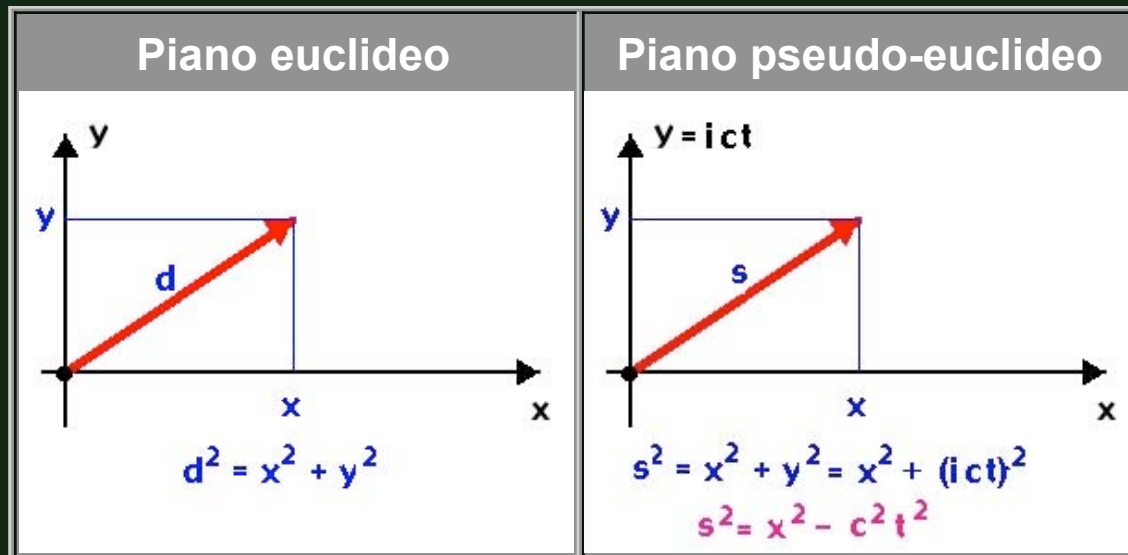
che è **invariante**

- . rispetto alle **rotazioni** e
- . rispetto alle **trasformazioni di Galileo**

il concetto di **intervallo**
in uno **spazio pseudo-euclideo**

che è **invariante**

- . rispetto alle **pseudo-rotazioni**
- . ovvero alle **trasformazioni di Lorentz**



Il formalismo covariante di Minkowski

Le stesse equazioni dell'elettromagnetismo di Maxwell

- . che la Relatività non aveva modificato essendo già corrette in partenza
- . a differenza della meccanica newtoniana che era stata modificata in quella relativistica

riscritte nel formalismo di Minkowski

- . apparivano in tutta la loro **compatta eleganza e simmetria**
- . rendendo visibile, anche attraverso i simboli matematici **l'unificazione operata da Maxwell tra elettricità e magnetismo** in un unico campo elettromagnetico tensoriale.

Improvvisamente

la fisica si stava "trasformando" in geometria

e **la percezione intuitiva del moto** e della sua **dinamicità** sembravano **crystallizzarsi in un fissismo geometrico ideale** (dal sapore un po' platonico, cartesiano, e spinoziano) un po' freddo forse, per quanto estremamente elegante e simmetrico.

Da quel momento il ruolo della **matematica** nella fisica, e particolarmente della geometria in questo caso, prenderà in certo senso il **sopravvento** rispetto al modo fino ad allora conosciuto di fare scienza, gettando le premesse per cominciare a concepire la teoria della **Relatività** nella sua nuova forma **"generale"**



Equazioni di Maxwell
in forma non covariante

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0,$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0,$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho,$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\frac{\vec{J}}{c},$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} \phi.$$

Equazioni di Maxwell
in forma covariante

$$\frac{\partial F^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} = -J^\alpha$$

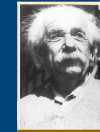
$$\frac{\partial F_{\alpha\beta}}{\partial x^\gamma} + \frac{\partial F_{\beta\gamma}}{\partial x^\alpha} + \frac{\partial F_{\gamma\alpha}}{\partial x^\beta} = 0$$

$$F_{\alpha\beta} = \frac{\partial A_\beta}{\partial x^\alpha} - \frac{\partial A_\alpha}{\partial x^\beta}$$

$$(F^{\mu\alpha}) \equiv \begin{pmatrix} 0 & E^1 & E^2 & E^3 \\ -E^1 & 0 & B^3 & -B^2 \\ -E^2 & -B^3 & 0 & B^1 \\ -E^3 & B^2 & -B^1 & 0 \end{pmatrix}$$



RELATIVITÀ - Albert Einstein (1879-1955)



Presentazioni

I - La teoria della Relatività ristretta

II - La teoria della Relatività generale

III - La ricerca dell' unificazione

IV - Questioni scientifico-filosofiche

La Relatività si è sviluppata secondo due tappe successive che costituiscono, anche dal punto di vista epistemologico due teorie vere e proprie:

- . la teoria della RELATIVITÀ "RISTRETTA" (o "speciale", o "particolare") e
- . la teoria della RELATIVITÀ "GENERALE"

La seconda, tuttavia, non può essere intesa come una semplice estensione della prima: la costruzione delle due teorie, infatti, fu guidata da
due EPISTEMOLOGIE molto diverse

II. La teoria della **RELATIVITÀ GENERALE**

1. Approccio epistemologico

2. Approccio fisico

3. Approccio geometrico

1. L'APPROCCIO EPISTEMOLOGICO

La **Relatività "generale"** (pubblicata nel 1916, anche se l'intuizione risale al 1908) nasce, di conseguenza, in una

PROSPETTIVA EPISTEMOLOGICA

ben diversa da quella dell'**operazionismo** iniziale dalla Relatività "ristretta"

- La **teoria della gravitazione di Newton**
- La **teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell**
- La **Relatività ristretta**

erano più che **soddisfacenti** di fronte ai **dati sperimentali**

Ma la fisica teorica era **"imperfetta"** da un punto di vista **"logico"** ed **"estetico"** (!)



La metodologia della Relatività generale

A. IL CRITERIO DI "PERFEZIONE INTERNA"

L'epistemologia di Einstein era ormai diventata diversa da quella della Relatività ristretta, come nota un po' dispiaciuto Bridgman, il teorico dell'operazionismo.

Bridgman:

« Einstein non riportò nella sua teoria della Relatività generale la profondità e gli insegnamenti che egli stesso ci aveva dato con la sua teoria particolare »

(Bridgman, in Schilpp, 1958, p. 281)

Ma si deve ben dire che ne portò di altri e non meno geniali; egli era alla ricerca di una teoria che soddisfacesse anche ad un criterio epistemologico interno

- di **semplicità**
- di **eleganza**
- di **unificazione**

Il suo problema era diventato quello di trovare una **spiegazione** sempre più **unificata** di tutta la fisica partendo dall'**identificazione dei punti metodologicamente deboli**, o risolti in maniera anche concettualmente e filosoficamente insoddisfacente, operando una **critica costruttiva** sul quadro scientifico che gli si presentava innanzi.



