

# Porte Dimensionali

relazione spazio-tempo-gravità, a cura di  
Enrico De Cecco, usando i servizi offerti da  
Wikipedia Creatore di Libri.

# Indice

## Voci

|                          |    |
|--------------------------|----|
| Accelerazione di gravità | 1  |
| Ponte di Einstein-Rosen  | 4  |
| Spaziotempo              | 14 |

## Note

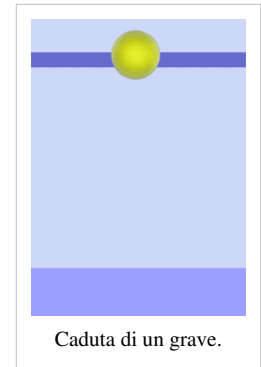
|  |    |
|--|----|
| Fonti e autori delle voci              | 21 |
| Fonti, licenze e autori delle immagini | 22 |

## Licenze della voce

|         |    |
|---------|----|
| Licenza | 23 |
|---------|----|

# Accelerazione di gravità

L'**accelerazione di gravità** (o accelerazione gravitazionale) è l'accelerazione che un corpo subisce quando è lasciato libero di muoversi in caduta libera in un campo di gravità.




## Accelerazione di gravità sulla superficie terrestre

L'accelerazione gravitazionale si indica con la lettera  $g$  e la sua unità di misura è il metro al secondo quadrato. Sulla superficie terrestre il valore esatto di  $g$  varia a seconda del luogo, in particolare della latitudine e dell'altitudine: per questo motivo è stato anche introdotto un valore convenzionale per  $g$ , pari a  $9,80665 \text{ m/s}^2$ ,<sup>[1]</sup> dalla terza CGPM nel 1901. Si tratta di un valore medio che approssima il valore dell'accelerazione di gravità presente al livello del mare a una latitudine di  $45,5^\circ$ . Tale valore viene a volte rappresentato con  $g_0$ , quando  $g$  viene invece usato per rappresentare l'effettiva accelerazione di gravità locale. L'accelerazione di gravità  $g$  è talvolta usata come unità di misura non-SI.

Il simbolo è scritto  $g$  minuscolo<sup>[2]</sup> per distinguerlo dalla costante gravitazionale  $G$  che compare nella equazione di Newton.

## Variazioni della gravità terrestre

 Per approfondire, vedi **Forza di gravità**.

L'effettiva accelerazione che la Terra produce su un corpo in caduta varia al variare del luogo in cui questa è misurata.

Il valore dell'accelerazione aumenta con la latitudine per due ragioni:

- la rotazione della Terra, che produce una forza centrifuga che si oppone all'attrazione gravitazionale; questo effetto da solo fa sì che l'accelerazione di gravità sia  $9,823 \text{ m/s}^2$  ai poli e  $9,789 \text{ m/s}^2$  all'equatore (il valore convenzionale di  $g$ , pari a  $9,80665 \text{ m/s}^2$  di cui sopra, è una media di questi due valori);
- lo schiacciamento della Terra ai poli, che allontana ulteriormente dal centro della Terra ogni corpo che si trova alle basse latitudini facendo sì che la forza di gravità che agisce su di esso sia leggermente inferiore, dato che è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i baricentri del corpo e della Terra.

La combinazione di questi due effetti rende il valore di  $g$  misurato ai poli circa lo 0,5% più grande di quello misurato all'equatore.

Il valore di  $g$  cui è sottoposto un corpo che si trova in aria ad altezza  $h$  sul livello del mare è calcolabile come:

$$g = 9,7803184 (1 + A \sin^2 L - B \sin^2 2L) - 3,086 \times 10^{-6} h$$

dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità in  $\text{m/s}^2$ ;
- $A = 0,0053024$ ;
- $B = 0,0000059$ ;
- $L$  è la latitudine;
- $h$  è l'altezza sul livello del mare in metri.

L'ultimo termine,  $3,086 \times 10^{-6} h$  è una correzione dovuta all'altezza.

Se il corpo è sulla verticale della terraferma, viene aggiunta un'ulteriore correzione dovuta alla maggiore massa di un volume di terra rispetto all'acqua; tale maggiore massa può essere approssimata con una superficie orizzontale

infinita dando luogo a un fattore di correzione (la *correzione di Bouguer*) pari a  $2\pi G$  volte la massa per unità di area, ovvero  $4,2 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ .

La gravità al di sotto della superficie terrestre viene invece calcolata sottraendo dalla massa totale della Terra la massa del guscio esterno al punto di misurazione. La forza di gravità diminuisce progressivamente all'aumentare della profondità e al centro della Terra è zero perché l'intera massa del pianeta attira il corpo in tutte le direzioni attorno a esso.

Anche variazioni locali nella composizione delle rocce e delle superfici possono alterare localmente l'accelerazione di gravità; queste anomalie sono generalmente misurate e mappate.

## Calcolo del valore di $g$

A partire dalla legge della gravitazione universale,  $g$  è il prodotto di alcuni termini che vi compaiono, ovvero

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = \left( G \frac{m_1}{r^2} \right) m_2$$
$$g = G \frac{m_1}{r^2}$$

Inserendo quindi i valori di  $G$ , della massa e del raggio della Terra si ottiene

$$g = G \frac{m_1}{r^2} = (6,6742 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}) \frac{5,9736 \times 10^{24} \text{ kg}}{(6,37101 \times 10^6 \text{ m})^2} = 9,822 \text{ m/s}^2$$

che è una buona approssimazione del valore medio di  $g$ . Le differenze sono ascrivibili a diversi fattori:

- la Terra non è omogenea
- la Terra non è una sfera perfetta - viene considerato un valore medio del suo raggio
- il calcolo non tiene conto dell'effetto centrifugo dovuto alla rotazione del pianeta


## Applicazioni

L'unità di misura  $g$  (conosciuta come Forza  $g$ ) è principalmente impiegata in campo aerospaziale per esprimere le accelerazioni alle quali sono sottoposti i velivoli, i veicoli spaziali e gli eventuali passeggeri.

L'unità di misura  $g$  è usata anche in campo automobilistico per esprimere le accelerazioni che agiscono sul veicolo in curva, accelerazione, frenata e per l'analisi delle collisioni.

La costante di accelerazione gravitazionale terrestre trova inoltre grande impiego dal punto di vista fisico nello studio dei comportamenti dei corpi sottoposti a certe condizioni (es. statica, dinamica, ecc..)

## Fattore di carico

 Per approfondire, vedi **Fattore di carico**.

Con l'espressione colloquiale forza  $g$  utilizzata in aeronautica (spesso erroneamente scritta *forza G*), ci si riferisce al fattore di carico lungo l'asse verticale di un aeromobile, unità di misura delle accelerazioni a cui astronauti e piloti sono soggetti, moltiplicato per l'accelerazione di gravità terrestre, con simbolo appunto  $g$ .

In realtà, quindi, la cosiddetta forza  $g$  non è una forza, ma un'accelerazione: in questo contesto, quando ci si riferisce a "1  $g$ " si indica un'accelerazione pari all'accelerazione di gravità media misurata sulla Terra, che vale  $9,80665 \text{ m/s}^2$ .

Una persona mediamente riesce a sopportare accelerazioni verticali di circa 5  $g$  positivi e  $2\div 3$   $g$  negativi. Per  $g$  positivo si intende una accelerazione che produce lo stesso effetto soggettivo causato dalla gravità terrestre su un soggetto in posizione eretta; questo effetto è prodotto da una accelerazione nel senso che va dai piedi verso la testa, quindi di senso contrario alla forza di gravità cui si è soggetti stando in piedi. Per  $g$  negativi si intendono accelerazioni ed effetti soggettivi di

senso inverso. I  $g$  positivi, quindi, causano il deflusso del sangue dalla testa verso i piedi, i negativi viceversa. Si calcola che un'accelerazione di 5  $g$ , se prolungata per vari secondi, provochi perdita di conoscenza e valori superiori possono danneggiare il corpo umano anche mortalmente, se non adeguatamente protetto.

Con la combinazione di speciali tute anti- $g$  e di forze applicate ai muscoli per tenerli in tensione, entrambi con lo scopo di ridurre il deflusso sanguigno dal cervello, i piloti moderni possono sopportare oltre 10  $g$  positivi ( $100 \text{ m/s}^2$ ). La resistenza a "g negativi" è molto inferiore: nell'intervallo fra i 2 e i 3  $g$  (dai  $20$  ai  $30 \text{ m/s}^2$ ) il campo visivo diventa rosso, a causa del maggiore apporto di sangue nei capillari nei globi oculari dovuta all'aumento della pressione sanguigna [Wikipedia:Uso delle fonti](#).

La forza  $g$  non va confusa con la costante di gravitazione universale, indicata con "G", né con l'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre: non va confusa in generale con una forza, essendo una accelerazione (sebbene, nei casi sia una accelerazione relativa al riferimento considerato, determina una forza fittizia, es. l'accelerazione centrifuga).

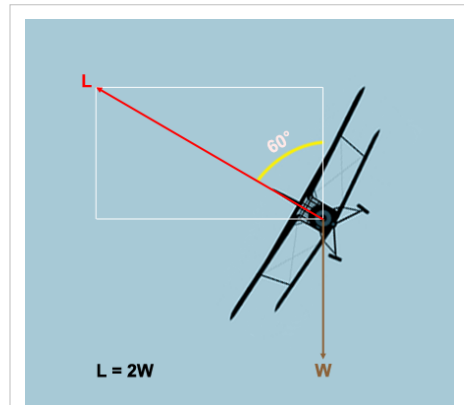
## Note

[1] IUPAC Gold Book, "standard acceleration of free fall" (<http://goldbook.iupac.org/S05905.html>)

[2] IUPAC Gold Book, "acceleration, a" (<http://goldbook.iupac.org/A00051.html>)

## Voci correlate

- Forza di gravità
- Caduta dei gravi
- Anomalia in aria libera

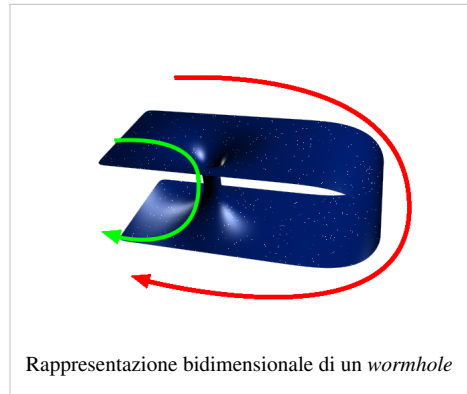


In volo livellato la portanza ( $L$ ) è pari al peso ( $W$ ). In una virata coordinata a  $60^\circ$  di sbandamento, la portanza è pari al doppio del peso ( $L = 2W$ ) ed il pilota è soggetto ad un'accelerazione di 2  $g$ . Maggiore è lo sbandamento, maggiore sarà il numero di  $g$ .

# Ponte di Einstein-Rosen

Un **ponte di Einstein-Rosen** o **cunicolo spazio-temporale**, detto anche *wormhole* (in italiano letteralmente "buco di verme", ma tradotto in modo poco attinente col termine **galleria di tarlo** o **cunicolo di tarlo**), è una ipotetica caratteristica topologica dello spaziotempo che è essenzialmente una "scorciatoia" da un punto dell'universo a un altro, che permetterebbe di viaggiare tra di essi più velocemente di quanto impiegherebbe la luce a percorrere la distanza attraverso lo spazio normale.

Il *wormhole* viene spesso detto **galleria gravitazionale**, mettendo in rilievo la *dimensione gravitazionale* strettamente interconnessa alle altre tre *dimensioni*: spazio e tempo. Questa singolarità gravitazionale, e/o dello spazio-tempo che dir si voglia, possiede almeno due estremità, connesse ad un'unica galleria o cunicolo, potendo la materia viaggiare da un estremo all'altro passandovi attraverso.



Rappresentazione bidimensionale di un *wormhole*

## Cenni storici

Il primo scienziato a teorizzare l'esistenza dei *wormhole* fu Ludwig Flamm nel 1916. In questo senso l'ipotesi della galleria gravitazionale è un'attualizzazione della teoria ottocentesca di una quarta dimensione spaziale la quale supponeva - ad esempio per un dato corpo toroidale, nel quale si trovino le tre dimensioni spaziali comunemente percettibili - una quarta dimensione spaziale che abbreviasse le distanze, e così i tempi del viaggio. Questa nozione iniziale fu plasmata in modo più scientifico nel 1921 dal matematico Hermann Weyl in relazione alle sue analisi della massa in termini di energia di un campo elettromagnetico.<sup>[1]</sup>

Attualmente la teoria delle stringhe ammette l'esistenza di oltre 3 dimensioni spaziali e non 4 (vedere iperspazio), ma le altre dimensioni spaziali sarebbero contratte o compattate in base a scale subatomiche (secondo la teoria di Kaluza-Klein) per cui sembra molto difficile (si direbbe "impossibile") sfruttare tali dimensioni spaziali "extra" per fare viaggi nello spazio e nel tempo.

## Origine del nome

Il termine inglese *wormhole* fu coniato dal fisico teorico americano John Archibald Wheeler nel 1957. Comunque, l'idea dei wormhole fu già teorizzata nel 1921 dal matematico tedesco Hermann Weyl nella sua analisi della massa in termini di energia del campo elettromagnetico.<sup>[2]</sup>

« Questa analisi costringe a considerare situazioni... dove c'è un flusso netto di linee di forza attraverso ciò che i topologi chiamerebbero una soluzione per lo spazio molteplicemente connesso e che i fisici potrebbero forse essere scusati per averlo vividamente definito un 'wormhole'. »

(John Wheeler in *Annali di Fisica*)

L'analogia usata per spiegare il concetto espresso dal termine *wormhole* è questa: si immagina che l'universo sia una mela, e che un verme viaggi sulla sua superficie. La distanza tra due punti opposti della mela è pari a metà della sua circonferenza se il verme resta sulla superficie della mela, ma se invece esso si scava un foro direttamente attraverso la mela la distanza che deve percorrere per raggiungere quel determinato punto diventa inferiore. Il foro attraverso la mela rappresenta il cunicolo spazio-temporale.

## Tipi di cunicoli spazio-temporali

- I **cunicoli spazio-temporali intra-universo** connettono una posizione con un'altra dello stesso universo in un tempo differente. Un tunnel gravitazionale dovrebbe poter connettere punti distanti nell'universo a causa delle deformazioni spaziotemporali, permettendo così di viaggiare fra loro in minor tempo rispetto ad un viaggio attraverso lo spazio normale.
- I **cunicoli spazio-temporali inter-universo** collegano un universo ad un altro differente e sono definiti *wormhole di Schwarzschild*. Questo ci permette di congetturare la possibilità se tali tunnel spazio-temporali possano essere usati per viaggiare da un universo ad un altro parallelo. Un'altra applicazione del *wormhole* potrebbe essere il viaggio nel tempo. In questo caso sarebbe una scorciatoia per spostarsi da un punto spaziotemporale a un altro differente. Nella teoria delle stringhe un *wormhole* viene visualizzato come la connessione tra due D-brane, dove le bocche sono associate alle brane e connesse tramite un tubo di flusso. Si pensa che i *wormhole* siano una parte della schiuma quantica o spaziotemporale.

Altra classificazione:

- I *wormhole* euclidei, studiati nella fisica delle particelle.
- I *wormhole* di Lorentz, sono principalmente studiati nella relatività generale e nella gravità semiclassica.
  - I *wormhole* attraversabili sono dei tipi speciali di *wormhole* di Lorentz che permetterebbero a un essere umano di viaggiare da un estremo all'altro del buco (tunnel).

Per il momento esistono teoricamente differenti tipi di *wormhole* che sono principalmente soluzioni matematiche al problema:

- Il supposto *wormhole* di Schwarzschild prodotto da buco nero di Schwarzschild viene considerato insormontabile;
- Il supposto *wormhole* formato da un buco nero di Reissner-Nordstrøm o Kerr-Newman, risulterebbe sormontabile, ma in una sola direzione, potendo contenere un *wormhole* di Schwarzschild;
- Il *wormhole* di Lorentz possiede massa negativa e si ipotizza come sormontabile in entrambe le direzioni (passato/futuro).

## Cunicoli spazio-temporali di Schwarzschild

I cunicoli spazio-temporali lorentziani noti come **cunicoli spazio-temporali di Schwarzschild** o **ponte di Einstein-Rosen** sono ponti fra aree di spazio che possono essere modellati come soluzioni di vuoto nelle equazioni di campo di Einstein combinando modelli di un buco nero e un buco bianco. Questa soluzione fu scoperta da Albert Einstein e il suo collega Nathan Rosen, che per primo pubblicò il risultato nel 1935. Ad ogni modo, nel 1962 John A. Wheeler e Robert W. Fuller pubblicarono un saggio mostrando che questo tipo di *wormhole* è instabile, e che sarà *schacciato* fuori istantaneamente non appena si forma, impedendo anche alla luce di attraversarlo.

Precedentemente i problemi di stabilità dei *wormhole* di Schwarzschild erano apparenti; fu proposto che i quasar fossero buchi bianchi formanti la fine di questi tipi di *wormhole*.

Mentre i *wormhole* di Schwarzschild non sono attraversabili, la loro esistenza ispirò Kip Thorne a immaginare *wormhole* attraversabili creati tenendo la 'gola' di un *wormhole* di Schwarzschild aperta con materia esotica (materia che ha massa/energia negativa).

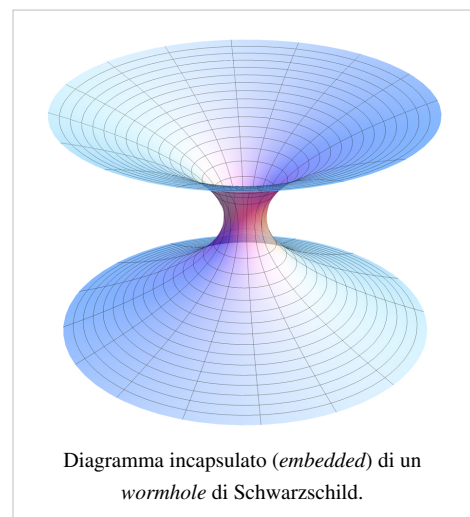


Diagramma incapsulato (*embedded*) di un *wormhole* di Schwarzschild.

