

*Einstein 100 anni dopo*

1915: prende forma la

“Teoria generale della relatività”

## **Lo strano caso di una ricerca che cambia strada facendo**

Subito dopo aver costruito la RR (relatività ristretta) Einstein è insoddisfatto: perché i riferimenti inerziali debbono avere questo ruolo privilegiato?

Si mette perciò al lavoro per “generalizzare” la sua teoria, in modo che sia applicabile anche a rif. non inerziali.

Ecco perché “Relatività Generale”.

Ma strada facendo succede qualcosa...

## Chiariamo meglio

Per capire meglio bisogna tornare alla meccanica newtoniana (non a Newton, però).

È infatti nella meccanica newtoniana che nasce la distinzione tra rif. inerziali e non inerziali.

*Sistema di riferimento* (brevemente “riferimento”, rif.) è sostanzialmente un *laboratorio*, dotato di tutti gli *strumenti* necessari per la fisica.

Rif. inerziale è un rif. in cui vale il primo principio:

*un corpo non soggetto a forze*

(in pratica, sufficientemente lontano da altri corpi, o adeguatamente schermato)

*si muove di moto rettilineo uniforme.*

## Attenzione all'enunciato!

Apparentemente il primo principio sembra un caso particolare del secondo:  $F = ma$ , quindi se  $F = 0$  anche  $a = 0$ , *moto rettilineo uniforme*.

Ma non è così, perché il secondo principio dice:

*In un rif. inerziale un corpo cui sia applicata una forza  $F$  si muove con accelerazione  $a$  tale che  $F = ma$ .*

Dunque il secondo principio richiede che si sappia che cos'è un rif. inerziale, e *a questo provvede il primo principio*.

## E se non è inerziale?

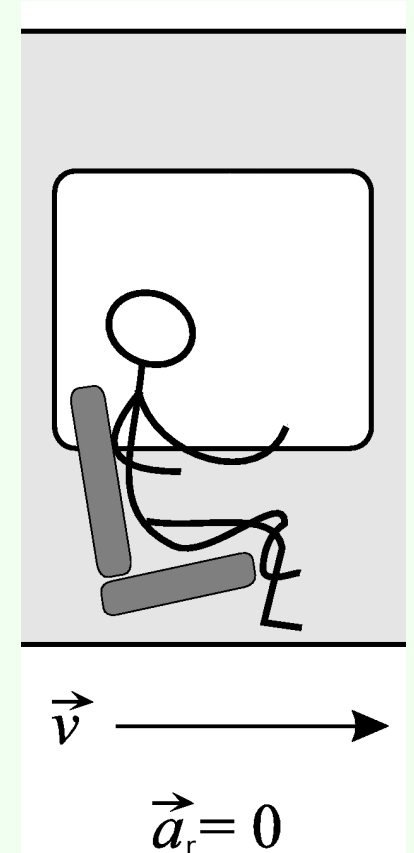
Dobbiamo rinunciare, o c'è qualche rimedio? Vediamo.

Mi trovo in un autobus, comodamente seduto. Finché l'autobus va a velocità costante, non mi accorgo del suo moto (pr. di relatività).

Se l'autobus improvvisamente frena, mi sento spinto in avanti.

In realtà quello che succede è che *se non sono vincolato* (non mi reggo da qualche parte) *improvvisamente mi muovo* (in avanti).

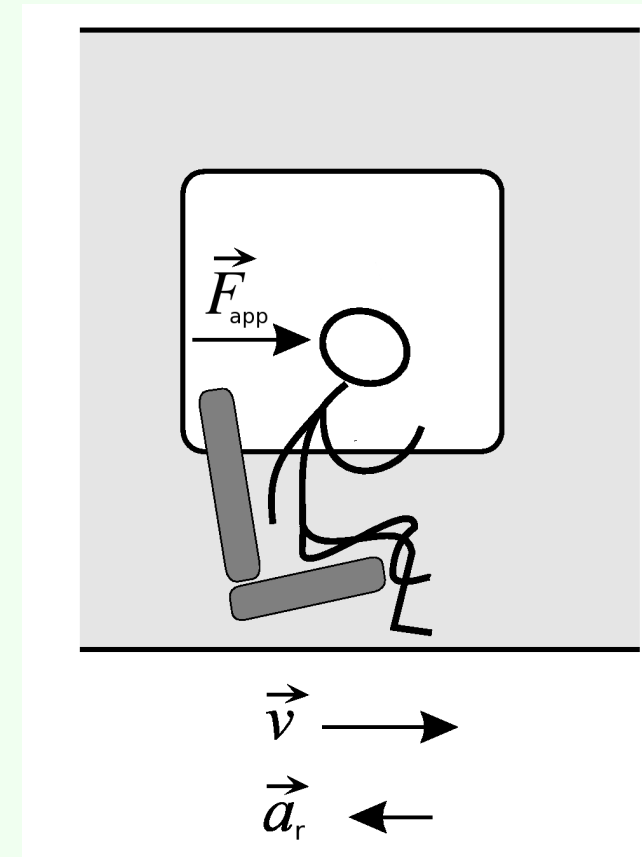
Dunque in queste condizioni *il primo principio non vale!*



Lo so, la vostra interpretazione sarà un'altra: c'è una “forza” che mi spinge.

Ma attenzione: una forza presuppone qualcosa o qualcuno che la produce, e qui il qualcosa o qualcuno *non c'è!*

Quindi la prima risposta che dà un fisico è: sei in un rif. *non inerziale* (l'autobus che frena) e le leggi della dinamica *in questo rif. non valgono*.



