



Scheda esperimento per studente-guida

Le onde gravitazionali- AVANZATO	
MATERIALE	
<ol style="list-style-type: none">1. Interferometro a laser: a) specchi; b) divisore di fascio; c) laser; d) fotoresistenza (sensore di luminosità); e) rotaia nanometrica;2. Interferometro a microonde: a) emettitore di microonde con generatore; b) rilevatore di microonde; c) 2 piedistalli per i sensori; c) prisma (per la divisione del fascio); d) specchio;3. telo elastico;4. pseudosfera in plastica ottenuta con stampante 3d	
FINALITÀ	
<p><i>Livello avanzato (per i più grandi):</i> Spiegare il percorso seguito per lo studio e la scoperta delle onde gravitazionali soffermandosi sulla teoria della relatività ristretta e relatività generale</p>	
FARE (INDICAZIONI OPERATIVE)	
<ol style="list-style-type: none">1. INTRODUZIONE per tutto il gruppo di visitatori: (15') RELATIVITA' NELLA VITA QUOTIDIANA : <p>Buongiorno a tutti e benvenuti. Io sono... (presentarsi sempre) e questi sono.... Siete venuti qui per scoprire cosa sono le onde gravitazionali. Ma secondo voi nella vita di tutti i giorni abbiamo qualche cosa a che vedere con le onde gravitazionali oppure no?</p> <p>(GPS e diapositive relative) si, le onde gravitazionali sono una conseguenza della relatività generale, che prevede, tra l'altro che il tempo non scorra allo stesso modo in qualunque punto dell'universo o in un qualunque sistema di riferimento. Il GPS (Global positioning System) è il sistema di satelliti americano installato dall'esercito con la collaborazione della Nasa, inizialmente per il controllo delle basi americane. Il sistema è stato progettato con il doppio funzionamento, tenendo conto della relatività e no, perchè gli scienziati NASA conoscevano la relatività, mentre i generali americani ritenevano il ritardo temporale che fosse una sciocchezza. Il sistema di satelliti europeo si chiama Galileo ed è opera dell'ESA (European Space Agency).</p> <p>Chi è l'autore di tutta questa previsione? Einstein</p> <p>Ma partiamo dall'inizio.</p>	

2. RELATIVITA' CLASSICA

Filmato relatività classica. Questo filmato ci mostra quello che si è sempre utilizzato e considerato vero, ovvero quanto teorizzato da Galileo, cioè che un corpo in moto in un sistema di riferimento in moto, se osservato da un sistema di riferimento fisso, si muove ad una velocità che è la somma vettoriale delle velocità del sistema di riferimento su cui si muove e della velocità del corpo stesso, (la relatività classica, valida per i sistemi inerziali, ovvero in moto relativo a velocità costante un rispetto all'altro, regolati dalle trasformazioni di Galileo). Fin qui niente di nuovo....

(Diapo Equazioni Maxwell)

3. Qualche problema.....con la luce (crisi della relatività classica)

MAAAA Nel .. Maxwell pubblica le sue quattro equazioni che, oltre a descrivere le caratteristiche dei campi elettromagnetici prevedono la propagazione della perturbazione elettromagnetica, ovvero l'esistenza di un'onda. Purtroppo Maxwell non vive abbastanza a lungo per vedere la conferma sperimentale della sua previsione ad opera di Hertz, che sperimentalmente rileva le onde elettromagnetiche.

Quindi, queste onde hanno una velocità molto elevata, pari a quella misurata fino ad allora per la luce (da Fizeau e Foucault) .

Se ne deduce che la luce possa essere un'onda elettromagnetica. Come tutte le onde propagano in u mezzo, anch'essa lo doveva fare. Si riepiloga l'etere luminifero che, secondo Aristotele costituiva l'essenza del mondo celeste. L'etere, pervadendo tutto l'universo, doveva essere fermo e gli altri corpi dovevano muoversi in esso.

Una stranezza che la luce dimostrava era che manteneva costante la sua velocità in ogni sistema di riferimento. Questa stranezza non convinceva, perchè, muovendosi la Terra a 30km/s, nelle sue diverse posizioni avrebbe dovuto ricevere una velocità della luce diversa nelle diverse posizioni dell'anno o in base a come la Terra si dirigeva rispetto all'etere. Insomma si sarebbe dovuto rilevare il "vento d'etere".

