

FISICAST

SxT  
per

# La relatività generale

di

Gianluca Li Causi



## La Relatività Generale

*Gianluca Li Causi*

### Abstract:

**I documentari divulgativi ci ripetono sempre che i pianeti e le stelle "incurvano" lo spazio con la loro gravità, come palle che affondano in un lenzuolo... ma perché mai una massa dovrebbe distorcere lo spazio? E soprattutto, come diavolo fa? Si può forse prendere lo spazio e tirarlo, come se fosse una rete da pesca? Questa puntata FISICAST ve lo spiega.**

### INIZIO:

**Q:** (parlando con se stessa) **questo non è... non ci siamo ancora... eccolo... Istituto Nazionale di Astrofisica (portone che si apre, rumore dei tacchi che camminano) ...dunque dove sarà (!) ...ecco, la porta dev'essere questa... (toc toc!)  
Ciao Gianluca, come stai?**

**A:** Ciao Chiara! Benone, e tu?

**Q:** **Tutto bene anche per me ...tranne che ieri sera ho visto in tv un documentario sulla Forza di Gravità, che mi ha lasciato più confusa di quanto già non fossi prima!**

**A:** Ah, si l'ho visto anch'io! Mi è sembrato semplice, cos'è che non ti ha convinto?

**Q:** **Eh si, sarà stato semplice per te... io invece non ho capito granché: diceva che la forza di gravità in realtà è dovuta al fatto che la Terra deforma lo spazio come una palla che affonda in una rete elastica...**

**A:** Si, è un'immagine molto usata. Se rappresenti la Terra come una palla che affonda in un telo elastico, ogni altra pallina che appoggi sul telo cadrà verso la Terra, e non perché la palla abbia una misteriosa "forza" che attiri le palline, ma semplicemente perché la superficie dove si trovano è inclinata verso il pianeta.

**Q:** **Si va bene, l'immagine del telo riesco a coglierla: la palla affonda nel telo elastico perché il suo peso la spinge verso il basso; ma cos'è che "spinge" i pianeti ad "affondare" dentro allo spazio?**

**Insomma, perché mai la massa di un pianeta dovrebbe deformare lo spazio? E soprattutto, come fa? Lo spazio non puoi mica spingerlo o tirarlo come una rete, no? Il documentario questo non l'ha mica spiegato!**

**A:** Eh già, hai proprio ragione, l'esempio si morde la coda, perché usa la gravità della Terra per spiegare ...la gravità della Terra!

Però, se hai ancora presente la nostra puntata sulla Teoria della Relatività Speciale, te lo posso spiegare in un modo più esauriente.

**Q: Come dimenticarla: spiegavi che lo spazio e il tempo cambiano con la velocità, relativamente all'osservatore, giusto?**

**A:** Brava! Sì, spazio e tempo cambiano con la velocità in modo relativo.

Questo concetto fu esteso ulteriormente dalla Teoria della Relatività Generale, che invece ci mostra come spazio e tempo cambino in modo assoluto quando intervengono delle variazioni della velocità, cioè un'accelerazione, una decelerazione, oppure una rotazione, e perfino quando sta tutto fermo ma c'è la forza di gravità.

Per esempio, vediamo che succede in un ascensore.

**Q: ...un ascensore?**

**A:** Sì. Immagina di stare in una stanza senza finestre, fluttuante nello spazio interstellare, lontano da qualsiasi pianeta: tu stessa fluttueresti per aria dentro la stanza, visto che non c'è la gravità della Terra a tenerti sul pavimento, giusto?

**Q: Certo.**

**A:** Ora immagina che qualcuno cominci a tirare la stanza verso l'alto, per esempio con una fune, come se fosse un ascensore, e che continui a tirarla costantemente facendola andare sempre più veloce, cioè mantenendola in accelerazione.

In tal caso ti sentiresti spinta verso il basso, allo stesso modo di come ti senti spinta indietro su un autobus che accelera improvvisamente, sei d'accordo?

**Q: Beh, sì: se la stanza accelera abbastanza, mi sentirò schiacciata verso il pavimento.**

**A:** Infatti. Non galleggeresti più a mezz'aria, ma ti troveresti di nuovo coi piedi sul pavimento, come se la stanza fosse ferma qui sulla Terra.

