

La seconda rivoluzione scientifica

La relatività (speciale) e la fine del “tempo uguale per tutti”

Crisi della fisica di fine Ottocento

Rivoluzione :
scientifica

paradigma meccanicistico [come lo designa Thomas Kuhn ne “*La struttura delle rivoluzioni scientifiche*”] quale **quadro teorico-sperimentale dominante**



Meccanicismo : corpo materiale, movimento,
sua trasmissibilità da un corpo ad un altro
= **forza o energia**

Problema : trovare una spiegazione di tipo meccanico
per tutti i fenomeni fisici (compresi quelli “nuovi”)

Crisi della fisica di fine Ottocento

Fenomeni fisici nuovi : difficili da spiegare
“meccanicamente” (?)

Luce



Calore

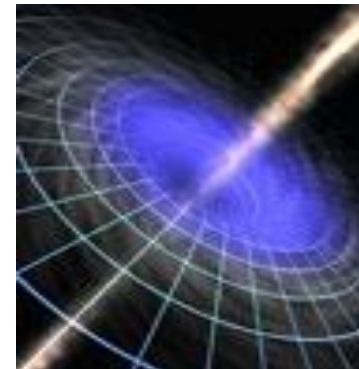


shutterstock - 837032

Elettricità



Magnetismo



Crisi della fisica di fine Ottocento

LUCE, CALORE, ELETTRICITÀ, MAGNETISMO

- indubbiamente sono fenomeni, “eventi fisici”
- come tali, devono essere “effetti” di una qualche causa
(nel meccanicismo, causa = corpo in movimento)
- però: **non sembrano avere massa (?)**
- per cui vengono immaginate come

“sostanze fluide imponderabili”

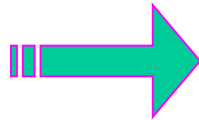
Primo Ottocento :
moto

1. Fisica delle masse in quiete o in moto
2. Fisica dei “fluidi imponderabili”

Crisi della fisica di fine Ottocento

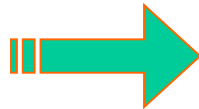
Nel corso del secolo
il meccanicismo “muove alla conquista”
della fisica degli imponderabili

Fenomeni termici



termodinamica

Fenomeni luminosi



teoria ondulatoria
della luce

Fenomeni elettromagnetici



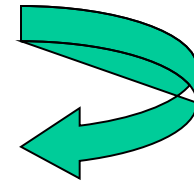
teoria elettromagnetica della luce
(unificazione di ottica ed elettrologia)

Crisi della fisica di fine Ottocento

Ma



incongruenze col
paradigma meccanicistico



• **secondo principio della termodinamica**

(freccia del tempo \longrightarrow)

• **campo elettromagnetico** (equazioni di **Maxwell**)

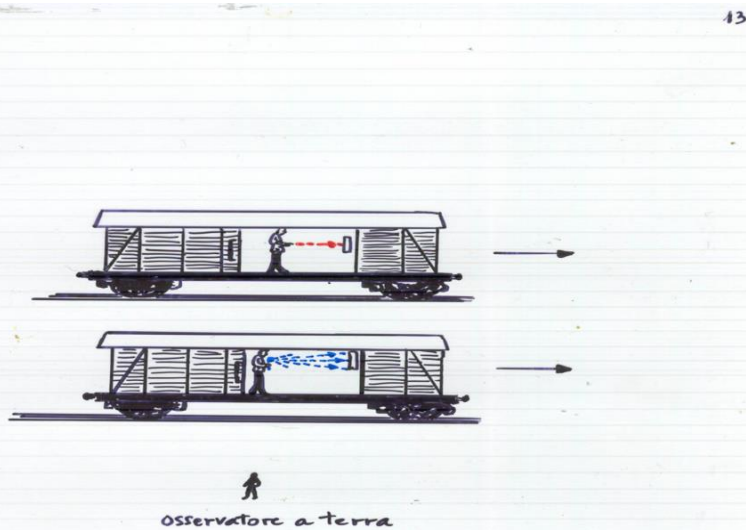
• **etere** : - proprietà contraddittorie

- mancata conferma sperimentale

(vedi i “falliti” esperimenti di **Michelson e Morley**)

Crisi della fisica di fine Ottocento

LUCE: natura ondulatoria (fenomeno elettromagnetico) - **etere**
 c (velocità della luce) = **300.000 km/s** (rispetto all'etere)



Qualsiasi osservatore in moto rispetto all'etere dovrebbe poter misurare per la velocità

Un uomo su di un treno che viaggia a **150 km/h** spara un proiettile con v rispetto al treno di **550 km/h** nella stessa direzione di marcia del treno.

Un osservatore al suolo concluderà (correttamente) che la v del proiettile rispetto al suolo è di **700 km/h** ($150 \text{ km/h} + 550 \text{ km/h}$).

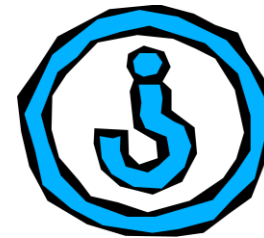
Lo stesso dovrebbe valere per un raggio di luce “sparato” (al posto del proiettile), cioè emesso dallo stesso viaggiatore nella direzione di marcia del treno: cioè un osservatore al suolo dovrebbe poter misurare per il raggio luminoso una v della luce pari a $c_1 = c + v$ (velocità del treno). **Invece non succede così: c resta inalterato**

Crisi della fisica di fine Ottocento

Dicotomia (e sconcerto)
nella fisica di fine Ottocento:



- **mechanische Weltbild** (risalente a **Newton**)
- **elektromagnetische Weltbild**
(introdotta da **Maxwell**)
- **energia** (**Ostwald** e **Mach**)



Crisi della fisica di fine Ottocento

Tuttavia alla maggior parte dei fisici lo stato di salute della fisica tra Ottocento e Novecento continuava ad apparire

“molto soddisfacente”

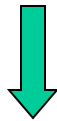


- **etere**: universalmente accettato quale mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche
- l'*ipotesi ad hoc* avanzata da Lorentz spiegava (matematicamente) l'anomalia circa la velocità della luce
- scoperti nuovi fenomeni sperimentali:
raggi X - radioattività - elettrone

Crisi della fisica di fine Ottocento

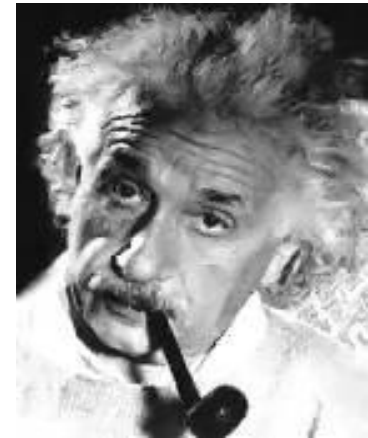
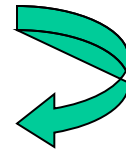
- **Tutto sommato il quadro (meccanicistico) di fondo sembrava “reggere” (pur mostrando qualche “piccola” crepa), senza dover ricorrere a revisioni radicali.**
- **Tanto che – probabilmente - gli scienziati avrebbero continuato a convivere a lungo con la vecchia fisica.**

Per Einstein invece



“Una delle più drammatiche situazioni che la storia della scienza ricordi.”

[A.Einstein – L.Infeld, *“L’evoluzione della fisica”*]



Crisi della fisica di fine Ottocento

Situazione concettuale di fronte alla quale
si trovò Einstein



1. Vale il principio di relatività galileiana
(in base al quale nessun moto è “assoluto”)

2. Ma la velocità della luce ($c = 300.000$ km/s) è sempre la stessa
indipendentemente dal moto della sorgente e dell’osservatore (e
alla luce sono assimilati tutti i fenomeni elettromagnetici)

3. Allora “l’invarianza” delle leggi della fisica (tutti i moti sono
relativi nei SR inerziali) vale solo per i fenomeni meccanici? **La
fisica è una oppure ci sono “due fisiche”?**

Einstein dichiarò a proposito:

“Per quale ragione Dio avrebbe dovuto creare un mondo
in cui esiste una *asimmetria* tra due settori della fisica?”

La seconda rivoluzione scientifica

1905

“*annus mirabilis*” della fisica

spartiacque tra la fisica classica

e la

nuova fisica relativistica



Einstein invia agli *Annalen der Physik* di Berlino tre scritti “rivoluzionari” su:

Moto browniano

Teoria quantistica della luce

Teoria della relatività (speciale)

La seconda rivoluzione scientifica

La rivoluzionaria memoria di Einstein che formula la teoria della

relatività speciale o ristretta



(“ristretta” perché riguarda solo i SR inerziali)

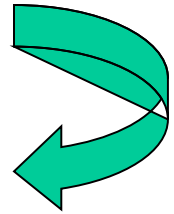
si intitola : *“Sull’elettrodinamica dei corpi in moto”*

Postulati fondamentali della teoria:

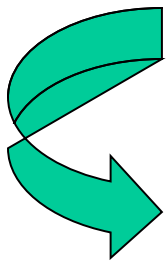
1. Il principio di relatività dei moti (galileiano-newtoniano) vale per tutti i fenomeni fisici (meccanici ed elettromagnetici)
2. La velocità della luce è una costante dell’universo fisico (ha lo stesso valore **C** in tutti i SR inerziali).

La seconda rivoluzione scientifica

Ora il secondo postulato – **costanza della velocità della luce** – viene a sostituire



quello del **tempo assoluto** della fisica classica.



Per cui il tempo non scorre più in modo uniforme in tutto l'universo, ma **accelera o rallenta** in relazione alla velocità del SR.



La seconda rivoluzione scientifica

Relatività del tempo

!!

La conseguenza più paradossale del
secondo postulato

Il tempo diventa una **“variabile**
dipendente dal moto relativo del SR

Novità difficile da “digerire”
non solo a livello di senso comune

La seconda rivoluzione scientifica

Paradosso del tempo



Problema della “**simultaneità**” di due eventi fisici

*“Tutti i nostri giudizi in cui interviene il **tempo** sono giudizi su **eventi simultanei**...”*

*Se per esempio dico: - Quel treno giunge qui alle 7 -, ciò equivale a dire in pratica che il posizionamento della lancetta del mio orologio sul 7 e l’arrivo del treno sono **eventi simultanei**.”*

Einstein, “*Sull’elettrodinamica dei corpi in moto*”

La seconda rivoluzione scientifica

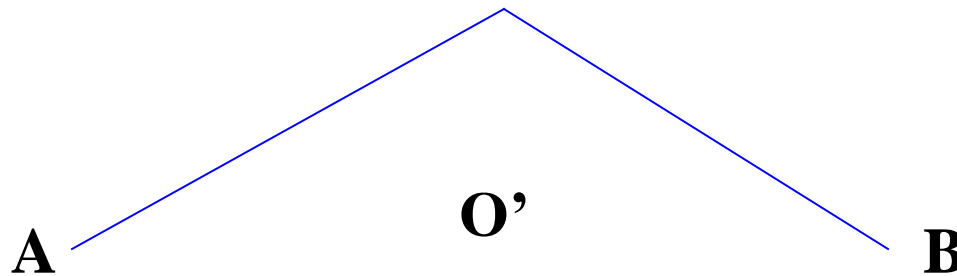
Tesi su cui si fonda la radicale “revisione” del tempo
operata da Einstein

La simultaneità tra due eventi non è assoluta,
bensì relativa e dipendente dal SR
in cui si trova l'osservatore

Ciò significa che eventi simultanei
per un osservatore **non sono tali** per un altro
osservatore in moto relativo rispetto al primo

La seconda rivoluzione scientifica

Dimostrazione fulmine biforcuto



O



direzione di moto del treno

Osservatore O : in quiete (relativa) sul terreno

Osservatore O' : all'interno e al centro del treno

La seconda rivoluzione scientifica

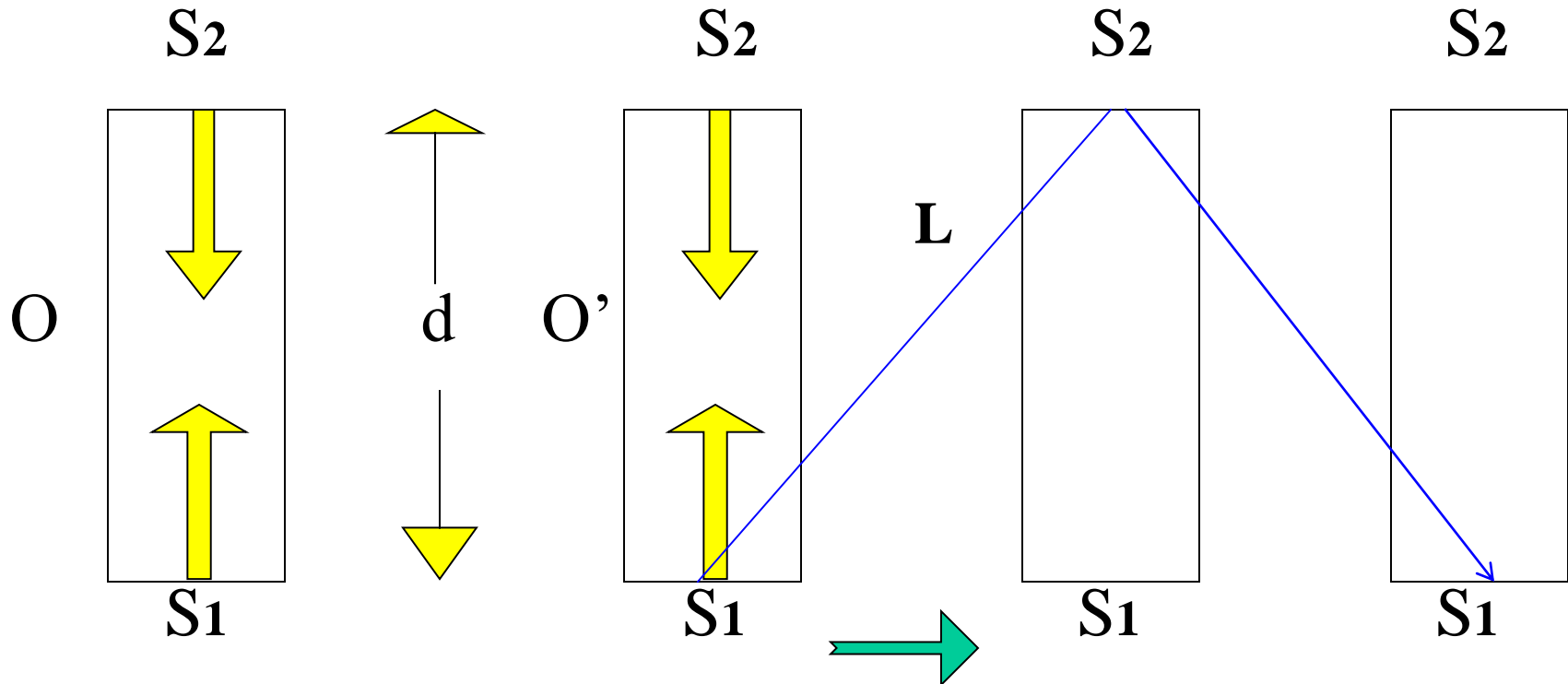
Un fulmine (biforcandosi) colpisce un treno

- Un **osservatore in O** percepisce contemporaneamente (cioè “simultaneamente”) le due scariche con le quali il fulmine biforcuto colpisce due punti A e B (equidistanti da lui)
- Invece un **osservatore in O'** (in moto rettilineo uniforme sul treno) percepisce le due scariche dello stesso fulmine in maniera un po' diversa: cioè la scarica in A sarà percepita da O' un frazione di secondo prima di quella in B (l'osservatore sul treno “va incontro” ad A)
- **Le due scariche in A e B che risultavano simultanee per O non lo sono per O'.**
- Ciò a causa della *velocità di propagazione finita* della luce

La seconda rivoluzione scientifica

Orologi a luce

[rallentamento del tempo in relazione alla velocità]



Sono rappresentati due “orologi a luce”, in cui un lampo di luce si riflette da S_1 a S_2 e ritorno (= tic – tac di un orologio). Ai due orologi sono collegati due osservatori fissi O e O' . Ora l’orologio a luce collegato con O' – in moto rettilineo uniforme rispetto ad O – “**ritarda**” (cioè rallenta) rispetto all’orologio collegato con O .

Cioè: O , che osserva l’orologio O' , vede il lampo procedere “obliquamente” (L e non d). Quindi, per il 2° postulato, il tempo impiegato dalla luce da S_1 a S_2 e ritorno misurato da O è maggiore di quello registrato da O' .

La seconda rivoluzione scientifica

Precisazione

**“dilatazione dei tempi” in rapporto alla velocità
[esempio precedente di due orologi a luce]**

• **nella fisica classica $t = t^1$**

• **nella fisica relativistica $t = t^1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$**

cioè l'intervallo di tempo t^1 per O^1 viene dilatato – rispetto a O – secondo il fattore di Lorentz

In realtà ciò significa:

L'orologio in moto “sarà visto” andare più lentamente rispetto al corrispondente (e sincronizzato) orologio stazionario (in un altro SR). La scala temporale di O e quella di O^1 risultano diverse se gli osservatori si trovano in moto relativo.

La seconda rivoluzione scientifica

TEMPO RELATIVISTICO

1. Conferma sperimentale (recente) :

studio dei cosiddetti *mesoni* μ

2. Paradosso dei gemelli :



La “memoria” di Einstein (sull’elettrodinamica dei corpi in moto) su cui si fonda la teoria della relatività speciale fu pubblicata negli *Annalen der Physik* il 26 settembre 1905. Secondo il suo stile, Einstein non allegava alcuna bibliografia.

La seconda rivoluzione scientifica

Conseguenze della teoria della relatività :

nasce un nuovo universo fisico

- 1. Nessun moto è assoluto.**
- 2. Nessun SR (meccanico o elettromagnetico) è “privilegiato”.**
- 3. L'etere diventa un'ipotesi inutile.**
- 4. Le trasformazioni di Lorentz sostituiscono quelle classiche di Galileo-Newton in tutti i fenomeni fisici (compresi quelli meccanici).**
- 5. La meccanica classica non perde il suo valore: riduce la sua estensione a quei fenomeni con velocità relativa (molto) inferiore a quella della luce: in questi casi le due teorie danno risultati praticamente coincidenti. In altri termini: la teoria della relatività contiene la meccanica classica come caso limite (per v molto inferiori a c).**

La seconda rivoluzione scientifica

6. **Il tempo** (come la massa e la lunghezza) **diventa relativo al SR**
7. **Rapporto massa-energia secondo la formula $E = mc^2$**
Cioè, massa ed energia non sono due realtà distinte:
ad ogni frammento di materia-massa equivale
un'enorme quantità di energia.
8. **La velocità della luce è una velocità limite.** Infatti se v fosse
maggiore di c , nel radicale di Lorentz la radice sarebbe
immaginaria : $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ [radicale di Lorentz].
9. D'ora in poi si parlerà di **spazio-tempo** (o cronotopo)
e di “continuo quadridimensionale” quale scenario-contesto
in cui avvengono i fenomeni fisici.

La seconda rivoluzione scientifica

Approfondimento / precisazione sulla famosa formula:


$$E=mc^2$$

Una formula che “doveva cambiare il mondo”

“Se un corpo emette E sotto forma di radiazione, la sua massa diminuisce di E/c^2 ...

“Se la teoria è conforme ai fatti, la radiazione trasporta inerzia (massa) tra corpi emittenti e corpi assorbenti.”

[**Einstein**, *L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*”: breve memoria (appena 3 pagine!) inviata agli *Annalen der Physik* di Berlino tre giorni dopo l'articolo sulla relatività]

La questione del tempo nella fisica contemporanea

Quadro generale (a livello sintetico-elementare)

•In base alla relatività speciale (1905), il tempo non scorre in modo omogeneo e uniforme in tutti i SR (tempo assoluto di Newton), ma accelera o rallenta in rapporto al moto relativo del SR (tempo relativo di Einstein).

•La teoria della relatività speciale, postulando la velocità della luce (c) come assoluto, “relativizza” il tempo per conservare l'**invarianza delle leggi della fisica in tutti i SR** (in moto inerziale, cioè rettilineo uniforme).

[Non per niente, Einstein avrebbe voluto chiamare la sua nuova teoria non “teoria della relatività”, bensì “*Invarianz-theorie*.]

La questione del tempo nella fisica contemporanea

Quadro generale (a livello sintetico-elementare)

•In base alla teoria della relatività speciale, le tre dimensioni dello spazio non sono più sufficienti a spiegare gli eventi fisici: ad essi va aggiunta la quarta dimensione rappresentata dal **tempo**.

Infatti d'ora in poi si parlerà di **spazio-tempo** quale scenario unico dell'accadere dei fenomeni.

•Conseguenza fondamentale: ogni mutamento/alterazione dello spazio comporta necessariamente una corrispondente variazione del tempo (e viceversa).

La questione del tempo nella fisica contemporanea

Quadro generale (a livello sintetico-elementare)

- La teoria della **relatività generale** (1916) estende il principio di relatività a tutti i SR, compresi i moti accelerati e quindi quelli gravitazionali.
- La teoria interpreta i campi gravitazionali come “**incurvature**” dello spazio-tempo (causate dalla presenza di masse).
- Importante : la struttura dello spazio-tempo è vista come “**continuum**” (anche a livello delle grandezze minime dello spazio-tempo).

- La **meccanica quantistica** invece (a partire dalla metà degli anni Venti del '900) introduce e postula una concezione dell'universo come “discretum” (a livello delle grandezze minime: la cosiddetta “fisica delle particelle”).

La questione del tempo nella fisica contemporanea

Quadro generale (a livello sintetico-elementare)

• In altre parole, i fisici scoprono che non si può scendere, in natura, sotto un minimo o **“quantum”**, sia di materia che di energia: a quelle dimensioni gli scambi avvengono solo per **“pacchetti”** o quanti, mai per sottomultipli di essi [cfr. la costante di Planck].

• Inoltre la meccanica quantistica postula un irrimediabile **“indeterminismo”** (v. principio di Heisenberg) nella misurazione di grandezze cosiddette **“coniugate”** (per es., posizione e impulso di un elettrone).

• Indeterminismo – è importante sottolinearlo - che non dipende dall'inadeguatezza dei nostri strumenti di misurazione, bensì dalla **“natura stessa delle cose”**.

La questione del tempo nella fisica contemporanea

Quadro generale (a livello sintetico-elementare)

•Attualmente la fisica contemporanea, e la meccanica quantistica in particolare (dalle cui conclusioni Einstein dissentiva), sta portando avanti un ambizioso programma di **“unificazione” di tutta la fisica** (che era stato anche l’obiettivo di ricerca di Einstein negli ultimi anni della sua vita, sebbene in altra direzione).

•In questa direzione sono stati ottenuti successi lusinghieri: tre delle quattro **forze fondamentali del nostro universo fisico** [elettromagnetica, forza “forte” (o “interazioni nucleari forti”) e forza “debole” (o “interazioni nucleari deboli”)] sono state brillantemente spiegate e unificate all’interno del quadro generale di fondo (o “paradigma”) fornito dalla meccanica quantistica (che costituisce sicuramente la più promettente e feconda prospettiva di ricerca della fisica contemporanea).

La questione del tempo nella fisica contemporanea

Quadro generale (a livello sintetico-elementare)

- Rimane – irrisolto e non unificato – il **problema della gravità** (e la forza gravitazionale costituisce la quarta forza fondamentale del mondo fisico).
- Ora, i moti gravitazionali trovano esauriente spiegazione nelle formule della relatività generale **a livello macroscopico, cioè astronomico**, ma risultano incompatibili (finora) con la meccanica quantistica (pertanto la relatività generale è in contraddizione con la meccanica quantistica, mentre la relatività speciale, perfettamente compatibile, ne costituisce un aspetto importante).
- Conclusione: si parla, nella fisica contemporanea, di **“modello standard”** e di **“Teoria del quasi Tutto”**, dove quel “quasi” sta a significare che non c’è ancora una teoria che consenta di unificare le tre forze fondamentali della natura con la quarta, quella gravitazionale.

La questione del tempo nella fisica contemporanea

Quadro generale (a livello sintetico-elementare)

- La **teoria delle “stringhe”** (o delle super-stringhe, i due termini sono pressoché equivalenti) potrebbe essere una soluzione, ma mancano ancora le conferme sperimentali.
- Gli acceleratori di particelle – in tutto il mondo, il CERN di Ginevra in particolare – sono “a caccia di stringhe”.

• È importante sottolineare - e ciò riguarda non solo, in particolare, il nostro (modesto) discorso sul tempo, bensì in generale la concezione stessa dell'universo – che **una spiegazione “quantistica” della gravità** – qualora fosse ottenuta e confermata – comporterebbe necessariamente la **“quantizzazione” del tempo**, con conseguenze rivoluzionarie per la concezione del tempo in generale.

Teoria della relatività generale (1916)

Scritto di Einstein che riguarda l'estensione della relatività (speciale) anche ai sistemi accelerati, pertanto compresi quelli soggetti alla forza di gravità:

“I fondamenti della teoria della relatività generale”

[pubblicato negli *Annalen der Physik* il 1916]

- **Einstein è mosso dal vettore della completezza: non è possibile che il principio di relatività valga solo per i sistemi inerziali. Le leggi della fisica devono valere per tutti i SR.**
- **1907, anno di svolta nell'iter concettuale lungo e complesso che condusse Einstein a formulare la nuova teoria. Per sua stessa ammissione in quell'anno egli ebbe “il pensiero più felice della sua vita”!**
- **Intuì quello che chiamò poi “**principio di equivalenza**”**
[tra campo gravitazionale e corrispondente accelerazione del SR]. Vedi *gedanken Experiment* dei due ascensori.

Teoria della relatività generale (1916)

- **I campi gravitazionali sono interpretati come “distorsioni” (causate dalla presenza di masse corporee) che strutturano lo spazio-tempo “incurvandolo”.**
- **Non è facile dare una descrizione della realtà fisica postulata dalla teoria, a prescindere dagli ardui formalismi matematici (v. calcolo tensoriale) che la sua elaborazione richiese.**

Lo stesso Einstein confessò ad un amico (lettera a Sommerfeld, ottobre 1912): “*L’animo mi si è riempito di grande rispetto per la matematica, la parte più sottile della quale, nella mia dabbenaggine, avevo finora trascurato.*”

- **Vedi l’analogia col foglio di gomma su cui poggiano sfere di piombo.**
- **In conclusione: in base alla legge della gravitazione universale formulata da Newton i corpi nello spazio si attraggono reciprocamente (in rapporto alla massa e alla distanza).**

Teoria della relatività generale (1916)

• Secondo la nuova teoria, invece, la presenza di materia [dove per “materia si intende tutto ciò che non è campo gravitazionale] distorce e “incurva” lo spazio-tempo.

Tali “distorsioni” corrispondono a quelli che chiamiamo “campi gravitazionali”.

• **Abbandono della struttura euclidea dell’universo**

(v. geometrie non-euclidee, nel caso specifico la geometria ellittica di Riemann).

• **Veramente “fisico” sembra equivalere a “geometrico”.**

Con la relatività generale ritorna con forza il tema della “struttura geometrica” del mondo, cara al pitagorismo da Platone a Galileo.

• La relatività generale ha avuto importanti conferme sperimentali, la prima già nel 1919 in occasione di un’eclissi di sole (influenza dei campi gravitazionali sulla luce, anomalia circa l’orbita di Mercurio).

Teoria della relatività generale (1916)

•Previsione della nuova teoria oggi:

i buchi neri

Infatti in base alla relatività generale, si ipotizza che il campo gravitazionale prodotto da una massa di densità crescente raggiunge, ad un certo punto, un livello tale da non consentire a nulla, nemmeno alla luce, di sfuggire ad esso. [Per farci un'idea: si potrebbe formare un buco nero se la massa del nostro sole diventasse così densa da non superare i 3 km di diametro.]

Importante per il nostro discorso sul tempo:

- 1) La nuova teoria (a differenza della meccanica quantistica) postula lo **spazio-tempo come struttura fisica unica, incurvata e dinamica** (in tensione), a causa dalla presenza di materia. La geometria che la descrive non è più quella di Euclide, ma di Riemann, mentre lo **spazio-tempo della meccanica quantistica** è quello “piatto” euclideo (ma non divisibile all'infinito).
- 2) Lo spazio-tempo è inteso come **“continuum”**, senza soluzione di continuità, anche alle grandezze minime.

Origine della meccanica quantistica

1. Spiegazione della radiazione di “corpo nero” (1900) da parte di Planck.

h : costante di Planck ($= 6,626 \times 10^{-34}$ Js)

Rappresenta la minima quantità di energia o “quantum”:
in natura non avvengono scambi energetici per sottomultipli di h .

Si scoprirà in seguito che **la costante di Planck è una costante universale del mondo fisico.**

Importante per il nostro discorso sul tempo: **la costante di Planck si ripresenta nel tempo “quantizzato”** (v. più avanti)

2. Spiegazione dell'**effetto fotoelettrico** (1905) da parte di Einstein (**fotoni o quanti di luce**) nello scritto per cui ebbe il Nobel:

“Su un punto di vista euristico circa la creazione e la trasformazione della luce.”

Conseguenza: **struttura (anche) corpuscolare della luce** (considerata prima solo come “onda” elettromagnetica).

Origine della meccanica quantistica

3. Conseguenza generale: **radiazione di energia come “discretum”** (o discontinuo).
4. Dualità “onda-corpuscolo” (paradosso sulla natura e il comportamento della luce).

La meccanica quantistica (elementi fondamentali)

1. Le onde di de Broglie (1924)

Egli ipotizzò che il dualismo onda-corpuscolo (proprio delle radiazioni) dovesse valere anche per le particelle: cioè perché i corpuscoli (elettroni, protoni, ecc.) non dovrebbero avere anche un *comportamento ondulatorio*? Negli anni seguenti (1927) le “onde di de Broglie divennero una realtà fisica.



Meccanica quantistica [elementi fondamentali]

2. Equazione d'onda di Schrödinger (1926)



La sua celebre “equazione d’onda” descrive la *probabilità* di trovare in un campo di forze una particella (per es. un elettrone) *distribuita come un’onda* in una zona dello spazio.

Attenzione: nella m.q. il corpuscolo non è più **il punto materiale** della fisica classica, bensì viene rappresentato come “funzione d’onda”.

Ogni qualvolta si localizza un **corpuscolo quantico** avviene (si usa dire) una “riduzione del pacchetto d’onda” (che perturba inevitabilmente l’evoluzione spazio-temporale della *funzione d’onda*, come renderà esplicito il principio d’indeterminazione di Heisenberg).

Meccanica quantistica (elementi fondamentali)

3. Principio di indeterminazione di Heisenberg (1927) : fine del determinismo e dell'oggettività classica.

Heisenberg giunse alla conclusione che, se conoscere significa misurare, nella m.q. **misurare significa perturbare inevitabilmente il sistema fisico.**

Egli formulò questo principio nel modo seguente:



“Per quanto siano perfezionati i sistemi di misurazione, la determinazione simultanea di due grandezze coniugate [per es. posizione e impulso di una particella] non è mai possibile con precisione, ma avviene sempre con una certa (ineliminabile) indeterminazione.”

Il problema è: si tratta di una caratteristica “inadeguata” della nostra conoscenza (come pensava Einstein) oppure *l'indeterminazione* è insita nella natura delle cose?

4. Principio di complementarità di Bohr (1927)



In sostanza, secondo Bohr, ogni esperienza in grado di evidenziare una particella elementare come *corpusco* esclude la possibilità di determinarla come *onda*.

Egli formulò così questo principio (per la prima volta nel Congresso Voltiano tenutosi a Como nel 1927):

“Se un esperimento permette di osservare un aspetto di un fenomeno fisico, esso impedisce al tempo stesso di osservare l’aspetto complementare dello stesso fenomeno.”

5. Interpretazione di Copenhagen (anni Trenta – Ottanta):
spiegazione “standard” di quanto accade nel mondo quantico.

Meccanica quantistica (elementi fondamentali)

6. Esperimenti e paradossi: sovrapposizione di stati quantici (*entanglement* o stato *entangled*):



esperimento della doppia fenditura

In esso – secondo Richard Feynman - è racchiuso “il mistero centrale della meccanica quantistica”.



paradosso EPR (Einstein – Podolsky – Rosen) :

“gedanken Experiment” che indusse Einstein a parlare di “*azione fantasma a distanza*”. Ciò avrebbe comportato la possibilità di una comunicazione istantanea a qualsiasi distanza, negata dal secondo principio della relatività speciale (velocità finita della luce).

Meccanica quantistica (elementi fondamentali)

7. **Il gatto di Schrödinger** il più famoso gedanken Experiment della meccanica quantistica



Gatto in cattura:
Entra nella scatola!



Gatto di Schrödinger nella scatola: pronto per l'esperimento



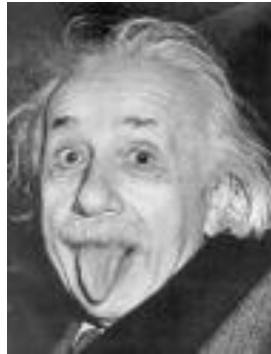
Gatto di Schrödinger prima dell'apertura:
vivo + morto (non: "vivo o morto")
Cioè: gatto in stato di "sovrapposizione quantica"



Gatto uscito vivo dalla scatola (giustamente) **si vendica !!**

Meccanica quantistica

Posizione di Einstein nei confronti della visione quantistica del mondo [che pure aveva contribuito a fondare]



(Einstein mostra la lingua)

- Si tratta di una interpretazione provvisoria, non definitiva: un punto di vista “euristico”.
- A causa della sua **incompletezza** e del suo **indeterminismo** (“**Dio non gioca a dadi**”) costituisce un ostacolo per un programma di unificazione della fisica.
- D’altra parte, ricerca (continua e solitaria) da parte di Einstein di una **teoria di campo unificata**.

Situazione attuale

- Nel corso degli anni, la posizione di Einstein si rivelò perdente (solo apparentemente?).
- Oggi la fisica quantistica descrive bene il comportamento del mondo su scala estremamente piccola (sia dal punto di vista teorico che sperimentale).
- I suoi principi di fondo – anche se in contrasto col senso comune – sono generalmente accettati. Essi sono:

1. Discontinuità (cioè i processi fisici avvengono in modo discontinuo, per *salts quantici*).

2. Casualità (cioè un'entità quantica sceglie tra le opzioni disponibili in modo *assolutamente casuale*).

3. Non-località (cioè due entità quantiche che fanno parte dello stesso sistema fisico, per es. due fotoni emessi dal medesimo atomo, restano *collegati l'un l'altro per sempre qualunque sia la distanza che li separi*).

Vedi esperimento di Aspect (che confutava definitivamente il paradosso EPR).

Cosa comporta tutto ciò per il problema del tempo?

1. Le leggi della fisica (compresa la relatività) non dicono che il tempo fluisce realmente dal presente al futuro.

Tutti i tempi si trovano sullo stesso piano.

Ciò solleva un quesito circa il destino e il libero arbitrio: il futuro è, in un certo senso, già presente e non aspetta altro che la nostra coscienza lo raggiunga?

2. Peraltro l'indeterminazione inerente alla fisica quantistica consente di ipotizzare (qualora si arrivasse ad una teoria dello spazio-tempo unificata, coniugando relatività generale e meccanica quantistica, v. "gravità quantistica") la possibilità di **ristabilire l'incertezza del futuro nella descrizione dello spazio-tempo.**

Cosa comporta tutto ciò per il problema del tempo?

3. La meccanica quantistica postula una **concezione discontinua del tempo** (come di ogni altra realtà fisica).

Cosa vuol dire ciò? Significa che deve esistere il “quanto di tempo”, cioè la minima misura di tempo che abbia senso nel mondo fisico. Essa corrisponde al tempo necessario alla luce per percorrere la distanza di Planck (ritorna la costante h) e corrisponde a 10^{-43} secondi (facile da scrivere, quasi impossibile da immaginare).

4. Allora, se le cose stanno come vuole la m.q., significa che **il tempo scorre “a intermittenza”, per somma di “quanti di tempo”**. Naturalmente a livello macroscopico il tempo “sembra” fluire in modo continuo, essendo gli intervalli assolutamente impercettibili.

Cosa comporta tutto ciò per il problema del tempo?

5. Ma la domanda di fondo è:

**Cosa c'è tra un quanto e l'altro di tempo?
Una sorta di non-tempo?**

Anche se per la m.q. la domanda è priva di senso (dal momento che il “quanto” è il minimo fisico concepibile e l’universo stesso deve aver avuto origine quando aveva già un’età pari a 10^{-43} secondi), è innegabile che una concezione “quantizzata” del tempo è sì affascinante, ma solleva non pochi interrogativi.

Situazione attuale della fisica (sintesi)

Modello standard

- Teoria che descrive tutte le particelle elementari note e tre delle forze fondamentali (cioè interazione forte, debole ed elettromagnetica).

Si tratta di una teoria coerente sia con la m.q. che con la relatività speciale.

- Non comprende invece la **gravità** (cioè la relatività generale) per la quale non esiste ad oggi una teoria quantistica.

- Il modello standard prevede:

- 1) particelle costituenti la materia

- 2) particelle mediatrici delle forze (dette *bosoni*)

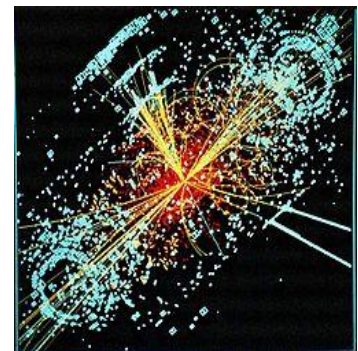
- Il modello standard non prevede il *gravitone* (cioè il bosone che dovrebbe mediare l'interazione gravitazionale). La teoria prevede invece il cosiddetto “bosone di Higgs”.

Situazione attuale della fisica (sintesi)

Bosone di Higgs (o “particella di Dio”)

- **Particella elementare prevista dal Modello Standard, da tempo (1964) ipotizzata dalla teoria e recentemente confermata (2012) sperimentalmente dall'acceleratore di particelle LHC [Large Hadron Collider] di Ginevra.**
- **Per la scoperta l'anno seguente (2013)) a Peter Higgs e François Englert è stato conferito il Premio Nobel per la fisica.**
- **Il bosone di Higgs è fondamentale per il Modello Standard in quanto portatore di massa a tutte le particelle.**
- **Data la sua importanza nella teoria, il premio Nobel per la fisica Leon Max Lederman l'aveva chiamata “la particella di Dio”.**

Simulazione di un evento (in un acceleratore) che dovrebbe generare un bosone di Higgs.



Situazione attuale della fisica

Gravità quantistica

- **Rappresenta il tentativo della fisica teorica (che descrive tre delle forze fondamentali della natura) di comprendere al suo interno anche la teoria della relatività generale (cioè la gravità, la quarta forza fondamentale).**
- **Lo scopo è quello di unificare le quattro forze fondamentali all'interno di una cosiddetta “Teoria del Tutto”.**
- **L'unificazione non è semplice perché le teorie partono da presupposti radicalmente diversi su come è strutturato il nostro universo.**
- **La teoria quantistica postula campi di particelle inserite nello spazio-tempo piatto della relatività ristretta [spazio-tempo di Minkowski].**
- **La relatività generale invece considera la gravità una curvatura intrinseca dello spazio-tempo, che varia per la presenza e il movimento delle masse [spazio-tempo di Riemann]. In altri termini il problema è spiegare come funziona la forza gravitazionale tra particelle elementari.**