4. ESPERIMENTO DI MM

Viene impostato l'esperimento di Michelson –Morley....

Filmato. Interrompere quando parla di interferometro. Mostrare funzionamento nostro interferometro.

Vedi scheda sotto. Sottolineare che si usa un laser a luce rossa di 660 nm, quindi luce coerente, ovvero tutti i fotoni sono emessi in fase. Quindi la figura di interferenza che si osserva è legata al percorso che i due raggi fanno prima di ricomporsi ed interferire sullo schermo. Ovvero, essendo i due bracci lunghi uguali, la lunghezza d'onda ci sta un numero uguale di volte nei due bracci, quindi se un'onda si diparte dallo specchio semitrasparente con un massimo, anche l'altra lo fa, entrambe percorrono lo stesso percorso, quindi si ricompongono oltre lo stesso specchio semitrasparente con la stessa fase. Quindi la figura di interferenza che si osserva sullo schermo è legata solo al cammino percorso dai due raggi. Se la figura varia, vuol dire che è cambiato il cammino percorso da almeno uno dei due.

Riprendere filmato e mostrare che il vento d'etere è quello spostamento dell'etere che si dovrebbe rilevare a causa dello spostamento (moto) della terra rispetto all'etere. Visto dal punto di vista dell'etere si vede che il percorso dei due raggi è diverso, quindi si dovrebbe osservare un cambiamento nelle frange d'interferenza.

Riprendere il nostro interferometro e dire che lo spostamento di 330 nm non ci è possibile, quindi per spiegare come funziona, effettuare l'esperimento dell'interferenza con le microonde (vedi sotto) .

5. CONSEGUENZE DELL'ESPERIMENTO E RELATIVITA' RISTRETTA....

Riprendere il filmato dei due bambini dall'orologio a luce e arrivare fino alla dilatazione dei tempi.

Se non si rileva un cambiamento nelle frange di interferenza, allora il vento d'etere non c'è, ovvero non c'è l'etere, quindi la velocità della luce non è c solo nell'etere, che era il mezzo privilegiato, ma la

velocità della luce non cambia al variare del sistema di riferimento.

Quindi se osservo il percorso di un fascio di luce che va e torna in verticale in due diversi sistemi di riferimento, uno fisso rispetto a me e uno in moto, noto che il fascio in moto rispetto a me percorre uno spazio maggiore rispetto a quello fisso (v rovesciata, rispetto a su e giù). Ma se la velocità della luce deve essere la stessa in qualunque sistema di riferimento io la osservi, allora il tempo per l'osservatore che io osservo in moto deve durare di più, ovvero passare più lentamente.

Si parla di dilatazione dei tempi. Ovviamente il fenomeno è rovesciabile, ovvero per l'osservatore in moto io mi sto muovendo ed egli si considera fisso, quindi lo stesso fenomeno per me e per lui ha una durata maggiore ed egli osserva che i miei tempi sono dilatati rispetto ai suoi.

(se volete anche parte su contrazione delle lunghezze)

6. LO SPAZIOTEMPO

Siete convinti che quindi non esiste uno spazio assoluto? E nemmeno un tempo assoluto, tutto dipende, dal sistema di riferimento in cui ci si muove. Ma non solo, si può dimostrare che il tempo scorre più lentamente in basso rispetto all'alto.

Prove sperimentali?

I GPS dell'inizio, oppure gli orologi atomici che vengono costruiti vicino a Busto Arsizio da un'azienda che si chiama SELEX e che sono montati a bordo del sistema europeo di geolocalizzazione Galileo.

Einstein quindi non parla più di spazio, ma di spaziotempo un contenitore di eventi localizzati nello spazio e nel tempo. Per definire un evento adesso, non basta più dire dove è collocato attraverso le tre dimensioni, ma bisogna anche darne le coordinate temporali. Quindi una persona ferma in un punto nello spazio rispetto ad un osservatore che è solidale (= sullo stesso sistema di riferimento) con lei in realtà non è ferma, ma viaggia in avanti nel tempo.