**Q: Sì... sarebbe uguale. Anzi, se lanciassi in aria una pallina mi sa che anche questa ricadrebbe sul pavimento, come se stessi qui sulla Terra, dico bene?**

**A:** Proprio così! Gli effetti di un'accelerazione e quelli di un campo gravitazionale sono perfettamente identici, tanto che in quella stanza chiusa, senza possibilità di guardar fuori, non potresti fare nessun esperimento fisico che ti permetta di capire se la stanza è in moto accelerato nello spazio, o se al contrario è perfettamente ferma, ma stai qui sulla Terra!

**Q: Certo è stupefacente che due cose così diverse, come la forza di gravità e l'accelerazione diano gli stessi effetti, no?**

**A:** Beh, questo avviene perché la forza di gravità accelera tutti gli oggetti nello stesso modo, indipendentemente dal loro peso, come scoprì Galileo Galilei con i suoi esperimenti sulla caduta dei corpi.

Ora, se accelerazione e gravità sono davvero indistinguibili per principio, e le misure fatte finora lo confermano, vuol dire che devono essere due facce della stessa medaglia!

E' il famoso "principio di equivalenza" di Einstein, che sta alla base della Relatività Generale.

**Q: Ah! Cioè... Stai cercando di dirmi che l'accelerazione e la forza di gravità sono la stessa cosa?**

**A:** No, quel che voglio dirti è che qualsiasi effetto avvenga per chi sta in accelerazione dove non c'è gravità, deve accadere allo stesso modo per chi sta fermo laddove c'è gravità!

**Q: ...uhm, perché accade qualcosa di strano a chi viene accelerato, a parte sentirsi spinto all'indietro?**

**A:** Altroché, e qui viene il bello! Sei mai andata al Luna Park?

**Q: Ma mi prendi in giro, certo che ci sono andata!**

**A:** E che succedeva quando andavi su una giostra, di quelle che girano veloci?

**Q: Che mi dovevo reggere forte, se no finivo sbalzata fuori!**

**A:** Certo, e questo succedeva perché facendoti girare la giostra ti accelerava continuamente, tirandoti sempre verso il centro, e tu perciò ti sentivi continuamente spinta in fuori. Ne abbiamo parlato anche in Fisicast nella puntata "Girotondo".

**Q: Sì, è un esempio di moto accelerato familiare un po' a tutti.**

**A:** Adesso immagina di stare sul bordo di una giostra, ma prova a immaginarla enorme, anzi gigantesca, una giostra immensa larga centinaia di chilometri e posta nello spazio interplanetario, lontano da qualsiasi campo gravitazionale!

**Q: Ok fatto.**

**A:** Ora, se questa giostra gira sempre come prima e tu stai sul bordo la tua velocità adesso sarà enorme perché sei molto lontana dal centro!

**Q: Sì, anzi più la immagino grande più andrò veloce!**

**A:** Infatti. ...perciò potresti raggiungere qualsiasi velocità?

**Q: Beh...direi di sì: se avessi una giostra abbastanza grande a un certo punto arriverei... ma sì! potrei arrivare addirittura alla velocità della luce!!**

**A:** In effetti facendo i conti, se la giostra facesse un giro in 10 secondi e avesse un diametro di 1 milione di chilometri (954 mila) la velocità al bordo dovrebbe già superare quella della luce...

**Q: Proprio come dicevo io!**

**A:** Ma questo non può avvenire!! Come abbiamo visto la volta scorsa non è possibile arrivare alla velocità della luce!

Ricordi perché?

**Q: Beh, ricordo che quanto più è grande la velocità di un corpo rispetto a me tanto più il suo spazio si accorcia e il suo tempo si dilata, cosicché quel corpo impiega tempi sempre più lunghi per coprire spazi sempre più brevi, non arrivando mai alla velocità limite della luce!**

**A:** E' proprio questo che ha scoperto Einstein, e la volta scorsa abbiamo anche spiegato come avviene.

Se lo applichiamo al nostro caso, questo ci dice che se anche la tua giostra si estendesse all'infinito, misureresti una velocità che cresce sempre di meno man mano che aumenta la distanza dal centro, avvicinandosi sempre più alla velocità della luce, ma senza mai raggiungerla!

**Q: Ah... è già, ma che succede allora?**

**A:** Beh, poiché lo spazio si contrae con la velocità, nella tua giostra succede che lo spazio si accorcia sempre di più man mano che ti avvicini alla periferia!

**Q: ...quindi se stessi sul bordo di questa immensa giostra, sarei più piccola che al centro?**

**A:** Sì, anche se questa contrazione, se ricordi, avviene soltanto lungo la direzione del moto, perciò se stai sul bordo il tuo metro si accorcia, rispetto a chi sta fermo, solo quando è allineato lungo la circonferenza. Se invece lo allinei lungo il raggio la sua lunghezza non cambia.

**Q: Incredibile. Ma, se ricordo bene, avveniva lo stesso anche viaggiando sempre dritto con una macchina superveloce: la sua lunghezza si accorciava, rispetto a chi era fermo sulla strada, mentre la sua larghezza restava uguale, no?**

**A:** Sì, brava, è la stessa cosa.

Però una differenza c'è: se stai nella macchina per te l'abitacolo è del tutto normale, solo per chi sta fermo il tuo spazio appare compresso. Mentre questo non vale per un sistema in rotazione!

Qui infatti la diversa contrazione dello spazio da punto a punto genera una deformazione assoluta della geometria, che vedi bene anche tu che ci stai sopra!

**Q: "Deformazione della geometria"...? E che vuol dire?**

**A:** A scuola ti avranno insegnato che la lunghezza di una circonferenza è uguale al diametro moltiplicato per 3,14, il famoso numero "pi-greco", giusto?

**Q: Sì certo, almeno questo lo ricordo anch'io!**

**A:** Ecco, se stai su una giostra in rotazione, la Relatività ti dice che questo non è più vero!

Infatti, abbiamo detto che un metro allineato lungo il bordo della giostra si accorcia per via della grande velocità, perciò se con quel metro misuri la circonferenza della giostra la troverai più lunga!

**Q: ...uh...**

**A:** Riepilogando, puntando un compasso al centro di una giostra rotante e disegnando dei cerchi sempre più grandi misureresti circonferenze via via sempre più lunghe rispetto al proprio diametro: non più 3,14 volte il diametro, ma 5, 10, ...1000 volte!

**Q: Mamma mia! Ma allora vuoi dire che la geometria che ho imparato a scuola è sbagliata?**

**A:** No, è corretta, ma vale solo per uno spazio piano, che si descrive appunto con la "geometria piana", o "geometria euclidea", cioè quella che si studia a scuola e che si usa per misurare le cose nel quotidiano.

La rotazione della giostra invece produce, come abbiamo visto, uno spazio deformato, in cui le relazioni geometriche sono diverse da quelle a cui siamo abituati.

**Q: Wow... beh è un esempio molto concreto di quel che dicevi nella seconda puntata di Fisicast, dove spiegavi "Che cos'è lo spazio"!**

**A:** Sì, qui lo vedi concretamente.

E lo stesso accade se misuri il tempo: anche qui, se stai nella macchina superveloce il tuo tempo scorre più lentamente rispetto a chi sta fermo, ma scorre comunque allo stesso modo in tutto l'abitacolo; mentre se stai su una giostra in rotazione la velocità è diversa da punto a punto e perciò il tuo tempo scorre sempre più lentamente man mano che ti allontani dal centro!

Per questo nei documentari senti sempre parlare di "spazio-tempo", piuttosto che dello spazio e del tempo separatamente, poiché spazio e tempo si deformano congiuntamente, come se fossero un'unica entità geometrica.

(Intermezzo musica)

**Q: Ok... ma adesso torniamo al nostro punto di partenza: (tono un po' alterato) io ti avevo chiesto \*come fanno i pianeti\* a deformare lo spazio, tu invece mi hai raccontato tutta questa storia dell'ascensore e della giostra! Insomma, che c'entrano le giostre con i pianeti?!**

**A:** È vero. Ma adesso abbiamo tutto quel che ci serve per rispondere alla tua domanda.

L'esempio della giostra mi è servito per mostrarti che ci sono situazioni in cui lo spazio viene deformato e, soprattutto, per farti vedere come questa deformazione non avviene perché la giostra "spinga o trascini lo spazio" in qualche modo, ma perché è una conseguenza delle differenze di velocità da punto a punto dovute alla rotazione.

**Q: Ok... ora comincio a capire.**

**A:** ...ma come abbiamo detto una rotazione è un'accelerazione.

Per vederlo basta che immagini che la stanza chiusa di cui parlavamo prima sia fissata sul bordo della giostra rotante e che tu stia ferma al centro della stanza: come fai a sapere che stai ruotando?

**Q: Facile, sento la forza centrifuga che mi spinge da un lato.**

**A:** ...proprio come se una fune ti accelerasse dal lato opposto, non ti pare?

**Q: Si... vuoi dire che non potrei sapere se sto su una giostra in rotazione, o dentro un ascensore in accelerazione!**

**A:** L'hai detto: se stai ferma non puoi saperlo, senti solo una forza che ti spinge da una parte.

E ti dirò di più: come puoi escludere che, al contrario, non stai dentro una stanza perfettamente ferma e che la forza che senti sia la gravità di un pianeta vicino, che ti tira da quella parte?

**Q: ...ah! Eh già, non potrei, per il Principio di Equivalenza di cui mi parlavi prima!**

**A:** Infatti, e finalmente possiamo tirare le conclusioni: la rotazione deforma lo spazio, come abbiamo visto con l'esempio della giostra; ma per ogni punto di un corpo che ruota la rotazione è indistinguibile da un'accelerazione, e come dimostra l'ascensore di Einstein, l'accelerazione, a sua volta, è indistinguibile da un campo gravitazionale. Mi segui?

**Q: Si... perciò se in ogni punto rotazione, accelerazione e gravità sono equivalenti...**

**A:** ...vuol dire che la geometria dello spazio-tempo deve essere deformata anche se stai ferma e in presenza di gravità!

**Q: Whow! ...ma quindi la contrazione dello spazio e la dilatazione del tempo, possono avvenire anche senza alcun movimento?**

**A:** E' proprio questa la scoperta della Relatività Generale: come sappiamo, due osservatori fermi l'uno rispetto all'altro nello spazio interplanetario non vedono alcuna differenza tra i rispettivi metri e orologi; se invece si trovano sempre fermi tra loro, ma in punti diversi di un campo gravitazionale, misurano una contrazione dello spazio e una dilatazione del tempo diverse: più grandi vicino al pianeta, dove la gravità è più intensa, e via via minori allontanandosi verso lo spazio interplanetario!

**Q: Fantastico! ...ma quindi stando fermi qui sulla Terra siamo più stretti e il nostro tempo scorre più lentamente che stando fermi nello spazio?**

**A:** Proprio così. Ed è più concreto di quanto immagini, tanto che gli orologi di bordo dei satelliti del GPS devono essere rallentati per restare sincronizzati con

quelli qui sulla Terra! Riascolta la puntata sul GPS, dove lo abbiamo spiegato nel dettaglio.

Ora vedi dunque come fanno i pianeti a modificare lo spazio-tempo, senza bisogno di qualcosa che li "spinga" dentro lo spazio per deformarlo, come nell'esempio del telo elastico, né "aggrappandolo" in alcun modo per "tirarselo appresso"!

**Q: Sì, ora ho capito. La forza di gravità ha un effetto sullo spazio analogo a quello di un moto accelerato, e quindi ne implica la contrazione relativistica.**

**A:** Sì.

...oppure puoi dire che un'opportuna deformazione dello spazio-tempo attorno a un pianeta si comporta "come se" il pianeta esercitasse una forza di attrazione sugli oggetti che gli stanno attorno... a questo punto, come vedi, è la stessa cosa!

**Q: No, aspetta, vacci piano! ...adesso mi stai dicendo che l'attrazione gravitazionale ...non esiste?!**

**A:** No, ti sto dicendo che fisicamente è la stessa cosa parlare di forza gravitazionale, o di deformazione dello spazio-tempo.

**Q: Ah... ma quindi se lascio una pallina che tengo in mano...**

**A:** ...quella comincia a cadere verso la Terra soltanto perché segue la deformazione dello spazio-tempo, non perché ci sia una magica "attrazione a distanza" da parte della Terra, come credeva Newton!