## Attraversabilità

I *wormhole* lorentziani attraversabili permetterebbero di viaggiare da una parte all'altra dello stesso universo molto rapidamente oppure viaggiare da un universo ad un altro. La possibilità di *wormhole* attraversabili nella relatività generale fu per prima volta dimostrata da Kip Thorne insieme a un suo studente laureato Mike Morris in un documento del 1988; per questa ragione il tipo di *wormhole* attraversabile che essi proposero, tenuto aperto per mezzo di un guscio sferico di materia esotica, viene riferito come un ***wormhole* di Morris-Thorne**. Più tardi, altri tipi di *wormhole* attraversabili furono scoperti come soluzioni accettabili riguardo alle equazioni della relatività generale, includendo una varietà analizzata in un documento del 1989 di Matt Visser, in cui un sentiero attraverso il *wormhole* può essere praticato senza attraversare una regione di materia esotica. Comunque nella versione originaria della teoria di Gauss-Bonnet la materia esotica non serve ai *wormholes* per esistere - poiché possono farlo senza di essa.<sup>[3]</sup> Un tipo tenuto aperto da massa negativa stringa cosmica fu proposto da Visser in collaborazione con Cramer ed altri,<sup>[4]</sup> asserendo che tali *wormhole* potrebbero essere stati creati naturalmente nell'universo primordiale.

I *wormhole* connettono due punti nello spaziotempo, ovvero permetterebbero in linea di principio di viaggiare nel tempo come pure nello spazio. In un saggio del 1988, Morris, Thorne e Yurtsever<sup>[5]</sup> cercarono esplicitamente di capire come convertire un *wormhole* attraversante lo spazio in uno attraversante il tempo.

## Base teorica

### Definizione

La nozione base di un cunicolo spaziotemporale *intra-universo* (che collega almeno due o più punti dello stesso universo) è che esso sia una regione compatta dello spaziotempo il cui confine è topologicamente insignificante ma il cui interno non è semplicemente connesso. Formalizzare questa idea conduce a definizioni come la seguente, presa dai *wormhole lorentziani* di Matt Visser.

« Se uno spaziotempo di Minkowski contiene una regione compatta  $\Omega$ , e se la topologia di  $\Omega$  è della forma  $\Omega \sim \mathbb{R} \times \Sigma$ , dove  $\Sigma$  è una topologia tre-dimensionale *non banale* (*nontrivial*), il cui contorno ha una topologia della forma  $d\Sigma \sim S^2$ , e se, inoltre, le ipersuperfici  $\Sigma$  sono tutte di tipo *spazio* (*spacelike*), allora la regione  $\Omega$  contiene un cunicolo quasipermanente intra-universo. »

Descrivere i cunicoli *inter-universo* (che collegano almeno due o più universi paralleli) è più difficile. Per esempio, si può immaginare un universo neonato connesso al suo 'genitore' per mezzo di uno stretto "cordone ombelicale". Si può considerare il cordone ombelicale come la strozzatura del cunicolo, ma lo spaziotempo è semplicemente connesso.

### Plausibilità

Si sa che i *wormhole* di Lorentz sono possibili nell'ambito della relatività generale, ma la possibilità fisica di queste soluzioni è incerta. Inoltre, non si sa se la teoria della gravità quantistica, ottenuta condensando la relatività generale nella meccanica quantistica, permetterebbe l'esistenza di questi fenomeni. La maggioranza delle soluzioni conosciute della relatività generale, che permettono l'esistenza di *wormhole* attraversati, richiedono l'esistenza di materia strana, una sostanza teorica che ha densità negativa di energia. Tuttavia, non è stato matematicamente provato che questo sia un requisito assoluto per questo tipo di *wormhole* attraversati, né è stato stabilito che la materia esotica non possa esistere.

Inoltre non si sa empiricamente se esistano *wormhole*. Una soluzione alle equazioni della relatività generale (come quella che fece L. Flamm) che possa rendere possibile l'esistenza di un *wormhole* senza il requisito di una materia esotica — sostanza teorica che possiederebbe una densità di energia negativa — non è stata tuttora verificata. Molti fisici, compreso Stephen Hawking (cfr. la sua congettura di protezione cronologica), sono dell'opinione che a causa dei paradossi che sarebbero implicati da un viaggio nel tempo attraverso un tunnel gravitazionale, esista qualcosa di



fondamentale nelle leggi della fisica che impedisca tali fenomeni (vedere censura cosmica).

Nel marzo del 2005, Amos Ori visualizzò un *wormhole* che permetterebbe di viaggiare nel tempo, senza precisare la materia esotica e soddisfacendo tutte le condizioni energetiche. La stabilità di questa soluzione è incerta, per cui non risulta chiaro se si richieda una precisione infinita affinché si formi e si permetta il viaggio nel tempo, e se anche in questo caso gli effetti quantistici proteggano la sequenza cronologica del tempo.

## Metrica

Le teorie della **metrica del wormhole** descrivono la geometria dello spaziotempo di un *wormhole* e servono come modelli teorici per un viaggio nel tempo. Un esempio di una metrica del *wormhole* (attraversabile) è il seguente:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dl^2 + (k^2 + l^2)(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2).$$

Un tipo di metrica del *wormhole* non-attraversabile è la soluzione di Schwarzschild:


$$ds^2 = -c^2 \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2).$$

La metrica più generale di wormhole attraversabile è:

$$ds^2 = -e^a c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{b(r)}{r}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2).$$

dove  $a$  è una funzione di  $r$  ovunque finita.<sup>[6]</sup>

## Buchi temporali

 Per approfondire, vedi *Viaggio nel tempo*.

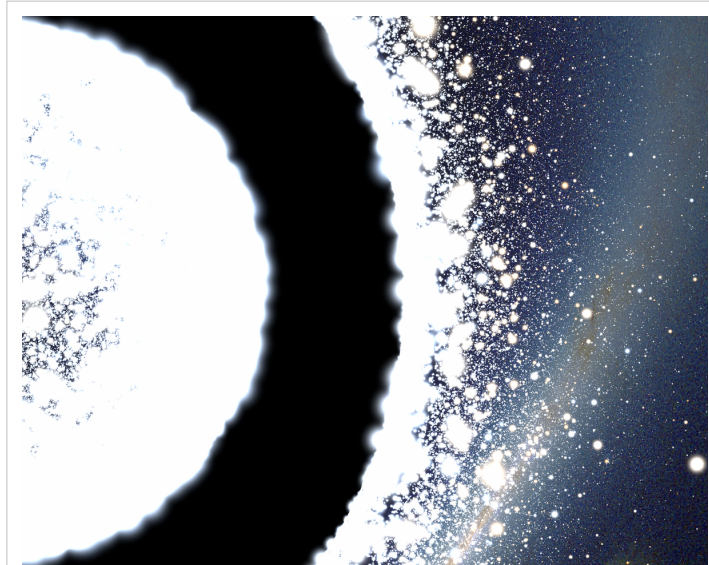
Un ponte di Einstein-Rosen potrebbe potenzialmente permettere il viaggio nel tempo. Questo potrebbe essere conseguito accelerando un'estremità del *wormhole* relativamente all'altra, e riportandola successivamente indietro; la dilatazione temporale relativistica risulterebbe in un minor tempo passato per la bocca del *wormhole* che è stata accelerata, in confronto a quella rimasta ferma, il che significa che tutto ciò che è passato dalla bocca stazionaria, uscirebbe da quella accelerata in un tempo precedente a quello del suo ingresso. Il percorso attraverso un tale *wormhole* viene detto curva spaziotemporale chiusa di tipo tempo, e un *wormhole* con questa caratteristica viene talvolta detto *timehole* o buco temporale.

Per esempio, si considerino due orologi per entrambe le bocche che mostrano la stessa data: 2000. Dopo aver effettuato un viaggio a velocità relativistiche, la bocca accelerata è riportata nella stessa regione di quella stazionaria, con l'orologio della bocca accelerata che legge 2005, mentre l'orologio di quella stazionaria legge 2010. Un viaggiatore

entrato dalla bocca accelerata in questo momento uscirebbe dalla stazionaria quando anche il suo orologio legge 2005, nella stessa regione, ma ora con cinque anni nel passato. Una tale configurazione di *wormhole* permetterebbe ad una linea di mondo di particella di formare un cerchio chiuso nello spaziotempo, noto come curva del tempo chiusa.

Si ritiene comunque che non sia possibile convertire un *wormhole* in una macchina del tempo in questa maniera; alcuni modelli matematici indicano che un circuito retroattivo di particelle virtuali, circolerebbe all'interno del *timehole* con intensità crescente, distruggendolo prima che qualsiasi informazione possa passarvi attraverso. Ciò è stato chiamato in causa dal suggerimento che la radiazione si disperderebbe dopo aver viaggiato attraverso il *wormhole*, prevenendo così un accumulo infinito. Il dibattito su questo soggetto è descritto da Kip S. Thorne nel libro *Black Holes and Time Warps*, e richiederebbe probabilmente la risoluzione di una teoria della gravità quantistica.

Non si sa se un ponte di Einstein-Rosen possa esistere. Una soluzione alle equazioni della relatività generale che potrebbe rendere possibili i ponti di Einstein-Rosen senza materia esotica, una sostanza teorica che ha una densità di energia negativa, non è stata ancora scoperta. Comunque, né le soluzioni alle equazioni della relatività generale che accomodano i *wormhole*, né l'esistenza della materia esotica, sono state rigettate. Molti fisici, compreso Stephen Hawking (vedi la congettura di protezione cronologica di Hawking), ritengono che, a causa dei problemi che un *wormhole* creerebbe in teoria, compreso permettere il viaggio nel tempo, ci sia qualcosa di fondamentale nelle leggi



Interpretazione artistica di un *wormhole* come dovrebbe essere visto da un osservatore che stia attraversando l'orizzonte degli eventi di uno *Schwarzschild wormhole*, il quale è simile ad un buco nero di Schwarzschild ma con la particolarità di avere in sostituzione alla regione dove si dovrebbe trovare la singolarità gravitazionale (nel caso del buco) un cammino instabile verso un buco bianco esistente in un altro universo (vedi anche Multiverso). Questa nuova regione è, comunque, irraggiungibile nel caso di un *wormhole* Schwarzschild, in quanto il ponte tra il buco nero e quello bianco collasserà sempre prima che l'osservatore abbia il tempo di attraversarlo. Si veda White Holes and Wormholes <sup>[7]</sup> per una discussione più tecnica ed una animazione di cosa un osservatore dovrebbe vedere cadendo in un ponte di Einstein-Rosen di tipo Schwarzschild.

della fisica che lo proibisca. Ad ogni modo, questa rimane una speculazione, e la nozione che la natura censurerebbe gli oggetti sconvenienti è già stata smentita nel caso del principio di censura cosmica.

### Viaggio più veloce della luce

La relatività speciale si applica solo localmente. I *wormhole* permettono viaggi *superluminali* (più veloce della luce) garantendo che la velocità della luce non sia ecceduta localmente in ogni tempo. Mentre viaggiando attraverso un *wormhole*, vengono utilizzate velocità *subluminali* (più lente della luce). Se due punti sono connessi tramite un *wormhole*, il tempo impiegato per attraversarli sarebbe minore del tempo impiegato da un raggio di luce attraversante lo spazio *esterno* al *wormhole*. Comunque, un raggio di luce viaggiando attraverso il *wormhole* sconvolgerebbe sempre il viaggiatore. Per analogia, il fatto di correre intorno al lato opposto di una montagna alla massima velocità renderebbe il cammino più lungo che passeggiando attraverso un tunnel che l'attraversasse. Si può camminare lentamente giungendo a destinazione prima, poiché la distanza è più breve.

### Viaggio nel tempo e paradossi

Dunque, secondo la teoria della relatività generale di Einstein, più un oggetto si sposta velocemente, più vedrà il tempo scorrere lentamente. Se l'entrata di un *wormhole* (buco nero) resta immobile e la sua uscita (fontana bianca) si muove al 99.99% della velocità della luce, dopo 48 ore dall'entrata, saranno trascorsi soltanto 28 minuti all'uscita. Così, se si arriva a costruire un *wormhole* e a controllare la velocità della sua uscita, noi potremmo viaggiare nel tempo e scegliere il momento dell'uscita nel passato.

Se il viaggio nel tempo è possibile, perché i nostri discendenti, che dovrebbero certamente controllare questa tecnologia non ci rendono visita? Semplicemente perché il nostro buco temporale non esiste ancora. Le entrate e le uscite nel tempo non potranno farsi se non quando un futuro inventore fabbricherà la "macchina per viaggiare nel tempo".

Adesso restano due grandi problemi da risolvere che proibiscono logicamente i viaggi nel tempo:

#### Paradosso del nonno

Immaginiamo che il nostro inventore viaggi nel passato. Se incontrasse il suo giovane nonno e se, ammettiamo che in un modo o nell'altro, egli sia indotto ad ucciderlo, avrà così ucciso il suo antenato, il quale di conseguenza non avrà mai figli e il nostro inventore non avrà mai visto la luce del giorno e dunque non sarebbe mai potuto nascere; e se l'inventore non è mai nato, non può giammai uccidere suo nonno.

#### Paradosso dello scrittore

Invece di uccidere suo nonno, immaginiamo che il nostro inventore gli doni un libro scritto da uno scrittore del futuro per farlo diventare celebre. Egli diventerà quindi conosciuto semplicemente ricopiando il libro. Esso non sarà mai stato scritto, ma semplicemente ricopiato.

Questi atti avranno come conseguenza quella di modificare il futuro diretto del nostro viaggiatore.

A causa di questi due paradossi, accettando l'esistenza di viaggi nel tempo, si arriva a negare tutte le coerenze logiche. Per trovare una soluzione, diversi scienziati ammettono l'ipotesi di mondi paralleli.

In effetti, se il nipote del nostro inventore parte, non è per andare nel passato, ma in un mondo parallelo. Se egli uccide l'uomo che crede essere suo nonno, la sua azione non avrà alcuna influenza sulla sua esistenza, visto che questo inventore non ha alcun rapporto con gli antenati. Così è per il libro. Se il nostro viaggiatore lo dona alla persona che egli pensa sia suo nonno, egli sarà stato ricopiato in questo mondo, e scritto nel nostro.

## I *wormhole* nella narrativa e nei media

I *wormhole*, per la loro supposta capacità di rendere possibili i viaggi tra punti molto distanti del cosmo, sono un elemento narrativo assai sfruttato nella fantascienza.

Sono il punto centrale del romanzo di Carl E. Sagan *Contact* (1985), per il quale Kip Thorne consultò Sagan sulla possibilità dei *wormhole*. Dal romanzo di Sagan è stato tratto un omonimo film del 1997.

Isaac Asimov usa l'espedito del salto temporale nel romanzo *Paria dei cieli*, pur non usando il nome *wormhole* per riferirsi al buco temporale che si apre davanti a Joseph Shwartz, il protagonista, che viene catapultato avanti nel tempo di millenni.

Ron Hubbard, scrisse *Ritorno al domani* (1980), la teoria della relatività di Einstein trova nell'ingegnere Alan Corday una inconsapevole cavia. Dopo ogni viaggio che per lui dura pochi mesi, incontra un mondo catapultato sempre più nel futuro.

Negli anni novanta i *wormhole* si sono trovati al centro del dittico della *Caccia alla Terra* (*Hunted Earth*, 1990 e 1994) dello scrittore statunitense Roger MacBride Allen.

Essi sono poi il principio base su cui si sviluppa la trama del film *Stargate* e delle serie tv derivatene *Stargate SG-1*, *Stargate Atlantis* e *Stargate Universe*. Gli *Stargate* sono antichissimi congegni costruiti da un'antica razza aliena e disseminati per tutta la Via Lattea e altre galassie, nel tentativo di creare una rete d'interscambio per viaggiare rapidamente da un pianeta all'altro senza dover ricorrere a potenti vascelli spaziali.

L'ambientazione della serie televisiva *Star Trek: Deep Space Nine* è quella di una stazione spaziale collocata vicino ad un "tunnel spaziale" (*wormhole*) stabile nello spazio del pianeta Bajor, che mette in comunicazione con il remoto quadrante Gamma della galassia. Il *wormhole* è peraltro popolato da misteriose entità extradimensionali che, con il nome di "Profeti di Bajor", sono da sempre oggetto di religiosa venerazione da parte del popolo dei Bajoriani.

La serie TV *Farscape* presenta un astronauta che accidentalmente passa attraverso un *wormhole* e finisce in una parte remota dell'universo.

Nella serie televisiva *I viaggiatori* (*Sliders*), viene trovato un metodo per creare dei *wormhole* che permettono viaggi non tra punti diversi dell'universo, ma tra universi paralleli; gli oggetti e le persone che viaggiano attraverso il *wormhole* partono e arrivano nello stesso punto geografico e cronologico, ma in una delle tante dimensioni parallele. Questa serie presume che la realtà esista come parte di un multiverso e si chiede cosa sarebbe successo se grandi o piccoli eventi della storia si fossero svolti in maniera differente (ucronia); sono queste scelte che danno vita agli universi alternativi nei quali è ambientata la serie. Analoghe premesse sono usate nell'episodio *Universi paralleli* della serie tv *Star Trek: The Next Generation*.

Nel 2000 Arthur C. Clarke e Stephen Baxter scrissero congiuntamente un romanzo di fantascienza, *La luce del passato*, che discute dei problemi che sorgono quando un *wormhole* viene utilizzato per comunicazioni a velocità superiore a quella della luce.

Un *wormhole* è anche alla base della sceneggiatura del film di Richard Kelly *Donnie Darko* (2001).

Un metodo correlato di viaggio che permette di superare la velocità della luce, che spesso appare nella fantascienza, specialmente nella Space Opera militare, è la "guida a salti", che può spingere un'astronave tra due "punti di salto" prefissati, che connettono i sistemi solari. Connettere i sistemi solari con una rete di questo tipo risulta in un "terreno" fissato che può essere usato per costruire trame legate alle campagne militari.

Nella serie a fumetti *X-Men* della Marvel Comics, il mutante Magneto utilizza il suo potere di alterare i campi magnetici per creare piccoli *wormhole* per spostarsi da un punto ad un altro.

Nel videogioco per Nintendo Wii *Metroid Prime 3: Corruption* i *wormhole* sono utilizzati dai Leviatani per raggiungere i pianeti vittima. Alla fine del gioco la Federazione Galattica utilizza un Leviatano per produrre un *wormhole*, in modo da raggiungere il pianeta Phaaze.

Nel 6° Special di Halloween (presente nella settima stagione) della serie *I Simpson*, nel terzo segmento della puntata Homer entra in un passaggio dimensionale dietro ad un armadio e sembra finire dentro un perfetto *wormhole*, che poi lo trasporta nel mondo reale.

Nel film *Jumper - Senza confini*, i cosiddetti *Jumper* usano i Wormhole per teletrasportarsi in qualsiasi parte del mondo.

Nel film *Thor* (Marvel Studios/Paramount-2011) gli dei asgardiani usano il Ponte Bifröst per spostarsi tra i 9 regni che governano, sulla terra la scienziata Jane Foster (Natalie Portman) pensa che questo mezzo di trasporto sia un possibile Ponte di Einstein-Rosen

Nella serie TV *Fringe* i wormhole sono utilizzati per il passaggio tra i due universi paralleli, e nella puntata finale della quinta stagione è stato utilizzato per viaggiare nel 2157 per cambiare il corso degli eventi.