I punti dello spazio-tempo sono detti eventi e ciascuno di essi corrisponde ad un fenomeno che si verifica in una certa posizione spaziale e in un certo momento. Ogni evento è perciò individuato da quattro coordinate. In questa interpretazione quindi, la struttura dello spazio-tempo dipende dall'osservatore: in particolare, la distanza spaziale o temporale tra due eventi risulta diversa a seconda che l'osservatore che la misura sia fermo oppure in movimento rispetto agli oggetti osservati. Questo effetto è molto piccolo (al limite trascurabile) per i fenomeni fisici della vita quotidiana, ma diventa molto importante per quegli oggetti (come le particelle elementari) che si muovono a velocità molto vicine a quella della luce. Le misure sperimentali della velocità della luce confermarono l'ipotesi di Einstein. Con l'accettazione da parte della comunità scientifica della teoria della relatività è stato demolito il concetto di spazio e di tempo assoluti e separati l'uno dall'altro, mentre ha preso il suo posto il concetto di spazio-tempo, un solo costrutto unico e omogeneo, nel quale non c'è un sistema di riferimento privilegiato e per ogni evento le coordinate spaziali e temporali sono legate tra di loro.

Mostrare il modello dello spazio tempo di polistirolo.

Quante dimensioni ha? Tre? In realtà sono quattro, perché non riusciamo a rappresentare anche il tempo, ma per quella scatola di polistirolo, che modella il nostro spaziotempo, il tempo trascorre in un'unica direzione. Quindi la stanza, come

Far vedere come una massa tonda può modificare lo spazio tempo.

Chiedere come si presenta lo spaziotempo se effettuiamo una sezione del solido e lo osserviamo su un piano? Quante dimensioni osserviamo? Due più una temporale.

7. LO SPAZIO TEMPO E' INCURVATO DALLA PRESENZA DELLE MASSE.

Questo spazio-tempo, secondo Einstein, è incurvato dalla presenza delle masse.

Mostrare il tappeto con le righe disegnate. Far osservare come sono le righe in assenza delle masse? Diritte.

E se adesso pongo una massa al suo interno? Si incurva lo spazio tempo e le linee che appaiono diritte su grandi scale, sono in realtà incurvate. Maggiore è la massa, maggiore è la curvatura. Mostrare l'equazione di Einstein

Einstein trova teoricamente che la curvatura geometrica dello spazio tempo (a sinistra) dipende solo dalla massa (a destra) .

Ma voi vi rendete conto di vivere in un oggetto incurvato? Ma quanto denso è ? E' come questo telo o come un tappeto elastico? Mostrare la diapositiva del modulo di elasticità. Secondo voi si potrà incurvare facilmente?no perché è molto rigido...

Mah, vi sembra di muovervi in un oggetto rigido? O Curvo? Non vi convince vero?

Usando il modellino) cosa succede alla mia pallina se la lascio libera di muoversi lungo una "linea retta" nello spazio incurvato? Si muove addosso alla massa più grande. (fare l'analogia di cosa succede quando lascio una massa libera di muoversi verso la Terra) e se lascio un astuccio libero di cadere? Si muove verso la terra. Capite quindi che la teoria della gravitazione universale cambia totalmente faccia e la forza di gravità diventa una conseguenza della curvatura dello spaziotempo.

Cosa succede se do una velocità tangenziale alla mia pallina? Cosa vi ricorda? Il sole e i pianeti. Usare modellino 3d ipersfera.

Secondo questa teoria anche la luce dovrebbe curvare in prossimità di una massa molto grande (diapo e gif)

Eddington, astronomo reale, si reca sull'isola di Principe nel 1909 per verificare il bending (curvatura) della luce in corrispondenza ad un'eclissi che poteva osservare come totale da lì

Ed ha misurato l'angolo di deflessione che Einstein aveva previsto esattamente.

Quindi funzione e spiega le lenti gravitazionali che danno immagini da reinterpretare sulla base delle deflessione della luce in corrispondenza a grandi masse.

(Digressione eventuale)

a. Se l'ipotesi di Einstein è vera, Maggiore è la massa, maggiore è la curvatura.

