

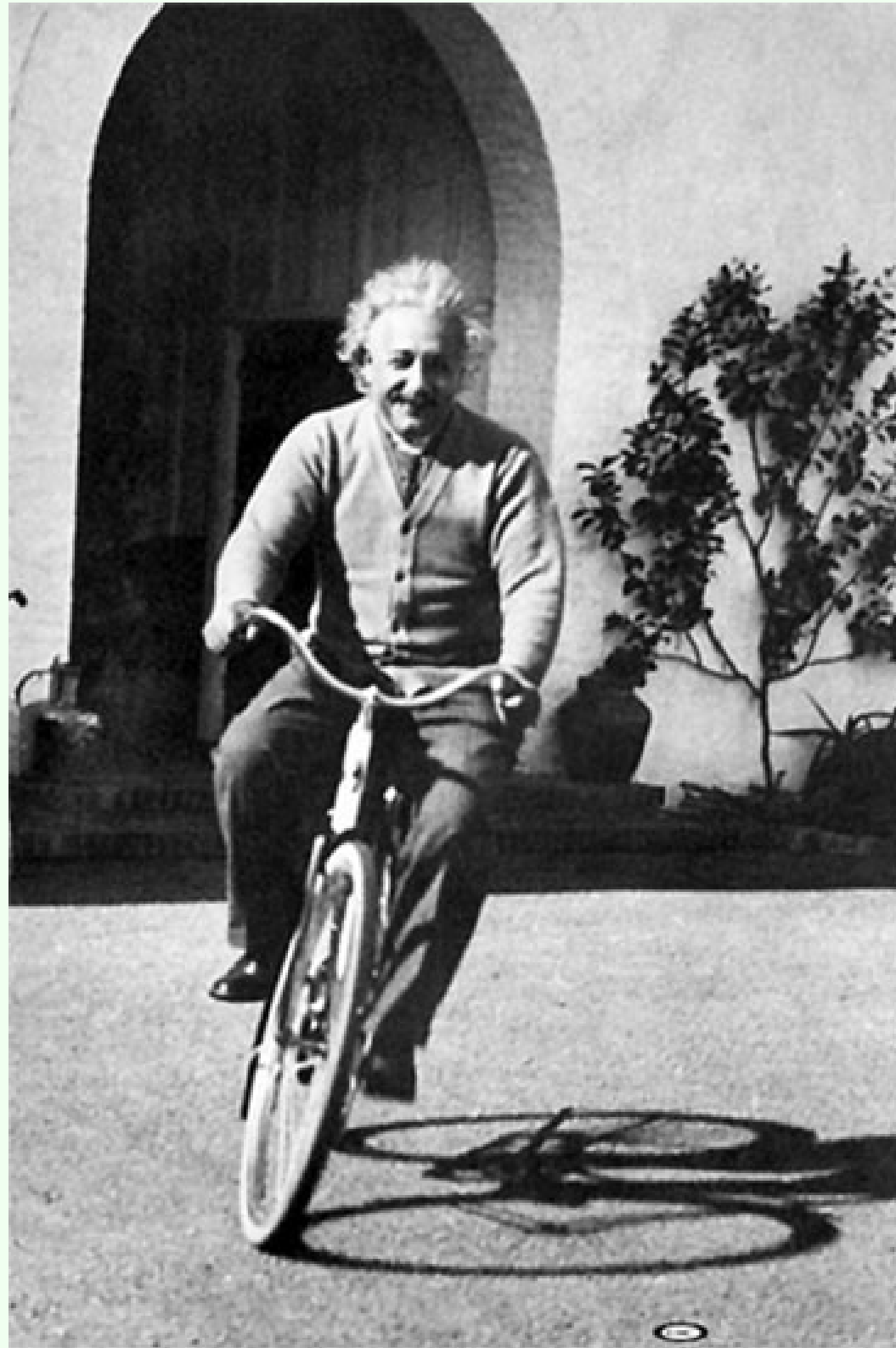
Einstein 100 anni dopo

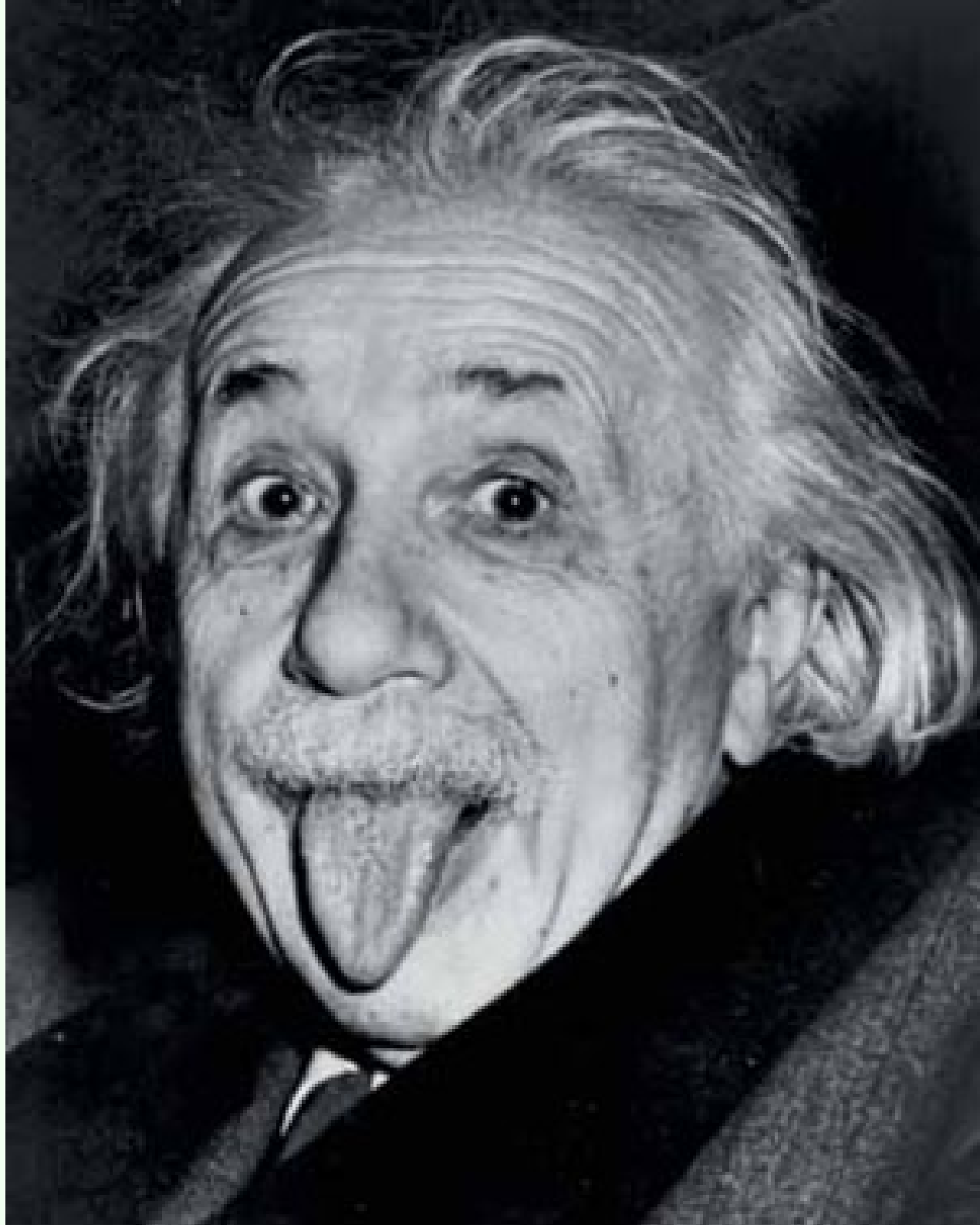
1905: nasce la nuova fisica

A proposito di Einstein

Non esiste scienziato che sia famoso, anzi popolare, quanto lo è Einstein, anche a più di 60 anni dalla sua morte.

Tutti hanno visto sue immagini curiose, che ce lo rappresentano come un uomo incurante delle convenzioni, anticonformista.





Ma c'è di più: anche chi conosce poco o niente la fisica sa che Einstein ha rivoluzionato le idee di questa scienza su punti fondamentali, come il modo di concepire lo spazio e il tempo.

Più in generale: Einstein ci parla di “cose” profonde anche se apparentemente familiari: lo spazio e il tempo appunto, ma pure la luce, la gravità...

E poi di concetti immensi, come l'Universo e la sua evoluzione.

È pure nozione comune che Einstein abbia introdotto idee “misteriose”, paradossali, che sembrano andare contro il *senso comune*, addirittura contro la *logica*. Che le sue teorie siano terribilmente complicate, richiedano conoscenze matematiche assai avanzate...

A proposito di Einstein

È su tutto questo che dovremo ragionare insieme, se vorrete seguirmi.

L'occasione, come sapete, è un centenario: è alla fine del 1915 (inizio del 1916) che Einstein conclude quella parte della sua ricerca che lo porta alla cosiddetta “Teoria generale della relatività” (brevemente, “Relatività Generale”, che abbrevierò in RG).

Ma non si deve dimenticare una cosa, su cui mi capiterà di tornare: anche se il nostro tema è questo, la “relatività”, molto altro Einstein ha dato alla fisica.

Tanto che un altro grande scienziato, Max Born (Nobel 1954) poté dire una volta:

“se anche Einstein, per assurdo, non avesse creato la relatività, per il resto che ha fatto sarebbe sempre il più grande fisico teorico di questo secolo”.

La relatività è difficile?

A dire il vero, la complessità delle teorie di Einstein viene troppo spesso esagerata: le idee fondamentali sono accessibili senza sforzo eccessivo, anche a chi sia in possesso di una cultura di livello liceale, ma a due condizioni.

La prima è che non si pretenda di capirle in quattro e quattr'otto, senza il minimo sforzo.

La seconda, che ci si appoggi su testi *seri*, e non sulla cosiddetta “divulgazione”, che troppo spesso per venire incontro al lettore semplifica al punto di distorcere del tutto il significato di ciò che dovrebbe spiegare.

Perciò anche oggi non potremo affrontare seriamente la teoria: dovrò limitarmi a fornire degli spunti; magari con la speranza di far venire il desiderio di saperne di più...

Relatività e senso comune

Quanto all'idea che la relatività andrebbe contro il senso comune, questo è *perfettamente vero*.

Ma non è una novità nella storia della scienza: il senso comune ci direbbe che la Terra è piatta, che il Sole le gira intorno.

Che i corpi pesanti cadono più rapidamente di quelli leggeri.

Che per mantenere un oggetto in moto occorre spingerlo o tirarlo.

Che ogni animale o vegetale produce discendenti uguali a se stesso.

Che il mondo celeste è eterno e immutabile.

E potremmo continuare...

Per superare tutte queste idee del senso comune, che oggi sappiamo errate, si sono dovute affrontare grandi difficoltà psicologiche, rischiare persecuzioni a base religiosa.