La Relatività ci impone di pensare allo spazio e al tempo come un'unica entità geometrica, fatta dalle 3 dimensioni dello spazio più una quarta dimensione che è il tempo.

In questo spazio 4D una pallina ferma è immobile solo nelle tre direzioni spaziali, ma continua a muoversi in avanti lungo la direzione temporale, insieme a tutto il resto, visto che il tempo "scorre", mi segui?

**Q: ...sì.**

**A:** Se però la pallina si trova in un campo gravitazionale, come qui sulla Terra, lo spazio e il tempo sono entrambi deformati, cosicché mentre lo scorrere del tempo, diciamo così, la "spinge" in avanti, la fa avanzare lungo un percorso piegato, un po' come se fosse una biglia lanciata su una pista parabolica.

Il risultato è che la pallina, andando avanti nel tempo, è costretta a muoversi anche nello spazio, accelerando così verso la Terra!

**Q: Nooo... Incredibile... Ma questa distorsione dello spazio non si può vedere con un esperimento? A me sembra più che altro un modo difficile di descrivere una cosa facile, come l'attrazione di gravità, che tutti conosciamo?**

**A:** No, aspetta. La Relatività Generale è il modo più facile che si conosca per descrivere, per mezzo di un singolo concetto, moltissime evidenze sperimentali, alcune delle quali sono del tutto inspiegabili in altro modo!

In particolare, due osservazioni famose hanno evidenziato in modo diretto la distorsione dello spazio attorno al Sole.

La prima fu suggerita dallo stesso Einstein, il quale predisse che, se la gravità del Sole distorce veramente lo spazio, allora osservando una stella molto vicina al bordo solare, per esempio durante un'eclissi di Sole, la dovremmo vedere leggermente spostata, in quanto la sua luce verrebbe "deviata".

**Q: ...ma scusa, un raggio di luce non va sempre dritto?**

**A:** Certo, ma "andare dritto" in uno spazio storto non vuol dire andare in linea retta!

Guarda, pensa a un ciclista su pista che percorre la sua curva parabolica: il ciclista non ruota per niente il manubrio, anzi continua a mantenerlo ben "dritto", ma nonostante questo alla fine cambia direzione!

Ecco, per la luce avviene lo stesso: se si muove in uno spazio-tempo deformato è costretta, come il ciclista su pista, a seguirne le deformazioni.

**Q: Ah, e si vede questo cambio di direzione?**

**A:** Sì, l'astronomo Arthur Eddington fece l'osservazione nel 1919, e misurò esattamente lo spostamento previsto dalla Relatività: una deviazione di appena un millesimo del disco solare, molto piccola, ma ben misurabile con un telescopio.

Questa misura rese celebre Einstein e la Teoria della Relatività, e dimostrò con i fatti che lo spazio attorno al Sole è veramente distorto.

Se la gravità fosse soltanto un'attrazione tra le masse, come nella teoria di Newton, la luce, essendo priva di peso, non sentirebbe nessuna attrazione e procederebbe sempre in linea retta!

La Relatività Generale perciò ci mostra che la forza gravitazionale non è un'attrazione tra due masse, ma è il risultato di una deformazione dello spazio-tempo.

**Q: E la seconda osservazione qual è?**

**A:** La seconda fu un'osservazione del pianeta Mercurio, il più vicino al Sole, fatta dall'astronomo Leverrier. L'orbita di Mercurio non è circolare, ma è ellittica, come per tutti gli altri pianeti. Quel che osservò Leverrier fu che l'orientazione di questa ellisse si sposta nel tempo e questo lasciò molto perplessi gli astronomi, perché se la gravità è soltanto una forza diretta verso il Sole, questo spostamento laterale non si spiega!

**Q: ...ora mi dirai che la Relatività Generale può spiegarlo.**

**A:** Sì, infatti se lo spazio è deformato come abbiamo detto, nel tratto dell'orbita più vicino al Sole la diversa geometria cambia leggermente la forma dell'orbita, facendo sì che questa non si chiuda più perfettamente su sé stessa. E la discrepanza misurata è esattamente quella prevista dalla Relatività Generale.

**Q: Mio dio, certo che Einstein era davvero un genio.**

**A:** Puoi dirlo forte!

**FINE**