Quali sono gli oggetti più massicci dell'universo? I buchi neri.

Quindi un oggetto vicino ad un buco nero cade dentro e non vi esce più(infatti è un buco ed è nero perché nemmeno la luce riesce a sfuggire, nonostante non sia dotato di massa.

b. Cosa succede se si buca il telo? Wormhole (vedi filmato di interstellar e diapo)

8. LO SPAZIOTEMPO TRASMETTE VIBRAZIONI.

COSA SUCCEDDE ADESSO SE tamburello sullo spazio tempo? (uno tamburella e l'altro si mette diametralmente opposto e avverte la vibrazione propagata)

(modello dell' acqua che propaga le onde se la "forchetta" ruota al suo interno)

Cosa succede se quest'acqua simboleggia lo spazio tempo e queste sono due masse che ruotano al suo interno? Si propaga un'onda che chiamiamo gravitazionale. Ma se lo spazio tempo è densissimo, solo alcune onde riusciranno davvero a perturbarlo, quindi devono essere corpi massicci o no ?

Infatti si apprezzano le onde liberate dalla rotazione di buchi neri o di stelle di neutroni. Osserviamo come queste stelle increspano lo spaziotempo.

(mandare filmato della pulsar che ruota attorno alla stella di neutroni.

Quindi se io metto un "galleggiante" in grado di oscillare al passaggio dell'onda posso rilevarla ed eventualmente mettere un sistema a bordo per misurarla.

9. . Le onde e LA RILEVAZIONE

Mostrare passaggio della Terra percossa dall'onda gravitazionale.

Questo sistema per misurarle l'onda è stato inventato e si chiama LIGO (light interferometer gravitational waves observatory) è una rete di interferometri americani posizionati ad Hanford e a Livingston (mostrare cartina.) E' un interferometro a tutti gli effetti, (mostrare il funzionamento con filmato).

I due bracci sono lunghi 4 km e uguali. Se arriva un'onda gravitazionale un braccio si accorcia e l'altro si allunga, quindi cambia la figura di interferenza che si viene a formare sullo schermo.

Deve essere una rete di rilevatori perché il segnale che si riceve deve essere lo stesso dovunque sulla Terra.

Il segnale è rilevato per un accorciamento di dieci alla meno diciotto metri su una distanza di 4 km!!!! Quindi è piccolissimo. E' come isolare un bisbiglio in una festa molto rumorosa....

Mostrare il video del segnale e la diapo che mostra che i due segnali, rilevati a Hanford e a Livingston si sovrappongono, quindi sono lo stesso fenomeno rilevato a distanze temporali differenti e pari alla distanza Hanford-Livingston diviso per c , velocità alla quale si propaga l'onda gravitazionale, come Einstein aveva previsto.

I due segnali si sovrappongono anche con la simulazione teorica sviluppata sulla teoria di Einstein al computer per la fusione di due buchi neri di masse.....vedi diapo

In Italia abbiamo advanced Virgo, presso Cascina (Pisa) che ha rilevato la seconda onda (17 agosto 2017) meno intenso del secondo, che dalla previsione avrebbe dovuto originare dalla fusione di due pulsar. Si identifica la direzione di arrivo dell'onda e

A quel punto la rete di telescopi si mette in azione e rileva anche la controparte ottica, che permette di verificare la veridicità del modello che prevedendo che dalla fusione di due pulsar si dovrebbe generare una kilonova. E viene proprio rilevata la radiazione associata alla nascita di una kilonova.