Ma soprattutto si è dovuto imparare gradatamente un *metodo*: il cosiddetto “metodo scientifico”.

1905: “annus mirabilis”

In quell'anno appare sugli *Annalen der Physik* (la più importante rivista di fisica tedesca) un articolo di un giovane di 26 anni, dal titolo a prima vista poco appassionante: “Sull'elettrodinamica dei corpi in moto”.

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhafte scheinen; ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt

Solo fisici esperti del campo potevano capire il significato di quel titolo, ma nessuno poteva immaginare che cosa l'articolo in realtà contenesse.

L'articolo non è breve (31 pagine) ma quelle pagine avrebbero sconvolto le idee fondamentali su cui è costruita la nostra visione del mondo fisico: lo *spazio* e soprattutto il *tempo*.

Ma prima di procedere, debbo spiegare il titolo: perché ho scritto “annus mirabilis”?

L'espressione non è mia: è stato così chiamato per la fisica il 1905, perché in quell'anno, sulla stessa rivista, Einstein pubblicò altri tre articoli.

A parte un secondo articolo sulla relatività, di cui riparleremo, ci si trova un articolo che avrebbe indicato la strada per risolvere una questione antica: *gli atomi esistono realmente?*

E poi un altro in cui introduce la prima idea che la radiazione elettromagnetica consiste di *quanti* (quelli che poi sarebbero stati chiamati “fotoni”).



Un passo indietro

Qui dobbiamo fare una premessa storica: a questo tempo (1905) sono 40 anni che si conoscono le leggi generali dell'elettromagnetismo (le famose “equazioni di Maxwell”).

Non starò a scriverle, non ci serviranno. Ma ci serve ricordare che cosa ne è seguito.

Da quelle equazioni Maxwell ha previsto che dovessero esistere le *onde elettromagnetiche*, che infatti Hertz avrebbe scoperto in laboratorio poco dopo (1887).

Ha anche previsto che le onde e.m. abbiano *la stessa velocità della luce*, cosa confermata sperimentalmente da Hertz.

(Immediata la conclusione: la luce stessa *consiste di onde e.m.*)

Noi siamo oggi così abituati alle onde e.m., ne facciamo uso continuamente, che faticiamo a renderci conto che si tratti di una scoperta così recente: meno di 150 anni!

Ma ai tempi di E. erano una cosa nuova: la radio (tanto meno la TV) erano di là da venire.

Il primo salvataggio di una nave in mare grazie a segnali radio sarebbe avvenuto nel 1909 (“Republic”).

Il problema del mezzo

L'esistenza delle onde e.m. fece nascere subito un problema.

Tutte le onde note ai fisici si propagano in un *mezzo*:

- le onde del mare sono un moto dell'*acqua*
- le onde sonore sono minime variazioni di pressione (e densità) dell'*aria*, o di un liquido, di un solido.

E le onde e.m.? Qual è il loro mezzo?

Gli venne dato un nome: “etere”.

Doveva essere un mezzo con proprietà assai particolari, su cui non posso soffermarmi, per andare dritto al problema centrale.

Se le onde e.m. si propagano nell'etere, avranno velocità c solo *rispetto all'etere*, ossia solo in un sistema di riferimento in cui l'etere è *fermo*.

Ma la Terra gira attorno al Sole, e la sua velocità cambia direzione col ciclo di un anno.

Quindi misurando la velocità della luce in un laboratorio terrestre si dovrebbero vedere differenze.

Invece gli esperimenti (Michelson) dicono di no.

Forse la Terra “trascina” l'etere?

A quel tempo (1905) il problema era ancora aperto...

Scende in campo Einstein...

... con un'ipotesi coraggiosa.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

E qui bisogna tradurre e spiegare.

Esempi di tipo analogo, come pure i tentativi falliti di constatare un moto della Terra rispetto al “mezzo luminoso”, portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non corrisponda ad alcuna proprietà dell'esperienza, non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica. E che inoltre per tutti i sistemi di riferimento per i quali valgono le equazioni meccaniche debbano valere anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche [...]

Assumeremo questa congettura (che nel seguito sarà chiamata “principio di relatività”) come postulato.

Il principio di relatività – da Galileo ad Einstein

Per capire questa “semplice congettura” di Einstein dobbiamo fare un altro passo indietro, questa volta più lungo: quasi tre secoli.

È infatti nel 1632 che fa la sua prima comparsa un “principio di relatività” (PR): nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, di Galileo.

Galileo propone un esperimento:

Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio [...]

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.

Nel libro di Galileo il principio di relatività serve a uno scopo preciso: *smontare le obiezioni al moto della Terra.*

Dicevano infatti gli oppositori di Copernico, del sistema eliocentrico: se davvero la Terra si muovesse, l'aria verrebbe trascinata via, gli uccelli non potrebbero volare come vediamo, un sasso lasciato cadere da una torre resterebbe indietro e di parecchio...

Con l'esempio della nave, che chiunque può sperimentare, Galileo mostra che ciò non è vero: nella nave in moto *tutto va come se fosse ferma.*

Alla stessa maniera noi, che stiamo sulla Terra come se fosse quella nave, non possiamo accorgerci del suo moto.

Notate bene: se il PR è vero, questo *non dimostra* il moto della Terra, ma dimostra che *le obiezioni non sono conclusive.*

Il PR vale anche per l'elettromagnetismo?

Ai tempi di Galileo le onde e.m. non erano conosciute.

Ci si può chiedere: il PR vale anche per l'elettromagnetismo?

Einstein afferma appunto questo: se anche ripetessimo l'esperimento di Galileo usando *qualsiasi fenomeno* conosciuto oggi, il risultato sarebbe sempre quello: il moto della nave *non è rivelabile*.

Si può dire la stessa cosa in un modo più “dotto”, che piace di più ai fisici:

*Tutte le leggi della fisica valgono allo stesso modo
in qualsiasi riferimento inerziale.*

In particolare:

La velocità della luce è la stessa in tutti i riferimenti inerziali.

Tutto qui?

A prima vista l'idea di Einstein non sembra gran cosa: non ha fatto altro che ribadire ciò che già Galileo aveva capito.

Ma invece le conseguenze sono sconvolgenti...

Immaginiamo dei fisici che si mettano a misurare la velocità della luce: *sulla Terra* (questo l'hanno già fatto da tempo) poi anche *su Marte* (sarebbe possibile, visto che ci abbiamo posato delle sonde) e poi *in altre parti del sistema solare*, e magari oltre.

Ma la velocità della Terra non è costante, né in grandezza né in direzione.

La velocità di Marte è diversa; quella degli altri pianeti ancora diversa...

Come può essere che le misure diano sempre lo stesso valore per c ?

Come può essere che le misure diano sempre lo stesso valore per c ?

Come mai la velocità della luce non si *compon*e con quella dei pianeti, come sappiamo che accade quando sperimentiamo con proiettili e altri oggetti, e come lo stesso Galileo ci aveva insegnato?

D'altra parte, è il problema di cui avevamo già parlato: agli inizi del '900 c'erano già esperimenti *fatti sulla Terra* che mostravano proprio questo.

Dunque non c'è che da accettare l'idea di Einstein...

Benissimo; solo che quell'idea si porta dietro una grave conseguenza, che nessuno prima di lui aveva visto.

Ora vogliamo esaminarla su un esempio semplice.

Un esperimento semplice – prima parte

Immaginiamo la banchina di una piccola stazione, davanti alla quale passa in corsa un treno veloce (molto veloce...).

Sul treno c'è un fisico che sta facendo un esperimento: ha posato sul pavimento un *emettitore* E, e più in alto, all'altezza h , un *ricevitore* R.

L'emettitore E fa partire un lampo di luce, che arriva in R; viene misurato il tempo che impiega il lampo per andare da E a R.

E questo è tutto, per quanto riguarda il treno.

Treno



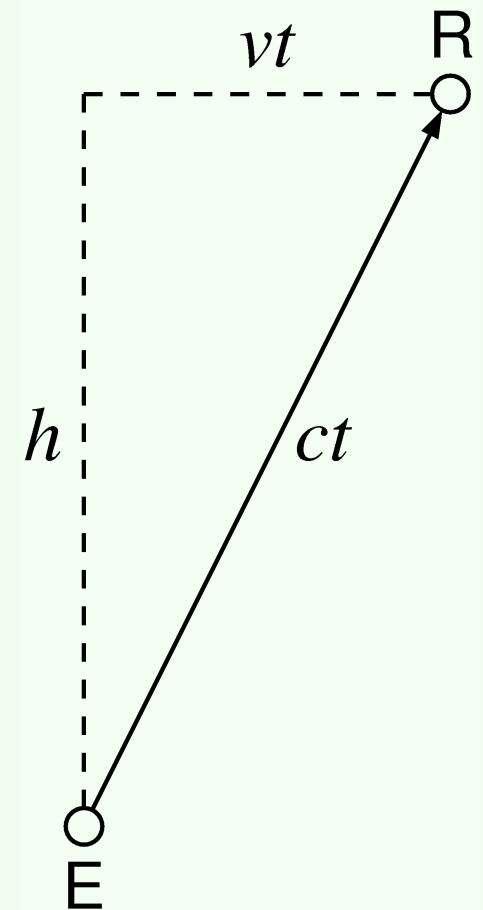
Un esperimento semplice – seconda parte

Anche sulla banchina c'è un fisico, che *con strumenti suoi* esegue misure sullo stesso esperimento. In particolare misura il tempo con propri orologi, *fermi rispetto alla stazione*.

Dato che il treno corre con una velocità v , nel tempo t (misurato dalla stazione) che il lampo di luce impiega per andare da E a R, l'apparato che sta sul treno si sarà spostato di un tratto vt .

Ho indicato con c la velocità della luce rispetto alla stazione. La figura mostra che il percorso *obliquo* del lampo è lungo ct .

Stazione



Un esperimento semplice – confronto

Confrontiamo le due misure: quella fatta nel riferimento del treno e quella nel riferimento della stazione.

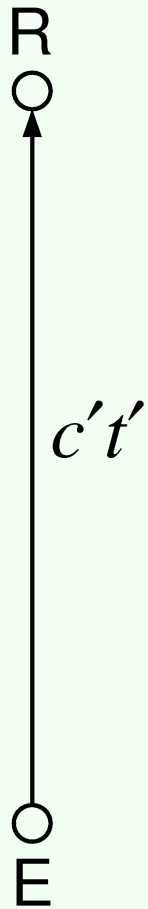
Questa volta ho indicato con c' la velocità della luce sul treno e con t' il tempo misurato, sempre sul treno.

Naturalmente $c't' = h$.