Nella serie di videogiochi *R-Type* i Bydo, i malvagi della situazione, si servono di un *wormhole* per i loro spostamenti spazial-temporali. Il *wormhole* lo si vedrà a partire dal terzo capitolo della serie (*R-Type III: The Third Lightning*).

Nel videogioco *Crysis 3*, uno dei punti fondamentali della trama consiste nell'impedire l'apertura di un Ponte di Einstein-Rosen che consentirebbe l'invasione della Terra da parte di una razza aliena proveniente dalla galassia M33.

Nel videogioco *Resistance 3*, uno dei punti fondamentali della trama consiste nell'impedire l'attraversamento di un Ponte di Einstein-Rosen che consentirebbe l'invasione della Terra da parte di una razza sconosciuta di Chimera, definiti dal dr. Malikov come Chimera Puri, ovvero coloro le cui voci vengono udite da Nathan Hale alla fine del capitolo precedente *Resistance 2*.

## Possibili vantaggi

Non si avrebbe alcun effetto di dilatazione temporale, e tale metodo potrebbe essere usato sia come "scorciatoia" nel tempo verso il futuro, sia nello spazio per raggiungere luoghi distanti diverse centinaia o migliaia di anni luce. Ciò è giustificabile dal fatto che in realtà non si sfrutta la contrazione dei tempi della relatività speciale, ma l'ipotetica curvatura dello spazio-tempo. Allo stato attuale non è possibile determinare se sia possibile tornare indietro nel tempo. Dobbiamo inoltre pensare ad una mancanza di entropia avvenuta nei due sistemi spazio-temporali poiché andiamo a portare in un altro sistema della massa e quindi dell'energia che prima non c'era, sottraendola da un altro sistema con risultati non ancora prevedibili. Un ipotetico viaggio nel tempo creerebbe un anello chiuso di fatti e conseguenze.

## Note

- [1] COLEMAN, Korte. *Hermann Weyl's Raum - Zeit - Materie and a General Introduction to His Scientific Work*, p. 199
- [2] Coleman, Korte, *Hermann Weyl's Raum - Zeit - Materie and a General Introduction to His Scientific Work*, p. 199
- [3] gr-qc/0701152 (January 2007) 'Mass without mass' from thin shells in Gauss-Bonnet gravity Elias Gravanis and Steven Willison
- [4] John G. Cramer, Robert L. Forward, Michael S. Morris, Matt Visser, Gregory Benford, and Geoffrey A. Landis, " Natural Wormholes as Gravitational Lenses (<http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/9409051>)," *Phys. Rev. D51* (1995) 3117-3120
- [5] M. Morris, K. Thorne, e U. Yurtsever, Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition ([http://prola.aps.org/abstract/PRL/v61/i13/p1446\\_1](http://prola.aps.org/abstract/PRL/v61/i13/p1446_1)), *Physical Review*, 61, 13, September 1988, pp. 1446 - 1449
- [6] <http://www.physics.uofl.edu/wkomp/teaching/spring2006/589/final/wormholes.pdf>
- [7] <http://casa.colorado.edu/~ajsh/schw.html>

## Bibliografia

- (EN) DeBenedictis, Andrew e Das, A., *On a General Class of Wormhole Geometries* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0009072>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Dzhunushaliev, Vladimir, *Strings in the Einstein's paradigm of matter* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0205055>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Einstein, Albert e Rosen, Nathan. The Particle Problem in the General Theory of Relativity (<http://link.aps.org/abstract/PR/v48/p73>). *Physical Review* **48**, 73 (1935).
- (EN) Fuller, Robert W. e Wheeler, John A.. Causality e Multiply-Connected Space-Time (<http://link.aps.org/abstract/PR/v128/p919>). *Physical Review* **128**, 919 (1962).
- (EN) Garattini, Remo, *How Spacetime Foam modifies the brick wall* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0409015>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) González-Díaz, Pedro F., *Quantum time machine* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9712033>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) González-Díaz, Pedro F., *Ringholes and closed timelike curves* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9608059>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Khatsymosky, Vladimir M., *Towards possibility of self-maintained vacuum traversable wormhole* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9612013>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Krasnikov, Serguei, *Counter example to a quantum inequality* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0409007>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Krasnikov, Serguei, *The quantum inequalities do not forbid spacetime shortcuts* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0207057>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Li, Li-Xin, *Two Open Universes Connected by a Wormhole: Exact Solutions* (<http://arxiv.org/abs/hep-th/0102143>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Morris, Michael S., Thorne, Kip S., e Yurtsever, Ulvi. Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.61.1446>). *Physical Review Letters* **61**, 1446–1449 (1988).
- (EN) Morris, Michael S. e Thorne, Kip S.. Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity (<http://link.aip.org/link/?ajp/56/395>). *American Journal of Physics* **56**, 395-412 (1988).
- (EN) Nandi, Kamal K. e Zhang, Yuan-Zhong, *A Quantum Constraint for the Physical Viability of Classical Traversable Lorentzian Wormholes* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0409053>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Ori, Amos, *A new time-machine model with compact vacuum core* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0503077>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Roman, Thomas, A., *Some Thoughts on Energy Conditions and Wormholes* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0409090>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
- (EN) Teo, Edward, *Rotating traversable wormholes* (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9803098>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005.
  - G. Vatinno, "Storia naturale del Tempo; l'effetto Einstein e la teoria della Relatività", Armando, ISBN:978-88-6677-600-0
- (EN) Visser, Matt, *The quantum physics of chronology protection by Matt Visser*. (<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204022>) in *arXiv eprint server*. URL consultato il 12 agosto 2005. Un'analisi eccellente e molto concisa.
- (EN) Visser, Matt. Traversable wormholes: Some simple examples (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.39.3182>). *Physical Review D* **39**, 3182–3184 (1989).

## Voci correlate

- Viaggio nel tempo
- Più veloce della luce
- Tubo di Krasnikov
- Iperspazio
- Tachione
- John Wheeler
- Kip S. Thorne
- Gravastar
- Superluminico
- Conggettura di protezione cronologica
- Stella di neutroni
- Raggio di Schwarzschild
- Teoria delle stringhe
- Teoria della relatività
- Propulsione spaziale
- Buco bianco

## Collegamenti esterni

- **(EN)** Creando un Wormhole attraversabile (<http://www.centauri-dreams.org/?p=561>) di Mohammad Mansouryar.
- **(EN)** Cos'è esattamente un wormhole? ([http://www.sciam.com/askexpert\\_question.cfm?articleID=000998FD-65C6-1C71-9EB7809EC588F2D7](http://www.sciam.com/askexpert_question.cfm?articleID=000998FD-65C6-1C71-9EB7809EC588F2D7)), risposta di Richard F. Holman, William A. Hiscock e Matt Visser.
- **(EN)** Perché i wormhole? (<http://www.mcs.vuw.ac.nz/~visser/general.shtml#why-wormholes>), di Matt Visser).
- **(EN)** Wormhole nella relatività generale (<http://www.bun.kyoto-u.ac.jp/~suchii/wormholes.html>), di Soshichi Uchii.
- **(EN)** Nuovi wormhole migliorati (<http://www.npl.washington.edu/av/altvw103.html>), di John G. Cramer.
- **(EN)** Tempo, viaggio nel tempo e wormhole attraversati (<http://timetravelportal.com/viewtopic.php?t=293>) incluso un forum di discussione.
- **(EN)** Buchi bianchi e wormhole (<http://casa.colorado.edu/~ajsh/schw.html>); presenta un'eccellente descrizione dei wormhole di Schwarzschild con grafici e animazioni, di Andrew J. S. Hamilton.
- **(EN)** Wormhole su arxiv.org (<http://xstructure.inr.ac.ru/x-bin/theme2.py?arxiv=gr-qc&level=2&index1=15>)
- **(EN)** Scientific American Magazine Wormhole (Edizione dicembre 2005) (<http://www.sciam.com/article.cfm?chanID=sa006&articleID=000D808D-B640-1373-B64083414B7F0000>) Un gioco sui wormhole.
- **(EN)** Wormhole MUD (<http://www.wormhole.se>) - A Sci-Fi Multi-User Dungeon



# Spaziotempo

In fisica per **spaziotempo** o **cronotopo**, si intende la struttura quadridimensionale dell'universo.

Esso è composto da quattro dimensioni: le tre dello spazio (lunghezza, larghezza e profondità) e il tempo, e rappresenta il "palcoscenico" dei fenomeni fisici nell'Universo.

## Caratteristiche

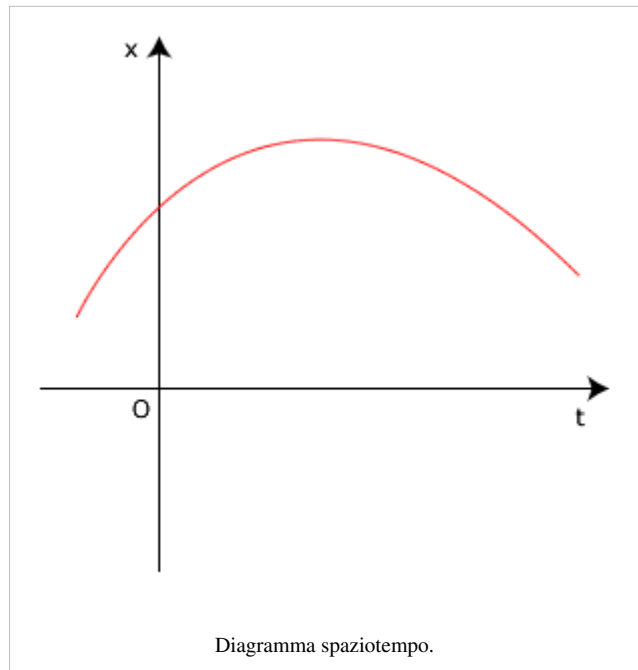
Lo spaziotempo è un concetto fisico che combina le nostre classiche nozioni tradizionalmente distinte di *spazio* e di *tempo* in un solo costruito unico e omogeneo. L'introduzione dello spazio-tempo è una conseguenza diretta della teoria della relatività ristretta, che stabilisce un'equivalenza fra lo spazio e il tempo.

Così come nella nostra visione classica dello spazio le sue tre dimensioni componenti sono equivalenti e

omogenee fra loro e relative all'osservatore (ciò che viene considerato avanti o dietro da un osservatore può essere considerato destra o sinistra da un altro osservatore disposto diversamente), la visione relativistica assimila anche la dimensione temporale (prima-dopo) alle tre dimensioni spaziali, rendendola percepibile in modo diverso da osservatori in condizioni differenti.

I punti dello spaziotempo 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 genere, per visualizzare le coordinate spaziali si usano tre coordinate cartesiane determinate dalla scelta di una terna di riferimento ortogonale; esse si possono denotare con le tre lettere diverse  $x$ ,  $y$  e  $z$  oppure con le lettere dotate di indici (o deponenti, o pedici)  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ . Nel primo caso la coordinata temporale si indica con  $t$ , nel secondo con  $x_0$ . Le coordinate con indici hanno il vantaggio formale di consentire l'uso di indici correnti e quindi di espressioni sintetiche. Di solito per un indice che corre solo nelle dimensioni spaziali 1, 2 e 3 si usano lettere come  $i$ ,  $j$  e  $k$ , mentre per gli **indici spaziotemporali** che corrono da 0 a 3 si usano lettere greche. Inoltre quando si studiano sistemi particolari (ad es. dotati di determinate simmetrie), per le dimensioni spaziali, invece delle coordinate cartesiane risulta conveniente usare ora le coordinate sferiche, ora le coordinate cilindriche, ora altre.


Se immaginiamo di osservare tutto lo spaziotempo dell'universo nella sua interezza, immaginando dunque di "uscirne fuori" per guardarlo, esso assomiglia, per ricorrere a un'utile metafora, a un filone di pane o a un lungo fiume completamente ghiacciato, nel quale ci sono le linee d'universo degli oggetti: la lunghezza è la dimensione temporale; per lo spessore e la larghezza ci sono gli eventi così come sono disposti nello spazio. Ricordiamoci che noi qui vediamo tutto lo spaziotempo, e dunque *tutto* lo spazio esistente e *tutto* il tempo (perlomeno del nostro universo - vedi Dimensione parallela e Multiverso), sia trascorso che futuro. Inoltre l'analogia precedente ha un errore di fondo (al quale però è impossibile ovviare): ogni fetta di un vero filone di pane, se si trascura la profondità (la "lunghezza" del filone), ha solo due dimensioni, mentre una "fetta" dello spaziotempo, se si trascura il tempo (allo stesso modo della "lunghezza" nell'esempio precedente) comprende tutt'e tre le dimensioni spaziali. La "visione" immaginaria e "in contemporanea" di tutto lo spaziotempo esistente è detta dai fisici e dai filosofi *visione "in blocco"* dello spaziotempo o anche **continuum spazio-temporale**.





Ogni oggetto presente nell'universo influisce sullo spaziotempo e quindi su tutt'e quattro le dimensioni che lo compongono: per esempio, la Terra influenza le tre dimensioni dello spazio attraverso la gravità, e influisce sul tempo attraverso un rallentamento del tempo stesso. Nei buchi neri il tempo viene rallentato di moltissimo; tanto da ipotizzare che, nel loro nucleo, il tempo sia completamente fermo.

Le caratteristiche dello spaziotempo permettono di ipotizzare la possibilità, sotto certe condizioni, del viaggio nel tempo.

 Per approfondire, vedi *Il viaggio nel tempo secondo la fisica attuale*.

## I concetti di spazio e tempo

Fino alla Teoria della relatività di Einstein (relatività ristretta e generale), il tempo era concepito come **assoluto** e spesso distaccato dal mondo fisico. Aristotele lo definiva come "la misura del movimento". Lo spazio, inoltre, era regolato dalla geometria euclidea. In tale geometria, l'invariante fondamentale è la distanza tra due punti  $P^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)})$  e  $P^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)})$ , ovvero il suo quadrato:

$$\Delta s^2 := \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = \sum_{i=1}^3 \Delta x_i^2 \quad \text{con} \quad \Delta x_i := x_i^{(2)} - x_i^{(1)}.$$

Si chiede che questa grandezza non cambi quando vengono applicate traslazioni

$$x'_i = a_i + x_i \quad i = 1, 2, 3.$$

oppure isometrie, cioè rotazioni e riflessioni.

In parole semplici, nella geometria euclidea e nella fisica pre-relativistica la lunghezza di un oggetto non cambia quando questo si sposta o ruota nello spazio.

## Le trasformazioni di Galileo

 Per approfondire, vedi *Trasformazioni galileiane*.

Nello spazio fisico tutte le direzioni spaziali sono equivalenti (si dice che lo spazio fisico è isotropo). Con la nascita della meccanica classica si è cercato di capire come variassero le leggi fisiche al variare del punto d'osservazione e degli spostamenti relativi dei due sistemi di riferimento. Un problema di grande importanza è quello dell'invarianza delle leggi fisiche in seguito a cambi di sistemi di riferimento.

Nelle trasformazioni galileiane si prende in considerazione un caso estremamente semplice: si considera un sistema inerziale  $K$ , ovvero un sistema in cui le leggi della fisica sono espresse nella forma più semplice, e un sistema  $K'$  che, senza ruotare, si muove di moto uniforme rispetto a  $K$ ; anche  $K'$  potrà essere, quindi, considerato sistema inerziale.

Per scrivere le trasformazioni, si partiva da 2 assiomi fondamentali:

1. il tempo è assoluto, ovvero il tempo  $t'$  misurato rispetto a  $K'$  è il medesimo di quello  $t$  misurato in  $K$  e relativo al medesimo evento;
2. la lunghezza è assoluta: un intervallo  $s$  in quiete, rispetto a  $K$ , ha la stessa lunghezza di  $s$  misurato in  $K'$ , in moto rispetto a  $K$ .

Ponendo gli assi dei due sistemi paralleli è semplice determinare la cosiddetta trasformazione di Galileo:

$$\begin{cases} x'_i = x_i - a_i - b_i t \\ t' = t - b \end{cases},$$

da cui è semplice ricavare che:

$$\frac{d^2 x'_i}{dt'^2} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx_i}{dt} - b_i \right) = \frac{d^2 x_i}{dt^2}$$

e per la distanza tra due punti differenti:

$$x'^{(1)}_i - x'^{(2)}_i = x^{(1)}_i - x^{(2)}_i$$

## Le trasformazioni di Lorentz

 Per approfondire, vedi **Trasformazioni di Lorentz**.


Alla prova dei fatti, tali trasformazioni furono considerate valide per molto tempo, almeno fino agli studi sull'elettromagnetismo. Il grave problema della relatività galileiana è che, mentre le leggi della meccanica classica sono invarianti per trasformazioni galileiane, lo stesso non vale per le Equazioni di Maxwell, che riassumono in sé tutto l'elettromagnetismo. Inoltre evidenze sperimentali (come il famoso esperimento di Michelson-Morley), sul finire del XIX secolo misero in crisi l'idea di sistemi di riferimento assoluti (*vedi etere (fisica)*).

Le trasformazioni di Lorentz propriamente dette sono un sistema di equazioni che, inserendo la velocità della luce  $c$ , danno il modo corretto in cui cambia il moto in un sistema di riferimento in moto rispetto ad uno fisso. Il caso più semplice di trasformazione è quella in cui il moto di un sistema si sviluppa solo ed esclusivamente lungo un asse particolare, ad esempio quello  $x$ :

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

Queste trasformazioni fanno sì che le equazioni di Maxwell restino invarianti in qualsiasi sistema di riferimento (inerziale) vengano applicate (invarianza che viene invece persa per le equazioni di Newton), ma per non abbandonare l'idea dell'etere (e quindi di tempo e spazio assoluti) si costruirono varie ipotesi ad hoc, come la contrazione delle distanze sperimentali in direzione del moto dell'osservatore rispetto all'etere, oppure il suo trascinarsi da parte della Terra nei suoi moti di rivoluzione.

## Teoria della Relatività

 Per approfondire, vedi **Relatività ristretta**.

Le trasformazioni suddette compaiono invece alla base della teoria della Relatività ristretta di Albert Einstein, come diretta conseguenza degli assiomi di costanza della velocità della luce  $c$  e dell'invarianza delle leggi fisiche in seguito a cambi di sistemi di riferimento (inerziali).

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 **spaziotempo**, nel quale **non c'è un sistema di riferimento privilegiato** e per ogni evento le coordinate spaziali e temporali sono legate tra di loro in funzione dello spostamento relativo dell'osservatore. Con l'assenza di un tempo assoluto, anche il concetto di contemporaneità è stato modificato dall'avvento della relatività: si può definire al suo posto l'altrove assoluto, cioè l'insieme degli eventi che non appartengono né al futuro né al passato, al di fuori cioè del cono di luce.

## Concetto di evento

In fisica, e in particolare nello studio della relatività, un **evento** indica un fenomeno fisico, localizzato in uno specifico punto dello spazio quadrimensionale.

## Esempi nel mondo macroscopico

Per esempio, nell'esperienza sperimentabile da chiunque di prima mano:

1. un bicchiere che cade a terra e si rompe in un determinato momento è un evento;
2. un'eclisse osservabile ad occhio nudo è un evento.

accadono in un unico posto in un determinato momento, in uno specifico sistema di riferimento.<sup>[1]</sup>

In senso stretto, la nozione di un evento è una idealizzazione astratta, nel senso che specifica un attimo definito ed un posto nello spazio, mentre la nozione comune di evento sembra avere un'estensione finita sia nel tempo che nello spazio.<sup>[2]</sup>

Uno degli obiettivi della relatività è di specificare la possibilità di come gli eventi si influenzino a vicenda. Questo è effettuato utilizzando un tensore metrico, che permette di determinare la struttura causale dello spaziotempo.

La differenza (o l'intervallo) tra due eventi può essere classificato come separazione spaziale, temporale e/o luminare (fotonica).

Per la meccanica relativistica sembra che solo se due eventi sono separati da intervalli spazio-temporali fotonici questi si possano influenzare l'un altro.

In seguito allo sviluppo della meccanica quantistica questo presupposto è entrato in crisi ponendo le basi per una Teoria unificata del Tutto (o "Theory of Everything" in lingua inglese).

## Spaziotempo di Minkowski

 Per approfondire, vedi *Spaziotempo di Minkowski*.

Come detto, l'usuale spazio euclideo può essere definito a partire dall'invariante della distanza euclidea, il cui quadrato è:

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

Questa quantità, calcolata col Teorema di Pitagora, è l'unica invariante a qualsiasi cambiamento del sistema di riferimento (traslazione o rotazione degli assi di coordinate).

In precedenza, il tempo era considerato un invariante e non poteva essere sommato alle tre dimensioni spaziali. Con la teoria della relatività ristretta, nel momento in cui si iniziano a prendere in considerazione alte velocità ciò non è più vero, in quanto le coordinate temporali e spaziali si mischiano sotto l'effetto di un cambiamento di sistema di riferimento.

La nuova "distanza" quadra è costruita sottraendo alla distanza quadrata euclidea un termine temporale:

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

dove  $c$  è la velocità della luce, uguale per ogni osservatore. Questa grandezza è spesso chiamata *intervallo* relativistico. Si verifica subito che prendendo due eventi come l'emissione di un raggio luminoso in un certo punto dello spazio-tempo  $P_{em} = (t_0, x_0, y_0, z_0)$  e la sua ricezione in un altro punto  $P_{oss} = (t_1, x_1, y_1, z_1)$ , l'intervallo tra di essi è identicamente nullo. Si verifica anche che applicando una trasformazione di Lorentz alle coordinate, l'intervallo rimane immutato. L'intervallo non è il quadrato di una distanza, in quanto non è definito positivo. Esistono due diverse convenzioni, quella con il meno davanti al termine temporale ed il più davanti a quelli spaziali e quella opposta, con tutti i segni invertiti:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$

Non esiste una convenzione dominante nel mondo accademico, ma la segnatura utilizzata non cambia minimamente la teoria fisica. Utilizzando invece la rotazione di Wick, considerando cioè un tempo puramente immaginario, si ottiene una distanza euclidea nello spazio-tempo quadridimensionale:

$$\tau = it$$

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta \tau^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

$$\Delta s = \sqrt{c^2 \Delta \tau^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

Bisogna notare però che la rotazione di Wick altera la struttura matematica della teoria e non è confrontabile con le due segnature discusse sopra. Questa formulazione è in realtà un prolungamento analitico delle altre e può essere usata, in alcuni contesti, per facilitare la risoluzione di alcuni problemi, facendo la trasformazione inversa per ritornare al tempo "fisico".

Nella relatività generale, l'intervallo viene generalizzato con il calcolo dell'elemento di spazio-tempo infinitesimo  $ds^2$ , tenendo conto delle variazioni della distanza infinitesima dovute alla curvatura dello spazio-tempo. La relatività ristretta è, in questa ottica, l'insieme delle trasformazioni di coordinate, la cinematica e la dinamica di sistemi in uno spazio-tempo di Minkowski o *pseudoeuclideo*.

## La curvatura dello spaziotempo nella teoria della Relatività Generale

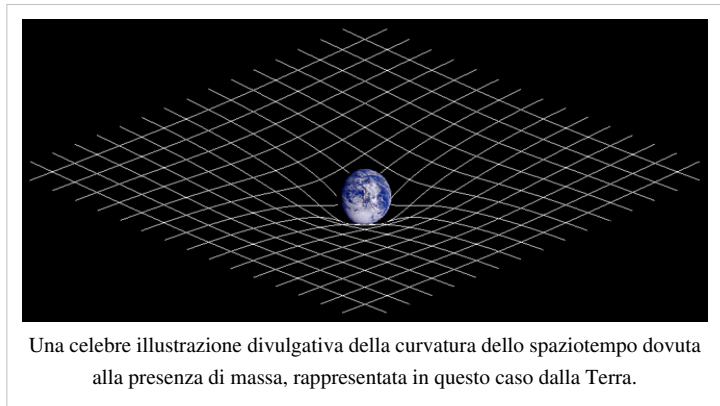
La teoria della relatività generale afferma infatti che lo spaziotempo viene più o meno *curvato* dalla presenza di una massa; un'altra massa più piccola si muove allora come effetto di tale curvatura.

Spesso, si raffigura la situazione come una palla che deforma un telo elastico teso con il suo peso, mentre un'altra pallina viene accelerata da questa deformazione del piano ed in pratica attratta dalla prima.

Questa è solo una semplificazione alle dimensioni raffigurabili, in quanto ad essere deformato è lo spazio-tempo e non solo le dimensioni spaziali, cosa impossibile da raffigurare e difficile da concepire.

L'unica situazione che riusciamo a raffigurare correttamente è quella di un universo a una dimensione spaziale ed una temporale. Un qualunque punto materiale è rappresentato da una linea (linea di universo), non da un punto, che fornisce la sua posizione per ogni istante: il fatto che sia fermo o in moto farà solo cambiare l'inclinazione di questa retta. Ora pensiamo di *curvare* tale universo usando la terza dimensione: quello che prima era la retta che descriveva un punto, ora è diventata una superficie.

Su una superficie curva non vale la geometria euclidea, in particolare è possibile tracciare un triangolo i cui angoli sommati non forniscono  $180^\circ$  ed è anche possibile procedere sempre nella stessa direzione, ritornando dopo un certo tempo al punto di partenza.



## Lo spaziotempo è quantizzato?

La ricerca attuale è concentrata sulla natura dello spaziotempo alla scala di Planck. La teoria della gravitazione quantistica a loop, la teoria delle stringhe e la termodinamica dei buchi neri predicono tutte uno spaziotempo quantizzato, con accordo sull'ordine di grandezza. La *teoria della gravità a loop* propone addirittura predizioni precise circa la geometria dello spaziotempo alla scala di Planck.

## Spazio-tempo e topologia

Secondo Einstein, lo spazio-tempo è un continuo a quattro dimensioni, che nel modello ciclico dell'universo di Fridman ha forma di ipersfera  $S^4$ . Se lo spazio-tempo è un'ipersfera ad esponente pari, ha una caratteristica di Eulero-Poincaré  $\chi = 2$ , e possiede almeno una singolarità polare (ossia di ordine 1). Da considerazioni geometriche, diviene prevedibile il Big Bang, una singolarità polare dello spazio-tempo.

La caratteristica di Eulero-Poincaré è pari alla somma algebrica degli ordini di singolarità dei punti che servono a reticolare una superficie chiusa.

Per reticolare una superficie si usano dei quadrati, per un oggetto tridimensionale si usano dei cubi. Generalizzando ad  $n$  dimensioni, si utilizzano degli ipercubi.

L'ordine di singolarità di un reticolo (costruito a partire da uno di questi punti) è pari all'angolo di rotazione (positivo o negativo) che compie un autovettore orientato (freccia), rapportato a  $360^\circ$ . Se un oggetto topologico ha una caratteristica di Eulero pari a 2, esso possiede almeno una singolarità di ordine 1, un polo.

## Superspazio

Il concetto di "**superspazio**" ha avuto due significati in fisica. La parola è stata usata la prima volta da John Archibald Wheeler per descrivere la configurazione spaziale della relatività generale, per esempio, tale uso può essere visto nel suo famoso libro di testo del 1973 dal titolo *Gravitation*<sup>[3]</sup>.

Il secondo significato si riferisce alle coordinate spaziali relative ad una teoria della supersimmetria<sup>[4]</sup>. In tale formulazione, insieme alle dimensioni spazio ordinario  $x, y, z, \dots$ , (dello spazio di Minkowski) ci sono anche le dimensioni "anticommutanti" le cui coordinate sono etichettate con i numeri di Grassmann; ovvero assieme alle dimensioni dello spazio di Minkowski che corrispondono a gradi di libertà bosonici, ci sono le dimensioni anticommutanti relative ai gradi di libertà fermionici<sup>[5]</sup>.

## Teoria in letteratura

Un impiego molto rilevante del concetto di cronotopo è quello proposto all'interno della narratologia, in particolare dal russo Michail Michajlovič Bachtin, per il quale la categoria tempo all'interno del romanzo riveste un ruolo di estrema centralità. In tale contesto il cronotopo viene a indicare "l'interconnessione dei rapporti temporali e spaziali all'interno di un testo letterario".

## Note

- [1] A.P. French (1968), *Special Relativity*, MIT Introductory Physics Series, CRC Press, ISBN 0-7487-6422-4, p 86
- [2] Leo Sartori (1996), *Understanding Relativity: a simplified approach to Einstein's theories*, University of California Press, ISBN 0-520-20029-2, p 9
- [3] Kip S. Thorne, Charles W. Misner, John A. Wheeler, *Gravitation*, San Francisco, W. H. Freeman, 1973. ISBN 0-7167-0344-0
- [4] Gordon Kane, *The Dawn of Physics Beyond the Standard Model*, Scientific American, June 2003, page 60 and *The frontiers of physics*, special edition, Vol 15, #3, page 8 "Indirect evidence for supersymmetry comes from the extrapolation of interactions to high energies."
- [5] Introduction to Supersymmetry (<http://arxiv.org/pdf/hep-th/0101055>), Adel Bilal, 2001.

## Bibliografia

- Ehrenfest, Paul (1920) "How do the fundamental laws of physics make manifest that Space has 3 dimensions?" *Annalen der Physik* 61: 440.
- George F. Ellis and Ruth M. Williams (1992) *Flat and curved space-times*. Oxford Univ. Press. ISBN 0-19-851164-7
- Isenberg, J. A. (1981) "Wheeler-Einstein-Mach spacetimes," *Phys. Rev. D* 24(2): 251–256.
- Kant, Immanuel (1929) "Thoughts on the true estimation of living forces" in J. Handyside, trans., *Kant's Inaugural Dissertation and Early Writings on Space*. Univ. of Chicago Press.
- Lorentz, H. A., Einstein, Albert, Minkowski, Hermann, and Weyl, Hermann (1952) *The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs*. Dover.
- Lucas, John Randolph (1973) *A Treatise on Time and Space*. London: Methuen.
- Roger Penrose, *The Road to Reality*, Oxford, Oxford University Press, 2004. Chpts. 17–18.
- Edgar A. Poe, *Eureka; An Essay on the Material and Spiritual Universe*, Hesperus Press Limited, 1848, ISBN 1-84391-009-8.
- A. A. Robb, *Geometry of Time and Space*, University Press, 1936.
- Erwin Schrödinger (1950) *Space-time structure*. Cambridge Univ. Press.
- J. W. Schutz, *Independent axioms for Minkowski Space-time*, Addison-Wesley Longman, 1997.
- F. R. Tangherlini, *Atoms in Higher Dimensions* in *Nuovo Cimento*, vol. 14, n° 27, 1963, p. 636.
- E. F. Taylor, Wheeler, John A., *Spacetime Physics*, W. H. Freeman, 1963.
- H.G. Wells, *The Time Machine*, New York, Pocket Books, 2004. (pp. 5 – 6)

## Voci correlate

- Jurij Michajlovič Lotman
- Michail Michajlovič Bachtin
- Narratologia
- Relatività generale
- Relatività ristretta

## Collegamenti esterni

- *Spaziotempo* (<http://thes.bncf.firenze.sbn.it/termine.php?id=26431>) in *Tesaurus del Nuovo Soggettario* (<http://thes.bncf.firenze.sbn.it/>), BNCf, marzo 2013.



**Portale Relatività:** accedi alle voci di Wikipedia che trattano di relatività

# Fonti e autori delle voci

**Accelerazione di gravità** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=67459834> *Autori:* 27182, Alfio, Antonio la trippa, Basilicofresco, Biopresto, Bramfab, Bultro, Castel, Codicorumus, CristianCantoro, DanGarb, Daniele Pugliesi, Davide, Discovolante88, Dr Zimbu, Esculapio, F l a n k e r, Fantasma, Fradeb2000, Ft1, Guidomac, Horcrux92, IlGino, Isolano2008, Kiban, LaseriumFloyd, M&M987, Massimiliano Panu, Matgio, Nubifer, Paginazero, Porta seriale, Pracchia-78, Rb1205, Retaggio, Snow Blizzard, SteGrifo27, Taueres, Unriccio, Vegetable, Viscontino, Waglione, Wiki wisdom, 64 Modifiche anonime

**Ponte di Einstein-Rosen** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=67719093> *Autori:* .mau., Alfio, Ary29, Blakwolf, Bratzscha, Bufo Bufo, Carlog3, Cassis, DamianoCB, Dr Zimbu, Drow, Fabiogremo, Fradeve11, Francisco83pv, Franco3450, Geniusmentis, Gianluigi, Gilgamesh, Gvnn, Harlock81, Hellis, Hill, Il Viandante Immortale, Indoril, Iron Bishop, Kabel81, Kal-El, Kronos, Laurentius, Leop81, LocutusOfBorg, Lorelolelore, M7, Marcok, Marcolonna, Marcuscalabresus, Marko86, Massi cadenti, Mauro Lanari, Mauro Tozzi, Mr68000, Nevermindfc, Paolopal, Pietro, Progettualita, Qbert88, Ragno, Sanremofilo, Shaka, Simone, Snowdog, Suisui, Template namespace initialisation script, Tener, Tommaso Ferrara, UgoBerlino, Valepert, Wikipedia Express, WinstonSmith, Yoruno, Zizzimic, ^musaz, 93 Modifiche anonime

**Spaziotempo** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=67580669> *Autori:* Agnellino, Alberto da Calvairate, Alemito, Alessandro.maggi, Aplasia, Berto, Blakwolf, Cassis, Danilo, Davide, Drow, Drugonot, EH101, Elwood, Epidosis, Fredericks, Frieda, Garretgian, Gaux, Gianluigi, Hashar, Ibrandelli, Idris.albadufi, IlPisano, Kormoran, Lenore, Lorenzor, M&M987, MFMF, Marco Matassa, Marcok, Mars79, MartinaMilanoLingue, Massimiliano Lincetto, Massimiliano Panu, Maurice Carbonaro, Melchisedec, Mikispag, Moroboshi, No2, Ossisty1, Paro, Pequod76, Phantomas, Piddu, Poldo328, Pracchia-78, R0tAbLe, Sannita, Sesquipedale, SkedO, Snowdog, Squattaturi, Sutor ultra crepidam, Template namespace initialisation script, Thukam, Vituzzu, Ylebru, ^musaz, 98 Modifiche anonime

# Fonti, licenze e autori delle immagini

**Immagine:Gravity gravita grave.gif** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Gravity\\_gravita\\_grave.gif](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Gravity_gravita_grave.gif) *Licenza:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Autori:* Waglione

**Immagine:Exquisite-kfind.png** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Exquisite-kfind.png> *Licenza:* GNU General Public License *Autori:* Guppetto

**File:Load factor and the g-force in turn.png** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Load\\_factor\\_and\\_the\\_g-force\\_in\\_turn.png](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Load_factor_and_the_g-force_in_turn.png) *Licenza:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Autori:* User:Abuk SABUK

**File:Nuvola apps katomic.png** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Nuvola\\_apps\\_katomic.png](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Nuvola_apps_katomic.png) *Licenza:* GNU Lesser General Public License *Autori:* AVRS, Alno, Alphax, Booyabazooka, Rocket000, Stannered, 1 Modifiche anonime

**File:Simple cog.svg** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Simple\\_cog.svg](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Simple_cog.svg) *Licenza:* Public Domain *Autori:* Pluke

**File:Unbalanced scales simpler.svg** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Unbalanced\\_scales\\_simpler.svg](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Unbalanced_scales_simpler.svg) *Licenza:* Public Domain *Autori:* 99of9, Derbeth, Paulatz, Rocket000

**File:Wormhole-demo.png** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Wormhole-demo.png> *Licenza:* GNU Free Documentation License *Autori:* Panzi

**File:LorentzianWormhole.jpg** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:LorentzianWormhole.jpg> *Licenza:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Autori:* AllenMcC.

**File:FY221c15.png** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:FY221c15.png> *Licenza:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Autori:* Alain r, Kanonkas, MickOre, Nihonjoe, 5 Modifiche anonime

**File:Crystal Clear app konquest.png** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Crystal\\_Clear\\_app\\_konquest.png](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Crystal_Clear_app_konquest.png) *Licenza:* GNU Free Documentation License *Autori:* AVRS, Ahmad yosif kahl, CyberSkull, LX, Rocket000, 1 Modifiche anonime

**File:Fanta logo.svg** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Fanta\\_logo.svg](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Fanta_logo.svg) *Licenza:* GNU Free Documentation License *Autori:* User:Dzag

**File:Spaziotempo.gif** *Fonte:* <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Spaziotempo.gif> *Licenza:* GNU Free Documentation License *Autori:* Asatruar, Basilicofresco, Ilario, Jacopo, 1 Modifiche anonime

**Immagine:Spacetime curvature.png** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Spacetime\\_curvature.png](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Spacetime_curvature.png) *Licenza:* GNU Free Documentation License *Autori:* User:Johnstone

**File:Gravitation space source (elaboration).png** *Fonte:* [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Gravitation\\_space\\_source\\_\(elaboration\).png](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Gravitation_space_source_(elaboration).png) *Licenza:* GNU Free Documentation License *Autori:* Gravitation\_space\_source.png: Superborsuk derivative work: Lenore (talk)



# Licenza

---

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0  
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

---