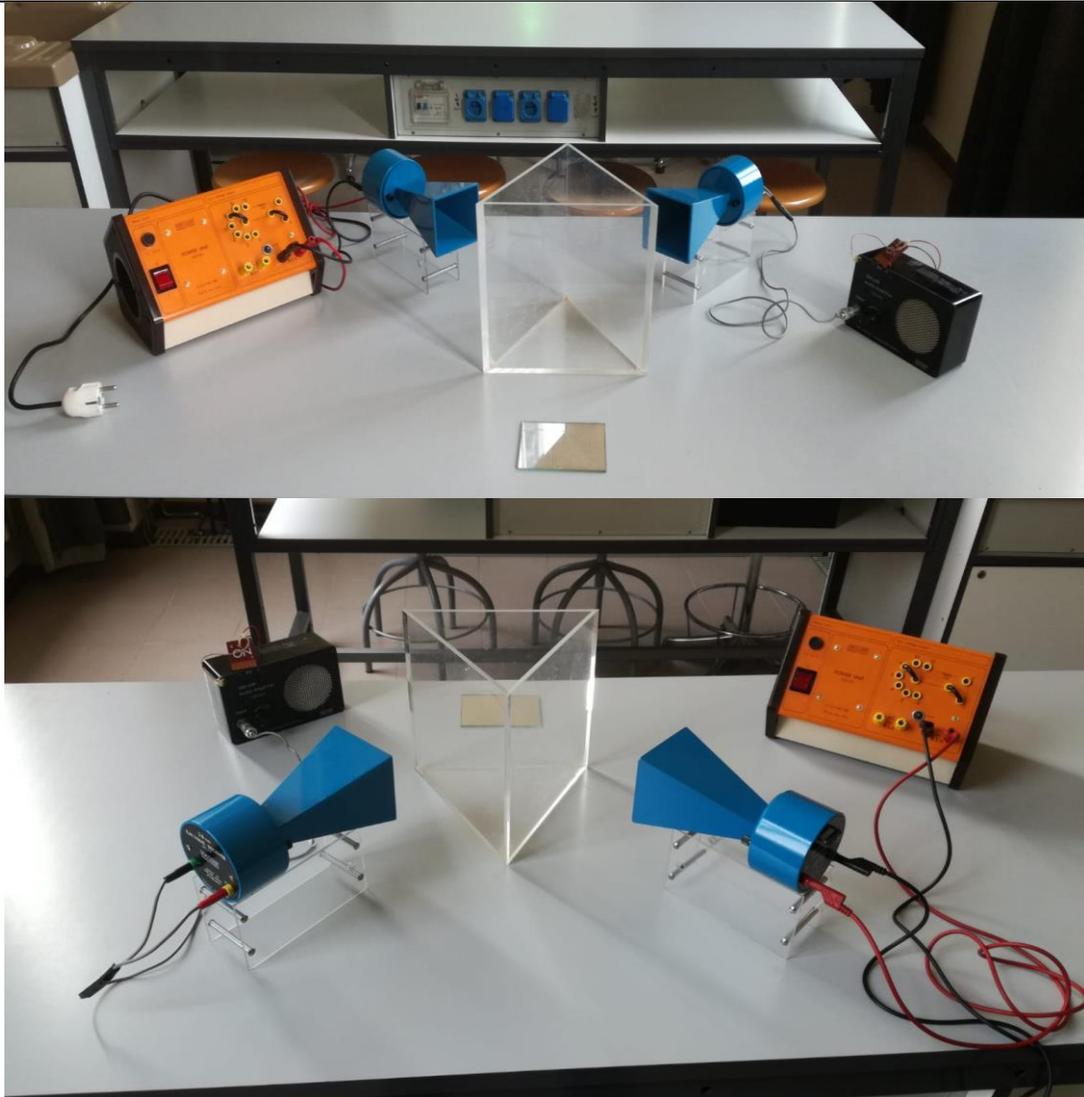
Concludere facendo ascoltare l'onda rilevata.