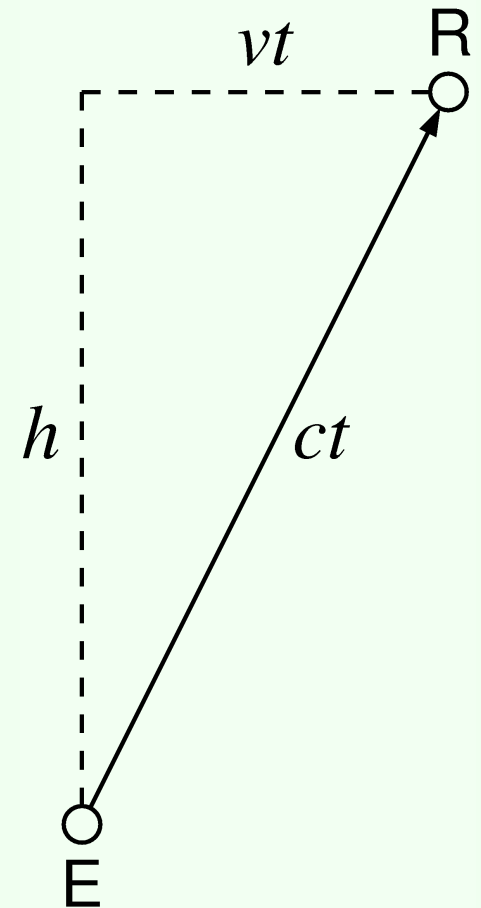
Per il momento non faccio *nessuna ipotesi* su c , c' , t , t' .

Neppure quelle che potrebbero sembrare più ovvie (logiche?).

Treno



Stazione



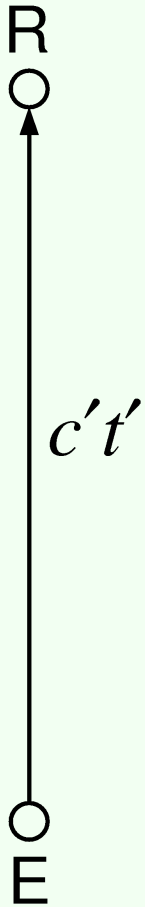
Un esperimento semplice – confronto

Che cosa ci dice il confronto tra le due figure?

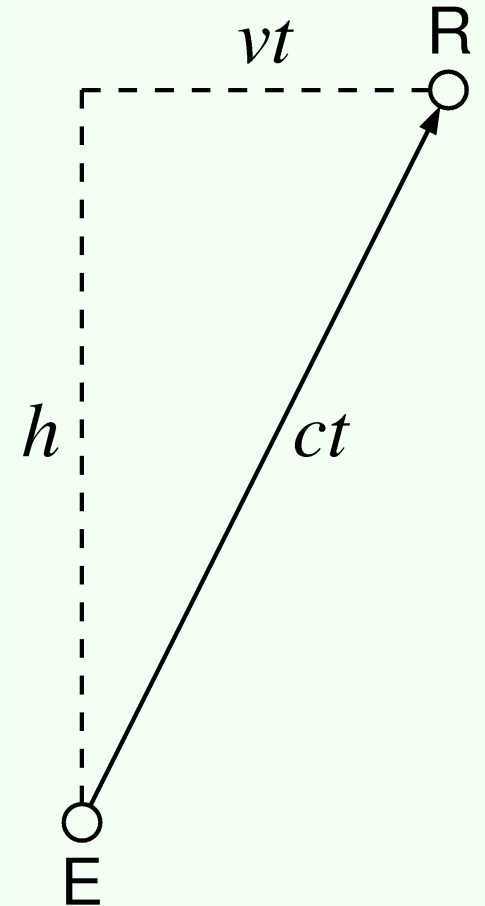
Un fatto è certo:

$$c t > c' t'.$$

Treno



Stazione



Un esperimento semplice – confronto

Che cosa ci dice il confronto tra le due figure?

Un fatto è certo:

$$c t > c' t'.$$

Ragioniamo...

Di sicuro non potrà essere insieme $c = c'$ e $t = t'$.

Nella fisica prima di Einstein si dava per scontato, seguendo Newton, che dovesse essere $t = t'$: tempo *assoluto* ossia *invariante*.

L'intervallo di tempo fra due eventi è *lo stesso*, in qualunque sistema di riferimento lo si misuri.

Ne seguiva di necessità $c > c'$: la velocità della luce (come quella di qualunque altro corpo in moto) dipende dal riferimento (*non è invariante*).

Nel nostro caso, *si compone* col moto del treno.

Un esperimento semplice – confronto

Invece il PR (Einstein) richiede $c = c'$: la velocità della luce è *invariante*.

Allora non si scappa: $t > t'$.

L'intervallo di tempo fra due eventi *cambia* a seconda del sistema di riferimento (non è invariante, è *relativo*).

Osservo di sfuggita che basta applicare il teorema di Pitagora per arrivare alla formula che lega t e t' : la famosa “dilatazione del tempo”.

Non scriverò la formula, ma voglio mettere sull'avviso riguardo a un paio di modi di descrivere questo risultato, entrambi pericolosi, per non dire insensati.

Attenzione: pericolo!

Eccoli:

- Gli orologi in moto *rallentano*.
- In un sistema di riferimento in moto il tempo *scorre più lentamente*.



Purtroppo non ho il tempo per approfondire questo punto, veramente cruciale.

Accontentiamoci del segnale di pericolo.

Entrambe queste frasi si possono trovare un po' dappertutto: nella divulgazione, ma anche in testi che dovrebbero essere seri, inclusi quelli scolastici.

Se le incontrate, ricordate il segnale...

Due domande

Abbiamo visto che l'intervallo di tempo fra due eventi *cambia* a seconda del sistema di riferimento (non è invariante, è *relativo*).

È naturale chiedersi:

- è proprio vero?
- a che serve?

Vediamo...



È proprio vero?

Questo equivale a chiedersi due cose:

- come fu accolto a quel tempo il lavoro di Einstein?
- ci sono prove sperimentali?

Sul primo punto, bisogna ricordare che l'idea di un tempo assoluto era (ed è) profondamente radicata non solo nella scienza ma in tutta la cultura occidentale.

Quanto alla fisica, basta ricordare Newton:

Tempus absolutum, verum, & mathematicum, in se & natura sua absque relatione ad externum quodvis, æquabiliter fluit.

Non era quindi cosa da poco accettare un radicale cambiamento di punto di vista.

È proprio vero?

Ci furono tra gli scienziati molte discussioni e pareri diversi.

Furono subito colte le conseguenze, a prima vista paradossali.

La più famosa è nota come “paradosso dei gemelli” (Langevin, 1911).

Non mi è possibile spiegare di che cosa si tratta. Ne parlo solo perché questo “esperimento ideale” ha prodotto una quantità incredibile di discussioni, di articoli ... che continua ancor oggi.

Il “paradosso” è stato usato sia per confutare la relatività, come esempio di supposta contraddizione della teoria, sia come illustrazione di una delle sue più importanti caratteristiche.

In conclusione però le idee di Einstein furono riconosciute valide (a parte alcuni irriducibili oppositori) dall'intera comunità scientifica.

All'epoca della pubblicazione del suo articolo, Einstein era un impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna (Svizzera).

Pochi anni dopo poteva scegliere fra cattedre universitarie a Zurigo, Berlino, Praga, Leida...

È proprio vero?

La domanda può essere letta anche in un altro modo: ci sono prove sperimentali *dirette* della “dilatazione del tempo”?

La difficoltà è che l'effetto è *molto piccolo*, a meno che la velocità v non sia confrontabile con c .

Il primo esperimento, che non è propriamente diretto, è quello di Ives–Stilwell (1938). Non lo descrivo.

Più diretto, ma ancora non immediato, è l'effetto osservato sul decadimento in volo dei *muoni* cosmici: Rossi–Hall (1941); Frisch–Smith (1962).

Su questo potete trovare il film in youtube:

<https://www.youtube.com/watch?v=AZ2TTMLBWw8>

Vari esperimenti sono stati eseguiti su particelle in acceleratori (per es. Lundy 1962 per i muoni).

Un esperimento veramente diretto, in quanto eseguito con *veri orologi* (atomici) portati in volo su aerei, è quello di Hafele–Keating (1971).

Eppure questo esperimento non ha fatto molto rumore e non è neppure molto conosciuto: come mai?

La ragione è che ormai la teoria di Einstein aveva avuto tante e tante conferme *indirette* che nessuno sentiva più il bisogno di ulteriori prove.



Come viene confermata una teoria fisica?

Una teoria fisica è qualcosa di piuttosto complesso: parte da alcune ipotesi semplici (*postulati*).

Da queste deduce una serie di sviluppi, quasi sempre per via *matematica*, che portano alla *spiegazione di fenomeni* già noti e *in precedenza non spiegati*, oppure spiegati in modo insoddisfacente.

Soprattutto, la teoria porta a prevedere *fenomeni nuovi*, mai osservati in precedenza, che poi vengono *confermati*; talvolta a distanza di anni.

La fiducia in una teoria fisica si forma quindi lungo tutti questi passi: non si crea all'improvviso e per un *singolo evento*.

Purtroppo qui non potremo vedere quasi nulla di questo processo, ma è importante tenerlo presente, perché non vale solo per la relatività: *tutta la fisica è costruita così*.

A che serve?

Stando a ciò che ho appena detto, la domanda è mal posta.

Ci si può chiedere a che serve la relatività, ma non a che serve una singola cosa, come la dilatazione del tempo.

Poi bisogna precisare: a che serve da quale punto di vista?

- applicazioni pratiche?
- per la fisica in generale?
- problemi o questioni specifiche?

Applicazioni pratiche della relatività ci sono, ma non sono dirette, e riguardano aspetti che non abbiamo ancora visto. Quindi rimandiamo.

Per la fisica in generale, la risposta è facile: la fisica oggi *non esisterebbe* se non in minima parte, se la relatività non fosse stata pensata (ipotesi campata in aria...).

Per le questioni specifiche, il campo che viene subito in mente è la fisica delle *interazioni fondamentali*: particelle, campi...

Intanto, gli acceleratori sono macchine *profondamente relativistiche*: non si possono progettare né usare senza la relatività.

Basta il fatto, noto a tutti, che le velocità delle particelle nei moderni acceleratori sono “quasi” pari alla velocità della luce.

Quindi sia la dilatazione del tempo, sia tutti gli effetti della meccanica relativistica (di cui debbo ancora parlare) entrano in gioco in modo assai importante.

Ma anche la pura teoria è relativistica: lo è la scoperta delle *antiparticelle*; lo sono tutti i passi che hanno portato dalla *elettrodinamica quantistica*, nata prima del 1930, fino al più recente *modello standard*.

Naturalmente tutto questo resterà fuori dal nostro discorso...

La dinamica relativistica

Forse ricordate: l'articolo del 1905 è lungo 31 pagine.

Non c'è dentro solo quel poco che vi ho detto finora. Ma del resto potrò dire assai poco.

La cosa più importante è questa: Einstein va a vedere come si conciliano con le sue idee le leggi della fisica conosciute fino allora.

Trova che *non c'è niente da cambiare nell'elettromagnetismo* (equazioni di Maxwell).

Invece occorre rivedere qualcosa nella dinamica, nelle antiche *leggi di Newton*, conosciute, applicate e verificate per oltre 200 anni.

Com'è possibile questo? Quelle leggi sono state usate in moltissimi campi; hanno permesso tra l'altro la scoperta di un nuovo pianeta (Nettuno, 1846).

Arriva 'sto giovanotto e dice “nossignori, qui c'è da cambiare”!

Spiegazione: le leggi di Newton *non sono da buttare*.

Solo abbiamo scoperto che hanno un *campo di validità* limitato.

Ormai abbiamo imparato che questo *dobbiamo aspettarcelo sempre*: qualunque legge fisica, che oggi ci appare convincente e ben verificata, in un futuro più o meno prossimo avrà bisogno di *revisione*, quando il nostro campo di esperienza si sarà *allargato*, come succede continuamente.

Questo è un difetto, un limite della scienza?

Tutto al contrario: è la prova che si tratta di una forma di conoscenza che *si rimette sempre in discussione*, e così facendo *evolve e migliora*.

Senza necessità di *distruggere il passato*: non si deve pensare che Einstein abbia “abrogato” Newton.

Ancor oggi i fabbricanti di auto e di aerei usano le leggi di Newton, e così pure i progettisti delle missioni spaziali.

Invece (l'ho già detto) quelli che hanno costruito LHC hanno dovuto usare la meccanica relativistica, e così pure quelli che studiano e realizzano gli esperimenti.

La dinamica relativistica: che cosa cambia?

Lasciamo i discorsi generali, e vediamo un po' più da vicino che cosa cambia.

Al solito abbreviando e semplificando: il cambiamento essenziale sta nella *seconda legge*, quella che si esprime nella formuletta nota a tutti:

$$F = ma.$$

Questa legge va bene finché ci occupiamo di corpi che si muovono a *velocità piccole* rispetto a c : auto, aerei, treni, capsule spaziali...

Ma non funziona più *ad alte velocità*.

Non scriverò formule. Dico invece qual è la differenza principale.

La legge di Newton non pone limiti alla velocità che un corpo può raggiungere: basta applicare una forza sufficientemente grande per un tempo abbastanza lungo, e si potrà arrivare a qualunque velocità.

Non così Einstein...

La dinamica relativistica: un esempio

Supponiamo che un'astronave, situata lontana dalla Terra e da qualunque altro oggetto celeste, lanci una sonda esploratrice.

Supponiamo pure che i razzi della navetta siano capaci di esercitare una forza *pari al peso* che la sonda avrebbe sulla Terra.

Dunque $F = mg$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) e di conseguenza $a = g$: la sonda si muove rispetto all'astronave con *accelerazione costante* pari a g .

Chiediamoci: che velocità avrà la navetta dopo un giorno di viaggio? E dopo un anno?

Si tratta di fare un paio di moltiplicazioni: un giorno sono 86400 secondi, un anno sono di più: circa 31.5 milioni di secondi (31.5×10^6).

Risultati: dopo un giorno $v = 850 \text{ km/s}$ (cifra tonda)
dopo un anno $v = 309000 \text{ km/s}$.

Risultati: dopo un giorno $v = 850$ km/s (cifra tonda)

dopo un anno $v = 309000$ km/s.

La prima è una velocità molto alta, cui nessun corpo del sistema solare si avvicina. Solo alcune stelle nel centro della Galassia hanno velocità del genere.

Ma siamo sempre a meno di $1/300$ di c .

La velocità dopo un anno supererebbe c , anche se di poco.

Ed ecco i valori calcolati secondo Einstein:

– dopo un giorno $v = 850$ km/s (cifra tonda)

– dopo un anno $v = 215000$ km/s.

Si vede che dopo un giorno non c'è differenza, ma dopo un anno siamo solo a $2/3$ di c .

E dopo due anni? La sonda non arriverebbe ancora a 270000 km/s.

Ma davvero dopo un giorno non c'è differenza?

Non c'è perché abbiamo arrotondato.

Se scriviamo più cifre abbiamo:

- per Newton $v = 846720$ m/s
- per Einstein $v = 846717$ m/s.

Ma torniamo piuttosto ai valori relativistici, dopo un anno e dopo due anni:

- dopo un anno $v = 215000$ km/s
- dopo due anni $v = 270000$ km/s.

Si vedono due cose:

- a) che la velocità è sempre minore di c (e così resterebbe dopo 3, 5, 100, 1000 anni)
- b) che l'aumento di velocità nel secondo anno è *molto minore* che nel primo, nonostante che la forza applicata sia *rimasta la stessa*.

Attenzione: pericolo!

Abbiamo detto: l'aumento di velocità nel secondo anno è *molto minore* che nel primo, nonostante che la forza applicata sia *rimasta la stessa*.

Questo è un *fatto* importante e indiscutibile della relatività.

È illustrato, per fare un esempio, nel film *La velocità limite*.

https://www.youtube.com/watch?v=ec2l_si9kLc

Ma dov'è il pericolo?

Sta nel modo come il fatto viene spiegato. Si trova spesso la frase:

“la massa aumenta con la velocità”.

Si dice pure che questo sarebbe il significato della famosissima formula

$$E = mc^2.$$

Ma questo *non è vero*!



Annus mirabilis

Avevo accennato all'inizio che nel 1905 Einstein pubblica un secondo articolo sulla relatività. Eccolo:

13. *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*
von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Traduco il titolo:

L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?

L'articolo è molto breve: solo 3 pagine.

Posso anche riassumerne in breve il contenuto.

Einstein dimostra che se si prende un corpo fermo, e se ne cambia *in qualunque modo* l'energia, *lasciandolo fermo*, la sua massa varia in proporzione alla variazione dell'energia:

$$\Delta m = \Delta E / c^2.$$

Per esempio, il corpo può essere caldo e cedere calore all'ambiente.

Oppure può assorbire radiazione e.m. in modo simmetrico.

Nel primo caso la massa aumenta, nel secondo diminuisce.

Va subito detto che nei casi pratici non ci accorgiamo di niente, perché le variazioni di massa sono *straordinariamente piccole*.

Per fare un esempio: se mettiamo a bollire 5 litri di acqua per la pasta, portandola da 20°C a 100°C, l'aumento di massa è meno di 20 *miliardesimi* di grammo.

Difficilmente ve ne accorgete con la bilancia!

So che qualcuno starà pensando: “questi fisici sono proprio matti, si perdono dietro a cose senza alcun valore pratico...”

Forse c'è del vero, almeno a prima vista.

Però molte volte le strane elucubrazioni dei fisici si sono mostrate col tempo tutt'altro che prive di valore pratico.

Lo stesso Einstein si preoccupa, alla fine dell'articolo, di suggerire come si potrebbe verificare la sua previsione.

Scrive:

Non è impossibile che con corpi il cui contenuto di energia è variabile in grande misura (per es. i sali di radio) si possa mettere la teoria alla prova con successo.

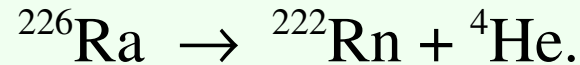
Einstein si riferisce a scoperte recentissime:

- la *radioattività*, scoperta da Becquerel nel 1896
- il nuovo elemento *radio*, responsabile in gran parte dell'attività dei minerali di uranio, scoperto da Marie e Pierre Curie nel 1898.



Si sapeva che la radioattività consiste nell'emissione di particelle di grande energia.

Vediamo un esempio: il decadimento del radio.



Si sapeva che la particella α (${}^4\text{He}$) veniva emessa con una grande energia cinetica: $4.87 \text{ MeV} = 7.80 \times 10^{-13} \text{ joule}$.

Si doveva avere perciò un *difetto di massa* di

$$7.80 \times 10^{-13} \text{ joule} / c^2 = 8.68 \times 10^{-30} \text{ kg}.$$

È questo che ha in mente Einstein.

A quel tempo non era ancora possibile misurare con precisione le masse dei nuclei, ma ecco i valori moderni in unità di massa atomica:

$$m(^{226}\text{Ra}): 226.025402 \text{ u}$$

$$m(^{222}\text{Rn}): 222.017570 \text{ u}$$

$$m(^4\text{He}): 4.002603 \text{ u}$$

$$m(^{226}\text{Ra}) - [m(^{222}\text{Rn}) + m(^4\text{He})] = 0.005229 \text{ u}.$$

Dato che $u = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$, si trova per il difetto di massa misurato *proprio il valore previsto* dalla relazione di Einstein.

Un mondo di particelle...

Il campo di applicazione principe della relazione di Einstein è la *fisica delle particelle*.

Le particelle interagiscono, nascono, decadono...

In tutti questi processi ci sono *variazioni di massa*, ma *non di energia*.

Dunque, che cosa significa $E = mc^2$?

Massa ed energia...

... i più grandi equivoci in tema di relatività stanno qui.

La “massa che si converte in energia” e viceversa...

Qui non posso chiarire bene, per mancanza di tempo e non solo.

Proverò a fare delle asserzioni, che hanno quasi il carattere di ricette, diciamo di *principi-guida*.

Massa ed energia...

Prima di tutto: massa ed energia sono *grandezze fisiche*, non altro.

Non sono “sostanze”.

Ogni corpo ha una *massa* m e un'*energia* E , come ha una *velocità* v , una *carica elettrica* Q , ecc. Grandezze che si possono *misurare*.

Per un corpo *fermo* vale $E = mc^2$.

Per un corpo in moto, la massa è *la stessa*, mentre

$$E = mc^2 + \text{en. cinetica.}$$

L'*energia si conserva sempre*, la massa no.

Massa ed energia...

Esempio del radio che decade: la massa iniziale è *maggiore* della somma delle masse finali (*difetto di massa*).

L'energia resta la stessa, perché le particelle finali hanno anche *energia cinetica* (si muovono).

Viceversa, quando due protoni e due neutroni si legano a formare un nucleo di ${}^4\text{He}$, la massa di questo è *minore* della somma delle masse delle quattro particelle iniziali.

(Poi a volte si confonde *massa e materia*, ma la seconda non è una grandezza fisica: è piuttosto una *categoria filosofica*.)

Concludiamo

Abbiamo visto tre delle rivoluzioni che Einstein ha prodotto nella fisica col suo lavoro del 1905.

(Ci sarebbe altro, ma dobbiamo accontentarci.)

1. Il tempo non è più quello *assoluto* di Newton: l'intervallo di tempo fra due eventi è *diverso* a seconda del sistema di riferimento.
2. Cambia la *seconda legge della dinamica*: in particolare, esiste una *velocità limite c* .
3. La *massa* di un corpo non è più inalterabile: cambia se il corpo *acquista o cede energia* (però la massa è *invariante*: la stessa in ogni riferimento).

Ricordate che a questo punto della storia Einstein ha solo 26 anni: aveva ancora tempo per altre cose...

Le vedremo insieme le prossime volte, se vorrete.