La metodologia della Relatività generale

I PRINCIPI DI UNA "CRITICA COSTRUTTIVA" – PERFEZIONARE LA RELATIVITÀ

Einstein

« Prima di iniziare una critica [...] della fisica, è necessario premettere qualche considerazione generale sui principi in base ai quali è possibile criticare le teorie fisiche.

- **Il primo principio** è ovvio: **la teoria non deve contraddire i fatti empirici.** [...]
- **Il secondo principio**
 - non ha avuto per oggetto il rapporto tra teoria e materiale di osservazione
 - bensì **le premesse della teoria stessa**, o ciò che brevemente, se pur vagamente, potrebbe definirsi "naturalzza" o semplicità **"logica" delle premesse** (ossia dei concetti fondamentali e delle corrispondenti relazioni reciproche poste a base di essi). [...]

Il secondo principio, insomma, si può brevemente caratterizzare dicendo che si riferisce alla **"perfezione interna"** della teoria, mentre il primo si riferiva alla **"conferma esterna"** »

(Note autobiografiche, op. cit., in Schilpp, 1958, p. 13).



La metodologia della Relatività generale

Il "prezzo da pagare" alla "perfezione interna":

UN POTENTE APPARATO MATEMATICO

Con la **Relatività generale** e con la **Meccanica quantistica**
il peso dell'apparato matematico nella fisica diventa sempre più rilevante

La matematica richiesta è

- **meno intuitiva** e
- **tecnicamente più sofisticata**

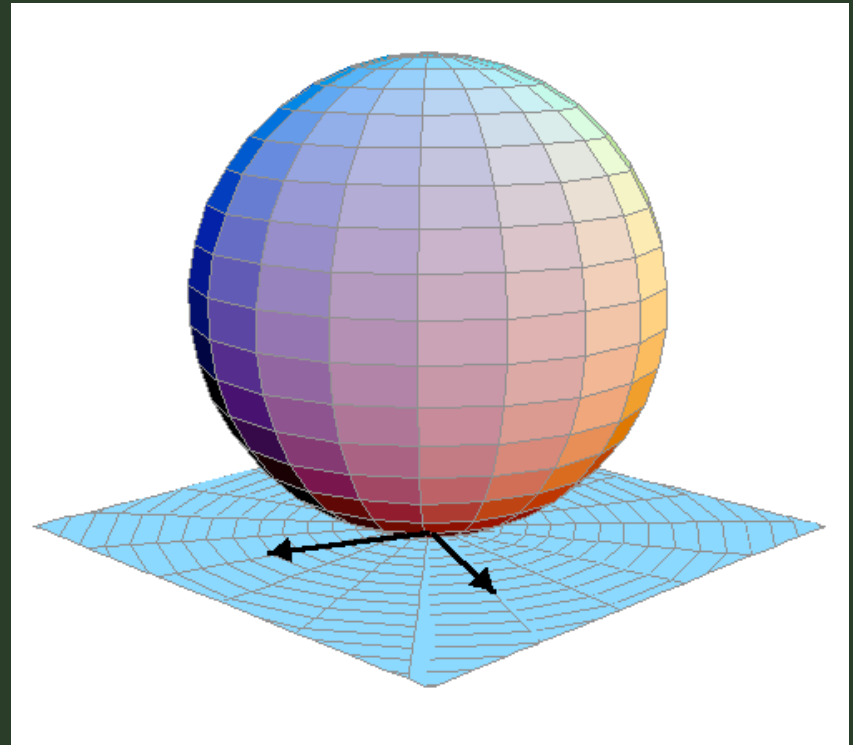
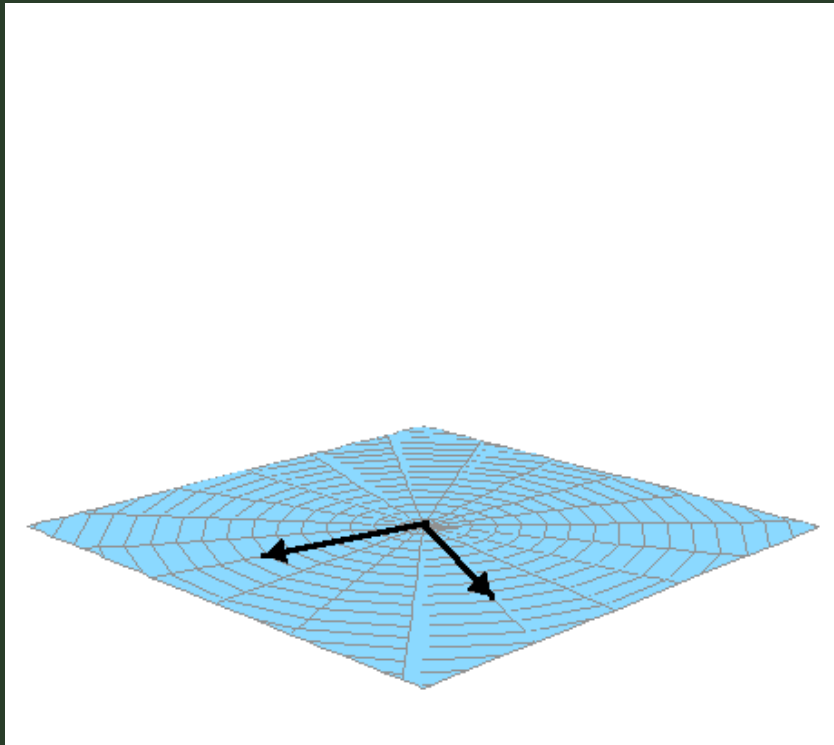
Si richiedono strumenti non elementari come

- la **geometria differenziale**, che a partire dalla **Relatività** si svilupperà enormemente, e
- l'**analisi funzionale negli spazi di Hilbert** per la **Meccanica quantistica**

La fisica si distanzia dall'esperienza diretta e dal senso comune.



Geometria differenziale su una superficie



- . Una superficie sufficientemente regolare si può approssimare, nell'intorno di un punto, con il suo piano tangente in quel punto
- . Analogamente uno spazio non lineare si approssima, localmente, ad uno spazio lineare nel quale si definiscono i vettori
- . Per spostarsi da un punto all'altro occorrono delle regole di trasporto dei vettori

 [\(Calcoli completi\)](#)

La metodologia della Relatività generale

Il "secondo prezzo da pagare" alla "perfezione interna":

LA MAGGIORE DIFFICOLTÀ DEL CONTROLLO SPERIMENTALE




Einstein

« Quanto più i concetti e gli assiomi fondamentali si allontanano da ciò che è direttamente osservabile [...] quanto più difficile e laborioso diventa quindi il confronto delle implicazioni della teoria con i fatti »

(Schilpp, p. 15)

Stavano ormai per affacciarsi i nuovi problemi:

- della ricerca degli "invarianti", cioè di quelle grandezze che non cambiano con l'osservatore
- delle "costanti universali" adimensionali e
- delle "simmetrie" nelle leggi naturali

che costituiscono una sorta di **dato oggettivo** alla base dell'universo e una guida per la nostra conoscenza di esso.   

II. La teoria della RELATIVITÀ GENERALE

1. Approccio epistemologico

2. Approccio fisico

3. Approccio geometrico

1. L'APPROCCIO EPISTEMOLOGICO

La **Relatività "generale"** (pubblicata nel 1916, anche se l'intuizione risale al 1908) nasce, di conseguenza, in una

PROSPETTIVA EPISTEMOLOGICA

ben diversa da quella dell'**operazionismo** iniziale dalla Relatività "ristretta"

- La **teoria della gravitazione di Newton**
- La **teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell**
- La **Relatività ristretta**

erano più che **soddisfacenti** di fronte ai **dati sperimentali**

Ma la fisica teorica era **"imperfetta"** da un punto di vista **"logico"** ed **"estetico"** (!)

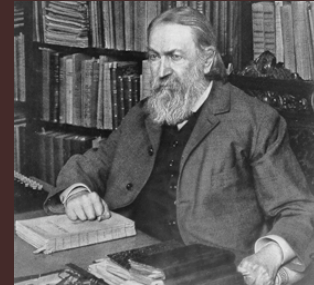


La metodologia della Relatività generale

2. APPROCCIO FISICO - DAL PRINCIPIO DI MACH AL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

Per realizzare questo progetto Einstein si ispirò

Ernst Mach (1838-1916)



alle considerazioni di Mach a proposito dell'**inerzia** in rapporto alla **gravitazione**:

Einstein

« Mach ritiene che in una teoria veramente razionale l'inerzia debba dipendere dalle interazioni fra le masse, esattamente come le altre forze di Newton »

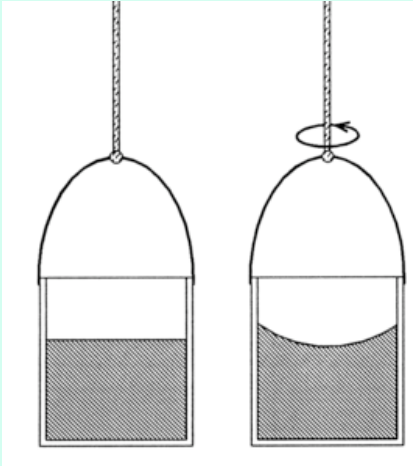
(Schilpp, p. 16; cfr. anche Sciama, 1965, pp. 78-96)

e ancora secondo

Einstein

« La critica di Mach è sostanzialmente sana » (Schilpp, p. 16)

Mach e l'esperienza del secchio di Newton



Nel riferimento di un secchio ruotante rispetto alle stelle fisse si produce una forza centrifuga che incurva la superficie dell'acqua.

« Consideriamo ora i fatti sui quali Newton ha creduto di fondare solidamente la distinzione fra moto *assoluto* e moto relativo. Se la terra si muove con moto rotatorio assoluto attorno al suo asse, forze centrifughe si manifestano su di essa, il globo terrestre si appiattisce, il piano del pendolo di Foucault ruota ecc. Tutti questi fenomeni scompaiono, se la terra è in quiete, e i corpi celesti si muovono intorno ad essa di moto assoluto in modo che si verifichi ugualmente una rotazione *relativa*. Rispondo che le cose stanno così solo se si accetta fin dall'inizio l'idea di uno spazio assoluto. Se invece si resta sul terreno dei fatti, non si conosce altro che spazi e moti relativi. Relativi sono i moti nell'universo sia nel sistema tolemaico sia in quello copernicano, quando si astragga dal presunto misterioso mezzo che pervade lo spazio. Queste due teorie sono ugualmente corrette, solo che la seconda è più semplice e più pratica dell'altra. L'universo non ci è dato due volte, con la terra in quiete e poi con la terra in moto rotatorio, ma una sola volta, con i suoi moti relativi, i soli che siano misurabili. Non possiamo dire come sarebbero le cose se la terra non girasse. Possiamo invece interpretare in modi diversi l'unico caso che ci è dato; se però la nostra interpretazione è tale da contraddire l'esperienza, vuol dire che è falsa. I principi fondamentali della meccanica possono essere formulati in modo che anche per i moti rotatori relativi risultino presenti forze centrifughe. L'esperimento newtoniano del vaso pieno d'acqua sottoposto a moto rotatorio ci insegna solo che la rotazione relativa dell'acqua rispetto alle pareti del vaso non produce forze centrifughe percettibili, ma che tali forze sono prodotte dal moto rotatorio relativo alla massa della terra e agli altri corpi celesti. Non ci insegna nulla di più ».

(E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, c. 2, n. 5)

La metodologia della Relatività generale

Partendo dalle idee di Mach, Einstein giunse alla formulazione del

"PRINCIPIO DI EQUIVALENZA"
tra massa inerziale e massa gravitazionale

ovvero

**tra il campo gravitazionale e le "forze apparenti" che
compaiono nei sistemi non inerziali**

Einstein

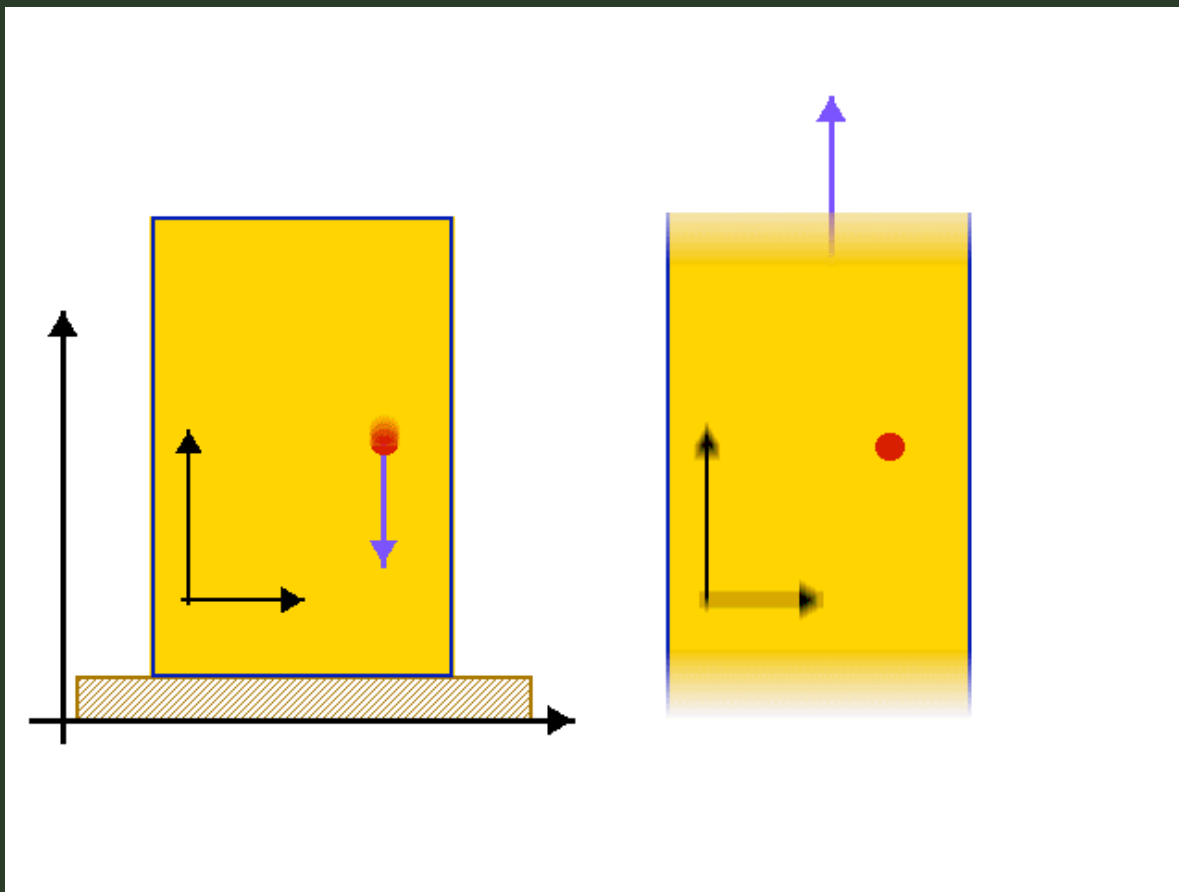
« Che la teoria della Relatività particolare fosse solo il primo passo di uno sviluppo necessario, mi divenne perfettamente chiaro solo durante i tentativi fatti per rappresentare la gravitazione nell'ambito di questa teoria. [...]

Allora mi venne in mente questo: l'uguaglianza della massa inerte e di quella pesante, cioè l'indipendenza dell'accelerazione gravitazionale dalla natura di ciò che cade, può essere espressa come segue:

in un campo gravitazionale (di piccola estensione spaziale) tutto accade come in uno spazio libero da gravitazione, purchè vi si introduca, al posto di un "sistema inerziale", un sistema di riferimento accelerato rispetto a un sistema inerziale »

(Schilpp, p. 34)





Le leggi della fisica appaiono identiche

- in un **riferimento locale** immerso in un **campo gravitazionale** uniforme g
- e in un **riferimento locale** dotato di un'**accelerazione** $a = -g$

(Principio di equivalenza)

II. La teoria della **RELATIVITÀ GENERALE**

1. **Approccio epistemologico**

2. **Approccio fisico**

3. **Approccio geometrico**

1. L'APPROCCIO EPISTEMOLOGICO

La **Relatività "generale"** (pubblicata nel 1916, anche se l'intuizione risale al 1908) nasce, di conseguenza, in una

PROSPETTIVA EPISTEMOLOGICA

ben diversa da quella dell'**operazionismo** iniziale dalla Relatività "ristretta"

- La **teoria della gravitazione di Newton**
- La **teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell**
- La **Relatività ristretta**

erano più che **soddisfacenti** di fronte ai **dati sperimentali**

Ma la fisica teorica era **"imperfetta"** da un punto di vista **"logico"** ed **"estetico"** (!)



La metodologia della Relatività generale

3. APPROCCIO GEOMETRICO – DALLO SPAZIO PIATTO DI MINKOWSKI ALLO SPAZIO CURVO DI RIEMANN

A questo punto della riflessione

- *occorreva* uno **strumento matematico** adatto
- per introdurre **il principio di equivalenza**
entro la **rappresentazione spazio-temporale a quattro dimensioni**

in maniera tale da

- **generalizzare** lo **spazio di Minkowski** della **Relatività ristretta**
- in un **nuova struttura** capace di includere anche la **gravitazione**

Einstein

« *L'uguaglianza della massa inerte e di quella pesante [cioè gravitazionale] porta quindi, in modo del tutto naturale, ad ammettere che l'esigenza fondamentale della teoria della Relatività particolare (l'invarianza delle leggi rispetto alle trasformazioni di Lorentz) sia troppo limitata, cioè che occorra postulare un'invarianza delle leggi rispetto a trasformazioni non lineari delle coordinate, nel continuo tetradimensionale* » (Schilpp, p. 35)



La metodologia della Relatività generale

LO SPAZIO-TEMPO CURVO

Questo passaggio conduce all'introduzione di uno spazio-tempo curvo basato sulla geometria non euclidea di Riemann

Riemann (1826-1866)



Vale la pena sottolineare come faccia, a questo punto, la sua comparsa nella fisica la

"NON LINEARITÀ"

delle equazioni che si ritrova a causa della **curvatura dello spazio-tempo**, che ora non è più euclideo.

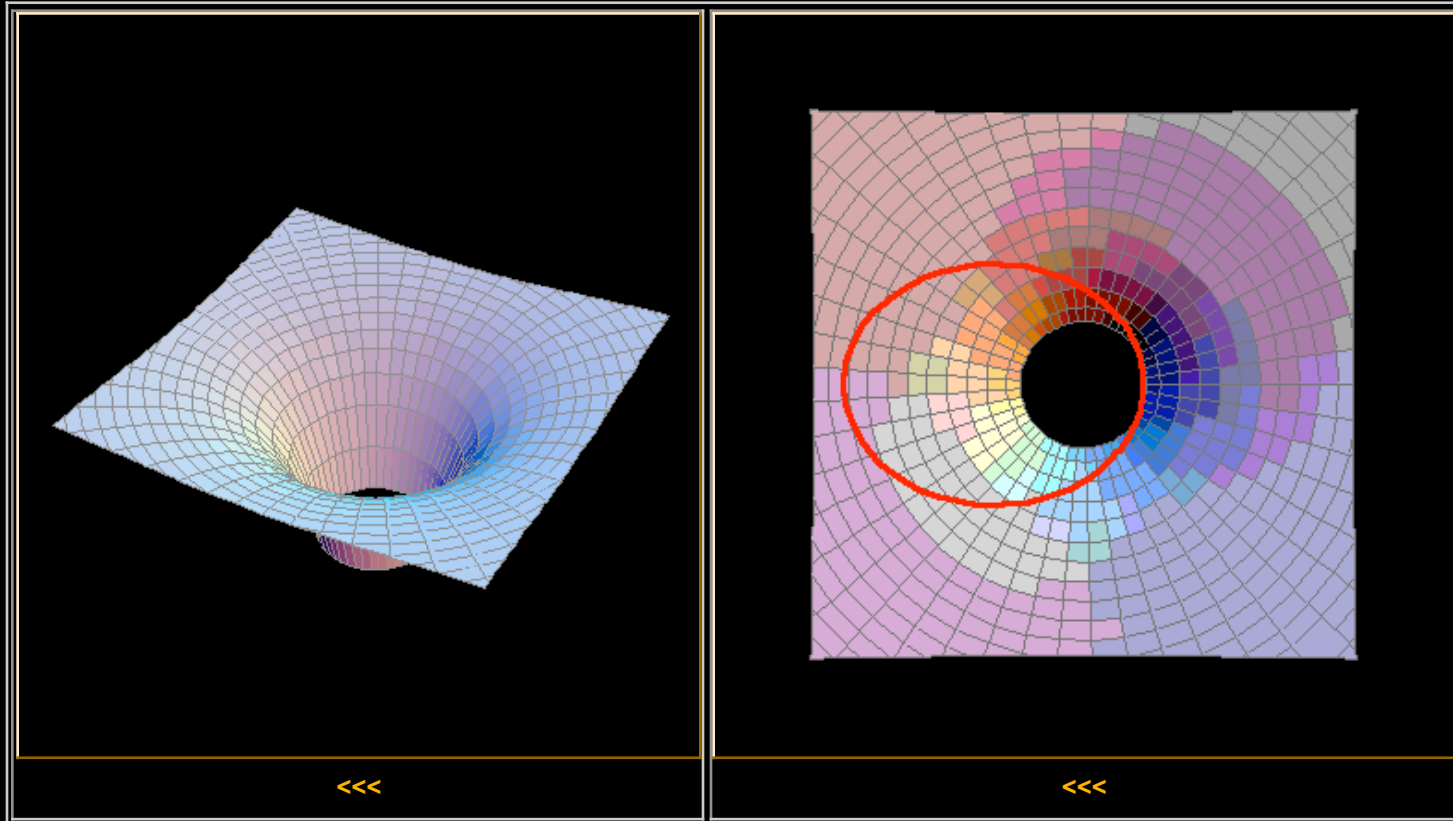
La Relatività generale rappresenta la prima teoria di campo a fare uso sistematico di

equazioni "non lineari" (Equazioni di Einstein)

quello stesso tipo di equazioni che, dopo alcuni decenni, si stanno dimostrando capaci di rivoluzionare l'intero statuto epistemologico delle scienze, con la comparsa del **caos deterministico** e della **complessità**



Modello bidimensionale dell'incurvamento dello spazio-tempo



In uno spazio-tempo curvo una particella si muove, in assenza di forze,

▫ lungo una geodetica.

(Principio d'inerzia generalizzato di Einstein)
(**Calcoli completi**)

Le equazioni di Einstein della gravitazione non sono lineari

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

$g_{\mu\nu}$ è il tensore metrico

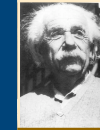
$R_{\mu\nu}$ è il tensore di curvatura di Ricci

R è la curvatura scalare

$T_{\mu\nu}$ è il tensore energia-impulso della materia



RELATIVITÀ - Albert Einstein (1879-1955)



Presentazioni

I - La teoria della Relatività ristretta

II - La teoria della Relatività generale

III - La ricerca dell' unificazione

IV - Questioni scientifico-filosofiche





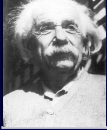
La Relatività si è sviluppata secondo due tappe successive che costituiscono, anche dal punto di vista epistemologico due teorie vere e proprie:

- . la teoria della RELATIVITÀ "RISTRETTA" (o "speciale", o "particolare") e
- . la teoria della RELATIVITÀ "GENERALE"

La seconda, tuttavia, non può essere intesa come una semplice estensione della prima: la costruzione delle due teorie, infatti, fu guidata da
due EPISTEMOLOGIE molto diverse

III. La ricerca dell'UNIFICAZIONE

Il **criterio della "perfezione interna"** della teoria, inteso come criterio di **"semplicità"** non poteva non essere che un **criterio di "unificazione"**

	<ul style="list-style-type: none">• Keplero, Galileo e Newton avevano unificato<ul style="list-style-type: none">◦ la meccanica "celeste" e◦ quella "terrestre"
	<ul style="list-style-type: none">• Maxwell aveva unificato<ul style="list-style-type: none">◦ elettricità e◦ magnetismo
	<ul style="list-style-type: none">• la Relatività ristretta aveva reso compatibili<ul style="list-style-type: none">◦ l'elettromagnetismo con◦ la meccanica, correggendo quest'ultima
	<ul style="list-style-type: none">• la Relatività generale aveva unificato<ul style="list-style-type: none">◦ la gravitazione e◦ la dinamica del moto con◦ la geometria dello spazio-tempo
	

Una **teoria dei campi unificati (??)** avrebbe dovuto **unificare la Relatività generale** con **l'elettromagnetismo**



La teoria dei campi UNIFICATI

Con la Relatività generale non c'erano più

- da una parte i principi della meccanica e
- dall'altra le leggi
 - della gravitazione (di Newton), o
 - dell'elettromagnetismo (di Maxwell)

ma un **unico sistema di equazioni** per il campo e per il moto, **le equazioni di Einstein**

Einstein

« Tutte le teorie hanno finora sentito il bisogno di disporre, oltre che delle leggi di campo, di leggi particolari per il moto di entità materiali sotto l'influenza dei campi »

(Schilpp, p. 41)

Mentre nelle Relatività generale

« la legge del moto non deve (e non può) essere postulata indipendentemente »

perché

« essa è già implicitamente contenuta nella legge del campo gravitazionale »

L'epistemologia dell'unificazione non poteva non spingere le ricerche successive verso il tentativo di inserire anche il campo elettromagnetico in una teoria ulteriormente generalizzata, progetto che, però, Einstein non riuscì a completare.



Verso una teoria dei CAMPI UNIFICATI ?

Dopo la morte di Einstein (1955) l'**obiettivo dell'UNIFICAZIONE** è rimasto latente per un po' nella fisica, fino a risvegliarsi, come un'eredità lasciata proprio dall'autore della Relatività all'intera categoria dei fisici verso la fine del XX secolo.

L'interesse per le **teorie unificate della gravitazione e dell'elettromagnetismo**

- in uno **spazio-tempo a più di quattro dimensioni**(sul modello di quella di Kaluza-Klein verso cui lo stesso Einstein manifestò una particolare attenzione)
- o in uno spazio con connessione affine **atensore metrico non simmetrico**

è al centro anche delle ricerche più recenti.

La seconda era l'impostazione che Einstein considerava...

Einstein

« la generalizzazione più naturale delle equazioni della gravitazione »

(Schilpp, p. 49)

e riteneva avere

« sufficiente probabilità di essere dimostrata valida, purché si dimostri la possibilità di descrivere in modo esauriente la realtà fisica sulla base del continuo »



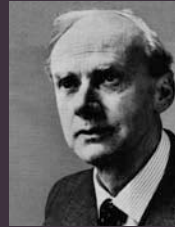
L'unificazione della Relatività con la Meccanica quantistica

Ma il problema principale dell'unificazione è rimasto ancora quello di

- un'unificazione "concettuale"
- oltre che "tecnica"

tra la Relatività e la Meccanica quantistica

L'operazione compiuta da Dirac (1902-1984)



di combinare le due teorie, su base puramente tecnica

(applicare il metodo della quantizzazione alla Relatività, come si era già applicato all'elettromagnetismo di Maxwell) ha portato alla

teoria quantistica dei campi

con grandi risultati dal punto di vista del potere previsionale della teoria, realizzando un potente strumento di calcolo.

Ma si è finito, forse, per trovarsi, un po' come all'epoca dell'astronomia tolemaica, con uno strumento che consentiva di calcolare correttamente il moto dei corpi celesti, ma era uno strumento matematico più che una teoria fisica del mondo reale (strumentalismo).



Muamenti del quadro scientifico ed epistemologico

Oggi siamo ancora alla ricerca di una **teoria unitaria**, ma il quadro delle scienze sta cambiando profondamente.

Da un lato si sta perseguendo la strada dell'**unificazione**

- aperta dalla **Relatività** e
- dalla **teoria quantistica dei campi**
oggi impegnata tra l'altro nell'impresa non facile di **quantizzare la gravitazione**

Dall'altro lato, e contemporaneamente, ci si è imbattuti nel problema della **"non linearità"** (ormai inevitabile anche a causa della stessa Relatività generale che l'ha introdotta per prima) con la comparsa

- dell'**instabilità** e del **caos deterministico**
- e della **complessità**

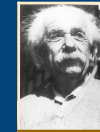
e non sappiamo ancora quale sarà l'esito di tutto questo.

La stessa **matematica**, strumento principe della fisica moderna, a partire da Cantor, Russell, Whitehead e Gödel sta lavorando sui suoi **fondamenti** e non pochi tra fisici, matematici, logici e filosofi della scienza stanno mettendo a paragone le **nuove problematiche** con quelle **antiche** del **pensiero greco** e **medioevale** che sembrano come riaffiorare in modo nuovo, interessante e ineludibile.





RELATIVITÀ - Albert Einstein (1879-1955)



Presentazioni

I - La teoria della Relatività ristretta

II - La teoria della Relatività generale

III - La ricerca dell' unificazione

IV - Questioni scientifico-filosofiche

La Relatività si è sviluppata secondo due tappe successive che costituiscono, anche dal punto di vista epistemologico due teorie vere e proprie:

- . la teoria della RELATIVITÀ "RISTRETTA" (o "speciale", o "particolare") e
- . la teoria della RELATIVITÀ "GENERALE"

La seconda, tuttavia, non può essere intesa come una semplice estensione della prima: la costruzione delle due teorie, infatti, fu guidata da
due EPISTEMOLOGIE molto diverse

IV. Questioni SCIENTIFICO-FILOSOFICHE

La "Relatività" ha sollevato, già dal suo apparire, una serie di problemi concettuali che non potevano non avere delle ripercussioni filosofiche.

1. <u>Spazio e tempo</u>	2. <u>Relatività e oggettività</u>	3. <u>Materia e energia</u>
4. <u>Causalità</u>	5. <u>Fisica geometrica / dinamica</u>	6. <u>Fisica locale / globale</u>

1. SPAZIO E TEMPO

La Relatività ristretta aveva sconvolto, anzitutto, i concetti di **spazio e di tempo assoluti di Newton**.

In un primo momento questa **"relativizzazione"**

- delle misure di **lunghezza** (contrazione di Lorentz delle lunghezze)
- e di **tempo** (dilatazione del tempo)
- e del concetto di **"simultaneità"** (relatività della simultaneità)

sembrarono far pensare ad un **soggettivismo filosofico** che vedeva i concetti di spazio e di tempo trasferiti

- dall'oggettività della realtà esterna (**realismo**)
- al soggetto che le osservava (**idealismo**)



2. RELATIVITÀ E OGGETTIVITÀ

La "**Relatività**", nonostante il nome che può trarre in inganno, non aveva niente a che vedere, dunque, con il relativismo filosofico:

al contrario essa era la teoria

- . degli "**invarianti**"
- . delle **leggi** che si presentano nella "**stessa forma**" per tutti gli osservatori (covarianza)

La formulazione nello spazio di Minkowski aveva consentito di evidenziare bene questo risultato già in Relatività ristretta per gli osservatori inerziali

ma Einstein non accontentandosi di questo, volle estendere l'indipendenza delle leggi fisiche a "tutti" gli osservatori, mediante la Relatività generale.

Come egli esplicitamente sosteneva:

Einstein

« La fisica è un tentativo di afferrare concettualmente la realtà, quale la si concepisce indipendentemente dal fatto di essere osservata. In questo senso si parla di "realtà fisica" »

(Schilpp, p. 43)



IV. Questioni SCIENTIFICO-FILOSOFICHE

La "Relatività" ha sollevato, già dal suo apparire, una serie di problemi concettuali che non potevano non avere delle ripercussioni filosofiche.

1. <u>Spazio e tempo</u>	2. <u>Relatività e oggettività</u>	3. <u>Materia e energia</u>
4. <u>Causalità</u>	5. <u>Fisica geometrica / dinamica</u>	6. <u>Fisica locale / globale</u>

1. SPAZIO E TEMPO

La Relatività ristretta aveva sconvolto, anzitutto, i concetti di **spazio e di tempo assoluti di Newton**.

In un primo momento questa "**relativizzazione**"

- delle misure di **lunghezza** (contrazione di Lorentz delle lunghezze)
- e di **tempo** (dilatazione del tempo)
- e del concetto di "**simultaneità**" (relatività della simultaneità)

sembrarono far pensare ad un **soggettivismo filosofico** che vedeva i concetti di spazio e di tempo trasferiti

- dall'oggettività della realtà esterna (**realismo**)
- al soggetto che le osservava (**idealismo**)



3. MATERIA ED ENERGIA

L'altra rivoluzione concettuale della Relatività era legata alla

Equivalenza massa-energia

che

- sembrava **dissolvere la consistenza corporea tradizionale della materia**
- che **poteva essere** addirittura **annichilata**, in certe condizioni fisiche, scomparendo nella fluidità impalpabile dell'energia.

E qui l'equivoco sorgeva dall'identificare

- la **"materialità"**, con
- l'**"impenetrabilità"**

attribuendo quindi all'energia della **radiazione**, che è **compenetrabile**, una sorta di **immaterialità**.

In realtà la "materialità" poteva essere considerata comune

- sia ai **corpi ("impenetrabili")**
- che ai **campi ("compenetrabili")**

entrambi dotati di **massa-energia** e quindi in grado di determinare la **metrica (estensione)** dello spazio-tempo .



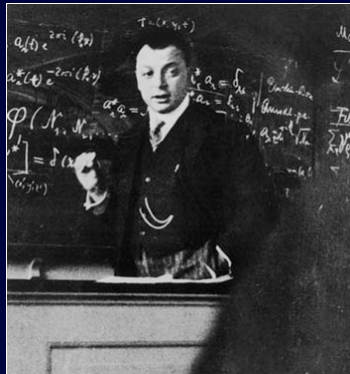
La impenetrabilità e il principio di Pauli

La "impenetrabilità" invece era legata, quantisticamente, al

Principio di Pauli

secondo il quale due particelle (fermioni) identiche di uno stesso sistema non possono occupare lo stesso stato quantico

W. Pauli (1900-1958)



E quindi era proprietà

- . dei campi fermionici e delle loro particelle
- . mentre la "compenetrabilità"

era caratteristica propria dei campi bosonici come quello elettromagnetico e alle loro particelle.



IV. Questioni SCIENTIFICO-FILOSOFICHE

La "Relatività" ha sollevato, già dal suo apparire, una serie di problemi concettuali che non potevano non avere delle ripercussioni filosofiche.

1. <u>Spazio e tempo</u>	2. <u>Relatività e oggettività</u>	3. <u>Materia e energia</u>
4. <u>Causalità</u>	5. <u>Fisica geometrica / dinamica</u>	6. <u>Fisica locale / globale</u>

1. SPAZIO E TEMPO

La Relatività ristretta aveva sconvolto, anzitutto, i concetti di **spazio e di tempo assoluti di Newton**.

In un primo momento questa "**relativizzazione**"

- delle misure di **lunghezza** (contrazione di Lorentz delle lunghezze)
- e di **tempo** (dilatazione del tempo)
- e del concetto di "**simultaneità**" (relatività della simultaneità)

sembrarono far pensare ad un **soggettivismo filosofico** che vedeva i concetti di spazio e di tempo trasferiti

- dall'oggettività della realtà esterna (**realismo**)
- al soggetto che le osservava (**idealismo**)



4 . CAUSALITÀ

Un'altra importante conseguenza relativistica, dal punto di vista filosofico, è legata alla concezione di **causalità**.

Il valore finito e non superabile della velocità della luce e di ogni informazione o trasporto di energia, imposto dalla Relatività, già nella sua forma ristretta,

comporta l'incompatibilità di questa teoria con l'istantaneità dell'effetto su un "bersaglio", prodotto da una causa quando la "sorgente" sia collocata ad una qualche distanza spaziale L

in quanto il "segnale" che trasporta l'informazione causale può viaggiare (al massimo) alla velocità della luce c e impiega, quindi, un tempo L/c a raggiungere il bersaglio.

Ciò equivale all'eliminazione dalla fisica dell'azione istantanea a distanza.

Nell'ambito dei sistemi non separabili della Meccanica quantistica questo modo di intendere la causalità ha portato a **paradossi** (paradosso EPR ad esempio) e problemi per i quali sono state proposte varie soluzioni che ripropongono, in vari modi, il problema della **non-località** e del **rapporto tra il "tutto" e le "parti"** di un sistema, problema presentatosi, più tardi anche nella fisica dei **sistemi complessi** .



IV. Questioni SCIENTIFICO-FILOSOFICHE

La "Relatività" ha sollevato, già dal suo apparire, una serie di problemi concettuali che non potevano non avere delle ripercussioni filosofiche.

1. <u>Spazio e tempo</u>	2. <u>Relatività e oggettività</u>	3. <u>Materia e energia</u>
4. <u>Causalità</u>	5. <u>Fisica geometrica / dinamica</u>	6. <u>Fisica locale / globale</u>

1. SPAZIO E TEMPO

La Relatività ristretta aveva sconvolto, anzitutto, i concetti di **spazio e di tempo assoluti di Newton**.

In un primo momento questa "**relativizzazione**"

- delle misure di **lunghezza** (contrazione di Lorentz delle lunghezze)
- e di **tempo** (dilatazione del tempo)
- e del concetto di "**simultaneità**" (relatività della simultaneità)

sembrarono far pensare ad un **soggettivismo filosofico** che vedeva i concetti di spazio e di tempo trasferiti

- dall'oggettività della realtà esterna (**realismo**)
- al soggetto che le osservava (**idealismo**)



5. FISICA "GEOMETRICA" E FISICA "DINAMICA"




Alla luce delle nuove problematiche, sorte a partire

- .dalla non linearità
- .dalla complessità e
- .dal confronto tra lo statuto epistemologico della fisica in senso tradizionale e della **biologia**, come oggi sta sviluppandosi

l'attenzione sembra spostarsi ormai più

- .sulla **metodologia** alla base della scienza e
- .sul **"modo"** della sua **matematizzazione**

Ci troviamo di fronte a due tendenze:

- .l'una che conduce a **"ridurre la fisica a geometria"** di uno spazio-tempo arricchito nel numero delle sue dimensioni, interpretate con vari significati fisici, e
- .l'altra che conduce a **diversificare i ruoli dello spazio e del tempo** in una prospettiva **"dinamica"** nella quale entrano in gioco
 - .gli effetti della forte sensibilità alle condizioni iniziali, l'instabilità, la caoticità e comunque **l'asimmetria (freccia) del tempo** e
 - .**l'irreversibilità termodinamica** dei sistemi in non equilibrio, tipica della complessità e del mondo biologico.   

Dinamicità emergente

Certamente la **Relatività**, e le teorie di campo che si basano su di essa

- .rispecchiano la prima **tendenza geometrizzante**
- .anche a causa del loro carattere di completa **reversibilità spazio-temporale**

Rimane, comunque il fatto che, anche in una visione spazio-temporale geometrizzata, esiste un **invariante che ha carattere temporale assoluto**, quale è

il **tempo proprio**

- .sia esso quello **cosmologico** dovuto all'espansione dell'universo nel suo insieme
- .sia quello legato al **moto di ciascun corpo** nell'universo.

Ed è rispetto a questo tempo proprio che l'irreversibilità termodinamica e il caos possono essere introdotti ristabilendo il **carattere dinamico della teoria**.

Se **Einstein** aveva ammirato quella **geometrizzazione statica e rigidamente deterministica** che lo avvicinava alla visione di Cartesio e di Spinoza, tuttavia sarà proprio la cosmologia costruita a partire dalla **Relatività generale** da Lemaître e Friedmann a convincerlo della presenza di una **dinamicità dell'universo** stesso, che si manifesta almeno attraverso la sua **espansione**.



IV. Questioni SCIENTIFICO-FILOSOFICHE

La "Relatività" ha sollevato, già dal suo apparire, una serie di problemi concettuali che non potevano non avere delle ripercussioni filosofiche.

1. <u>Spazio e tempo</u>	2. <u>Relatività e oggettività</u>	3. <u>Materia e energia</u>
4. <u>Causalità</u>	5. <u>Fisica geometrica / dinamica</u>	6. <u>Fisica locale / globale</u>

1. SPAZIO E TEMPO

La Relatività ristretta aveva sconvolto, anzitutto, i concetti di **spazio e di tempo assoluti di Newton**.

In un primo momento questa "**relativizzazione**"

- delle misure di **lunghezza** (contrazione di Lorentz delle lunghezze)
- e di **tempo** (dilatazione del tempo)
- e del concetto di "**simultaneità**" (relatività della simultaneità)

sembrarono far pensare ad un **soggettivismo filosofico** che vedeva i concetti di spazio e di tempo trasferiti

- dall'oggettività della realtà esterna (**realismo**)
- al soggetto che le osservava (**idealismo**)



6. FISICA "LOCALE" E FISICA "GLOBALE" (oltre il Riduzionismo)

Quello che ancora si può forse aggiungere, a conclusione di queste osservazioni, è il fatto che

La scienza odierna sta cercando di superare il classico metodo del riduzionismo

che appare ormai insufficiente a far progredire la conoscenza scientifica della natura.

Per la fisica, in prima istanza almeno, ciò sembra significare la necessità di **non limitarsi a teorie rette da**

equazioni "lineari"

. per le quali

. la somma di due soluzioni è ancora una soluzione e quindi

. il "tutto" viene ottenuto come somma delle "parti"

E la Relatività generale è stata la prima teoria

Einstein

« a esigere che la legge invariante più semplice non sia lineare né omogenea nelle variabili di campo e nelle loro derivate »

(Schilpp, p. 41)



Un mateamtica "non locale" ?

Tuttavia essa è ancora, in qualche modo una **teoria locale** nel senso che, facendo uso della **geometria differenziale** la struttura di spazio vettoriale che utilizza è necessariamente locale, basata, cioè sul fatto che

nell'intorno di un punto ogni spazio viene approssimato da uno spazio lineare

così come **una curva** viene approssimata dalla sua tangente, **una superficie dal piano tangente in quel punto** .

E questa limitazione consente alla Relatività generale di stabilire il principio di equivalenza solamente in una

Einstein

« piccola estensione spaziale »

(Schilpp, p. 34)

e non su grande scala, come avrebbe voluto Mach.

Ma questo non è tanto un limite proprio della Relatività quanto **una caratteristica di tutta la matematica che si basa sul calcolo differenziale e integrale che è per sua natura riduzionistico** . Ma, per ora, non possediamo ancora una matematica diversa e non sappiamo ancora neppure se in futuro potremo disporne.



IV. Questioni SCIENTIFICO-FILOSOFICHE

La "Relatività" ha sollevato, già dal suo apparire, una serie di problemi concettuali che non potevano non avere delle ripercussioni filosofiche.

1. <u>Spazio e tempo</u>	2. <u>Relatività e oggettività</u>	3. <u>Materia e energia</u>
4. <u>Causalità</u>	5. <u>Fisica geometrica / dinamica</u>	6. <u>Fisica locale / globale</u>

1. SPAZIO E TEMPO

La Relatività ristretta aveva sconvolto, anzitutto, i concetti di **spazio e di tempo assoluti di Newton**.

In un primo momento questa "**relativizzazione**"

- delle misure di **lunghezza** (contrazione di Lorentz delle lunghezze)
- e di **tempo** (dilatazione del tempo)
- e del concetto di "**simultaneità**" (relatività della simultaneità)

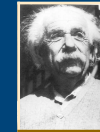
sembrarono far pensare ad un **soggettivismo filosofico** che vedeva i concetti di spazio e di tempo trasferiti

- dall'oggettività della realtà esterna (**realismo**)
- al soggetto che le osservava (**idealismo**)





RELATIVITÀ - Albert Einstein (1879-1955)



Presentazioni

I - La teoria della Relatività ristretta

II - La teoria della Relatività generale

III - La ricerca dell' unificazione

IV - Questioni scientifico-filosofiche

La Relatività si è sviluppata secondo due tappe successive che costituiscono, anche dal punto di vista epistemologico due teorie vere e proprie:

- . la teoria della RELATIVITÀ "RISTRETTA" (o "speciale", o "particolare") e
- . la teoria della RELATIVITÀ "GENERALE"

La seconda, tuttavia, non può essere intesa come una semplice estensione della prima: la costruzione delle due teorie, infatti, fu guidata da
due EPISTEMOLOGIE molto diverse

Bibliografia

1. **A. Einstein**, "Il significato della relatività ", Einaudi, Torino 1950 e Newton-Compton, Roma 1997
2. **A. Einstein e L. Infeld**, "L'evoluzione della fisica", Boringhieri, Torino 1965 e 1999
3. **A. Einstein**, "Relatività: esposizione divulgativa", Einaudi, Torino 1950 e Boringhieri, Torino 1967
4. **W. Pauli**, "Teoria della relatività , Boringhieri", Torino 1958
5. **P.A. Schilpp (a cura di)**, "Albert Einstein scienziato e filosofo, Boringhieri", Torino 1958
6. **P.W. Bridgman**, "La logica della fisica moderna", Boringhieri, Torino 1965
7. **D.W. Sciama**, "L' unità dell' universo", Einaudi, Torino 1965
8. **M. Jammer**, "Storia del concetto di spazio", Feltrinelli, Milano 1966
9. **M. Born**, "La sintesi einsteiniana", Boringhieri, Torino,1969
10. **D.W. Sciama**, "La Relatività Generale. Fondamenti Fisici della teoria", Zanichelli, Bologna 1972
11. **E. Mach**, "La meccanica nel suo sviluppo storico-critico" (1883), Boringhieri, Torino 1977
12. **H. Reichenbach**, "Filosofia dello spazio e del tempo", Feltrinelli, Milano 1977
13. **A. Einstein**, "Autobiografia scientifica", Boringhieri, Torino 1979
14. **M. Jammer**, "Storia del concetto di massa", Feltrinelli, Milano 1980
15. **E. Cassirer**, "La teoria della relatività di Einstein. Considerazioni gnoseologiche", Newton Compton, Roma 1981
16. **G. Cortini**, "La Relatività Ristretta" (con nota storica di S. Bergia), Loescher Editore, Torino 1981
17. **A. Pais**, "Sottile è il Signore... La scienza e la vita di Albert Einstein", Bollati-Boringhieri, Torino 1986
18. **A. Einstein**, "Opere scelte", a cura di E. Bellone, Bollati-Boringhieri, Torino 1988
19. **A. Brissoni**, "L'epistemologia di Albert Einstein", Gangemi Editore, Roma 1991
20. **A. Einstein**, "Come io vedo il mondo (1922-1934)", Newton Compton, Roma 1993
21. **P. Greco**, "Il sogno di Einstein", Cuen, Napoli, 2000
22. **L. Kostro**, "Einstein e l'etere - Relatività e teoria del campo unificato", Dedalo, Bari 2001
23. **A. Strumia**, voce *Relatività* , in "[Dizionario Interdisciplinare di Scienza e Fede](#)", a cura di G. Tanzella-Nitti e A. Strumia, Città Nuova e Urbaniana University Press, Roma 2002