SPIN OFF

Astronomia gravitazionale
Buchi neri
Onda gravitazionale big bang

Esperimento interferenza microonde

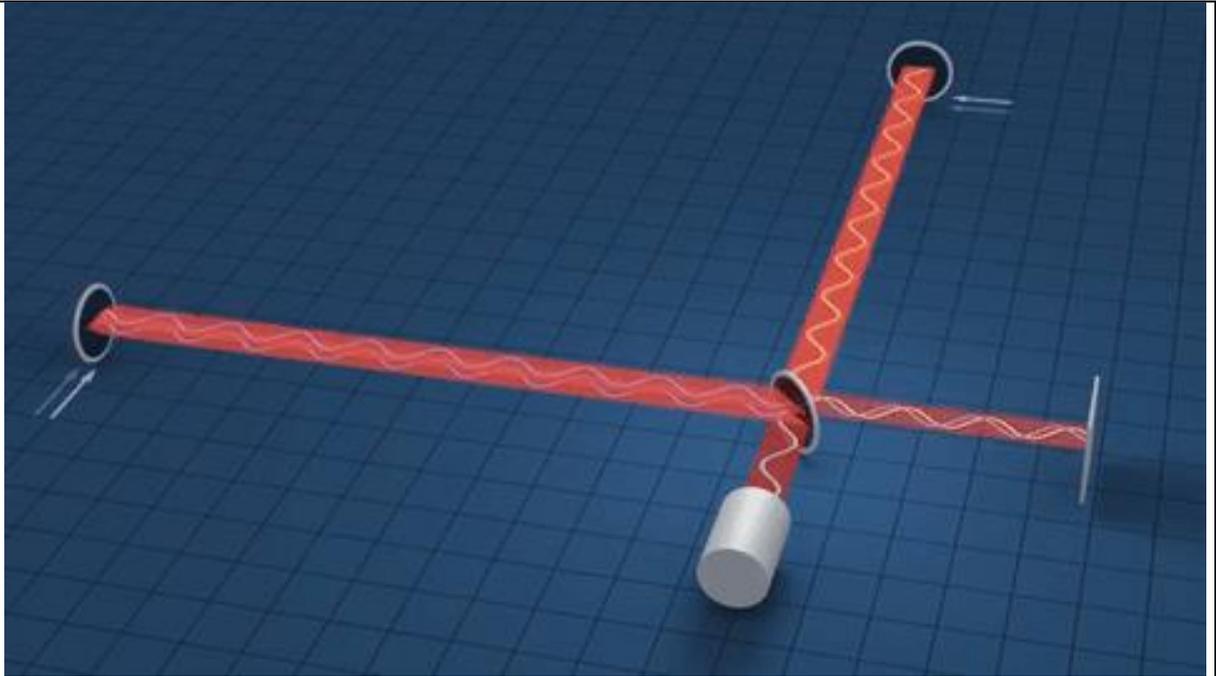
1. L'interferometro a laser non funziona, data l'assenza di UNA VITE in grado di compiere spostamenti nanometrici, abbiamo quindi optato per un interferometro basato sulle microonde, le quali non essendo percepibili dall'occhio umano hanno bisogno di un rilevatore che emetta un segnale acustico per avvertirne la presenza.
2. L'emettitore di microonde e il ricevitore vanno posizionati sui piedistalli
3. Si fa vedere il funzionamento dei sensori, posizionandoli l'uno di fronte all'altro e regolando il volume tramite l'apposita rotella sul ricevitore
4. Si mostra che lo specchio riflette le microonde
5. Si posiziona il prisma fra i due ricevitori e, variando l'angolo di incidenza fra l'emettitore e il prisma, si fa percepire l'onda al ricevitore, VEDI IMMAGINI ILLUSTRATIVE



6. Si posiziona lo specchio, ad altezza dei sensori, in modo tale che riflettendo le onde produca un'interferenza di tipo costruttivo o distruttivo.

Parte teorica

1. Michelson e Morley nel 1887 eseguirono un esperimento per cercare di calcolare la velocità di spostamento della Terra nell'etere. Per fare ciò utilizzarono un interferometro ovvero uno strumento costituito da un raggio laser diviso in due da uno specchio semi-riflettente e successivamente ricongiunto in un rivelatore. L'idea di Michelson e Morley era quella di osservare la figura di interferenza creatasi dall'interazione dei due raggi dovuta allo sfasamento di uno dei due a causa della composizione della velocità della luce con quella di spostamento della Terra (dato che nella vita di tutti i giorni se una macchina si sposta verso un corridore la velocità apparente è la somma delle due). Il risultato dell'esperimento fu negativo, dato che non si rilevò nessuna interferenza. Il primo che tentò di dare una spiegazione a questo fenomeno fu Lorentz in maniera puramente matematica, proponendo una contrazione del braccio parallelo alla direzione del moto.