## Un altro modo di vedere le cose

Ma la fantasia dei fisici è abbastanza viva, e ha trovato il modo di salvare l'impressione che dicevo prima:

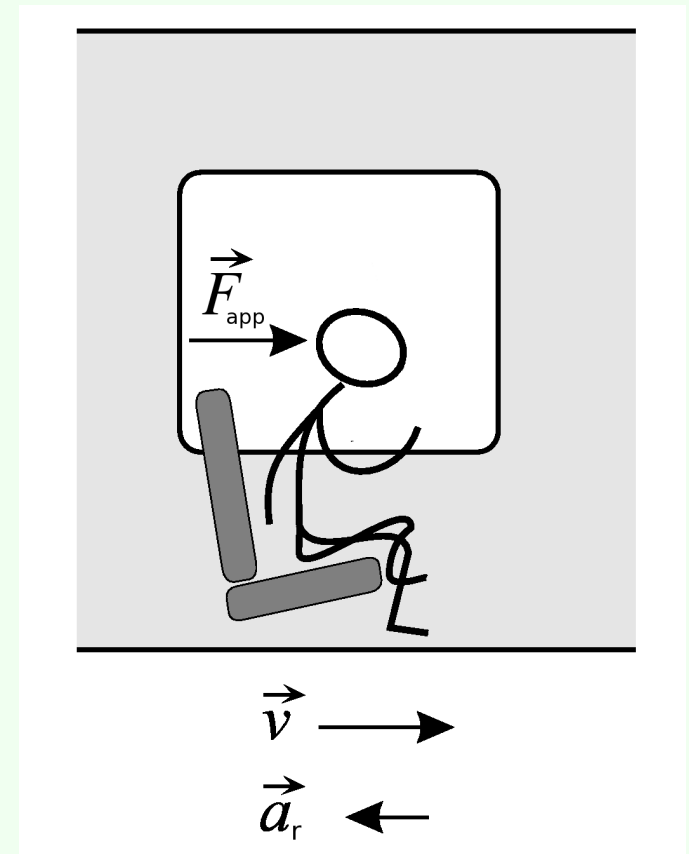
“La vostra interpretazione sarà un'altra: c'è una ‘forza’ che mi spinge.”

Per poter usare le leggi della dinamica anche nei rif. non inerziali (accelerati) sono state inventate delle forze speciali, che prendono il nome di *forze apparenti*.

## Forze apparenti

La regola è questa:

“Se ci si trova in un rif. non inerziale, che si muove (rispetto a uno inerziale) con accelerazione  $a_r$ , si possono ancora usare le leggi di Newton a patto di aggiungere, alle forze *reali* agenti su un corpo (quelle prodotte da altri corpi) la forza *apparente*  $-ma_r$ .”





Questa regola va capita bene. Rileggiamola:

“Se ci si trova in un rif. non inerziale, che si muove (rispetto a uno inerziale) con accelerazione  $a_r$ , si possono ancora usare le leggi di Newton a patto di aggiungere, alle forze *reali* agenti su un corpo (quelle prodotte da altri corpi) la forza *apparente*  $-ma_r$ .

Vanno osservate due cose:

1) Il segno  $-$ . Vuol dire che la forza apparente è *opposta* all'accelerazione del rif. non inerziale.

Nel caso dell'autobus che frena,  $a_r$  è diretta *verso la coda*, quindi la forza apparente è diretta *in avanti*. E infatti così la sentiamo.

2) Molto più importante: la forza apparente agirà *su qualsiasi corpo* il cui moto venga studiato nel rif. non inerziale. La forza su ciascun corpo è *diversa* dall'uno all'altro per l'intensità: è *proporzionale alla massa* del corpo.

## **È proporzionale alla massa del corpo**

Come la forza di gravità!

Questo fatto colpisce Einstein: lo vede come un legame tra gravità e rif. accelerati.

Sarà una svolta cruciale nel suo lavoro.

Ma vediamo meglio, richiamando la teoria newtoniana della gravitazione.

## La teoria newtoniana della gravitazione

Le caratteristiche della teoria newtoniana si riassumono nella famosa formula:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}.$$

Il corpo di massa  $M$  attrae quello di massa  $m$  con una forza proporzionale alle due masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Anche se non c'è scritto in modo esplicito, va notato che la forza è *istantanea*: se  $M$  si muove, la forza cambia istante per istante a seconda della sua posizione.

La forza di gravità newtoniana *si propaga istantaneamente*.

Già questo è *incompatibile* con la relatività, dove  $c$  è una *velocità limite*.

## La teoria newtoniana della gravitazione

Ma ora la cosa più importante è la proporzionalità a  $m$ : è questa che fa sì che l'*accelerazione* di un grave sia *indipendente dalla sua massa*:

$$a = G \frac{M}{r^2}.$$

*Tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione.*

Ma questo l'aveva scoperto Galileo, che ne parla nei *Massimi Sistemi*. Che c'è di nuovo?

C'è la connessione coi rif. accelerati, che Einstein enuncia come *principio di equivalenza* (PE):

*Se siamo in un rif. accelerato (accelerazione  $a_r$ ) tutto va come se ci trovassimo in un rif. inerziale, in presenza di gravità  $g = -a_r$ .*

*E viceversa.*

## Il principio di equivalenza

Se siamo in un *rif. accelerato* (accelerazione  $a_r$ ) tutto va come se ci trovassimo in un *rif. inerziale*, in *presenza di gravità*  $g = -a_r$ .

E viceversa.

Si potrebbe dire che Einstein *riscopre* il PE, perché non è cosa nuova: senza accorgersene lo usa già Newton (non abbiamo tempo per vedere dove e come).

Però anche qui, come già col PR, Einstein compie una generalizzazione: anche il PE, come il PR, *vale per ogni fenomeno fisico*.

E trova subito due *applicazioni*.

## Il principio di equivalenza: applicazioni

La prima è la deflessione *gravitazionale della luce*.

In un'astronave che accelera, un proiettile sparato trasversalmente *non va in linea retta*, come non va in linea retta sulla Terra (PE: *gravità = accelerazione*).

Lo stesso accade alla luce: in prossimità della Terra la luce *non si propaga in linea retta*.

Solo che la deviazione della luce è *assai più piccola* di quella di un proiettile, a causa della *maggiore velocità*.

Ma se invece della Terra pensiamo al Sole, con una forza di gravità molto più grande e che agisce su uno spazio molto più lungo, la deviazione *può diventare misurabile...*

Ne riparleremo.

## Il principio di equivalenza: applicazioni

La seconda è il cosiddetto *redshift gravitazionale*.

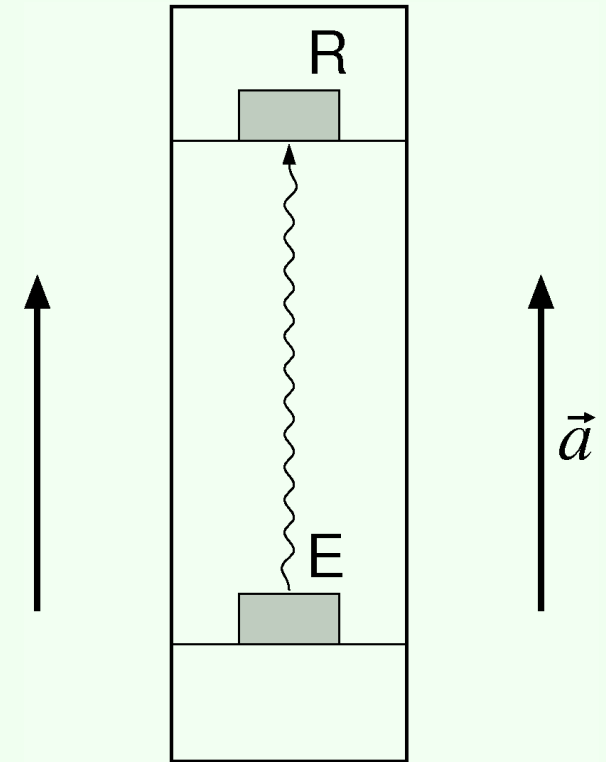
*Primo tempo.* Siamo in un'astronave, nello spazio profondo.

L'astronave porta a bordo un *emettitore* E e un *ricevitore* R di radiazione e.m.: il primo a poppa, il secondo a prua.

L'astronave ha i *razzi accesi* e un'accelerazione  $a$ , in grandezza uguale all'accelerazione di gravità sulla Terra:  $a = g$ .

Ci chiediamo: che relazione ci sarà tra la frequenza  $\nu_e$  della radiazione emessa e quella  $\nu_r$  ricevuta?

A prima vista non si vede perché non dovrebbero essere uguali. Però...



Nel tempo che la radiazione impiega per andare da E a R, la velocità dell'astronave è *aumentata*, quindi è come se R si muovesse rispetto a E, *allontanandosi*.

Ma si sa che se un ricevitore si allontana, la frequenza che riceve è *minore* (effetto Doppler).

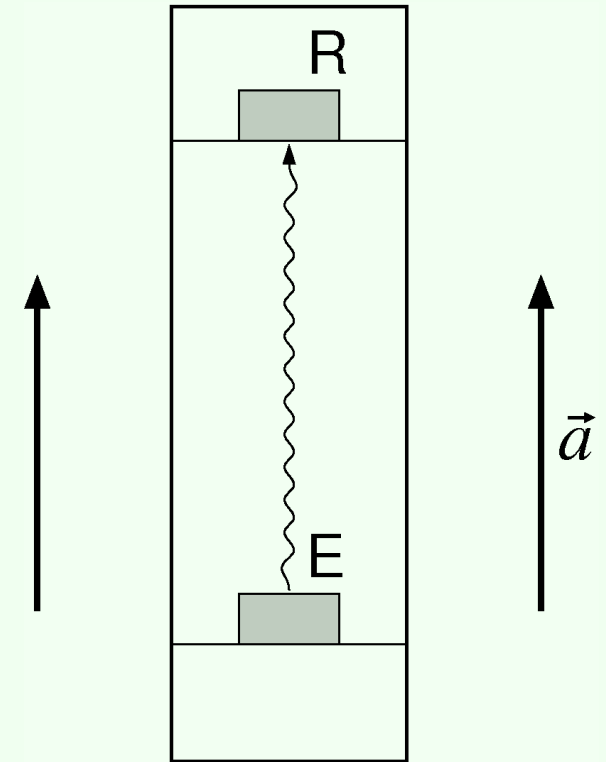
Quindi avremo  $v_r < v_e$ .

Si può anche dare una formula, ma sorvoliamo.

È importante tener presente che la frequenza ricevuta è *minore* di quella emessa.

N.B.: Qui la relatività *non c'entra*.

Se l'idea fosse venuta in mente, il risultato sarebbe stato prevedibile anche prima di Einstein, ma poco interessante.





*Secondo tempo.* La stessa astronave è ferma a terra sulla rampa di lancio, a motori spenti.

Che possiamo dire ora delle due frequenze?

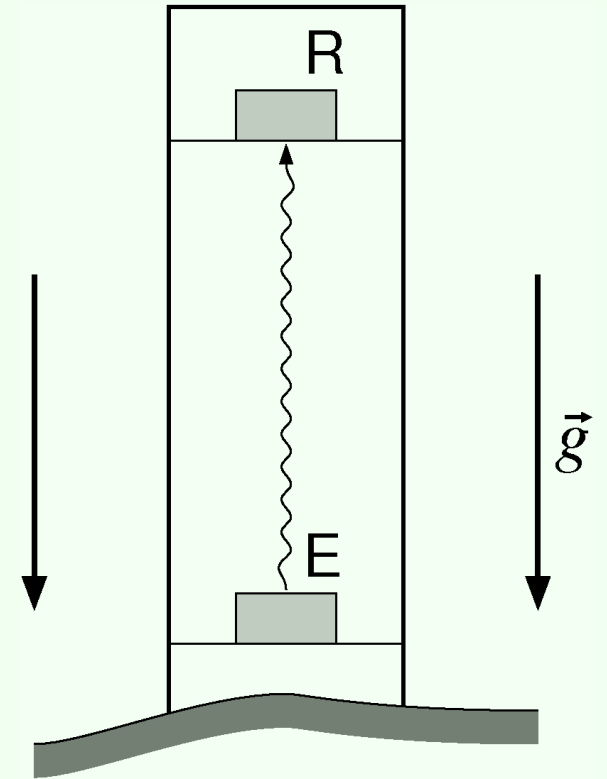
Prima di Einstein, chiunque avrebbe detto che sono uguali.

Ma Einstein usa il PE: in un'astronave ferma in un campo gravitazionale, tutti gli esperimenti debbono dare lo stesso risultato come se l'astronave fosse accelerata in assenza di campo gravitazionale.

Quindi sarà

$$v_r < v_e$$

con la stessa relazione nei due casi.



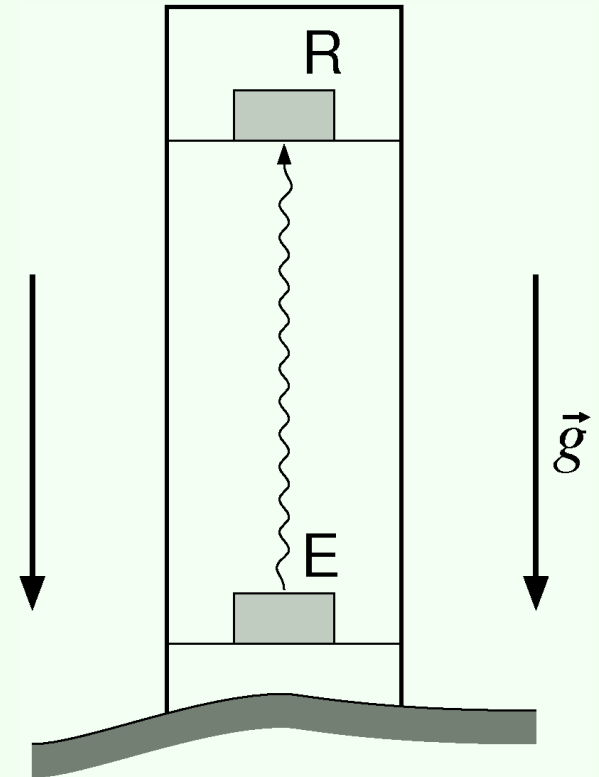
È questo il *redshift gravitazionale* (“redshift”, ossia spostamento verso il rosso, perché la frequenza diminuisce).

In un campo gravitazionale una radiazione che si propaghi verso l'alto *diminuisce di frequenza man mano che sale*.

Einstein dà anche un numero: nel campo gravitazionale della Terra la diminuzione relativa di frequenza è  $10^{-16}$  per ogni metro di dislivello.

Estremamente piccola, quindi difficile da verificare sperimentalmente...

Però la verifica è *necessaria*, perché fin qui il PE è solo una *congettura*, un'ipotesi.



## **Il cambiamento di programma**

A parte la nuova idea (PE) e le sue applicazioni, a questo punto avviene un fatto essenziale: Einstein *cambia il suo programma di ricerca*.

Non si tratta più di generalizzare la RR ai rif. non inerziali, ma di costruire una *teoria relativistica della gravitazione*.

Ma per far questo c'è un altro protagonista che deve entrare in gioco: lo *spazio-tempo*.

## **Facciamo un passo indietro**

Mentre Einstein sta pensando a come generalizzare la teoria, la RR comincia a essere studiata da altri.

Tra questi è importante Minkowski.

Di origine polacco-lituana, Minkowski studiò matematica in Germania, ed era professore a Zurigo quando Einstein frequentava il Politecnico.

Minkowski fu uno dei suoi professori. A quel tempo era già un matematico famoso.

Quando apparve la RR, Minkowski si mise a pensare al significato delle “trasformazioni di Lorentz” (fra poco ...) e arrivò a un'idea che espose in una relazione a un congresso, nel 1908.

## Lo spazio-tempo

Ecco l'inizio della relazione di Minkowski:

*I concetti di spazio e di tempo che desidero esporvi traggono origine dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò risiede la loro forza. Sono radicali. D'ora in avanti lo spazio singolarmente inteso, ed il tempo singolarmente inteso, sono destinati a svanire in nient'altro che ombre, e solo una connessione dei due potrà preservare una realtà indipendente.*

Purtroppo Minkowski sarebbe morto pochi mesi dopo, a 44 anni, di appendicite.

## Lo spazio-tempo

In sostanza, Minkowski unifica spazio e tempo in un'entità unica, che da allora avrà nome “spazio-tempo”.

Ma queste sarebbero solo parole, se non ci fosse altro. Vediamo.

Minkowski mostra che la trasformazione delle coordinate spazio-temporali da un rif. inerziale a un altro (le famose “trasformazioni di Lorentz”) può essere vista più sinteticamente come una *trasformazione nello spazio-tempo*, sotto la condizione di conservare la *metrica*.

Ossia: lo spazio-tempo è dotato di un particolare tipo di “distanza”, che si esprime allo stesso modo in tutti i rif. inerziali in funzione delle coordinate  $(x,y,z,t)$ .

In questo modo la RR acquista una veste *geometrica*.

Purtroppo non posso spiegarmi meglio: mi piacerebbe molto, ma il tempo non me lo consente.

## Un trucco matematico?

Einstein all'inizio non vede la profondità e fecondità di questo punto di vista: lo prende per un puro “trucco” matematico.

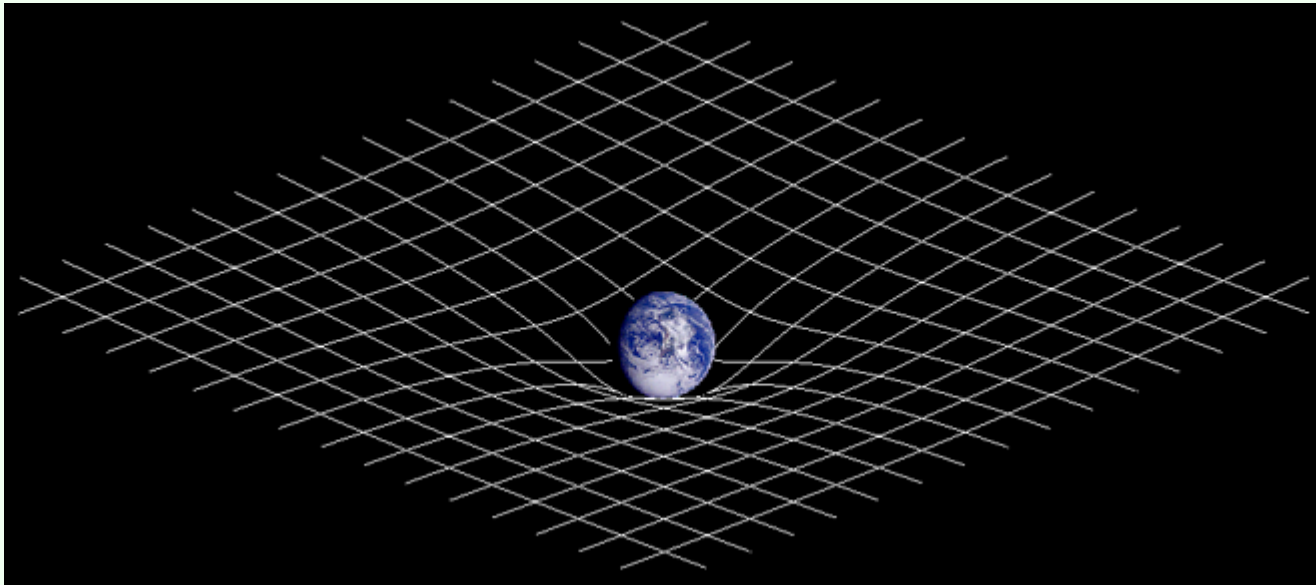
(Einstein non era un matematico!)

Poi però, riflettendo su gravità e accelerazione, capisce che il significato profondo della gravità è questo: *in presenza di materia* lo spazio-tempo non è più quello di Minkowski, ma *diventa curvo*.

## Che cos'è lo spazio-tempo curvo?

Mi sarebbe possibile spiegarlo solo se avessi molto più tempo.

Posso però mostrarvi che cosa *non è*.



Questa è una figura che è molto facile trovare, ma è *completamente sbagliata*.

Chi la trova, la cosa migliore che può fare è chiudere gli occhi e *dimenticarla*.



Einstein si convince di dover studiare un campo della matematica recentissimo e complesso.

Ecco che cosa scrive a Sommerfeld nell'ottobre 1912:

*... l'animo mi si è riempito di un grande rispetto per la matematica, la parte più sottile della quale avevo finora considerato, nella mia dabbenaggine, un puro lusso. In confronto a questo problema, l'originaria teoria della relatività è un gioco da bambini.*

## Trovare le equazioni

Ora il compito di Einstein diventa: *trovare le equazioni* che reggono questo legame tra *materia* e *curvatura* dello spazio-tempo.

Quelle che poi saranno le “equazioni di Einstein”.

E qui proprio non posso portarvi: sarebbe già molto difficile spiegare di che razza di equazioni si tratta ... molto molto diverse da quelle con cui avete fatto conoscenza.

Quindi saltiamo alla conclusione, che si sviluppa tumultuosamente alla fine del 1915 e all'inizio del 1916.

18-11-1915: Einstein presenta una versione non ancora corretta delle sue equazioni (valida *solo nel vuoto*).

Questa versione porta però a un diverso valore della deflessione, *doppio* di quello precedente.

Porta anche a un *terzo effetto*, di cui dobbiamo ancora parlare.

25-11-1915: Einstein ha finalmente trovato la *forma finale*, valida in generale, che nel vuoto coincide con la versione precedente.

Negli stessi giorni anche Hilbert lavora allo stesso problema (da matematico).

Arriva alle stesse equazioni, senza però capirne bene il significato e senza preoccuparsi di verifiche sperimentali.

16-1-1916: Einstein legge una prima comunicazione di Schwarzschild, che dà la soluzione *esatta* delle sue equazioni per il caso di simmetria sferica.

Grande meraviglia di E., che non avrebbe mai creduto esistesse una soluzione così semplice.

(Lui si era accontentato di una soluzione *approssimata*.)

24-2-1916: seconda comunicazione di Schwarzschild, che risolve le equazioni in un caso un po' più ampio.

19-6-1916: Einstein commemora Schwarzschild, morto di malattia sul fronte russo.

(Ricordate che dal luglio 1914 è in corso la *prima guerra mondiale*.)

## Il perielio di Mercurio

Si tratta del *terzo effetto* cui ho accennato poco fa.

Ricordate che cosa avevo scritto nella prima puntata:

“Da queste ipotesi la teoria 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.”

Per ora abbiamo visto *due previsioni* di fenomeni nuovi:

- la deflessione della luce
- il redshift gravitazionale.

Ma c'è anche un fenomeno *noto da tempo* e non spiegato: la *precessione del perielio di Mercurio*.

## Il perielio di Mercurio

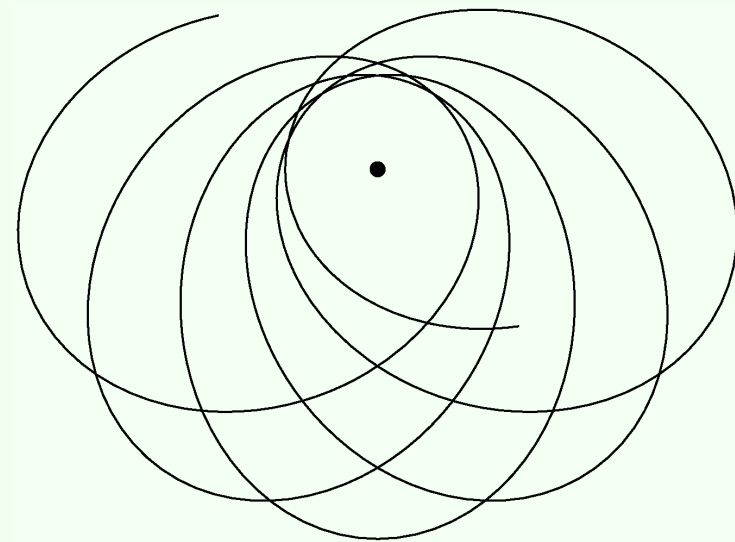
Quasi 60 anni prima LeVerrier (lo stesso che coi suoi calcoli aveva portato a scoprire il nuovo pianeta Nettuno) aveva mostrato che il moto di Mercurio (il pianeta più vicino al Sole) non si spiegava bene coi calcoli.

Calcoli non facili, perché bisognava tener conto non solo dell'attrazione del Sole, ma anche di quella degli altri pianeti, per quanto piccola.

Tutto considerato, restava uno spostamento in eccesso dell'asse maggiore dell'orbita (quindi del perielio).

Nella figura lo spostamento è assai esagerato: nella realtà per fare un giro l'asse maggiore impiega oltre *3 milioni di anni*.

Può sembrare incredibile che gli astronomi riescano a vedere un moto così piccolo, eppure ci riuscivano già 160 anni fa!



## Il perielio di Mercurio

In quei 60 anni erano stati fatti diversi tentativi di spiegare lo strano comportamento di Mercurio:

- un altro pianeta, più vicino al Sole
- modifiche della legge di gravitazione
- ...

ma senza risultati.

Nel novembre del 1915 Einstein mette alla prova la sua teoria (che non era nata per spiegare Mercurio).

Trova una formula per l'angolo  $\Delta\varphi$  di cui ruota l'asse maggiore dell'ellisse nel tempo  $\Delta t$ :

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{3}{c^2 (1-e^2)} \sqrt{\frac{(GM)^3}{a^5}}$$

## Il perielio di Mercurio

Trova una formula per l'angolo  $\Delta\varphi$  di cui ruota l'asse maggiore dell'ellisse nel tempo  $\Delta t$ :

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{3}{c^2 (1-e^2)} \sqrt{\frac{(GM)^3}{a^5}}.$$

- $c$  è la velocità della luce
- $a$  è il semiasse maggiore
- $e$  l'eccentricità
- $G$  la costante di gravitazione
- $M$  la massa del Sole.

*Tutte grandezze conosciute.*

Inserendo i valori numerici, Einstein *ritrova proprio il valore misurato* dagli astronomi.



## Il perielio di Mercurio

Vedere che la sua teoria rendeva ragione di questo fatto misterioso produsse su Einstein un'impressione profondissima.

In una lettera a Ehrenfest scriveva:

*Per alcuni giorni sono rimasto fuori di me per l'eccitazione e la gioia: la natura mi aveva parlato!*

Cerchiamo di capire meglio.

La teoria di Einstein era nata su tutt'altre basi, *senza alcuna relazione* col problema di cui stiamo ora parlando,

E ora forniva una risposta inequivocabile: accuratissima e del tutto priva di qualsiasi *incertezza e arbitrarietà*.

O i calcoli tornano con le osservazioni, o non tornano: *tertium non datur*.

I suoi calcoli, la sua teoria, *tornavano perfettamente*.

## La deflessione gravitazionale

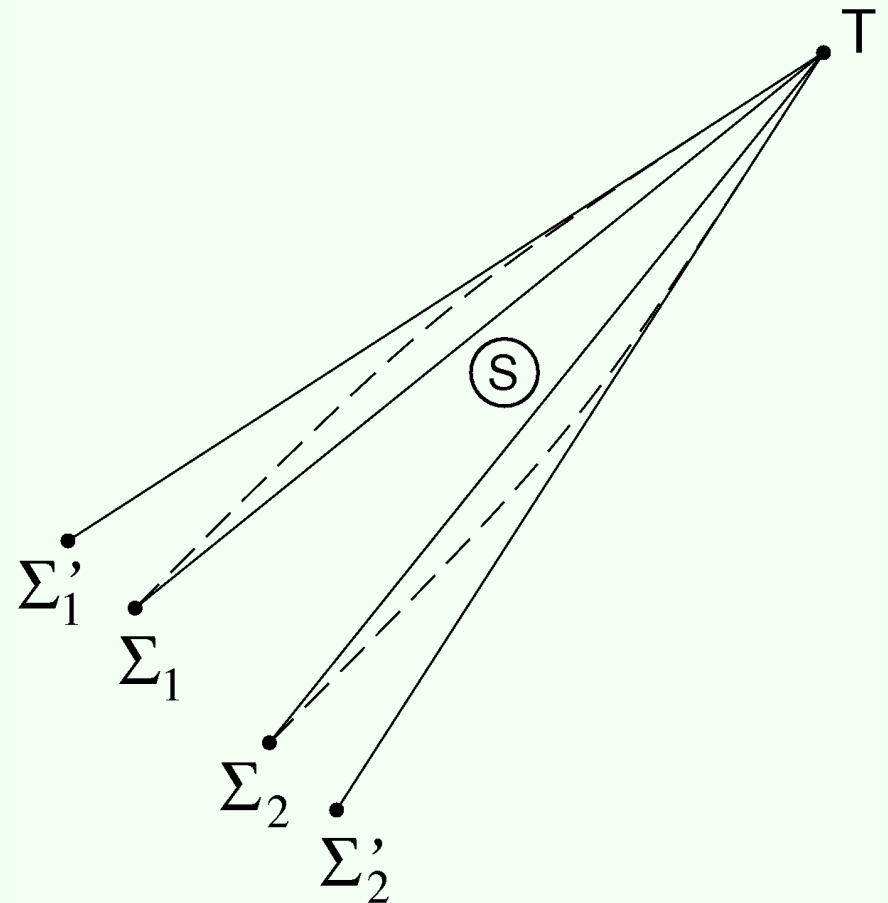
Per osservare la deflessione prodotta dal Sole si usa la luce di una stella.

Se il Sole  $S$  non ci fosse, la luce andrebbe *dritta* da  $\Sigma_1$  alla Terra  $T$ .

Invece viene *deviata* e il suo percorso è la curva tratteggiata.

Di conseguenza noi dalla Terra vediamo la stella in  $\Sigma'_1$ , e lo stesso per  $\Sigma_2$  che vediamo in  $\Sigma'_2$ .

Ci accorgiamo di questo perché *l'angolo* fra le due stelle ci appare *maggiore* che quando non c'è il Sole in mezzo.



## La deflessione gravitazionale

È bene ricordare che l'angolo di deflessione è *piccolissimo*: 1.75".

Ma il vero problema è un altro: come si possono vedere le stelle, se c'è il Sole di mezzo?

Soluzione: aspettare quando il Sole, visto da noi, è *coperto* dalla Luna (*eclisse totale*).

Le eclissi totali capitano più o meno due volte ogni anno. L'inconveniente è che durano poco e spesso capitano in luoghi sperduti, difficili da raggiungere.

100 anni fa era già possibile fare queste misure, ma si dovette aspettare la fine della guerra.

Le prime spedizioni, in Brasile e sulla costa occidentale dell'Africa, furono organizzate per il maggio 1919.

## La deflessione gravitazionale – risultati

I risultati delle misure furono positivi.

Certamente la deflessione *esisteva*, e la sua grandezza era *in accordo* con la previsione di Einstein.

La verifica dell'effetto di deflessione ebbe *grandissima diffusione* sulla stampa di tutto il mondo, e rese la figura di Einstein estremamente popolare.

In realtà le misure era piuttosto incerte, soggette a *errori sistematici*.

Però furono ripetute più volte negli anni seguenti, con risultati sempre più *sicuri* e sempre *in accordo con Einstein*.

Ormai da diverso tempo le misure di deflessione si fanno usando *quasars* e non in luce visibile, ma *in campo radio*.

Il che vuol dire che la luce del Sole *non disturba*, e non occorre aspettare un'eclisse.

Al tempo stesso, la deflessione è oggi rivelabile anche per radiazione che passa *distante dal Sole*.

## **Il redshift gravitazionale – conferma**

La verifica del redshift ha dovuto aspettare molto più tempo, perché non c'era modo di rivelare in laboratorio variazioni di frequenza così piccole.

Ricordate:  $10^{-16}$  per metro.

Solo nel 1959 (Pound e Rebka) fu possibile, usando l'*effetto Mössbauer* da poco scoperto, misurare il redshift in un dislivello di 25 m.

Einstein era morto da 4 anni...

## Il redshift gravitazionale – altri esperimenti

In seguito altri esperimenti hanno dimostrato effetti *strettamente imparentati* col redshift.

Questi esperimenti non misurano frequenze, ma *tempi*.

Sono stati possibili grazie agli *orologi atomici*.

Vediamone uno di Briatore e Leschiutta (1975).

## L'esperimento di Briatore e Leschiutta

Ci sono due orologi atomici: il primo a Torino (250 m s.l.m.).

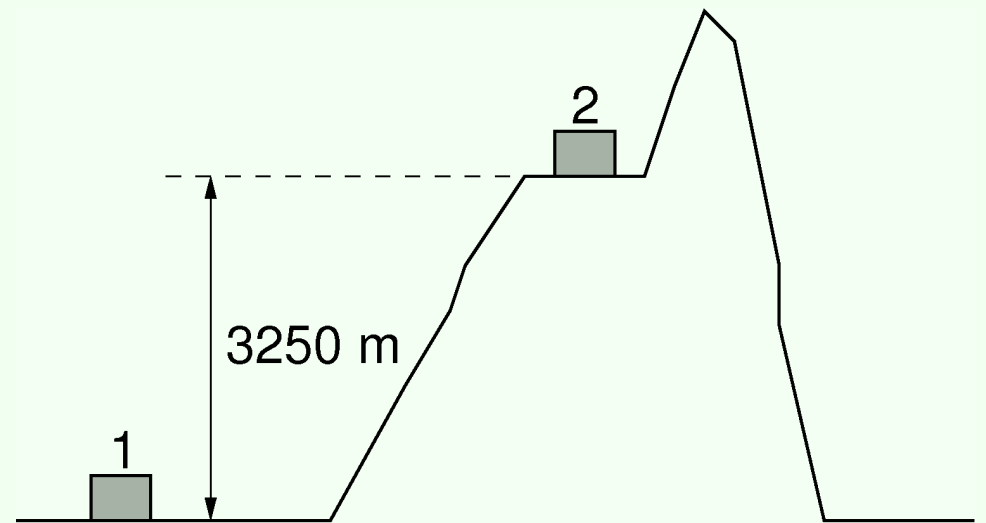
Il secondo si trova a 3500 m, sul Plateau Rosa (gruppo del Cervino).

L'orologio 1 invia a 2 un primo segnale di *inizio* esperimento, e qualche tempo dopo un segnale di *fine*.

Indichiamo con  $\Delta\tau_1$  l'intervallo di tempo tra i due segnali, misurato dall'orologio 1.

Con  $\Delta\tau_2$  l'intervallo misurato dall'orologio 2.

Avendo preso  $\Delta\tau_1$  di circa 68 giorni, si vede che  $\Delta\tau_2$  è *più lungo*, per  $2.4 \mu\text{s}$ .





## Briatore e Leschiutta – Pound e Rebka

Non è difficile capire che i due esperimenti sono collegati.

Se  $\Delta\tau_1$  è il periodo della radiazione *emessa* nell'esperimento di Pound e Rebka, e  $\Delta\tau_2$  quello della radiazione *ricevuta*, dato che la frequenza *diminuisce*, è giusto che il periodo *aumenti*.

Basta fare i conti per verificare che stiamo misurando la stessa cosa, anche in senso quantitativo.

Meno semplice è capire *che cosa dice* l'esperimento di B-L.

Purtroppo debbo lasciarvi con l'interrogativo.

Ed è un peccato, perché anche su questo argomento se ne leggono di tutti i colori:

- orologi che *rallentano* in un campo gravitazionale più intenso
- oppure quando stanno *più in basso* (non è la stessa cosa)
- il tempo che *scorre più lentamente* in un campo gravitazionale ...



## Riassumiamo

Dopo il 1905 Einstein si propone di *generalizzare* la RR ai rif. non inerziali.

Abbiamo visto che in un rif. non inerziale sono presenti le *forze apparenti*, proporzionali alla massa dei corpi su cui agiscono.

La stessa proprietà che ha la forza di gravità.

Einstein è colpito da questo, ed è portato a ipotizzare che la gravità non sia altro che una forza apparente.

Enuncia il principio di equivalenza (PE):

*Se siamo in un rif. accelerato (accelerazione  $a_r$ ) tutto va come se ci trovassimo in un rif. inerziale, in presenza di gravità  $g = -a_r$ .*

*E viceversa.*

Dal PE ricava due conseguenze:

- *la deflessione gravitazionale della luce*
- *il redshift gravitazionale.*

Minkowski interpreta la RR come prova che spazio e tempo vanno considerati come *un'unica realtà, lo spazio-tempo.*

Einstein capisce che *in presenza di materia* lo spazio-tempo non è più quello di Minkowski, ma *diventa curvo.*

Alla fine del 1915 trova le *equazioni* che regolano questa relazione fra materia e curvatura.

Ne ricava la spiegazione esatta di un terzo effetto: la *precessione del perielio di Mercurio.*

Nel 1919 arriva la prima prova che *la deflessione gravitazionale esiste*, nella misura prevista da Einstein.

Per il redshift bisogna aspettare invece il 1959.

Altri esperimenti (Briatore e Leschiutta, con orologi atomici: 1975) mostrano un effetto sugli *intervalli di tempo*, che *equivale al redshift*.

## Nella prossima puntata

L'ho intitolata:

“Dopo il 1915: l'Universo e altri dettagli”.

Anche se ci abbiamo già dato un'occhiata, abbiamo solo visto le verifiche degli *effetti previsti* da Einstein fino al 1915.

Ma lui non si è mica fermato...

E molti altri hanno lavorato durante un secolo, sia in direzione *teorica*, sia come *esperimenti e osservazioni*.

Le cose da dire sarebbero moltissime, ma cercheremo di parlare almeno dell'*universo* e delle *onde gravitazionali*.

Mi sembra di sentirvi: “i buchi neri no?”

Temo che non mi sarà possibile. Vedremo.