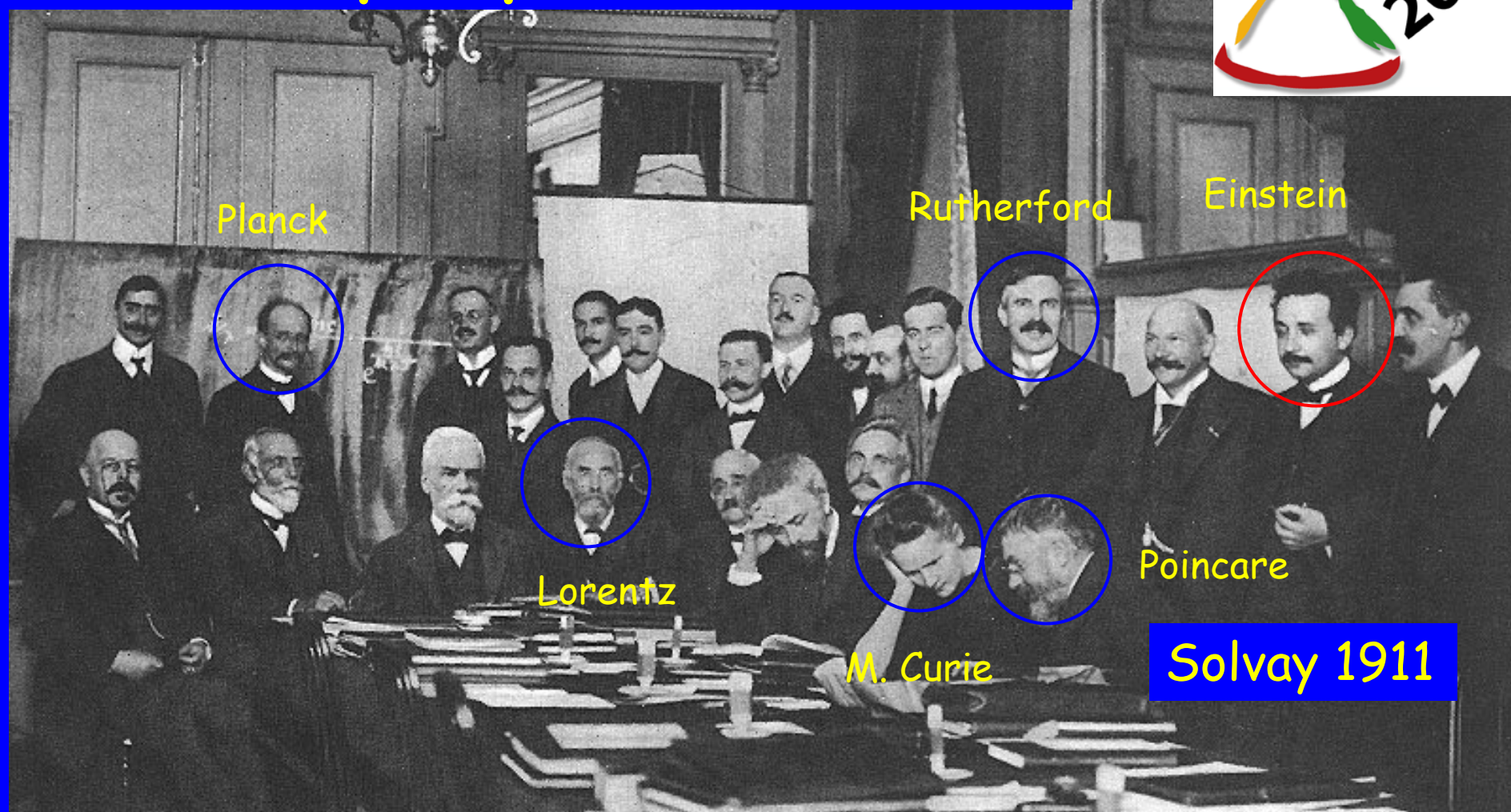


Claudio Cereda marzo 2005 - La relatività: da dove viene e cosa dice?

Perché proprio il 2005?



GOLDSCHMIDT
NERNST

PLANCK
BRILLOUIN

RUBENS
SOMMERFELD
SOLVAY

LINDEMANN
M. DE BROGLIE
LORENTZ

HASENOHRL
HOSTELET
KNUDSEN
WARBURG
PERRIN

HERZEN
WIEN
Madame CURIE

JEANS
RUTHERFORD
POINCARÉ

KAMERLINGH ONNES

EINSTEIN

LANGEVIN



Perché proprio il 2005?

I padri della meccanica quantistica

Quelli di prima

E in mezzo Einstein

Solvay 1927

A. PICCARD	E. HENRIOT	P. EHRENFEST	Ed. HERZEN	Th. DE DONDER	E. SCHRÖDINGER	E. VERSCHAFFELT	W. PAULI	W. HEISENBERG	R.H. FOWLER	L. BRILLOUIN
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W.L. BRAGG	H.A. KRAMERS	P.A.M. DIRAC	A.H. COMPTON	L. de BROGLIE	M. BORN		N. BOHR	
I. LANGMUIR	M. PLANCK	Mme CURIE	H.A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	Ch.E. GUYE	C.T.R. WILSON	O.W. RICHARDSON		



1905 anno mirabile

17 marzo 1905: un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce

fotoni

30 aprile 1905: una nuova determinazione delle dimensioni molecolari

Numero di Avogadro

11 maggio 1905: il moto delle particelle in sospensione nei fluidi in quiete come previsto dalla teoria cinetica molecolare del calore

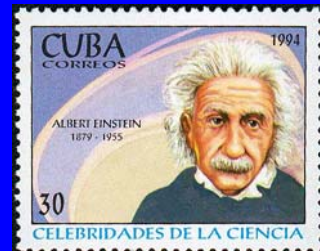
Relatività speciale

giugno 1905: l'elettrodinamica dei corpi in movimento

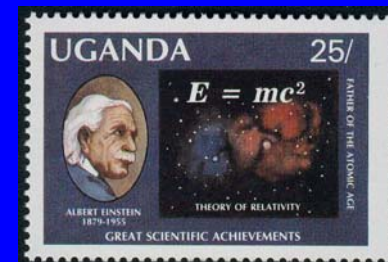
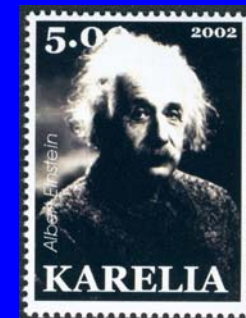
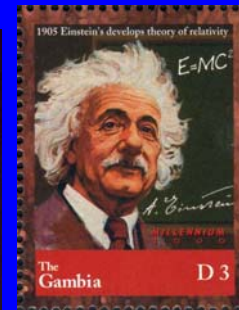
settembre 1905: l'inerzia di un corpo in movimento dipende dal suo contenuto di energia?

Dinamica relativistica

Perché Einstein è così importante per la cultura del 900?



Einstein semplificato

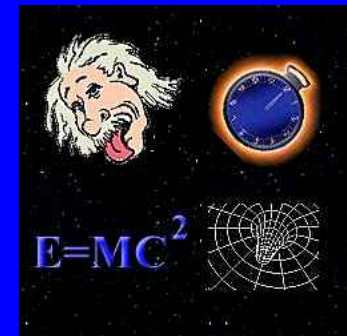
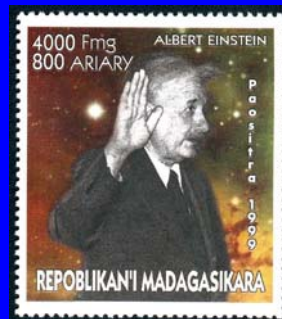


Perché pensava in grande Perché ha inventato la fisica teorica

Perché era rivoluzionario e un po' matto

Perché ha messo al centro della fisica la bellezza, la semplicità logica, i principi come strumenti di unificazione

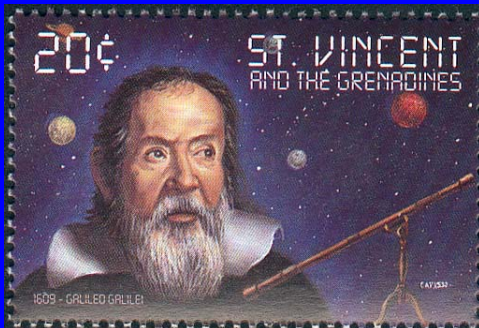
Esempio: ero ragazzo e mi chiedevo ma se un osservatore viaggia alla velocità della luce vede un'onda stazionaria. Che mondo sarebbe mai questo?



meccanica $\Leftrightarrow$ elettromagnetismo

generalità località

La meccanica di Galilei Newton



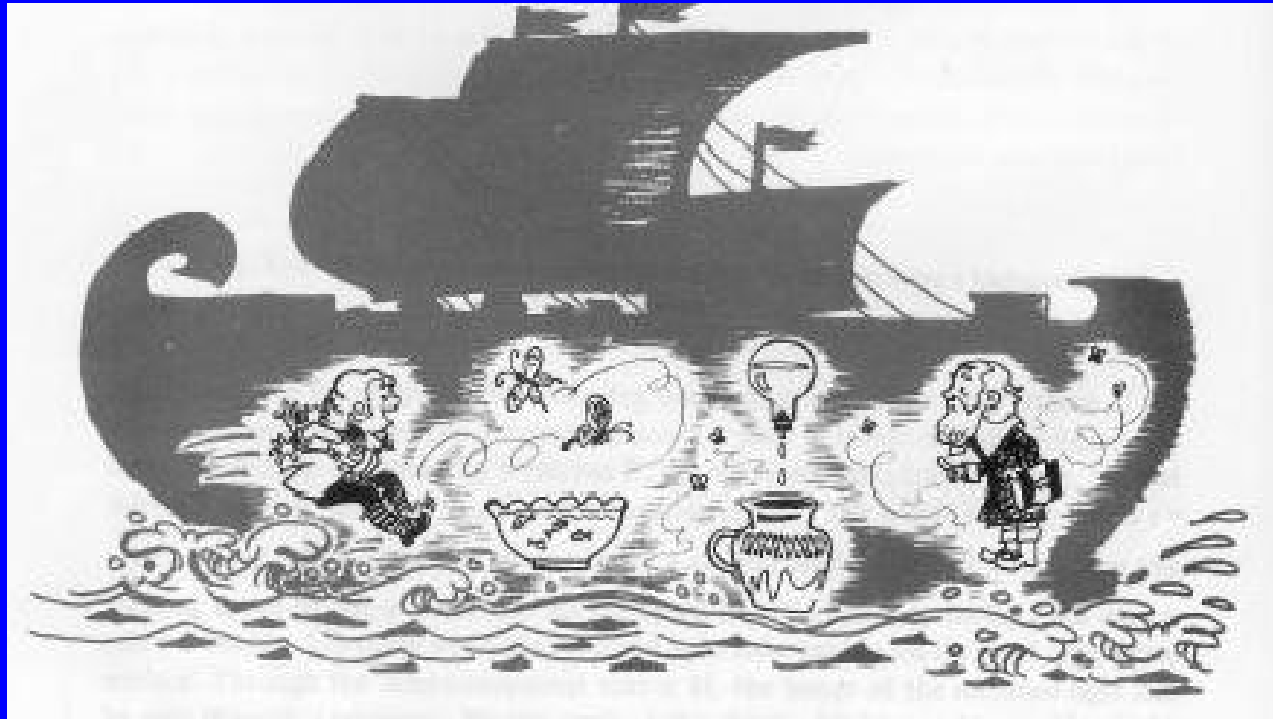
Principio di inerzia e
definizione di un sistema
di riferimento particolare



Cos'è un sistema di riferimento: chiarimenti terminologici

Se esiste un sistema inerziale ne esistono infiniti

Cosa dice la relatività galileiana?



Insetti volanti

Gocce che cadono

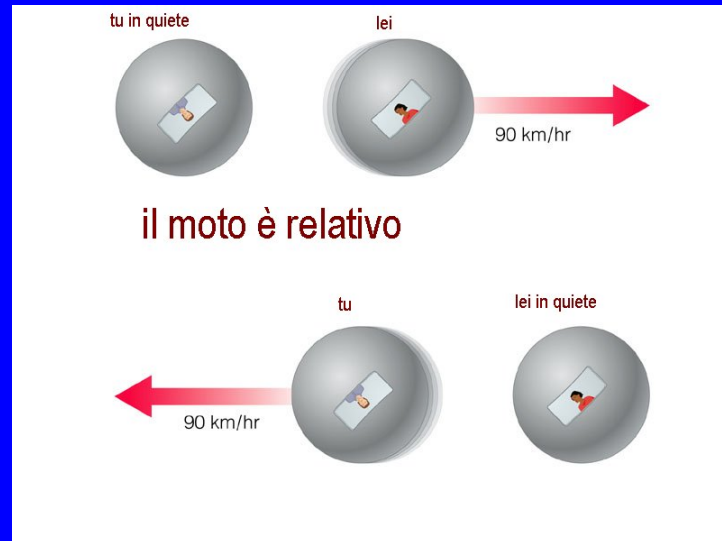
Persone che
saltano

Pesci che nuotano

Il fumo

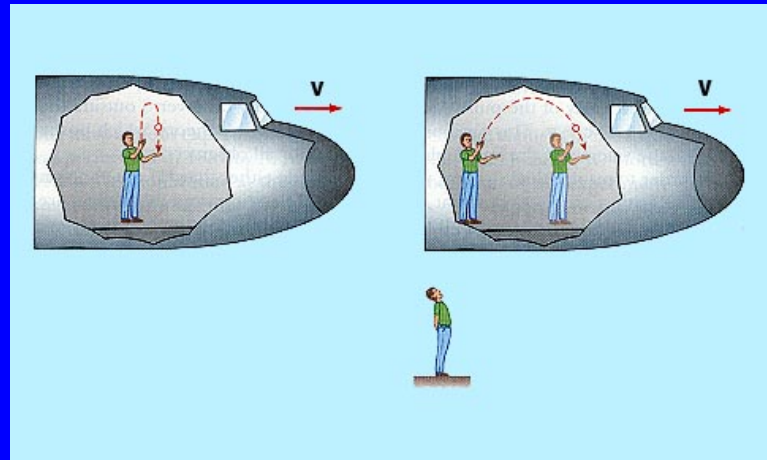
Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave ...

Per gli osservatori inerziali la fisica è una sola



Il moto è relativo e non assoluto

Se mi trovo nel vuoto e siamo solo in due non posso dire chi si sta muovendo

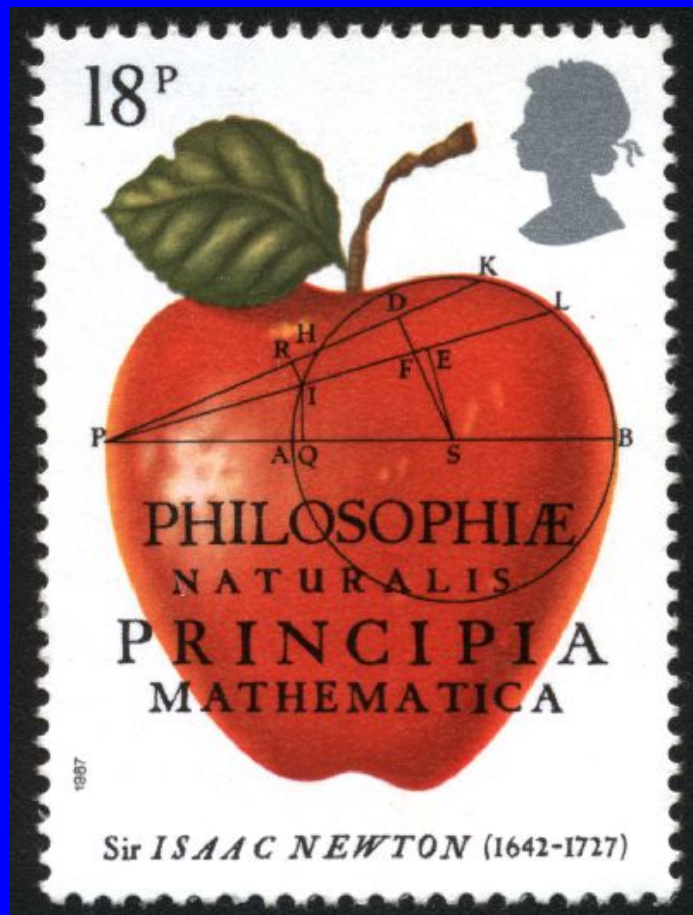


Se faccio degli esperimenti da terra o sull'aereo ottengo gli stessi risultati.

In due sistemi inerziali si vedono le stesse accelerazioni

Newton non la pensava così

Noi usiamo lo spazio e il tempo relativi ma essi sono il nostro modo per avvicinarci allo spazio e al tempo assoluti



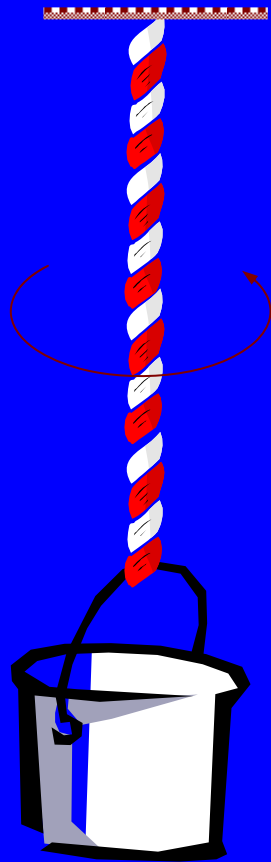
bisogna distinguere il tempo, lo spazio il luogo e il moto in *assoluti e relativi, veri e apparenti, matematici e comuni*.

Il tempo assoluto vero e matematico senza alcuna relazione a niente di esteriore, scorre uniformemente e si chiama *durata*. Il tempo relativo apparente e comune è la misura sensibile ed esterna di una parte di una qualsiasi durata (uguale o ineguale) derivata dalla considerazione di moti, e tali sono le misure *delle ore, dei giorni, dei mesi*, di cui generalmente ci si serve al posto del tempo vero.

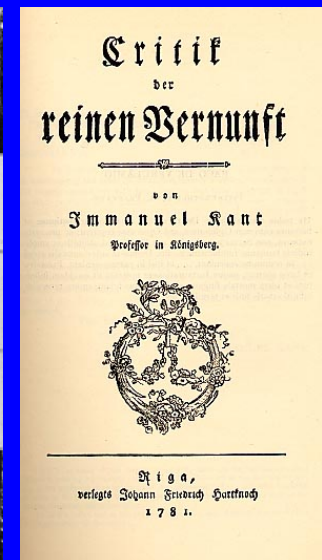
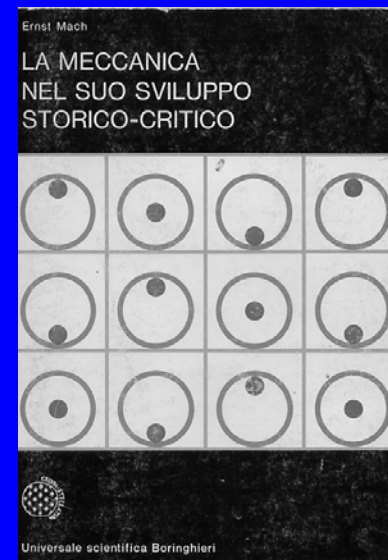
Esperimento del secchio rotante

Il menisco è diverso se ruota l'acqua rispetto al secchio o il secchio rispetto all'acqua. Nel primo caso la rotazione è assoluta

La cosa rimane sullo sfondo perché la meccanica funziona bene nel sistema di riferimento delle stelle fisse



Ma Mach, prima di Einstein, demolirà questa impostazione



Due libri che hanno formato il giovane Einstein tra i 16 e i 18 anni

Le equazioni di Maxwell



And God said:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

And there was light.

Teorema di Gauss

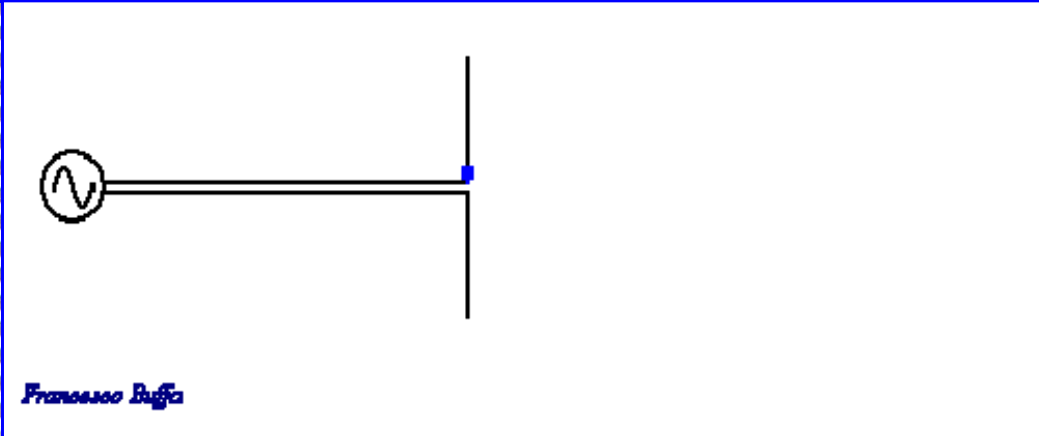
Legge di Faraday

Legge di Ampere Maxwell

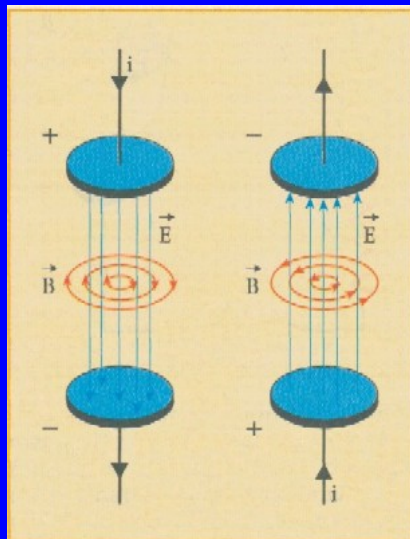
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Chi sono ϵ e μ ai tempi di Maxwell?

Ecco a voi le onde di Maxwell

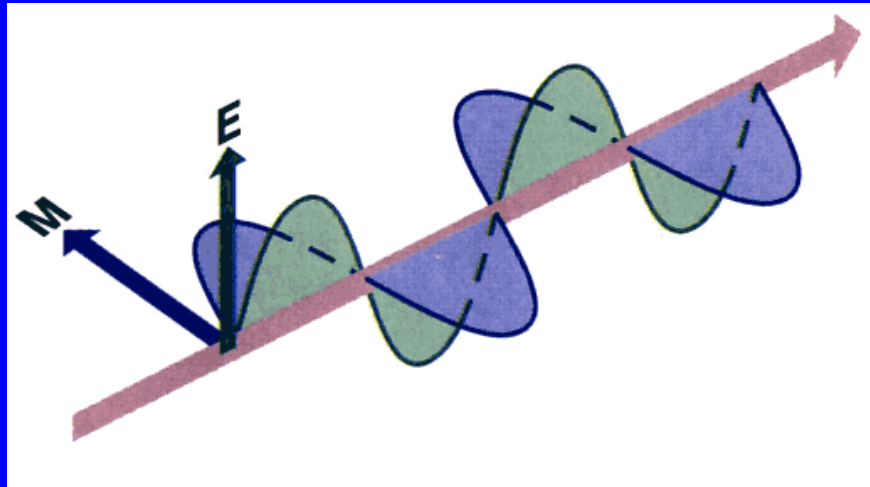


Hertz tra il 1885 e il 1889 prova che le onde elettromagnetiche esistono, si possono generare e hanno le caratteristiche previste nella teoria di Maxwell



Due parole sulla simmetria e sui rapporti tra concetti, esperienza, matematica ed eleganza formale

Ma le equazioni valgono in un solo riferimento

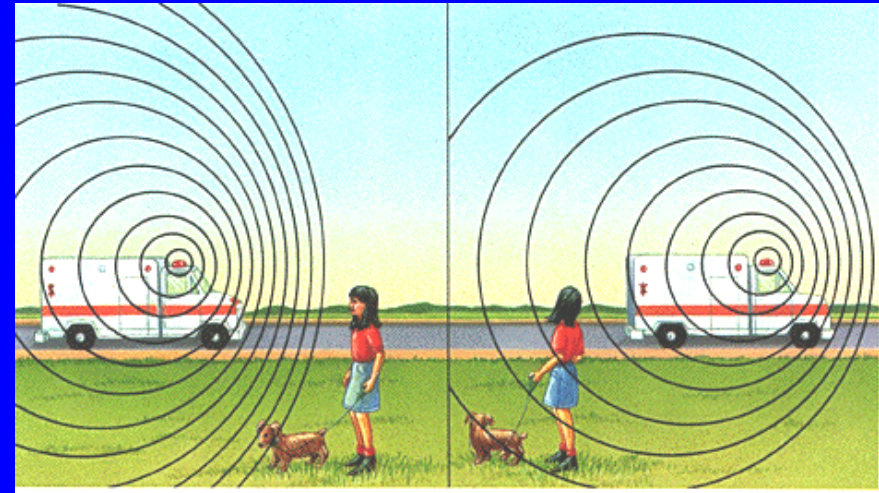
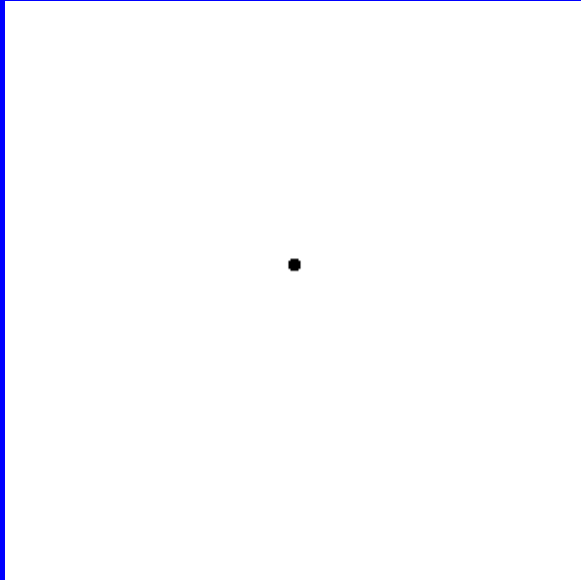


Il valore previsto dalla teoria corrisponde alla velocità della luce nel vuoto. Ma in quale sistema di riferimento?

Anche le onde meccaniche hanno una velocità che non dipende dal moto della sorgente: ma c'è il mezzo

Sta per nascere l'**etere**: il mezzo delle onde elettromagnetiche

Una digressione sulle onde: l'effetto Doppler



Se il suono viaggia a 340 m/s quando la sorgente è in moto rispetto al mezzo sento un brusco cambio di tono

$$v' = v / (1 - \beta)$$

$$\beta = v_{\text{sor}} / v_{\text{onda}}$$

Se mi muovo io invece della sorgente succede qualcosa di simile anche se non esattamente identico

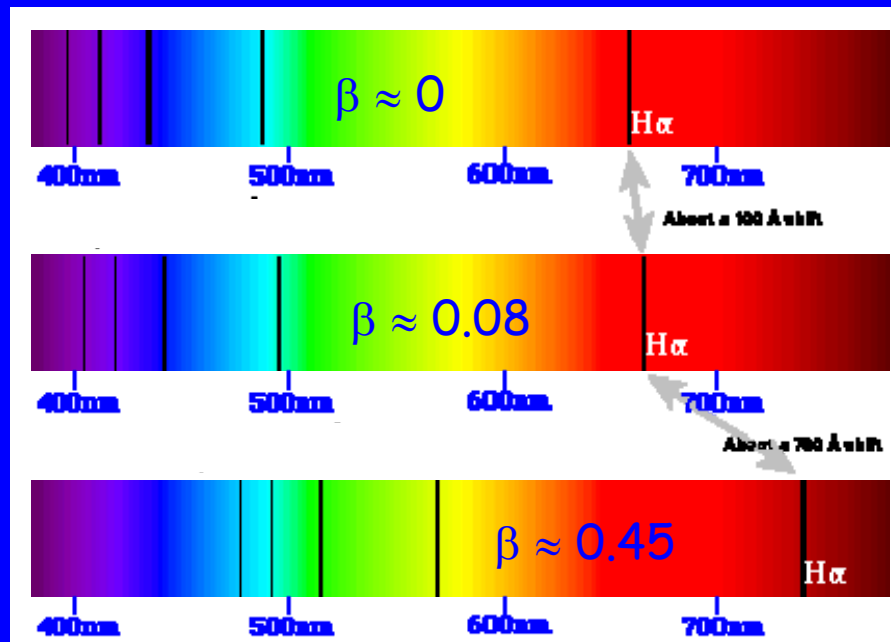
$$v' = v (1 + \beta)$$

Esempio di effetto del II ordine $1 + \beta \approx 1 / (1 - \beta)$ a meno di β^2

Una digressione sulle onde: l'effetto Doppler

Ma con la luce **questa asimmetria non può esistere** perché non c'è il mezzo e può esistere solo **moto relativo** tra sorgente ed osservatore

Il fenomeno è spiegato dalla **teoria della relatività** e produce il **red shift** nello spettro delle galassie



$$v' = v \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

Dalla misura dello spostamento si risale alla velocità e da essa alla distanza (**universo in espansione**)

I fisici di fine 800 di fronte a un dilemma

Un mezzo ci vuole: chiamiamolo *etere*

È solido (onde trasversali)

E la terra come si trova rispetto all'*etere*?

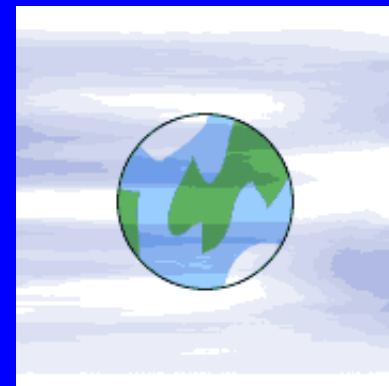
E' molto denso ed elastico
(velocità)

E' imponderabile



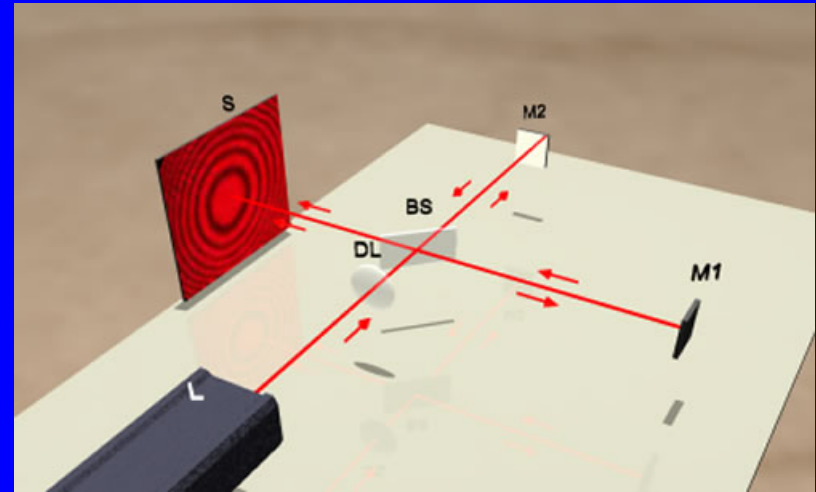
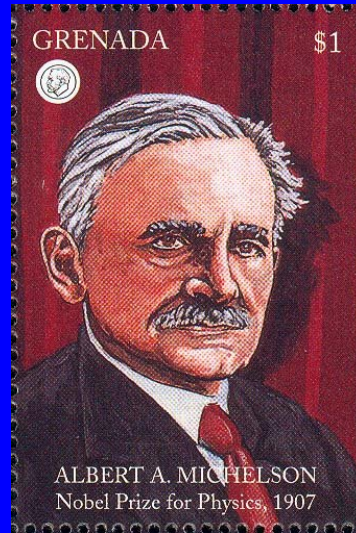
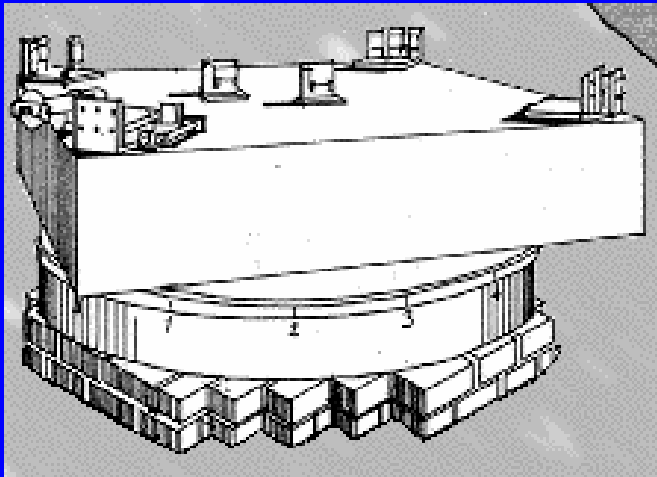
Se la Terra è immobile rispetto all'*etere* allora *aveva ragione la santa inquisizione*

Le equazioni di Maxwell non si discutono



Meglio dire che *deve esistere un vento d'etere* misurabile

Alla ricerca del vento d'etere

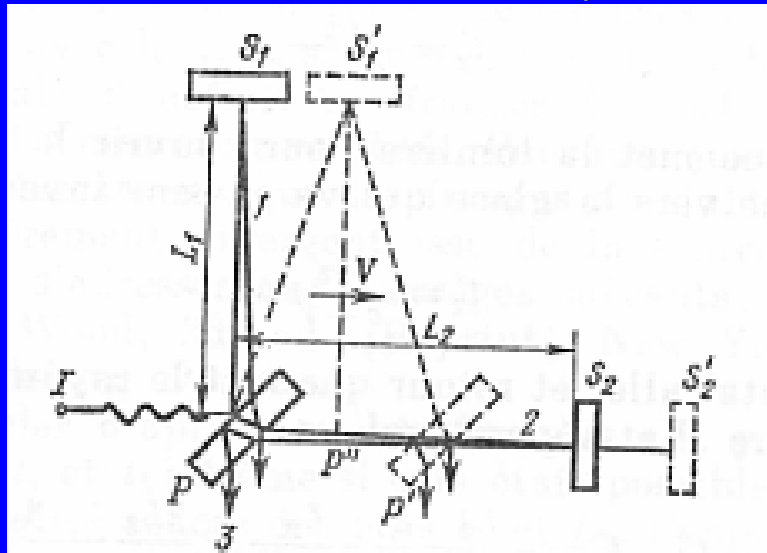


Sono esperimenti molto raffinati perché per vedere il vento d'etere bisogna tener conto che la **massima velocità di allora è 30 km/s**

Michelson prende il premio Nobel nel 1907 ma il **vento d'etere non si vede**; il suo strumento servirà per misure precise di lunghezza

Lorenz costruisce una teoria che spiega che non si vede perché il moto farebbe contrarre i bracci dell'interferometro

L'esperimento di Michelson



La composizione con il moto nell'etere dovrebbe sfasare i due fotoni e farli interferire. Se si ruota di 90° l'apparato i ruoli si invertono e le frange si spostano.

Va così se l'etere esiste; ma non si vede nulla nonostante la sensibilità strumentale

Lorentz per spiegare l'insuccesso ipotizza che i corpi rigidi in moto si contraggano

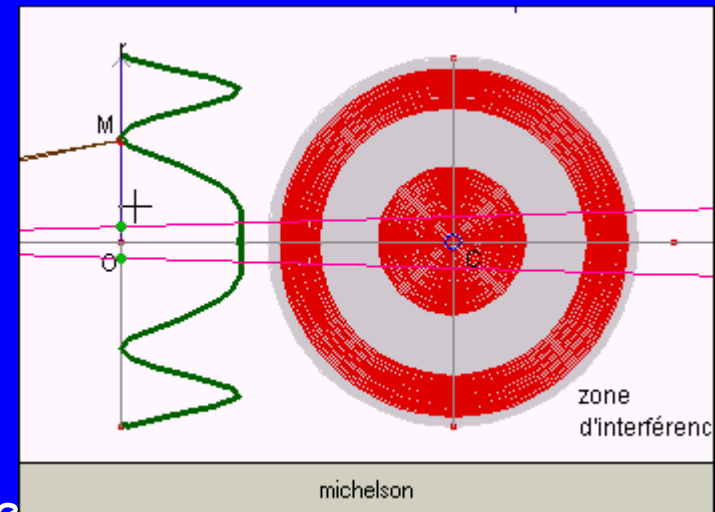


TABELLA 1-2 Basi sperimentali della teoria della relatività ristretta.

Teoria		Esperimenti di propa- gazione della luce							Esperimenti in altri campi					
		Aberrazione	Coefficiente di convezione di Fizean	Michelson-Morley	Kennedy-Thorndike	Sorgenti e specchi in moto	Stelle doppie di De Sitter	Michelson-Morley, con luce solare	Variazione della massa colla velocità	Equivalenza generale di massa e energia	Radiazione da cariche in movimento	Decadimento dei mesoni di alte velocità	Trouton-Noble	Induzione unipolare con magneti permanenti
Teorie dell'etere	Etere stazionario, nessuna contrazione	A	A	D	D	A	A	D	D	N	A	N	D	D
	Etere stazionario, contrazione di Lorentz	A	A	A	D	A	A	A	A	N	A	N	A	D
	Etere connesso ai corpi ponderabili	D	D	A	A	A	A	A	D	N	N	N	A	N
Teorie emissive	Sorgente d'origine	A	A	A	A	A	D	D	N	N	D	N	N	N
	Balistica	A	N	A	A	D	D	D	N	N	D	N	N	N
	Nuova sorgente	A	N	A	A	D	D	A	N	N	D	N	N	N
Teoria ristretta della relatività		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Leggenda A, la teoria è in accordo coi risultati sperimentali
D, la teoria è in disaccordo coi risultati sperimentali
N, la teoria non è applicabile all'esperimento

Esperimenti e teorie in competizione

esperimento	anno	att	mis
Michelson	1881	0.04	0.02
Michelson + Morley	1887	0.4	0.01
Morley + Morley	1902-04	1.13	0.015
Miller	1921	1.12	0.08
Miller	1923-24	1.12	0.03
Miller (Sunlight)	1924	1.12	0.014
Tomascheck (Starlight)	1924	0.3	0.02
Miller	1925-26	1.12	0.088
Kennedy (Mt. Wilson)	1926	0.07	0.002
Ilingworth	1927	0.07	0.0002
Piccard + Stahel(Mt.Rigi)	1927	0.13	0.006
Michelson et al.	1929	0.9	0.01
Joos	1930	0.75	0.002

Albert Einstein α 1879 Ω 1955



1889 inizia a leggere Kant

1891-1895 studia da solo l'analisi

1895 lascia il liceo di Monaco e tenta Zurigo senza successo

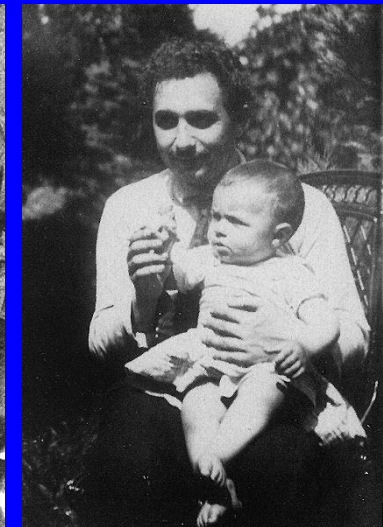
1896 rinuncia alla cittadinanza tedesca (apolide per 6 anni); si diploma ad Arau e si iscrive al Politecnico

1900 si laurea bene, ma non riesce a restare come assistente

1903 sposa M. Maric, compagna di studi; nasce la Accademia Olimpia; lavora all'ufficio brevetti di Berna

1904 nasce Hans Albert 1905

1906 teoria quantistica dei calori specifici



Albert Einstein α 1879 Ω 1955



1907 principio di equivalenza

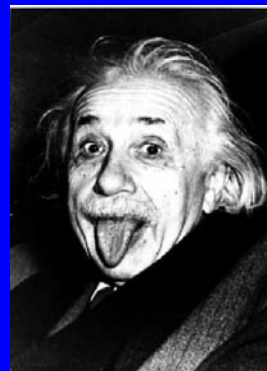
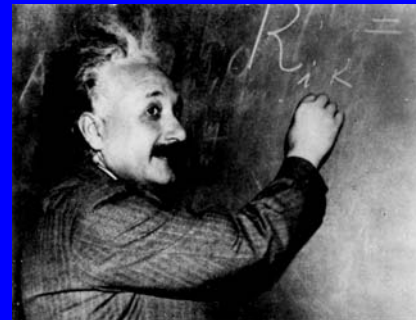
1909 corpo nero rivisitato,
docente universitario

1911 docente a Praga,
incurvamento dei raggi di luce

1912 - 1915 relatività generale Berlino

1919 spedizione di Eddington; Einstein
diventa famoso

1922 premio Nobel per la fisica teorica in
particolare per l'effetto fotoelettrico



Albert Einstein α 1879 Ω 1955

I tentativi non riusciti

Trasformare la meccanica quantistica in una teoria che rispettasse la causalità e la località

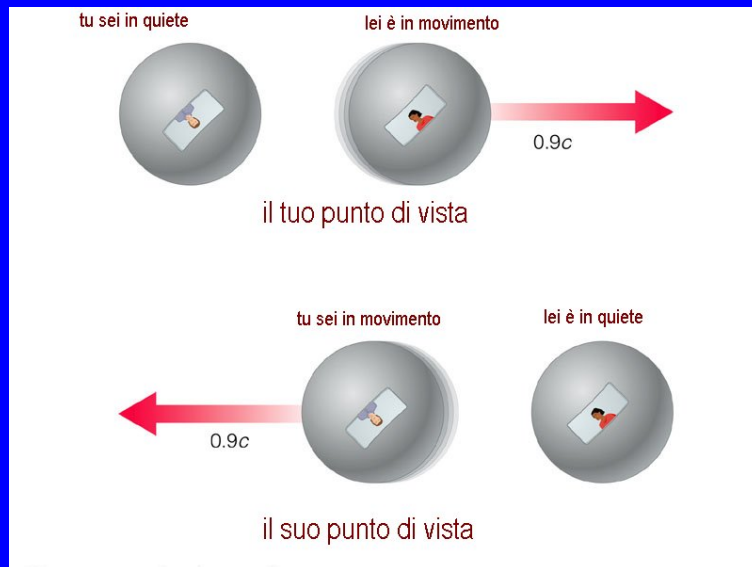
Costruire una teoria unificata della gravitazione e dell'elettromagnetismo: precursore delle teorie di gauge

La proposta di Einstein?



Si ammettono due principi: **primo**

Principio di relatività: le leggi dell'elettromagnetismo e non solo quelle della meccanica sono le stesse per sistemi di riferimento in moto relativo



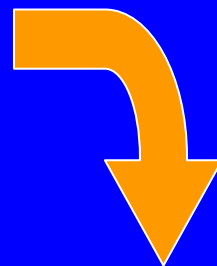
non gli piace

che ci siano 2 teorie in contrasto

la asimmetria sul moto dell'elettromagnetismo

l'etere

Gli piace una fisica dei principi



Non ci può essere mai contrasto nel modo in cui due osservatori in moto relativo inerziale vedono il mondo



È noto che l'elettrodinamica di Maxwell - così come essa è oggi comunemente intesa - conduce, nelle sue applicazioni a corpi in movimento, ad asimmetrie che non sembrano conformi ai fenomeni. Si pensi ad esempio alle interazioni elettrodinamiche tra un magnete e un conduttore. Laddove la concezione usuale contempla due casi nettamente distinti, a seconda di quale dei due corpi sia in movimento, il fenomeno osservabile dipende, in questo caso, solo dal moto relativo di magnete e conduttore.

Infatti, se si muove il magnete e rimane stazionario il conduttore si produce, nell'intorno del magnete, un campo elettrico con una ben determinata energia, il quale genera una corrente nei luoghi ove si trovano parti del conduttore.

Se viceversa il magnete resta stazionario e si muove il conduttore, non nasce, nell'intorno del magnete, alcun campo elettrico; tuttavia si osserva, nel conduttore, una forza elettromotrice, alla quale non corrisponde, di per sé, un'energia, ma che - supponendo che il moto relativo sia lo stesso nei due casi - genera correnti elettriche della stessa intensità di quelle prodotte dalle forze elettriche nel caso precedente, e che hanno lo stesso percorso.

Esempi come questo, come pure i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al « mezzo luminifero » suggeriscono che i fenomeni elettrodinamici, al pari di quelli meccanici, non possiedono proprietà corrispondenti all'idea di quiete assoluta.

Essi suggeriscono piuttosto che, come già è stato mostrato in un'approssimazione al primo ordine, per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni della meccanica varranno anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche.

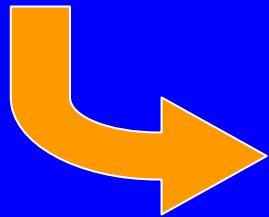
Eleveremo questa congettura (il contenuto della quale verrà detto, in quanto segue, « principio di relatività ») al rango di postulato

La proposta di Einstein?

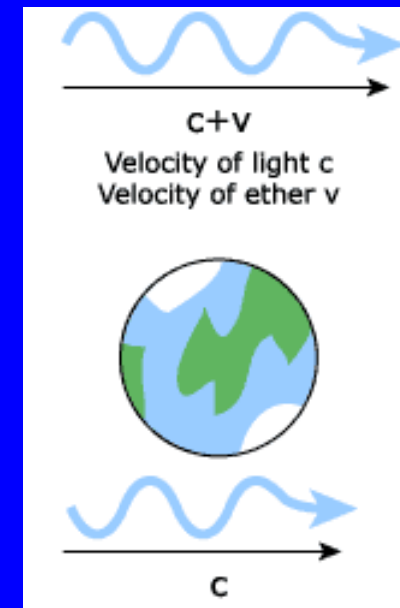


Si ammettono due principi: **secondo**

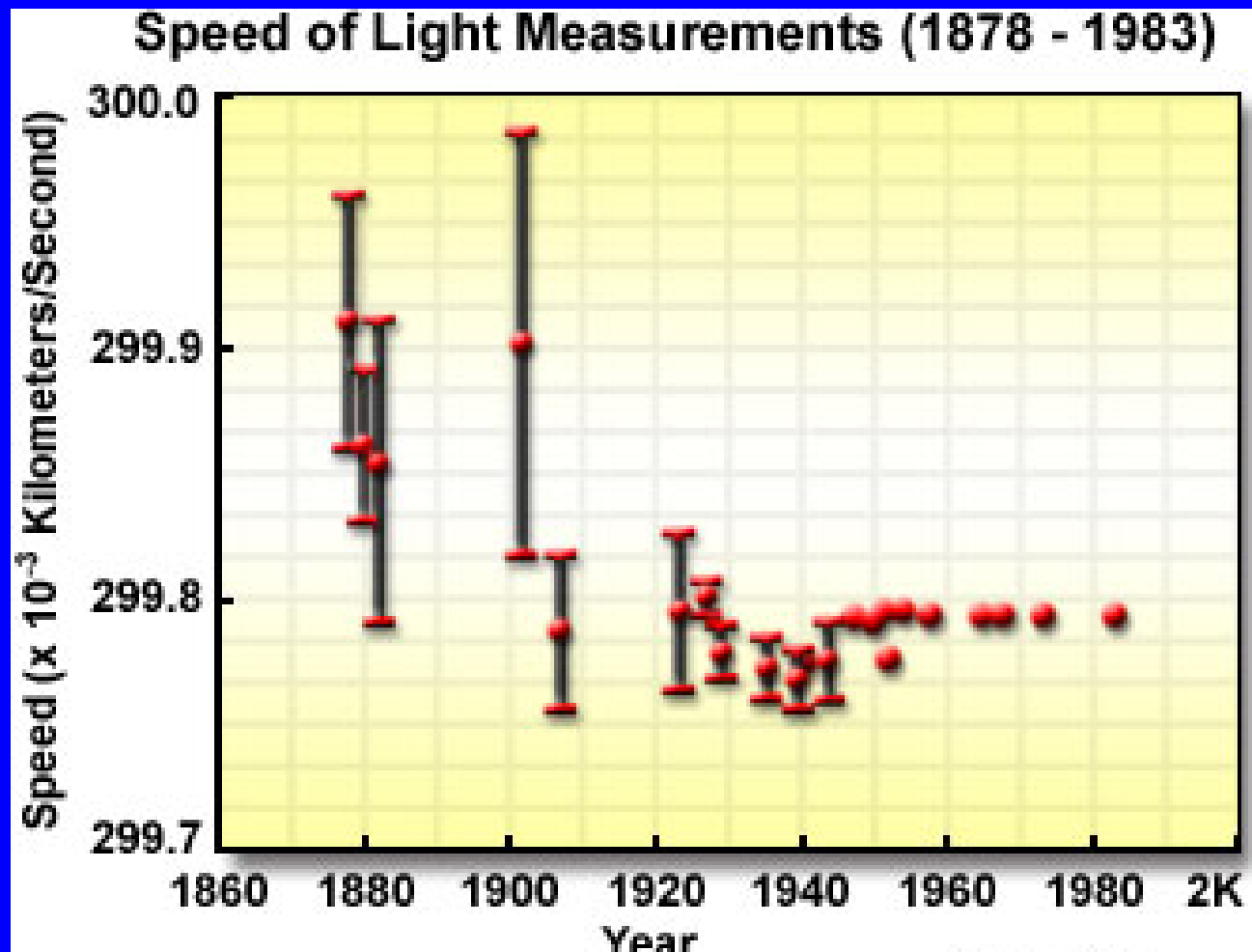
Principio di costanza della velocità della luce: la velocità della luce nel vuoto è la stessa per tutti gli osservatori



Sembra una cosa innocente **ma ne discendono conseguenze pesanti**



Cosa sappiamo della velocità della luce?



Ecco perché oggi definiamo il secondo attraverso la frequenza della luce emessa dagli atomi e il metro attraverso il percorso della luce in un dato tempo.

$$c = 299'792'458 \text{ m/s}$$

supporremo inoltre - un postulato, questo, solo apparentemente incompatibile col precedente - che la luce, nello spazio vuoto, si propaghi sempre con una velocità determinata, e, che non dipende dallo stato di moto del corpo che la emette.

Questi due postulati bastano per giungere a una teoria elettrodinamica dei corpi in movimento, semplice e coerente, fondata sulla teoria di Maxwell per i corpi stazionari.

L'introduzione di un « etere luminifero » si manifesterà superflua, tanto più che la concezione che qui illustreremo non avrà bisogno di uno « spazio assolutamente stazionario » corredato di particolari proprietà, né di un vettore velocità assegnato a un punto dello spazio vuoto nel quale abbiano luogo processi elettromagnetici.

La nostra teoria si basa - come tutta l'elettrodinamica - sulla cinematica del corpo rigido: infatti gli enunciati di una qualsiasi teoria di questo tipo riguardano i rapporti fra corpi rigidi (sistemi di coordinate), orologi e processi elettromagnetici. La non sufficiente considerazione di questa circostanza è la radice delle difficoltà con le quali si scontra, oggi, l'elettrodinamica dei corpi in moto.

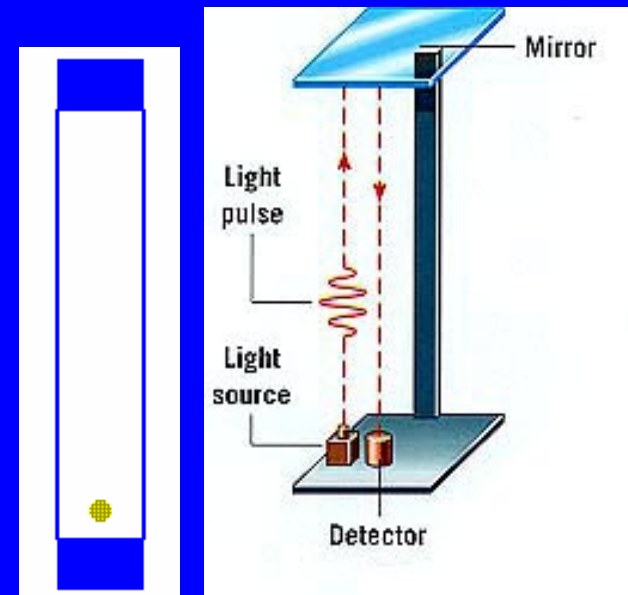
Che natura hanno i due principi?

Primo: la conoscenza deve essere universale; è un principio metafisico

Secondo: ci abbiamo provato; ma il vento d'etere non si è visto

Si riparte dalla cinematica: nessun problema per i corpi rigidi con i quali assegniamo le coordinate spaziali **ma per il tempo ci sono dei problemi**

Gli orologi ? Facciamoli a luce, avremo la garanzia che sono tutti uguali





La simultaneità è un concetto relativo

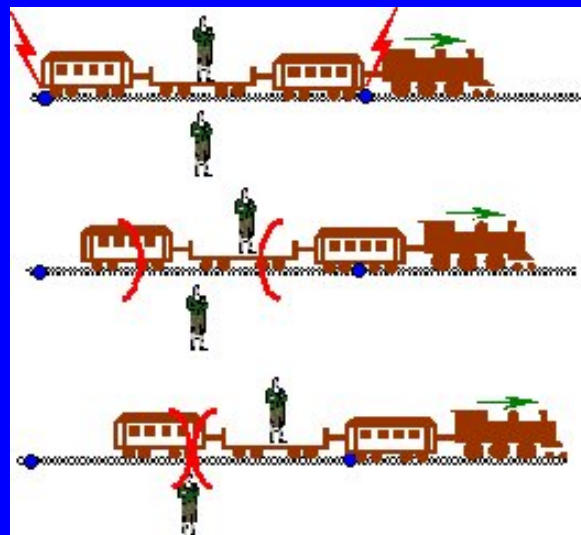
La emissione dei segnali è
simultanea se essi raggiungono il
punto medio nello stesso istante

Ma se essa è simultanea per il
sistema a terra non lo è per chi
sta sull'astronave che corre
incontro a uno di essi



Ed è vero anche il viceversa

La simultaneità è un concetto relativo

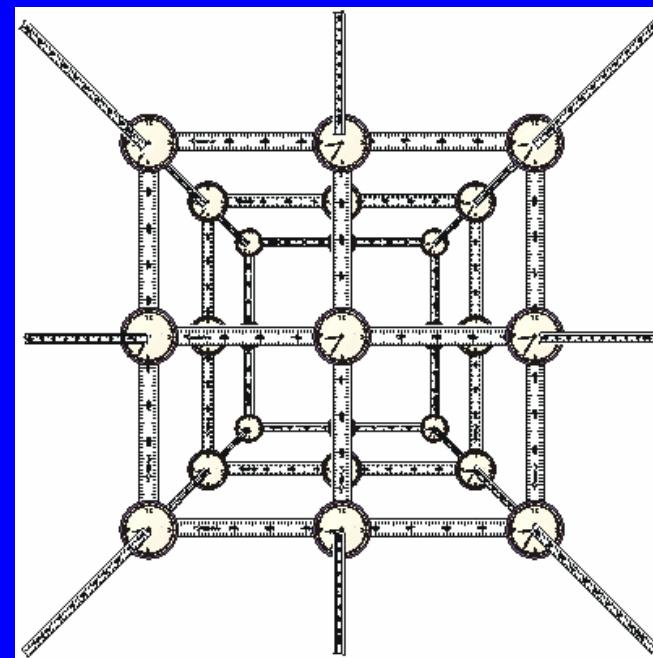


Se i fulmini **sono simultanei** per chi sta sulle rotaie, per chi sta sul vagone **non lo sono**. E **viceversa**

Ma: la descrizione dei fenomeni avviene per **coincidenze** tra fatti e misure di tempo e luogo

Ci serviranno **tanti regoli rigidi** e **tanti orologi sincronizzati**

Questo è **l'universo** di Einstein nel quale ogni sistema di riferimento avrà la **sua simultaneità** e la **sua sincronizzazione**: il **cronotopo** o **spaziotempo** o **spazio a 4 dimensioni**

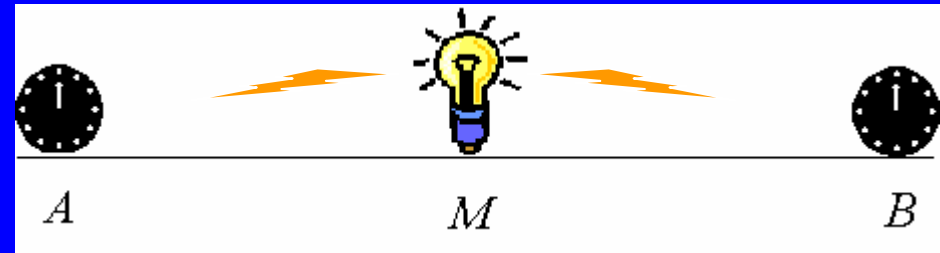


Per sincronizzare gli orologi si deve usare la simultaneità a distanza

Sono possibili diverse definizioni equivalenti

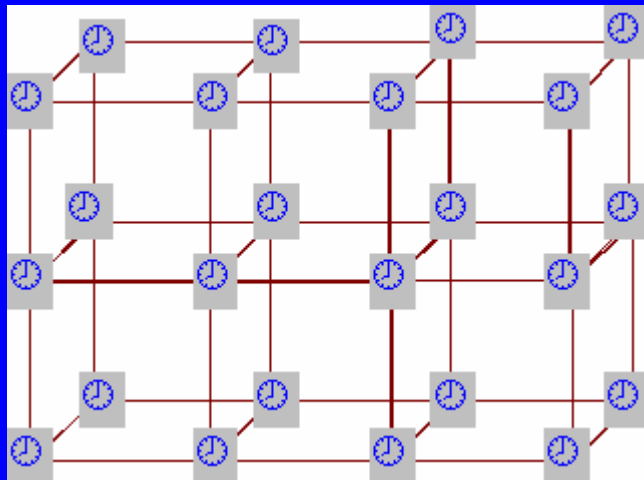
Perché non basta guardarli?

Perché non li sincronizziamo nello stesso punto?



Così facendo riusciamo a sincronizzare gli orologi in ogni sistema di riferimento

E questo è il risultato finale
un mondo di coordinate
spaziali e temporali



La sincronizzazione come la simultaneità è interna al riferimento

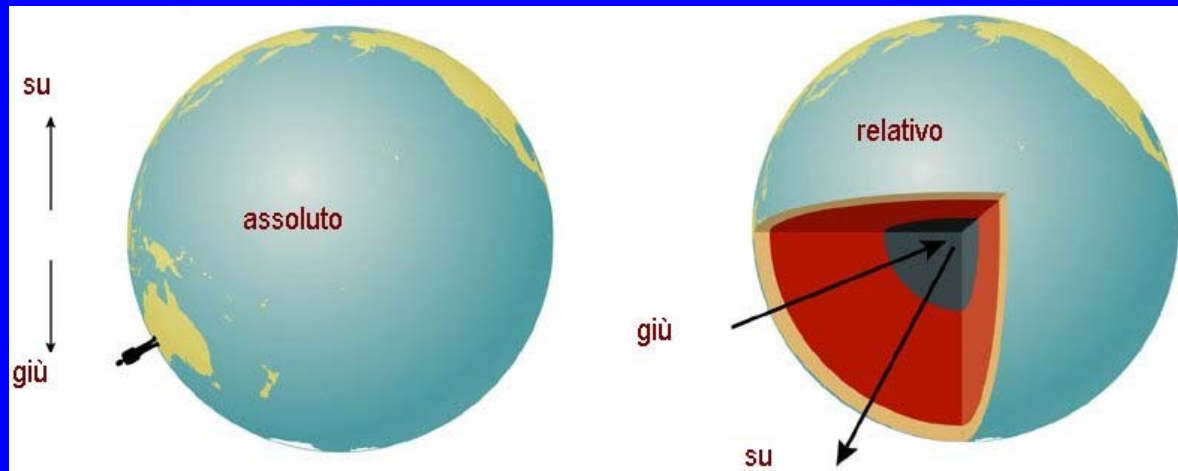


Ogni sistema di riferimento ha i suoi **orologi in accordo tra loro** e in **disaccordo con gli altri**

La **misura del tempo è relativa ad ogni sistema di riferimento**

Dai fenomeni agli eventi

Siamo già abituati alla relatività della posizione adesso dobbiamo **abituarci a pensare la stessa cosa anche per il tempo**



Evento



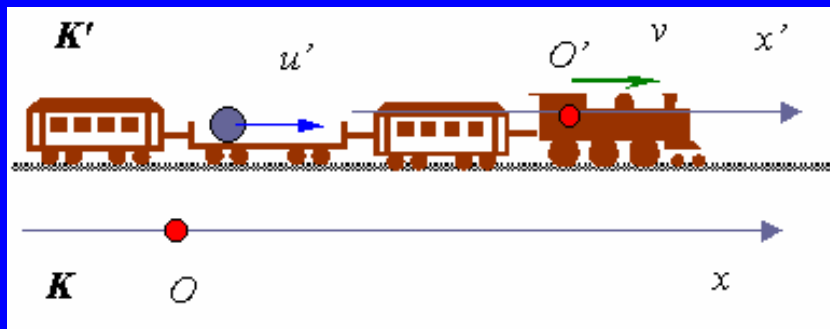
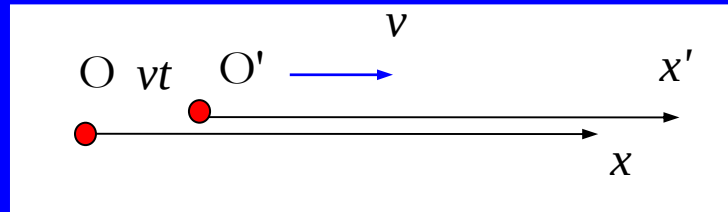
Il treno arriva alla stazione di Monza alle 12.05 di un orologio della stazione di Monza e del sistema di riferimento **tal dei tali** : **un luogo e un istante; due cose misurate** in un sistema di riferimento **e diverse in un altro**

Cosa accade se cambio riferimento?

Lo stesso evento viene descritto in maniera diversa

Si passa dalle trasformazioni di Galilei

$$x' = x - vt \quad t' = t$$



alle Trasformazioni di Lorentz

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

Come si ricavano ?

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

Discendono direttamente dai postulati con conti di algebra elementare

Cosa dicono ?



C'è il **fattore relativistico** $\beta = v/c$ che diventa importante per β prossimo a 1

Il **tempo** di un evento è **influenzato dalla posizione**

Spazio e tempo si rivelano reciprocamente **connessi** e sono entrambi **relativi al riferimento**

Conseguenze delle trasformazioni

L'etere non serve più: le equazioni di Maxwell valgono in ogni riferimento e scompaiono le asimmetrie; se si vuole si fa sparire il campo magnetico

Le velocità non si sommano più nel solito modo $u' = u - v$

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

ovviamente

$$c' = c \oplus v = \frac{c - v}{1 - \frac{cv}{c^2}} = \frac{c - v}{1 - \frac{v}{c}} = \frac{c(c - v)}{c - v} = c$$

La lunghezza di un corpo è diversa a secondo del riferimento

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

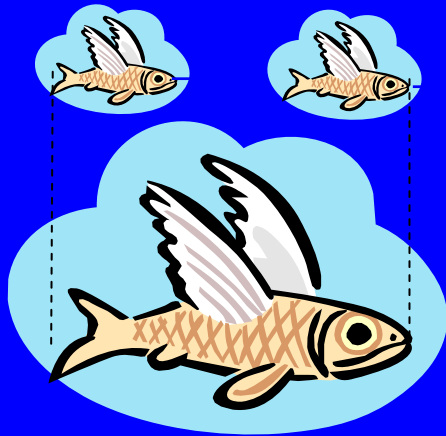
Si parla di **lunghezza propria** (corpo in quiete)

La durata di un fenomeno è diversa a secondo del riferimento

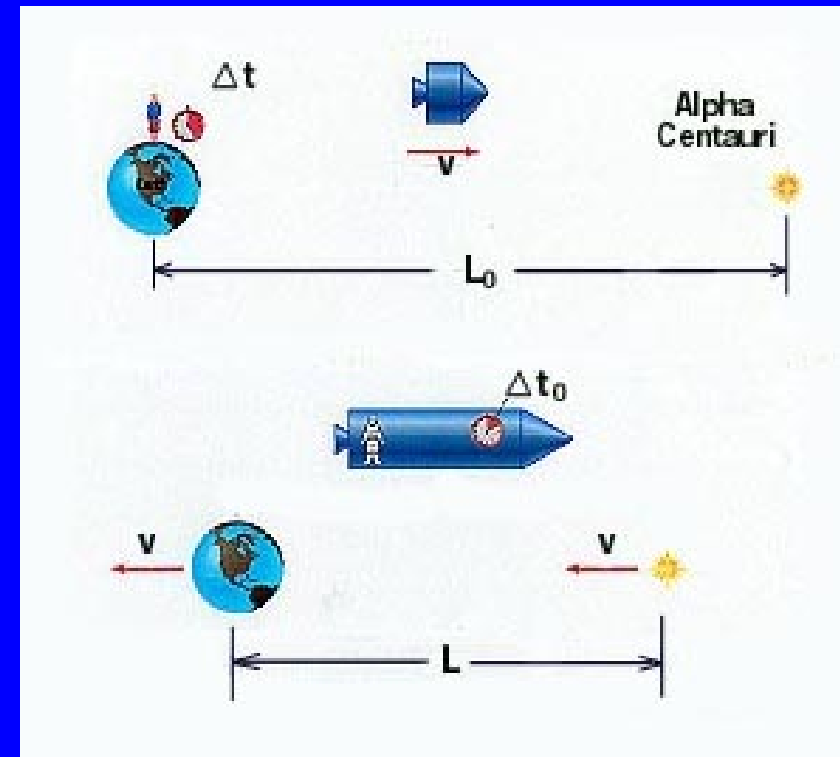
$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Si parla di **tempo proprio** (stesso orologio)

paradossi e senso comune

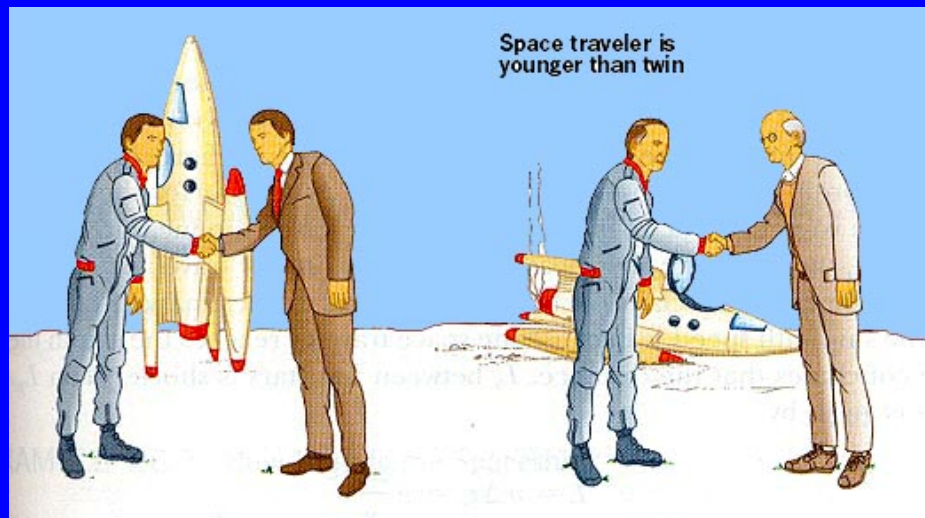
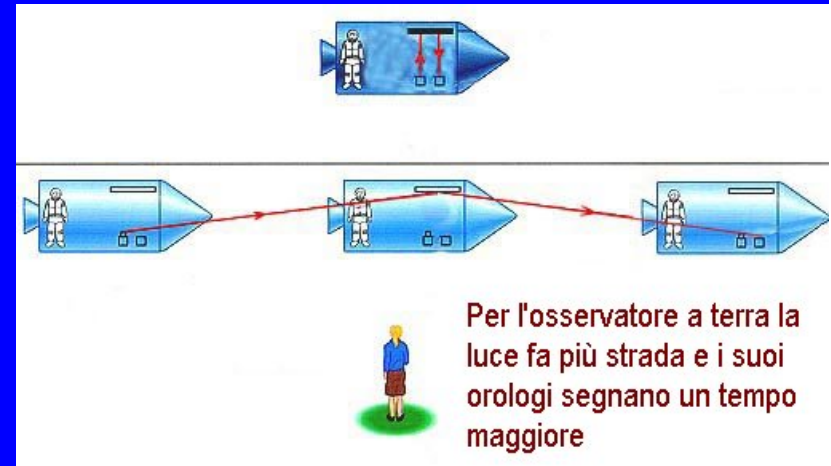
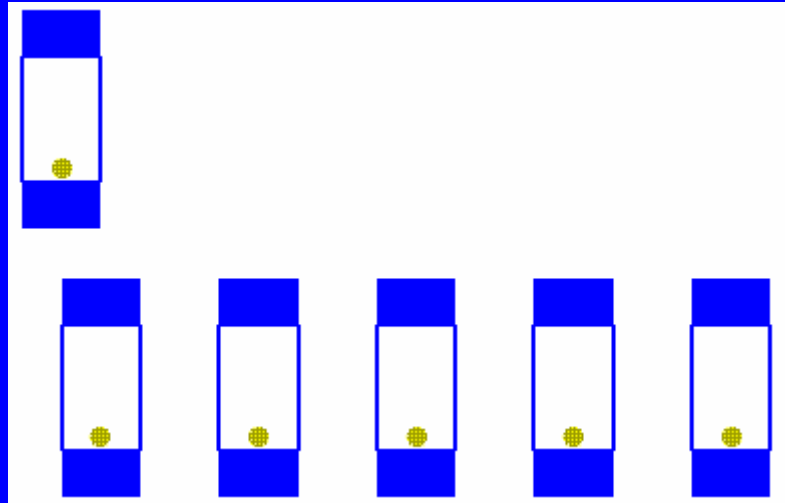


Cosa c'entra la
lunghezza con la
simultaneità?

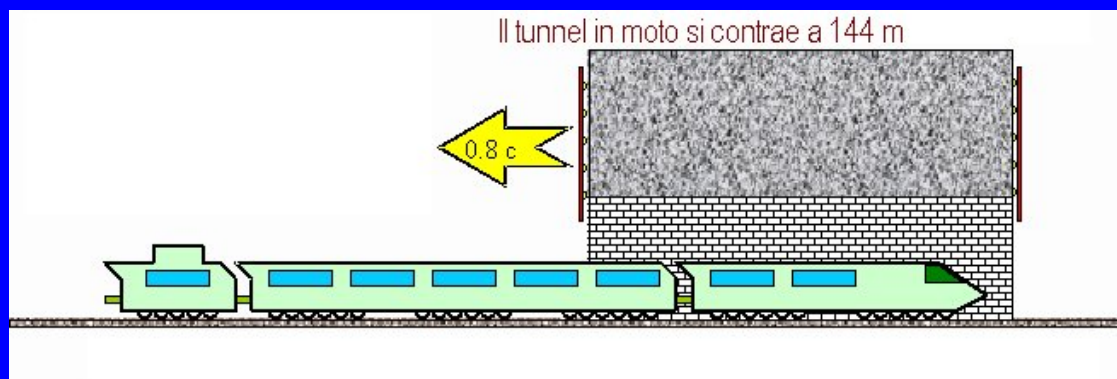
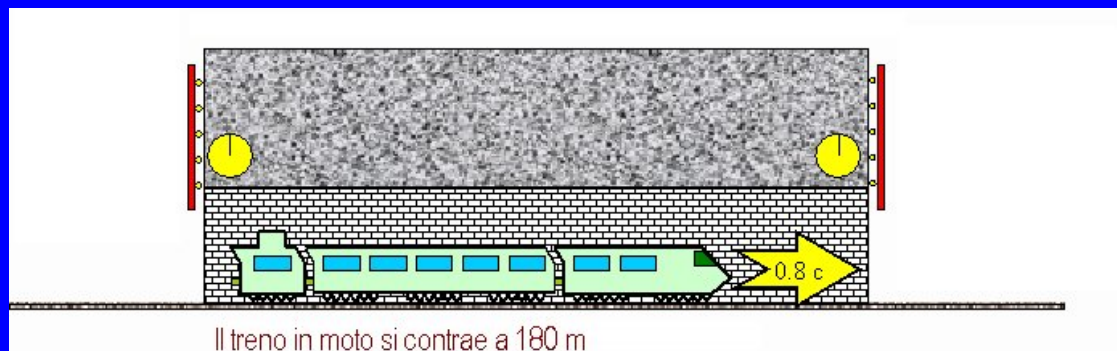
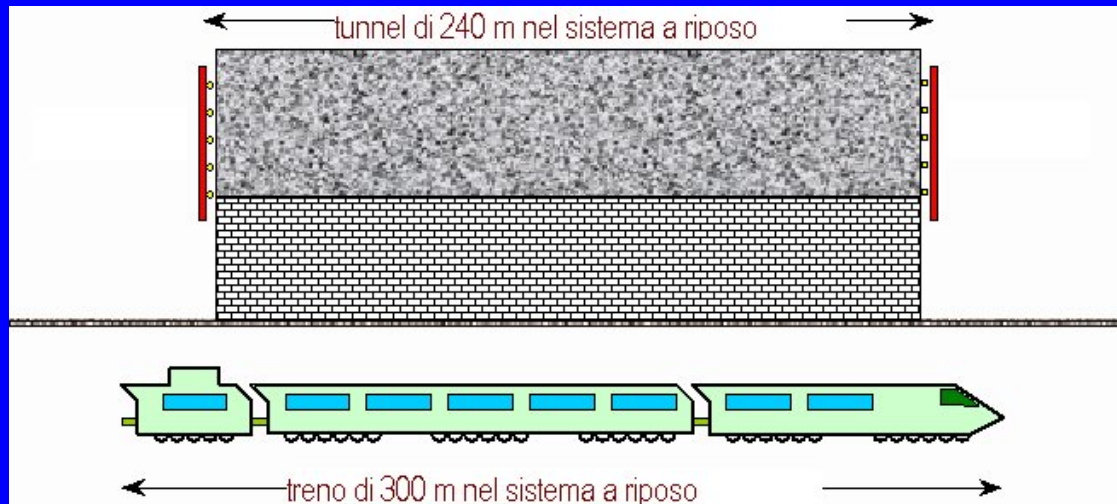


paradossi e senso comune

Da dove viene la **dilatazione del tempo**?



Il **paradosso dei gemelli**



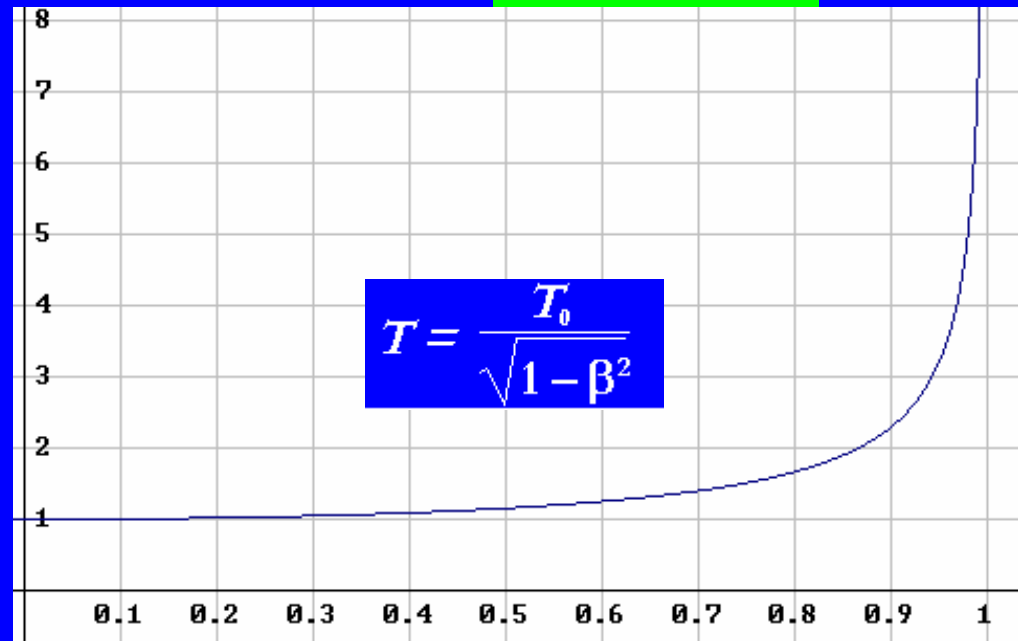
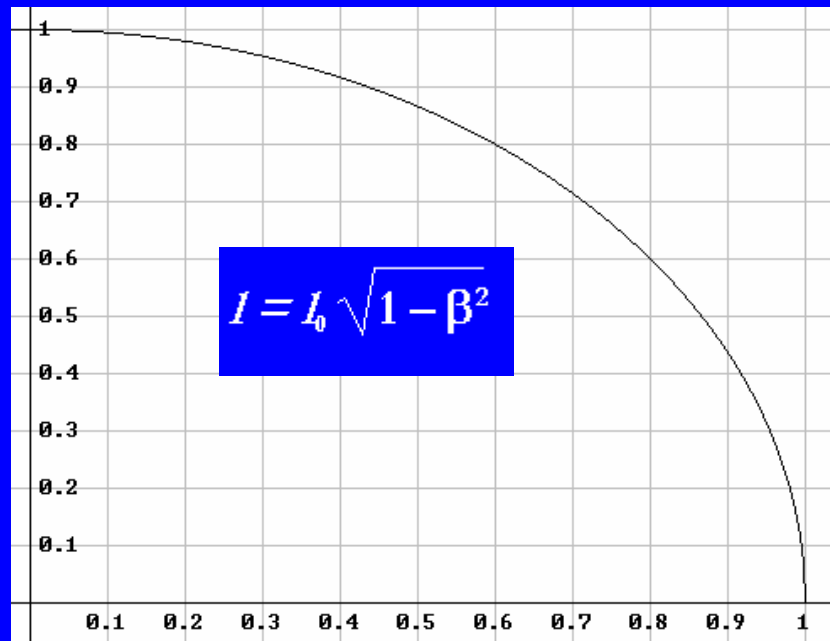
Il paradosso del treno e della galleria

Il treno si contrae

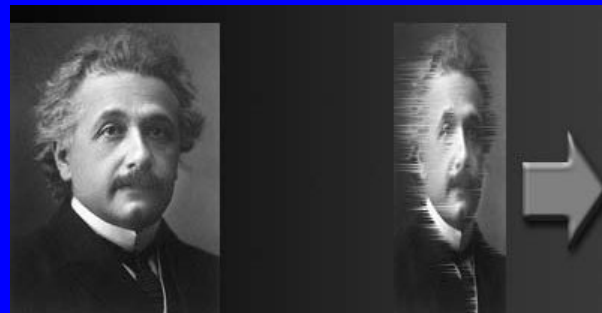
La galleria si contrae

Il fattore relativistico

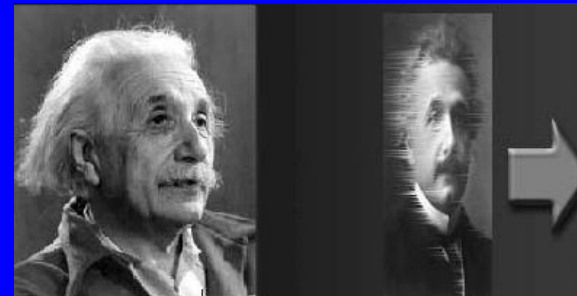
$$\sqrt{1-\beta^2}$$



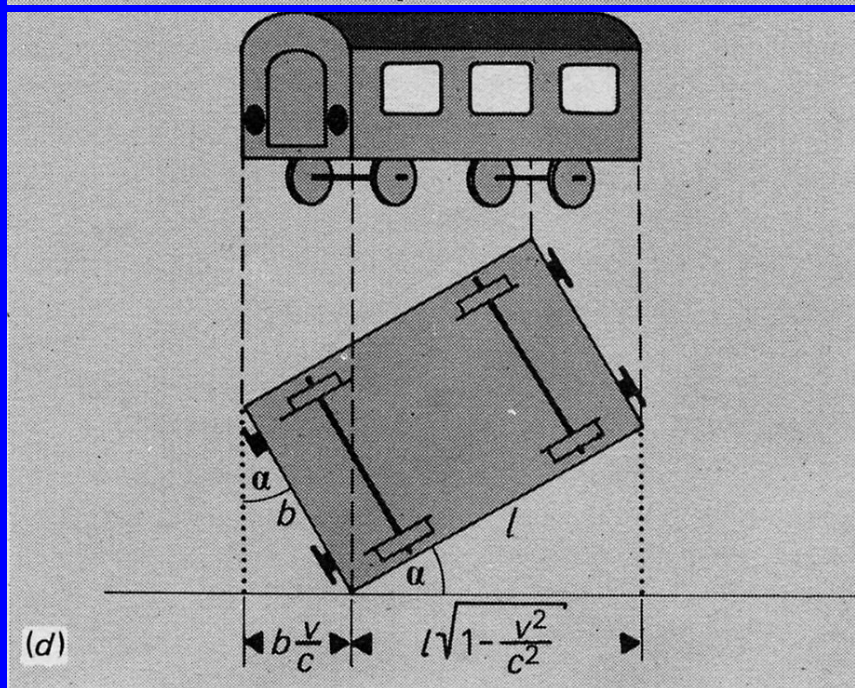
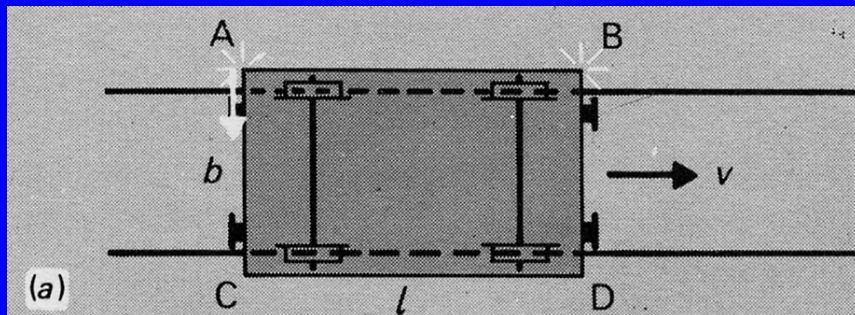
contrazione delle lunghezze



dilatazione del tempo



Come vediamo la contrazione?



Un vagone sfreccia con velocità v

Un osservatore da lontano vedrà la luce da A, C e D. **Ma la luce di C e D è partita dopo.**

$c \Delta t = b$ mentre $v \Delta t = \Delta x$ e dunque si vedrà la zona tratteggiata in rosso di lunghezza b come nella immagine (c)

$$\sin \alpha = v b/c / b = v/c = \beta$$

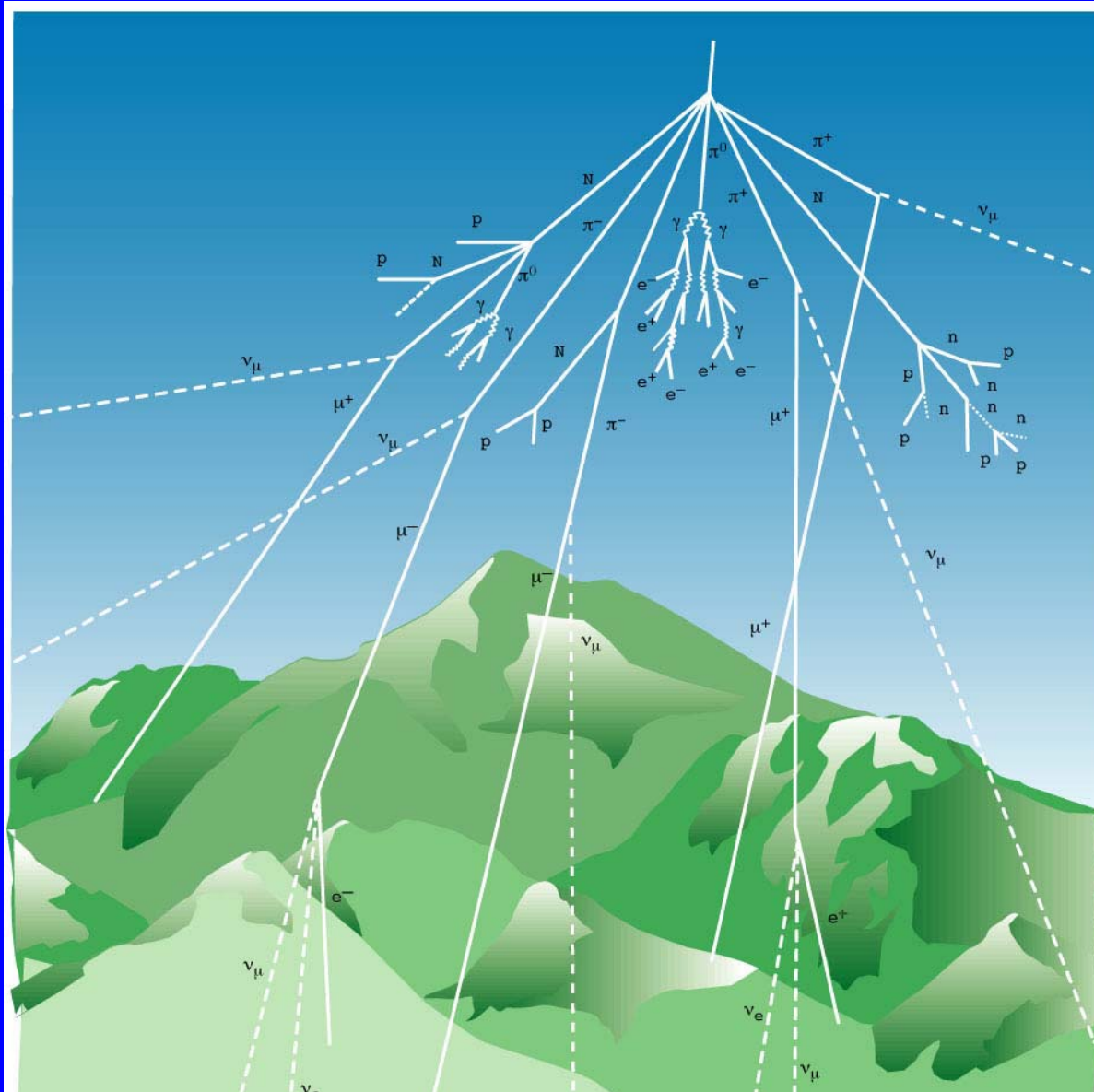
il seno dell'angolo di rotazione del lato corto è pari al fattore relativistico

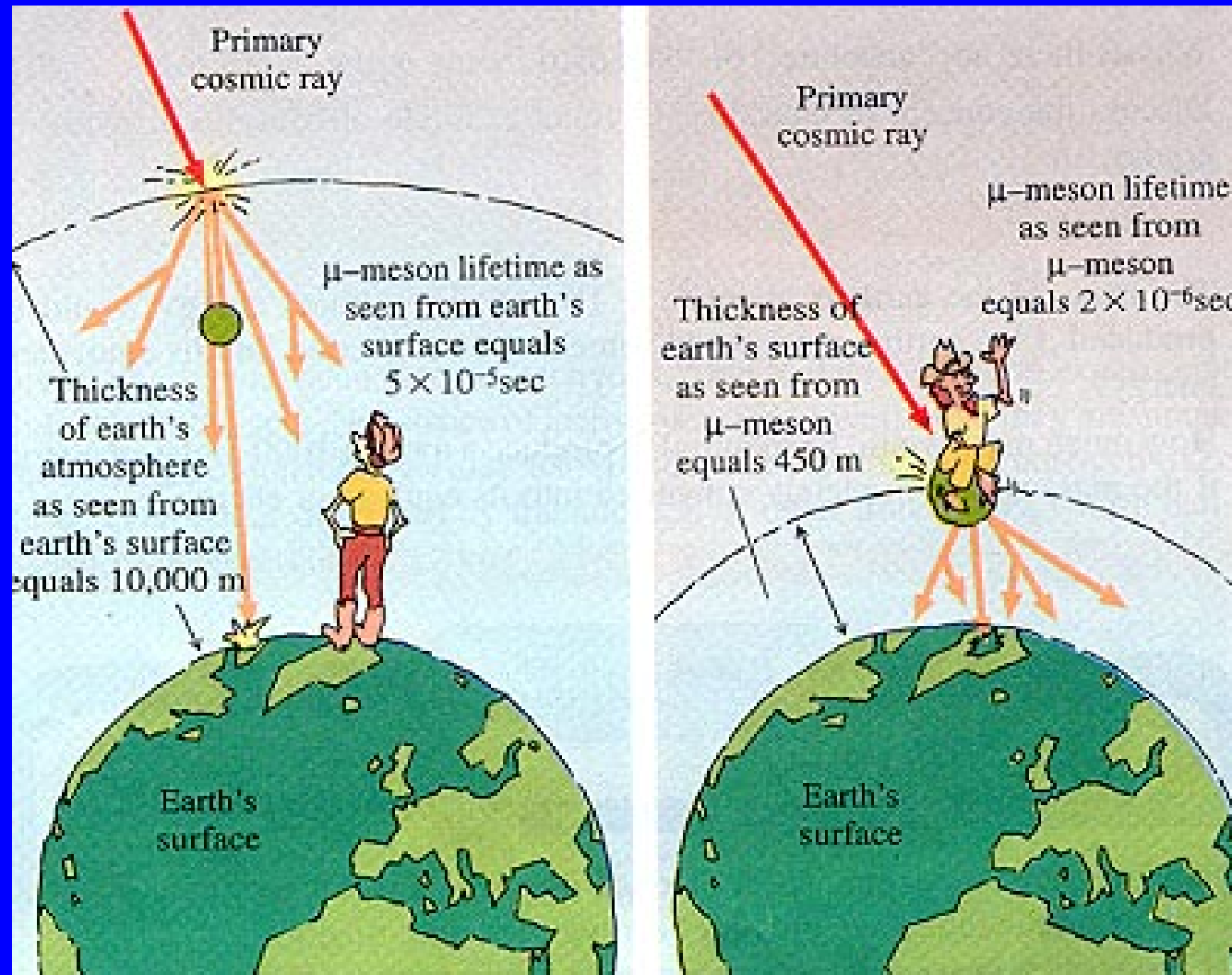
Ma lungo l'asse x si ha la contrazione di Lorentz e dunque il lato l si riduce a

$$l \sqrt{1 - \beta^2} = l \cos \alpha$$

La contrazione di Lorentz corrisponde proprio alla rotazione di l e l'osservatore vede la contrazione e l'arrivo di raggi partiti in tempi diversi come una rotazione

La vita media dei muoni e gli effetti relativistici

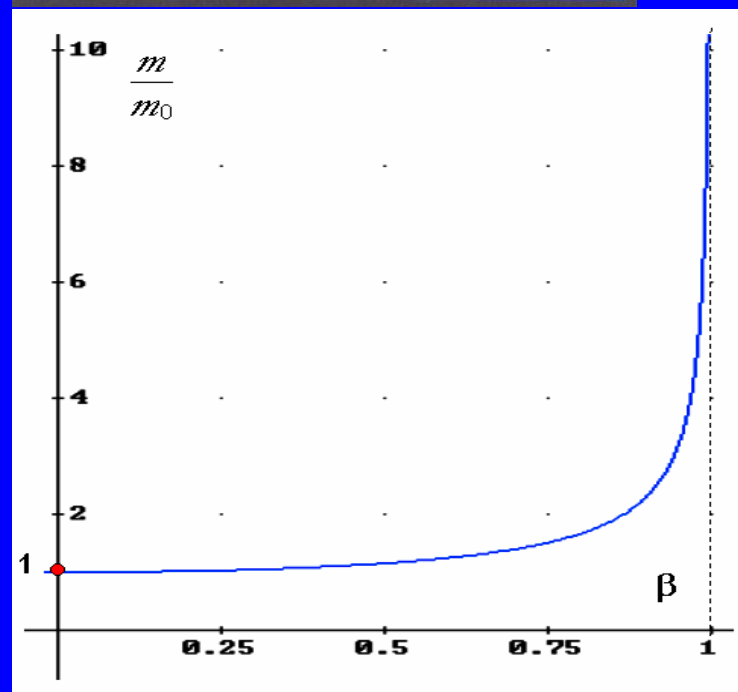
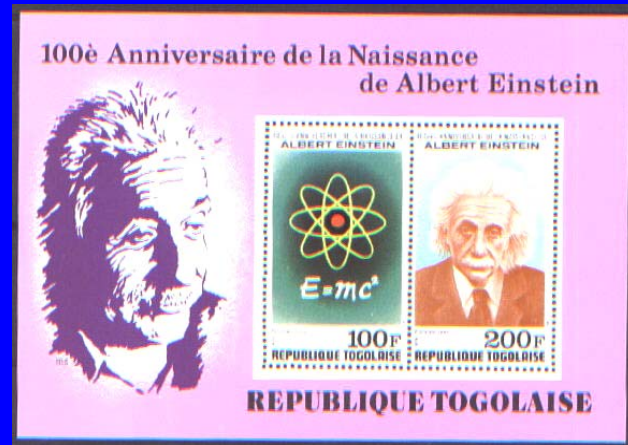




m
u
o
n
i

Quando si passa alla dinamica si ha

l'incremento relativistico della massa

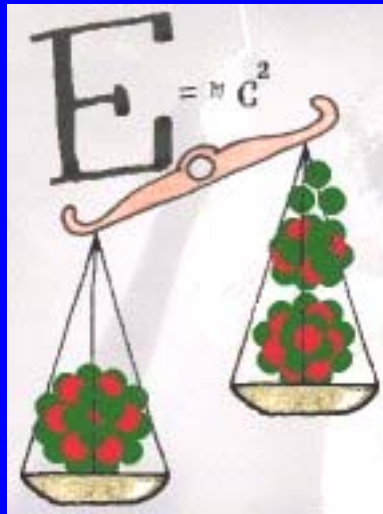
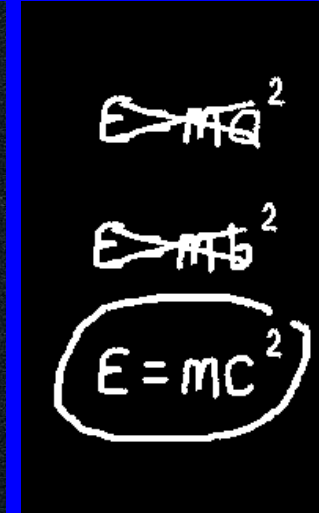
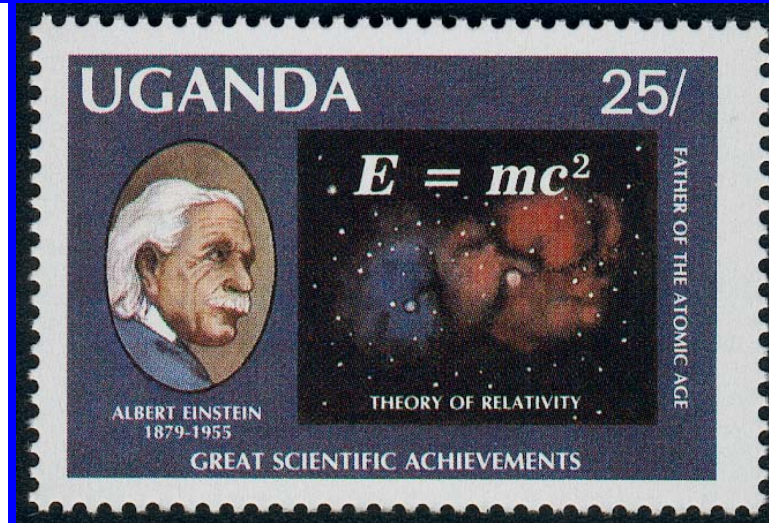
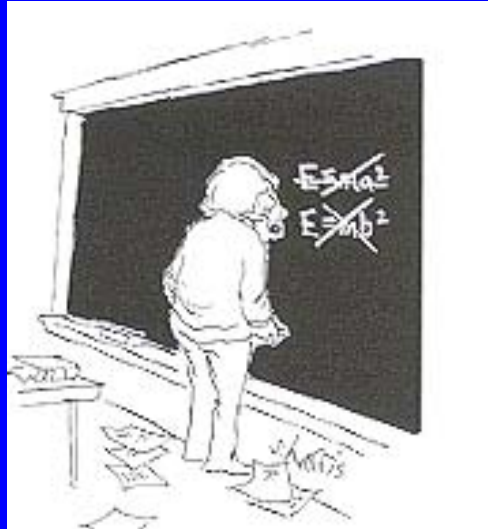


$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Perché crediamo alla conservazione della quantità di moto ?

Evidenza sperimentale nel 1905: nulla

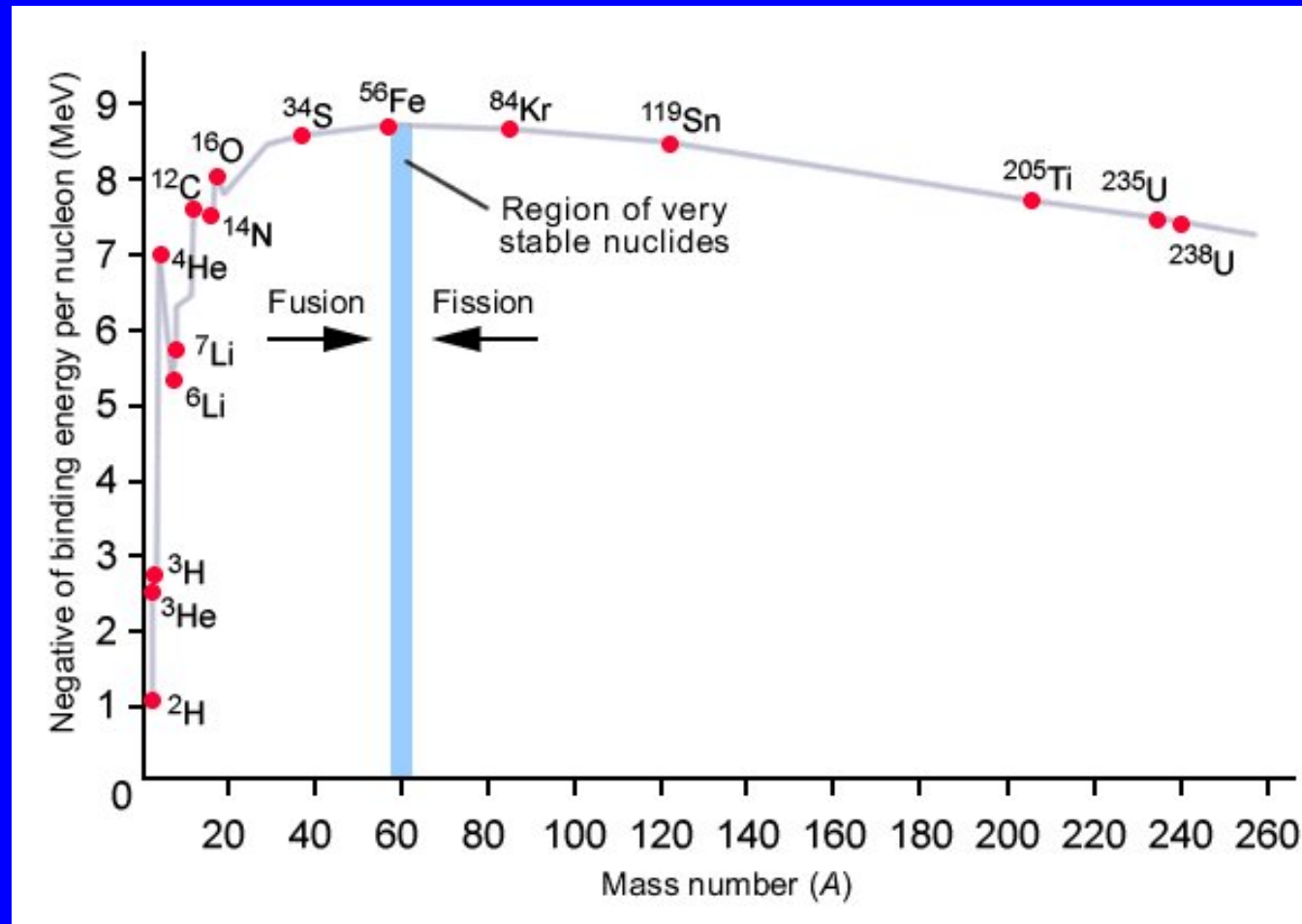
Equivalenza tra massa ed energia



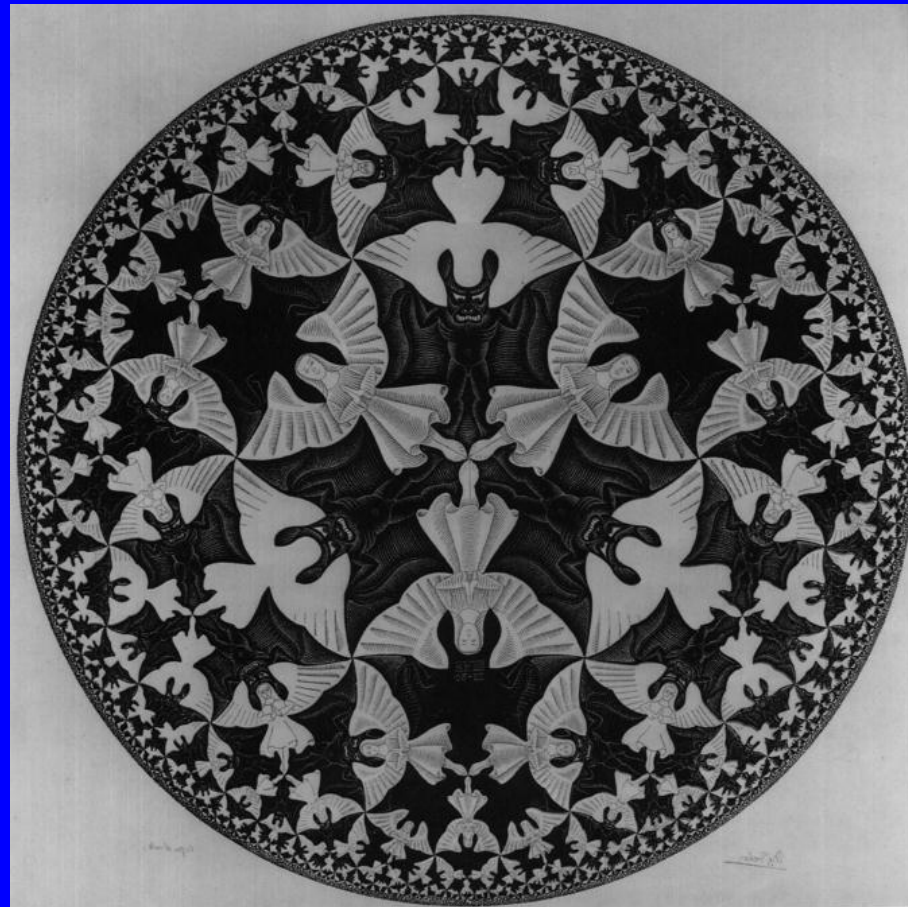
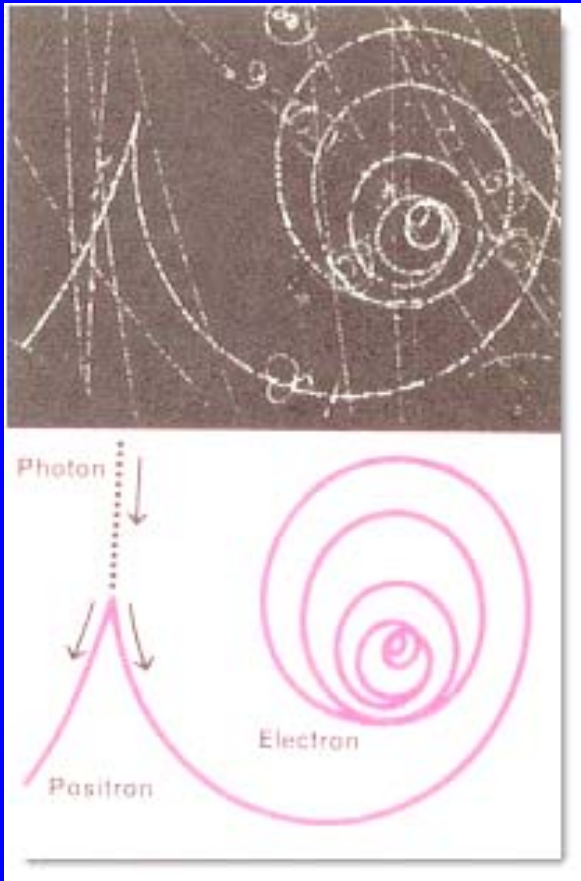
difetto di massa

c^2 è molto grande $\approx 10^{17}$ e perciò una piccola variazione di massa produce una grande variazione di energia e viceversa

Energia nei nuclei



Materia e antimateria



Per finire: la relatività è una teoria dell'assoluto e non del relativo

La lunghezza è relativa, l'intervallo temporale è relativo ... ma la quantità $\Delta x^2 - (c\Delta t)^2$ detta **intervallo spazio temporale** è costante per tutti i sistemi di riferimento

Le **leggi** dell'elettromagnetismo e della meccanica **sono le stesse** in tutti i sistemi di riferimento

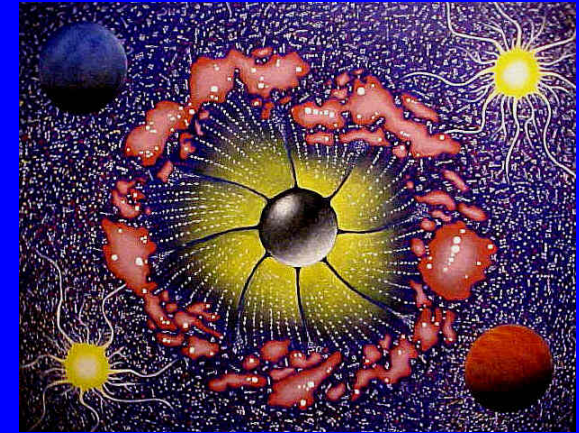
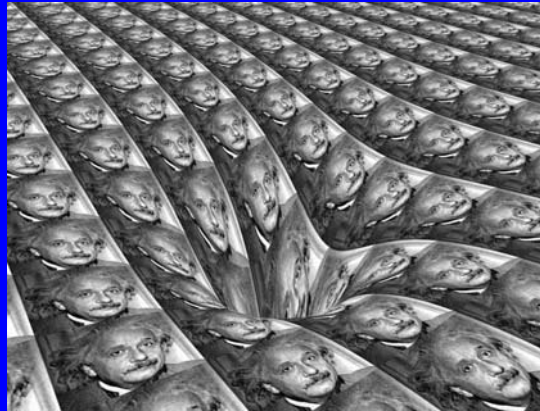
La **massa** e l'energia sono **relativistiche** ma insieme: **sono** costanti

Tutto è relativo lo dicono i qualunquisti. Io ho provato a far vedere che dietro il relativo si nasconde l'assoluto



Qualche frase famosa

Dio non gioca ai dadi



Sottile è il Signore, ma non malizioso

Le proposizioni della geometria nella misura in cui sono certe non ci parlano del mondo e, nella misura in cui ci parlano del mondo, non sono certe ...