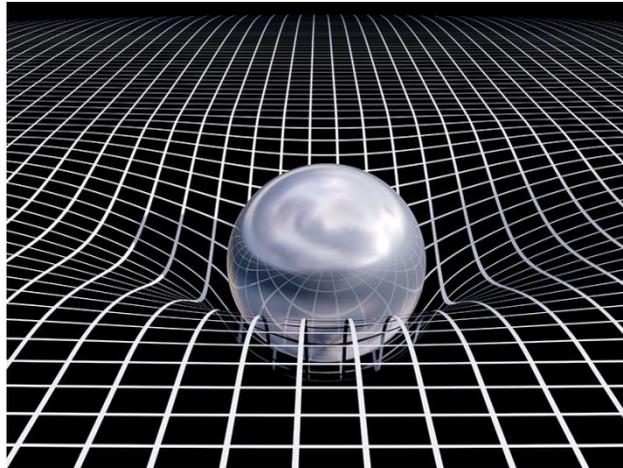


Schema interferometro

1. Negli anni successivi (1905) Einstein tentando di dare risposta a questo quesito formulò la teoria della relatività ristretta, nella quale postulava che la velocità della luce fosse costante in qualsiasi sistema di riferimento inerziale, diversamente da come pensavano Michelson e Morley. Conseguenza di ciò sono varie trasformazioni che influenzano spazio, tempo di un corpo in movimento rispetto ad un corpo fermo, queste trasformazioni sono chiamate trasformazioni di Lorentz.

$$\text{Trasformazioni di Lorentz} \begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

1. Successivamente Einstein si accorse che alla sua teoria mancava qualcosa, così una decina di anni dopo (1916) formulò la teoria della **relatività generale** nella quale ampliava la teoria della **relatività ristretta** aggiungendo l'influenza delle masse sulla percezione del tempo. Essendo la velocità della luce l'unica costante e spazio e tempo indissolubilmente legati, Einstein teorizzava lo spaziotempo come struttura quadridimensionale dell'universo. In questa struttura una posizione non è più definita da tre coordinate bensì da quattro, aggiungendo alle tre coordinate spaziali anche quella temporale.



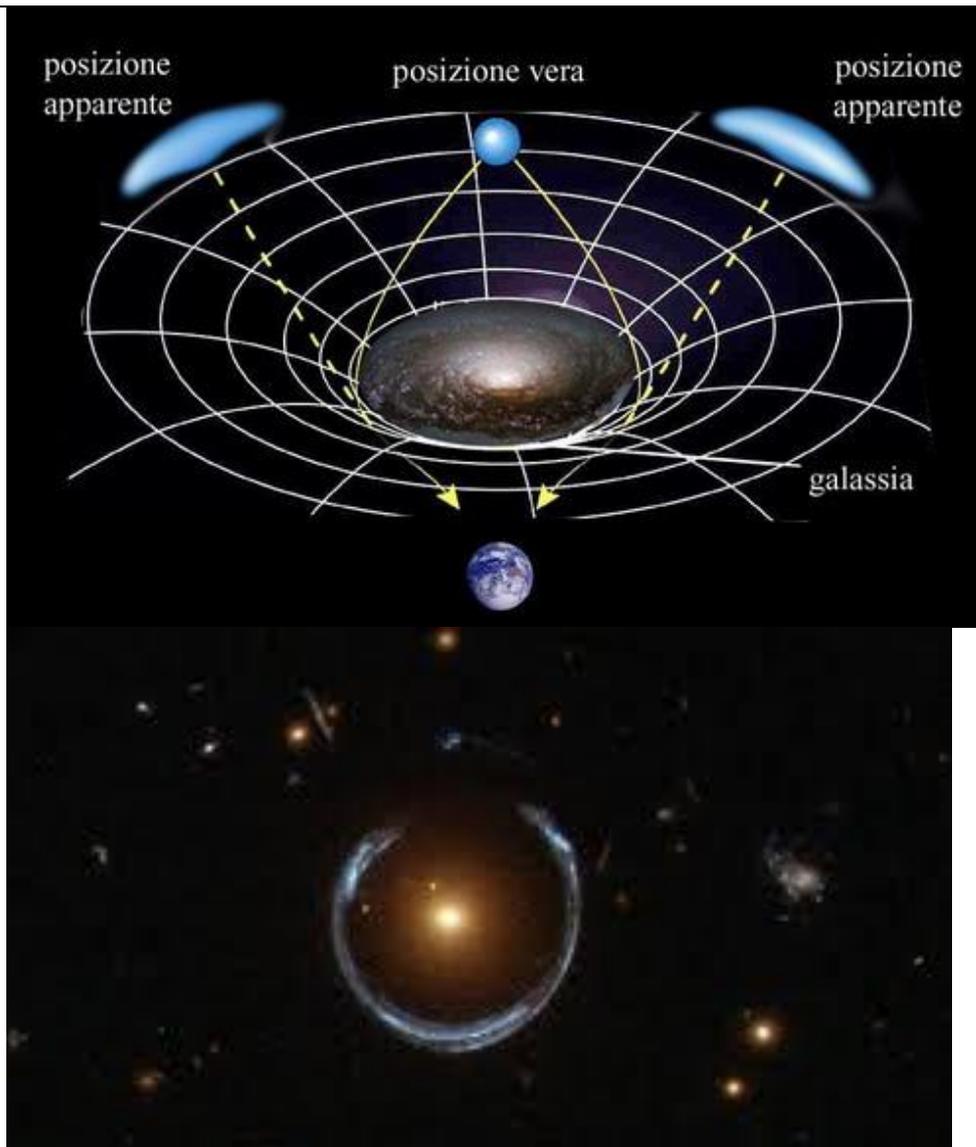
Quindi come abbiamo detto precedentemente una massa che va ad influenzare la percezione del tempo, dato che spazio e tempo sono legati tra loro, va a modificare anche lo spazio, curvando lo spaziotempo. Albert Einstein ipotizza che questa curvatura sia l'effettiva causa dei fenomeni gravitazionali andando in contrasto con la gravitazione newtoniana. Secondo Einstein un corpo in movimento segue sempre il percorso con minor tempo possibile, quindi un corpo in orbita, a causa della diversa percezione temporale dovuta alla distanza da una massa, non compirà una linea retta bensì una linea curva (geodetica) che appare come l'orbita del corpo, eliminando totalmente le forze di interazione gravitazionale. Una conseguenza di ciò è la precessione delle orbite di un satellite attorno alla massa (si vede con la pseudosfera); tale precessione, ovvero il cambiamento nel tempo della posizione dell'orbita causa una perdita di energia che si manifesta come perturbazione dello spazio-tempo, questo fenomeno è stato teorizzato da Einstein e si chiama "onda gravitazionale".

DOMANDE BASE

1. Cosa è un sistema inerziale?
2. Cosa è lo spaziotempo?
3. Quindi cade il principio di relatività galileiana?
4. Cosa sono le lenti di Einstein?
5. Cos'è un buco nero?

RISPOSTE

1. Per definizione un sistema di riferimento inerziale è un sistema che si muove in moto rettilineo uniforme rispetto a un altro sistema, ossia con velocità costante rispetto ad esso.
2. In fisica per spaziotempo, o cronotopo, si intende la struttura quadridimensionale dell'universo. Introdotto dalla relatività ristretta, è composto da quattro dimensioni: le tre dello spazio (lunghezza, larghezza e profondità) e il tempo
3. No, perché a velocità non elevate questo mantiene ancora la sua esattezza e la sua coerenza.
4. Le lenti di Einstein (ultima immagine) sono distribuzioni di materia che sono in grado di deformare lo spaziotempo, modificando la traiettoria della luce di un corpo che sta dietro. Modificando il percorso della luce la massa (galassia o buco nero) è in grado di riconvergere i raggi luminosi che altrimenti si disperderebbero permettendoci di osservare galassie molto più lontane di quanto saremmo in grado di vedere



Lente di Einstein

5. Un buco nero è un oggetto talmente massiccio in un volume talmente ridotto che la velocità di fuga da esso è teoricamente maggiore della velocità della luce, ma dato che nessuna particella né forma di energia può avere una velocità superiore a quella della luce tale massa appare nera perché assorbe tutto, inoltre dato che qualsiasi particella che entra nel suo campo gravitazionale non può sfuggire essa è per questo definito “buco”

INTERPRETAZIONE Livello avanzato:

