

costruire una macchina del tempo  
time voyager di Enrico De Cecco

# Indice

<b>1</b>	<b>Meccanismo di Higgs</b>	<b>1</b>
1.1	Origine e sviluppo dell'idea	1
1.2	Teoria	2
1.3	Meccanismo di Higgs in astrofisica	3
1.4	Curiosità	3
1.5	Note	3
1.6	Voci correlate	3
1.7	Bibliografia	3
1.8	Collegamenti esterni	4
<b>2</b>	<b>Tachione</b>	<b>5</b>
2.1	Proprietà di base	5
2.2	Causalità	6
2.2.1	Tachioni, EPR, e la proposta di Bohm	6
2.3	Teorie di campo e delle stringhe	6
2.4	I tachioni nella fantascienza	6
2.5	Note	7
2.6	Bibliografia	7
2.7	Voci correlate	7
2.8	Altri progetti	7
2.9	Collegamenti esterni	7
<b>3</b>	<b>Linea di universo</b>	<b>8</b>
3.1	Definizione	8
3.1.1	Spaziotempo classico	8
3.1.2	Relatività ristretta	8
3.2	Note	9
3.3	Bibliografia	9
3.4	Voci correlate	9
3.5	Altri progetti	9
3.6	Collegamenti esterni	9
<b>4</b>	<b>Quarta dimensione</b>	<b>11</b>

4.1	Geometria euclidea in uno spazio quadridimensionale . . . . .	11
4.2	Esempi di oggetti in un tetraspazio . . . . .	11
4.2.1	Ipercubo . . . . .	11
4.2.2	Ipersfera . . . . .	12
4.3	Note . . . . .	12
4.4	Bibliografia . . . . .	12
4.5	Voci correlate . . . . .	12
4.6	Altri progetti . . . . .	12
4.7	Collegamenti esterni . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Iperspazio</b>	<b>13</b>
5.1	L'iperspazio nella fantascienza . . . . .	13
5.1.1	Iperspazio geometrico . . . . .	13
5.1.2	Iperspazio <i>tachionico</i> . . . . .	13
5.2	Lo spazio-tempo come precursore del concetto di iperspazio . . . . .	13
5.3	Note . . . . .	14
5.4	Bibliografia . . . . .	14
5.5	Fonti per testo e immagini; autori; licenze . . . . .	15
5.5.1	Testo . . . . .	15
5.5.2	Immagini . . . . .	15
5.5.3	Licenza dell'opera . . . . .	16

# Capitolo 1

## Meccanismo di Higgs

Il **meccanismo di Higgs** o **meccanismo di Anderson-Higgs**, proposto dal fisico scozzese Peter Higgs su un'idea di Philip Anderson, e contemporaneamente da altri studiosi, è il meccanismo teorico che conferisce massa ai bosoni di gauge deboli  $W$  e  $Z$ <sup>[1]</sup> e, nel suo aspetto più generale, anche ai fermioni, cioè a tutte le particelle elementari massive.

Si può considerare generato da un caso elementare di condensazione tachionica di un campo scalare complesso, detto campo di Higgs (di cui uno dei quanti è il bosone di Higgs), che innesci una rottura spontanea di simmetria.

Teorizzato nel 1964, il meccanismo di Higgs è stato validato nel 2012 dalla rilevazione sperimentale del bosone di Higgs. Nel 2013 Peter Higgs e François Englert sono stati insigniti del premio Nobel per la fisica per la sua scoperta.

### 1.1 Origine e sviluppo dell'idea

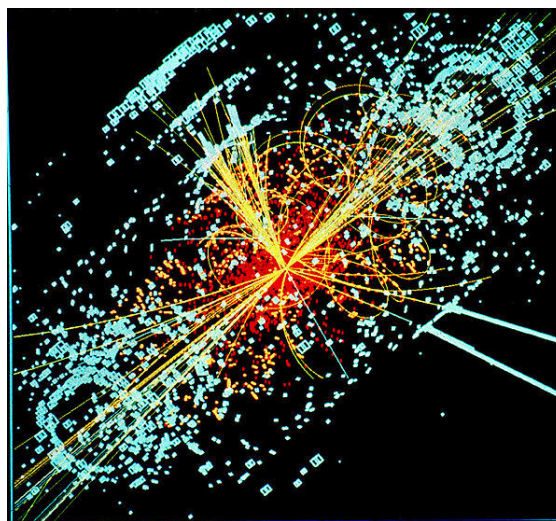


*Cinque dei sei vincitori del Premio Sakurai 2010 dell'American Physical Society: Kibble, Guralnik, Hagen, Englert e Brout.*

L'ipotesi innovatrice di Higgs<sup>[2]</sup> fu formulata indipendentemente anche da Robert Brout e François Englert dell'Université Libre de Bruxelles<sup>[3]</sup> e da Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen e Thomas Kibble dell'Imperial College<sup>[4][5]</sup>, ed era quella di dare massa ad un bosone vettore (detto anche bosone di gauge) mediante l'accoppiamento con un campo scalare, poi denominato campo di Higgs. L'importanza fondamentale de-

gli articoli originali di tutti questi autori per la formulazione del meccanismo di Higgs (il nome fu proposto da Gerardus 't Hooft nel 1971) fu ufficialmente riconosciuta nel 2008, in occasione della celebrazione per il 50° anniversario della rivista *Physical Review Letters*<sup>[6]</sup>, e per tale motivo esso è talvolta citato come **Meccanismo di Brout-Englert-Higgs** o **Meccanismo di Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble**.

Il risultato del meccanismo di Higgs è stato ottenuto nel contesto di un modello di rottura spontanea di simmetria del tipo proposto da Yoichiro Nambu<sup>[7]</sup> ed altri al fine di spiegare l'interazione forte.



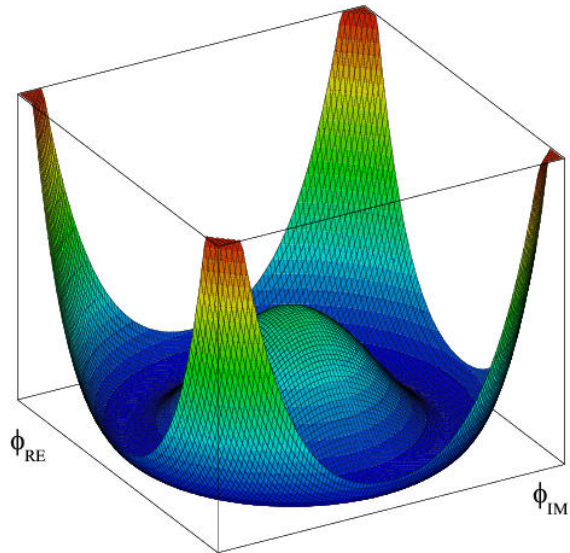
*Simulazione di un evento in un acceleratore di particelle che dovrebbe generare un bosone di Higgs*

Modelli di questo genere sono stati anche ispirati dai lavori sulla fisica della materia condensata, specialmente di Lev Davidovič Landau e Vitaly Ginzburg, e dalla proposta di Philip Anderson che la superconduttività potesse essere importante nella fisica relativistica; vennero inoltre anticipati da precedenti ricerche del fisico svizzero Ernst Stueckelberg già nel 1938.<sup>[8]</sup>

Il meccanismo di Higgs è stato incorporato nel modello standard, in una descrizione della forza debole come teoria di gauge, indipendentemente da Steven Weinberg e Abdus Salam nel 1967; in tale contesto esso si riferisce

specificamente all'assunzione di massa dei bosoni vettori elettrodeboli  $W$  e  $Z$ . L'idea generale di un campo scalare ubiquitario responsabile di rottura di simmetria è stata anche utilizzata al fine di giustificare la massa dei fermioni (vedere più avanti e alla voce **Campo di Higgs**).

Il modello standard prevede uno stato di eccitazione massiva quantica del campo di Higgs, chiamato bosone di Higgs, la cui massa non è prevista dal modello e la cui rilevazione sperimentale è considerata l'obiettivo principe di conferma della teoria. L'annuncio dell'osservazione di una **particella** con caratteristiche compatibili col bosone di Higgs è stato dato dagli scienziati del CERN il 4 luglio 2012, in seguito agli esperimenti condotti con l'acceleratore LHC.<sup>[9]</sup>



## 1.2 Teoria

Per un esempio di rottura spontanea della simmetria, si immagini un campo scalare complesso il cui valore in ogni punto dello spazio corrisponde a

$$H(x, y, z)$$

Si consideri il campo dare un'energia potenziale della forma

$$V(x, y, z) = \left( |H(x, y, z)|^2 - v^2 \right)^2$$

integrata sullo spazio. Essa è non-negativa ed esiste una varietà continua di minimi energetici definita da

$$|H|^2 = v^2.$$

Ciò significa, in termini meno tecnici, che la densità di energia potenziale, considerata come una funzione di  $H$ , appare come il fondo di una bottiglia di spumante: una collinetta circondata da una valle circolare. Si può immaginare il valore del campo complesso come un piano a due dimensioni, tipo diagramma di Argand-Gauss, ed il potenziale come l'altezza sopra tale piano.

Il punto  $H = 0$  è simmetrico rispetto alla simmetria del gruppo abeliano  $U(1)$  (e più genericamente nei confronti della simmetria elettrodebole  $SU(2) \times U(1)$ ), che cambia la fase complessa di  $H$  come

$$H \rightarrow e^{i\theta} H$$

che è energeticamente sfavorevole e quindi instabile. Per un valore casuale di  $\phi$  si potrebbe dire che il campo di Higgs “discende dalla collinetta” e si fissa in un valore stabile

$$H = v e^{i\phi}$$

detto valore di aspettazione del vuoto (si verifica in una parola una *condensazione tachionica*). Ciò provoca un'asimmetria del vuoto, nel senso che lo stato basale non è invariante rispetto alla simmetria  $U(1)$  che trasforma il valore di  $\phi$  in uno differente: si verifica una rottura spontanea di simmetria.

Tale modello, in accordo con il teorema di Goldstone, ipotizza una particella scalare priva di massa che sarebbe l'eccitazione quantica lungo la direzione di  $\phi$ , e che è chiamata bosone di Nambu-Goldstone. Non vi è consumo di energia potenziale nel movimento lungo il fondo della valle circolare, così che l'energia di questa particella è pura energia cinetica; la qual cosa implica nella teoria di campo quantico che la massa sia zero. Non sono state ancora sperimentalmente dimostrate particelle scalari di massa nulla.

Vi era negli anni sessanta il grave problema dell'applicazione della teoria di Yang-Mills, nota anche come teoria di gauge non abeliana, all'interazione elettrodebole. A differenza del fotone nella QED infatti, i bosoni vettori dell'interazione debole (bosoni  $W$  e  $Z$ ) sono massivi, mentre la teoria di Yang-Mills prevede l'esistenza di bosoni privi di massa.

Grazie all'intuizione di Higgs e degli altri studiosi, accoppiando una teoria di gauge con un modello di rottura spontanea di simmetria, il problema si risolve in maniera assai elegante proprio grazie ai bosoni di Goldstone. Ciò è possibile perché, per la proprietà della teoria di campo quantistica, i bosoni vettori privi di massa e quelli massivi hanno rispettivamente 2 e 3 gradi di libertà per quanto riguarda la polarizzazione: il bosone scalare (ovvero a 1 grado di libertà) di Goldstone viene così a rappresentare il grado mancante che viene “acquisito” dal bosone privo di massa della teoria di gauge. Essendo quello di Higgs un

campo complesso, sarebbero in gioco tre bosoni di Goldstone, cioè tre modalità prive di massa  $\phi$  del bosone di Higgs, la cui combinazione con il bosone di gauge conferirebbe, nel caso specifico ai tre bosoni vettori deboli, una massa che dipende fundamentalmente dal valore di aspettazione del vuoto dello stesso campo di Higgs.

Estendendo l'interazione del campo di Higgs con rottura di simmetria ai campi fermionici, tramite l'interazione di Yukawa, si ottengono nelle lagrangiane termini di massa che consentono di introdurre nella teoria, ma non quantificare, le masse dei fermioni.

### 1.3 Meccanismo di Higgs in astrofisica

È stato proposto che il meccanismo di Higgs si possa applicare anche al bosone di Higgs prodotto nell'annichilazione dell'antimateria, dando luogo a linee nello spettro dei raggi gamma a energie determinate dalle masse delle particelle interagenti, le WIMP.<sup>[10]</sup>

### 1.4 Curiosità

- Peter Higgs racconta che ebbe l'intuizione del “meccanismo” che porta il suo nome durante una passeggiata sulle colline scozzesi del Cairngorm intorno al proprio laboratorio, dove ritornò rapidamente annunciando di aver avuto “una grande idea” (“one big idea”).
- Il bosone di Higgs, data la sua importanza nella teoria del Modello standard, è stato soprannominato in un testo del Premio Nobel per la Fisica Leon Max Lederman la “particella di Dio”. In realtà tale soprannome derivò dalla trasformazione, decisa dall'editore per motivi commerciali, di “particella dannata” (“the goddamn particle”), originariamente scelto da Lederman per indicare la difficoltà della sua scoperta.

### 1.5 Note

- [1] G. Bernardi, M. Carena, and T. Junk: “Higgs bosons: theory and searches”, Reviews of Particle Data Group: Hypothetical particles and Concepts, 2007, [http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/higgs\\_s055.pdf](http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/higgs_s055.pdf)
- [2] Peter W. Higgs, Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons in Physical Review Letters, vol. 13, 1964, pp. 508–509, DOI:10.1103/PhysRevLett.13.508.
- [3] F. Englert and R. Brout, Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons in Physical Review Letters, vol. 13, 1964, pp. 321–323, DOI:10.1103/PhysRevLett.13.321.

- [4] G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, Global Conservation Laws and Massless Particles in Physical Review Letters, vol. 13, 1964, pp. 585–587, DOI:10.1103/PhysRevLett.13.585.
- [5] Gerald S. Guralnik, The History of the Guralnik, Hagen and Kibble development of the Theory of Spontaneous Symmetry Breaking and Gauge Particles in International Journal of Modern Physics, A24, 2009, pp. 2601–2627, DOI:10.1142/S0217751X09045431.
- [6] Physical Review Letters - 50th Anniversary Milestone Papers
- [7] Y Nambu, Quasiparticles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity in Physical Review, vol. 117, 1960, pp. 648 – 663, DOI:10.1103/PhysRev.117.648.
- [8] Stueckelberg, Helvetica Physica Acta Vol.11, 1938, p.299, 312
- [9] (EN) CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson, [press.web.cern.ch](http://press.web.cern.ch), 4 luglio 2012. URL consultato il 4 luglio 2012.
- [10] Proposta di M. Taoso in .

### 1.6 Voci correlate

- Bosone di Higgs
- Gravitone
- Interazioni fondamentali
- Lista delle particelle
- Modello standard
- Rottura spontanea di simmetria
- Trivialità quantistica

### 1.7 Bibliografia

- G S Guralnik, C R Hagen and T W B Kibble, Global Conservation Laws and Massless Particles in Physical Review Letters, vol. 13, 1964, p. 585, DOI:10.1103/PhysRevLett.13.585.
- F Englert and R Brout, Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons in Physical Review Letters, vol. 13, 1964, p. 321, DOI:10.1103/PhysRevLett.13.321.
- Peter Higgs, Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields in Physics Letters, vol. 12, 1964, p. 132, DOI:10.1016/0031-9163(64)91136-9.
- Peter Higgs, Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons in Physical Review Letters, vol. 13, 1964, p. 508, DOI:10.1103/PhysRevLett.13.508.

- Peter Higgs, Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons in Physical Review, vol. 145, 1966, p. 1156, DOI:10.1103/PhysRev.145.1156.
- Y Nambu; G Jona-Lasinio, Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity in I Phys. Rev., vol. 122, 1961, pp. 345–358, DOI:10.1103/PhysRev.122.345.
- J Goldstone, A Salam and S Weinberg, Broken Symmetries in Physical Review, vol. 127, 1962, p. 965, DOI:10.1103/PhysRev.127.965.
- P W Anderson, Plasmons, Gauge Invariance, and Mass in Physical Review, vol. 130, 1963, p. 439, DOI:10.1103/PhysRev.130.439.
- A Klein and B W Lee, Does Spontaneous Breakdown of Symmetry Imply Zero-Mass Particles? in Physical Review Letters, vol. 12, 1964, p. 266, DOI:10.1103/PhysRevLett.12.266.
- W Gilbert, Broken Symmetries and Massless Particles in Physical Review Letters, vol. 12, 1964, p. 713, DOI:10.1103/PhysRevLett.12.713.

## 1.8 Collegamenti esterni

- (EN) Effetto Meissner e massa come effetti macroscopici dell'entanglement
- Tutto quello che vorresti sapere sul bosone di Higgs
- Il Bosone di Higgs
- (EN) A Generalized Higgs Model
- (EN) Global Conservation Laws and Massless Particles
- (EN) A popular “quasi-political” explanation of the Higgs boson
- (EN) In CERN Courier, Steven Weinberg reflects on spontaneous symmetry breaking
- (EN) Steven Weinberg Praises Teams for Higgs Boson Theory
- (EN) Physical Review Letters – 50th Anniversary Milestone Papers (go down to 1964)
- [(EN) [http://www3.imperial.ac.uk/newsandeventspggrp/imperialcollege/newssummary/news\\_13-6-2008-12-42-20?newsid=38514](http://www3.imperial.ac.uk/newsandeventspggrp/imperialcollege/newssummary/news_13-6-2008-12-42-20?newsid=38514) Imperial College London on PRL 50th Anniversary Milestone Papers]
- (EN) Physics World, Introducing the little Higgs



## Capitolo 2

# Tachione

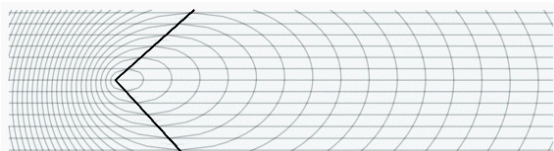
Il **tachione** (dal greco  $\tauαχύς$  *tachýs*, “veloce”) è un'ipotetica particella avente massa immaginaria e velocità superiore a quella della luce.

La prima descrizione teorico-concettuale è attribuita ad Arnold Sommerfeld, mentre tentativi di interpretazione all'interno della relatività ristretta furono compiuti da George Sudarshan nel 1962.<sup>[1]</sup> Il termine “tachione” venne usato per la prima volta da Gerald Feinberg nel 1964. Nella ricerca fisica moderna il concetto compare in vari contesti, in particolare nella teoria delle stringhe.

Il tachione viene spesso citato nella letteratura fantascientifica, sebbene di solito con proprietà non interamente corrispondenti a quelle scientifiche.

Se la sua energia e quantità di moto fossero reali, la massa a riposo sarebbe immaginaria, oppure se la massa a riposo e la quantità di moto fossero reali, l'energia sarebbe immaginaria. È difficile interpretare il significato fisico di una massa di valore complesso. Un effetto curioso è che, a differenza delle particelle ordinarie, la velocità di un tachione *aumenta* al diminuire della sua energia. Questa è una conseguenza della relatività ristretta in quanto il tachione, in teoria, ha una massa che elevata al quadrato è negativa. Secondo Einstein, la massa totale di una particella rispetto ad un dato sistema di riferimento è la somma della sua massa a riposo e dell'incremento di massa dovuto all'energia cinetica. Se  $m$  indica la massa a riposo, allora l'energia totale è data dalla relazione:

### 2.1 Proprietà di base



*Rappresentazione grafica di un tachione.*

*Dal momento che un tachione si muove più rapidamente della luce, non possiamo vederlo avvicinarsi. Dopo che ci ha superato, dovremmo vederne comparire due immagini, che si separano e allontanano in direzioni opposte. La linea nera è il fronte dell'onda d'urto della radiazione di Čerenkov, mostrata solo in un istante. Questo effetto di doppia immagine è più evidente per un osservatore che si trovi lungo il percorso di un oggetto più veloce della luce. L'immagine di destra è formata dalla luce spostata per effetto Doppler verso il blu che giunge all'osservatore posto al vertice dell'onda radiante di Čerenkov; l'immagine di sinistra è formata dalla luce spostata per effetto Doppler verso il rosso che lascia l'oggetto dopo che questi ha superato l'osservatore.*

L'ipotetica esistenza del tachione è compatibile con la teoria della relatività speciale, secondo la quale esso sarebbe una particella con un quadri-impulso di tipo-spazio, relegata ad una porzione tipo-spazio del grafico energia-momento; perciò non potrebbe mai rallentare alla velocità della luce o inferiore.

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

oppure:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{(1 + \frac{v}{c}) \cdot (1 - \frac{v}{c})}}$$

Consideriamo questa relazione come valida sia per i tachioni che per le particelle comuni (“bradioni” o “tardioni”). In situazioni ordinarie, questa equazione mostra che  $E$  aumenta all'aumentare della velocità, tendendo all'infinito quando  $v$  si avvicina a  $c$ , la velocità della luce. Se  $m$  è immaginario, invece, il denominatore della frazione deve essere immaginario per mantenere l'energia reale (visto che un immaginario diviso per un altro immaginario dà un reale). Il denominatore è immaginario se la quantità all'interno della radice è negativa, il che avviene se  $v$  è maggiore di  $c$ . Quindi, allo stesso modo in cui per i bradioni è impossibile superare la barriera della velocità della luce, lo stesso vale per i tachioni, che non possono avere velocità inferiori a quella della luce.

L'esistenza di simili particelle pone degli interessanti problemi sulla fisica moderna. Ad esempio, prendiamo le formule della radiazione elettromagnetica e supponiamo che un tachione abbia una carica elettrica (non possiamo dire a priori se un tachione sia neutro o dotato di carica); allora un tachione in accelerazione dovrebbe generare onde



elettromagnetiche, come qualsiasi particella dotata di carica. Però, come abbiamo visto, diminuendo l'energia di un tachione la velocità *aumenta*, e quindi in una situazione del genere una piccola accelerazione ne produrrebbe una maggiore, portando ad un effetto a catena simile alla catastrofe ultravioletta.

Nel 1973 Philip Crough e Roger Clay hanno annunciato una particella più veloce della luce apparentemente dovuta ad un'ondata di raggi cosmici (l'osservazione non è stata né confermata né ripetuta).<sup>[2]</sup>

## 2.2 Causalità

La proprietà della causalità, un principio fondamentale della fisica delle particelle, pone un problema per l'esistenza fisica dei tachioni. Se un tachione esistesse e potesse interagire con la materia ordinaria, la causalità potrebbe essere violata: a grandi linee, non ci sarebbe più modo di distinguere la differenza tra il futuro e il passato lungo la linea degli eventi di una data quantità di materia ordinaria. Una particella potrebbe mandare energia o informazione nel suo passato, formando un cosiddetto *loop causale*. Questo porterebbe a *paradossi* logici come il *paradosso del nonno*, a meno che la teoria non sia impostata in modo da prevenirli. Attualmente una simile soluzione non è conosciuta: per esempio, il *principio di auto consistenza di Novikov* non è stato ottenuto all'interno di una teoria quantistica dei campi, ma deve essere imposto. Come minimo il principio di *relatività speciale* dovrebbe essere abbandonato. Secondo la teoria della *relatività generale*, è possibile costruire modelli dello spaziotempo in cui alcune particelle viaggino più veloci della luce relativamente ad un osservatore distante. Un esempio è la *metrica di Alcubierre*. Comunque, questi non sono tachioni come i precedenti, in quanto localmente non superano la velocità della luce.

### 2.2.1 Tachioni, EPR, e la proposta di Bohm

Un'altra possibilità per risolvere i paradossi causali, proposta a suo tempo da David Bohm per trattare il *paradosso EPR*, consiste nell'esigere l'esistenza di un sistema di riferimento privilegiato nel quale non si osservano mai segnali, pur superluminali, che si muovono indietro nel *suo* tempo relativo (a questo punto una specie di *tempo universale* in senso lato). In tal modo è impossibile creare *loop* temporali, **in qualsiasi sistema di riferimento**. L'apparente moto indietro nel tempo di alcuni segnali diverrebbe in tal caso soltanto una specie di effetto ottico. Nel sistema di riferimento privilegiato, non c'è alcun moto indietro nel tempo. Questo ha come conseguenza che osservatori in moto rispetto al sistema di riferimento privilegiato non possono vedere ed emettere segnali arbitrari, ma solo quelli superluminali che si muo-

vono in avanti nel tempo per il sistema di riferimento privilegiato. Vale la pena di osservare che nel quadro della *Relatività ristretta* subluminali, non sarebbe mai possibile scoprire un simile "etere", il moto rispetto al quale però potrebbe essere rivelato misurando in ogni direzione la massima velocità (in quella particolare direzione) di un segnale superluminale osservabile. In tal senso i tachioni causali (o gli effetti non locali della *meccanica quantistica*) sono compatibili con la relatività ristretta in cui sia presente un "etere" sullo sfondo, infatti i due postulati della *Relatività ristretta*, rimangono ancora validi, poiché la forma delle leggi naturali in forma differenziale non viene toccata (rimanendo così covarianti), ma viene aggiunta di fatto una condizione al contorno.

## 2.3 Teorie di campo e delle stringhe

Nella teoria quantistica dei campi un tachione è un quanto di un campo, solitamente un campo scalare, la cui massa al quadrato è negativa (è espressa cioè da un numero immaginario). L'esistenza di una particella simile comporta l'instabilità dello spazio-tempo vuoto, poiché l'energia del vuoto presenta un massimo piuttosto che un minimo (per lo meno rispetto alla direzione del tachione). Un impulso molto piccolo (anche una normale fluttuazione quantistica) condurrà il campo a crollare, con un accrescimento esponenziale delle altezze, inducendo la *condensazione tachionica*. Il meccanismo di Higgs è un esempio elementare, ma importante, per capire che una volta che il campo tachionico ha raggiunto il potenziale minimo, cioè ha subito il processo di condensazione, i suoi quanti non sono più tachioni ma bosoni di Higgs, che hanno massa positiva.

È importante sottolineare che anche per i campi quantistici tachionici gli operatori di campo commutano (o anticommutano) a punti separati tipo-spazio.

I tachioni compaiono in molte versioni della teoria delle stringhe. In generale la teoria delle stringhe dice che ciò che vediamo come "particelle" (elettroni, fotoni, gravitoni e così via) sono in realtà diversi modi di vibrare delle stesse strutture fondamentali, le stringhe. La massa di una particella può essere dedotta dalle vibrazioni della stringa: come dire che la massa dipende dalla "nota" suonata dalla stringa. I tachioni appaiono spesso nello spettro dei possibili stati delle stringhe, nel senso che alcuni stati hanno massa immaginaria; un esempio è lo stato fondamentale della stringa bosonica.

## 2.4 I tachioni nella fantascienza

A causa della loro natura misteriosa - in particolare della caratteristica di muoversi a velocità maggiore di quella della luce - i tachioni hanno spesso stimolato l'immaginazione degli autori di fantascienza. In numero-

se storie di fantascienza i tachioni sono utilizzati come mezzo per effettuare comunicazioni più veloci della luce, con o senza riferimenti a risultati di casualità; alcune volte sono parte di qualche tecnologia per il viaggio nel tempo. Citazioni dei tachioni si trovano infatti in molte serie fantascientifiche come *Star Trek*, *Eureka* o *Babylon 5* e perfino nei fumetti *PKNA - Paperinik New Adventures* della The Walt Disney Company Italia, oppure in *Watchmen* di Alan Moore. I tachioni in molti romanzi sono particelle necessarie per realizzare i viaggi nel tempo, come in *Timescape*, *Le porte di Anubis* o *L'orlo della Fondazione*.

- Tachioni più veloci della luce?

## 2.5 Note

[1] (EN) Sudarshan, Deshpande e Bilaniuk, Meta Relativity in American Journal of Physics, vol. 30, 1962, p. 718, Bibcode:1962AmJPh..30..718B, DOI:10.1119/1.1941773.

[2] scienceworld


## 2.6 Bibliografia

- Erasmo Recami, *I tachioni*, in *Scienza & tecnica 73. Annuario della EST*, Milano, Edizioni scientifiche e tecniche Mondadori, 1973, pp. 85–94
- “Einstein-Podolsky-Rosen Correlations of Spin Measurements in Two Moving Inertial Frames”, J. Rembielinski, K. Smolinski , Phys. Rev. A 66, 052114 (2002)
- “Tachyons and the preferred frames” J. Rembielinski, Int.J.Mod.Phys. A12 (1997) 1677-1710

## 2.7 Voci correlate

- D-brane
- Velocità superluminale
- Materia esotica

## 2.8 Altri progetti

-  **Commons** contiene immagini o altri file su **Tachione**

## 2.9 Collegamenti esterni

- (EN) The Faster Than Light (FTL) FAQ
- (EN) Superluminal

## Capitolo 3

# Linea di universo

La **linea di universo** o **linea oraria** (in alcune traduzioni da testi divulgativi inglesi **linea di mondo**) è un concetto di tipo teorico ampiamente utilizzato in cosmologia. Essa è, in sostanza, una rappresentazione schematica del percorso che un oggetto compie nello **spaziotempo** (o cronotopo) e può essere vista come la generalizzazione in uno spazio a quattro **dimensioni** (poiché è presente anche la coordinata temporale) del concetto di **traiettoria** di un corpo. Il primo a introdurre tale concetto fu **Hermann Minkowski**.

### 3.1 Definizione

#### 3.1.1 Spaziotempo classico

Dopo aver scelto un **sistema di riferimento**, la **traiettoria** di un oggetto nello spazio è determinata dalle sue tre coordinate spaziali

$$(x(t), y(t), z(t))$$

che mutano al variare del tempo  $t$ . Una **traiettoria** è quindi una **curva** nello spazio.

Nello **spaziotempo** quadridimensionale ogni evento è caratterizzato da quattro **coordinate**, tre **spaziali** ed una **temporale**. La **traiettoria** dell'oggetto è quindi descritta da una curva simile alla precedente

$$(t, x(t), y(t), z(t))$$

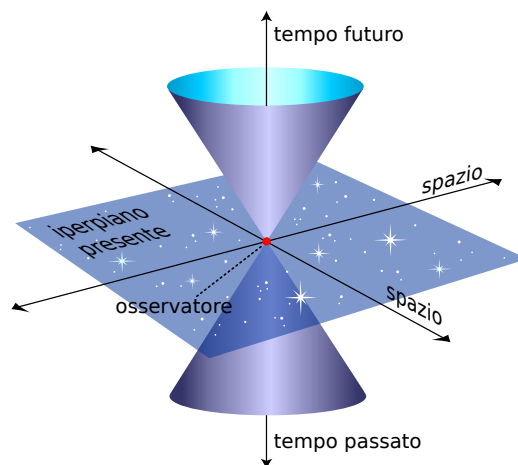
cui è stata aggiunta una **variabile temporale**. Una curva di questo tipo è detta **linea di universo**.

Ad esempio, una persona o un oggetto che, semplicemente, stanno fermi nel punto  $(x_0, y_0, z_0)$ , sono descritti da una **linea di universo** "verticale", in cui si muove solo la prima coordinata temporale:

$$(t, x_0, y_0, z_0).$$

#### 3.1.2 Relatività ristretta

Nella **fisica classica**, il concetto di **linea di universo** non differisce molto da quello di **traiettoria**: le due nozioni sono interscambiabili, e per passare dall'una all'altra è sufficiente togliere o inserire la **variabile temporale** "  $t$  ". La nozione di **linea di universo** acquista però una notevole importanza nella formulazione della **relatività ristretta** di **Albert Einstein**. In relatività ristretta le nozioni di **spazio** e **tempo** non sono infatti più **assolute** e dipendono dal **sistema di riferimento** scelto. Lo **spaziotempo** è un oggetto **quadridimensionale**, la cui **suddivisione** in **spazio** e **tempo** non è più **assoluta** ma dipende dall'**osservatore**. Questo oggetto **quadridimensionale** è modellato secondo la geometria dello **spaziotempo** di **Minkowski**.



*Versione tridimensionale dello spaziotempo di Minkowski (una dimensione spaziale è omessa). Lo spazio presente e il tempo dipendono dal sistema di riferimento in cui è posizionato l'osservatore. Il cono di luce formato dai vettori di tipo luce non dipende però dal sistema di riferimento.*

Poiché lo **spazio 3-dimensionale** non è più univocamente definito (ma dipende dal sistema di riferimento dell'osservatore), non lo è più neppure la **nozione di traiettoria** come **curva** nello spazio 3-dimensionale. Resta però ben definita la **nozione di linea di universo**, nel modo seguente.

Una **linea di universo** nello spaziotempo di Minkowski

è una **curva differenziabile** i cui vettori tangenti sono tutti di tipo tempo, orientati positivamente.

Un vettore  $(t, x_1, x_2, x_3)$  nello spaziotempo di Minkowski è di tipo tempo se

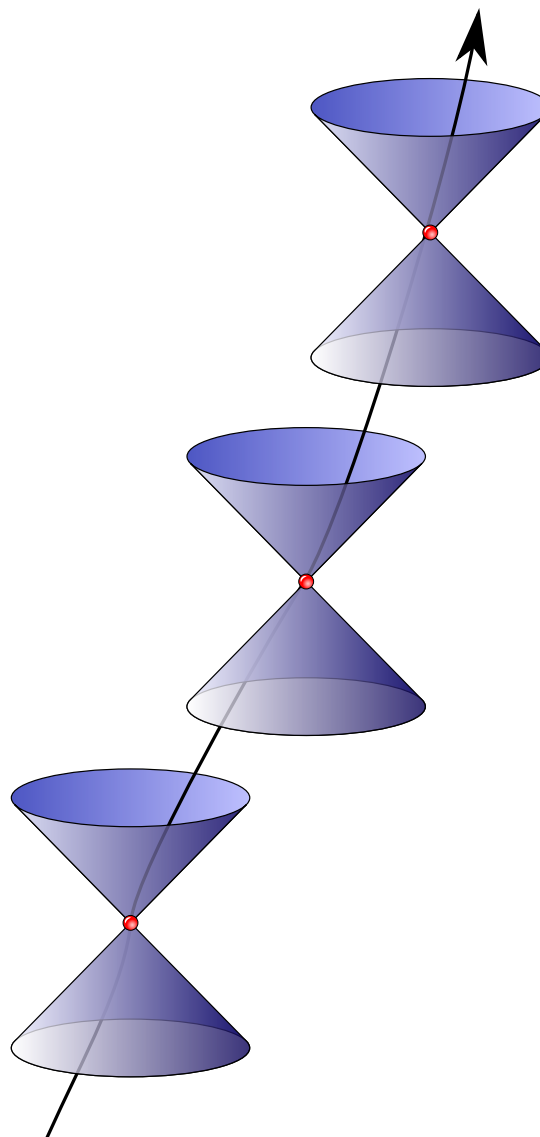
$$c^2 t^2 > x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$$

dove  $c$  è la velocità della luce. Ovvero lo spazio percorso dalla luce nell'intervallo di tempo che separa i due eventi è maggiore dello spazio che li separa. Ciò significa che i due eventi possono essere collegati da un segnale trasmesso con qualcosa che viaggi a velocità inferiore a quella della luce. In altre parole, il vettore tangente alla curva è sempre contenuto nel **cono di luce**. Questa condizione è equivalente alla richiesta che la velocità dell'oggetto sia in ogni istante inferiore a quella della luce, come richiesto dalla teoria della relatività.

In generale si definisce **linea di universo** anche quella percorsa dalla luce, cioè da un **fotone**: in questo caso il vettore tangente è sempre di tipo luce, cioè

$$c^2 t^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2.$$

La **linea di universo** in questo caso è una **retta** contenuta nel **cono di luce**. Generalmente, si scelgono delle unità di misura in cui  $c = 1$  (ad esempio le **unità di misura di Planck**): in questo modo la **linea di universo** di un fotone è una **retta** inclinata di  $45^\circ$  rispetto all'asse temporale. Ad esempio, si possono prendere come coordinate temporali gli **anni** e come coordinate spaziali gli **anni-luce**: per definizione, la luce percorre un **anno luce** all'anno, e quindi  $c = 1$ .



*Una linea di universo percorsa da un corpo nello spaziotempo di Minkowski. Il corpo non può in nessun istante viaggiare più veloce della luce: la tangente alla curva in ogni punto è quindi sempre un vettore tempo.*

## 3.2 Note

## 3.3 Bibliografia


- *Viaggiare nel Tempo*, di John Richard Gott III, Milano, Arnoldo Mondadori Editore, 2002.
- (EN) Edwin F. Taylor, John Archibald Wheeler (1992): *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity*, 2nd ed., W. H. Freeman & Co., ISBN 0-7167-2326-3
- (EN) Anadijiban Das (1996): *The Special Theory of Relativity: A Mathematical Approach*, Springer, ISBN 0-387-94042-1

## 3.4 Voci correlate

- Piano cartesiano

- Spaziotempo
- Spaziotempo di Minkowski

## 3.5 Altri progetti

-  **Commons** contiene immagini o altri file su **linea di universo**

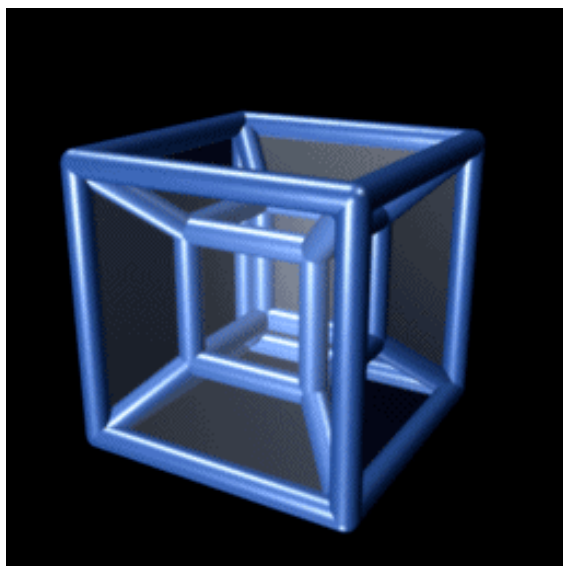
## 3.6 Collegamenti esterni

- Corso di RR di Bruno Touschek

- (DE) Relatività ristretta Lavoro originale dal periodico *Annalen der Physik*, Berna 1905
- (EN) Animation demonstrating the theory of relativity
- (EN) A Special Relativity Simulator
- Appunti di Teoria della relatività ristretta
- La Teoria della Relatività Ristretta
- Iper testo didattico sulla Relatività Ristretta

## Capitolo 4

# Quarta dimensione



Proiezione 3D di un ipercubo quadridimensionale che ruota attorno ad un piano che biseca la figura.

Il termine **quarta dimensione** è generalmente riferito ad una estensione degli oggetti ulteriore rispetto alla **lunghezza**, alla **larghezza** e alla **profondità**, che implica la necessità di una ulteriore **coordinata** oltre a quelle spaziali per individuare univocamente la posizione dei punti.

La quarta dimensione ammette come ogni altra dimensione una descrizione astratta nell'ambito della **topologia**, dove spazi con dimensioni superiori a tre discendono naturalmente dalla generalizzazione dei concetti geometrici elementari come **retta**, **superficie** e **volume**. In fisica, e in particolare nella **teoria della relatività**, la quarta dimensione è riferita al **tempo**, componente che costituisce lo spazio-tempo quadridimensionale unificato in cui occorrono ed esistono tutti gli eventi del nostro universo.

Dal punto di vista matematico, oltre alla quarta dimensione possono esserne aggiunte altre che possono avere caratteristiche anche completamente differenti rispetto a quelle della geometria euclidea. Dal punto di vista fisico, sono state proposte alcune teorie volte a meglio descrivere le **interazioni fondamentali** tra le particelle, che prevedono l'esistenza di ulteriori dimensioni oltre al tempo e alle tre spaziali. In questi ambiti il tempo può essere indicato come l'ultima dimensione possibile e il termine

“quarta dimensione” può riferirsi semplicemente a una delle dimensioni spaziali aggiuntive. Esempi di modelli di questo tipo sono la **teoria delle stringhe** e le teorie di **Kaluza-Klein**.

### 4.1 Geometria euclidea in uno spazio quadridimensionale

Ogni spazio che abbia dimensioni superiori a tre è chiamato **iperspazio**, come caso particolare il **tetraspazio** indica uno spazio a quattro dimensioni. In uno **spazio euclideo** tridimensionale, i punti possono essere individuati da tre **coordinate cartesiane**  $(x, y, z)$  e insiemi di punti possono costituire **rette**, **piani** e **volumi**. Una **retta**  $r$  può essere ad esempio descritta come l'insieme di punti tali che giacciono sull'asse  $x$ , cioè tali che sia la loro **coordinata**  $y$  che quella  $z$  siano nulle. Un esempio di **piano**  $S$  può invece essere descritto come l'insieme di punti tali che la sola **coordinata**  $z$  sia nulla.

In uno spazio euclideo quadridimensionale i punti invece sono individuati da quattro **coordinate cartesiane**  $(x, y, z, t)$ . La **retta** in uno spazio quadridimensionale diventa adesso l'insieme di punti tali che ad esempio non solo le **coordinate**  $y$  e  $z$  ma anche quella  $t$  è nulla. L'**iperpiano**, generalizzazione del concetto di **piano**, è descritto ad esempio dai punti che hanno sia la **coordinata**  $z$  che quella  $t$  nulla. Procedendo in questo modo, un oggetto tridimensionale può essere individuato ad esempio da un insieme di punti in cui la sola **coordinata**  $t$  è nulla.

### 4.2 Esempi di oggetti in un tetraspazio

#### 4.2.1 Ipercubo

È il solido geometrico analogo di un cubo a tre dimensioni con una quarta aggiuntiva, in quanto i suoi **lati** (che convergono tutti ai suoi **spigoli**) hanno ugual misura e sono o **paralleli** o **ortogonali** tra di essi.



### 4.2.2 Ipersfera

Una ipersfera è la generalizzazione del concetto di sfera in più di tre dimensioni. Nello spazio euclideo quadridimensionale, un esempio di ipersfera è il luogo di punti la cui distanza dall'origine è  $r$  :

$$S = \left\{ (x, y, z, t) \in \mathbb{R}^4 : \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + t^2} = r \right\}.$$

### 4.3 Note

### 4.4 Bibliografia


- Donal O'Shea, *La congettura di Poincarè*, Rizzoli, 2008 [2007], ISBN 978-88-17-02357-3
- Martin Gardner, *Mathematical Puzzles and Diversions*, New York, Simon and Shuster Inc. 1959
- Rudy Rucker, *La quarta dimensione* Milano, Adelphi, 1984
- Lawrence M. Krauss *La fisica di Star Trek*, Milano, TEA, 2002, ISBN 88-7818-804-2
- Lisa Randall *Passaggi curvi*, Cles-(TN), Mondadori printing S.p.A, 2007
- Paolo Schiannini (a cura di), *Dizionario enciclopedico dei termini scientifici della Oxford University Press*, Milano, RCS Rizzoli Libri S.p.A, 1990 ISBN 88-17-14522-X
- Alan e Sally Landsburg, *Alla scoperta di antichi misteri*, Milano, Arnoldo Mondadori Editore, 1977
- Michio Kaku *Iperspazio*, Macro Edizioni 2009 (l'autore noto teorico delle *Stringhe* introduce a relatività e fisica subnucleare nell'ottica delle dimensioni iperspaziali fra cui la quarta).
- Albert Einstein *Relatività: Esposizione divulgativa*, volume rilegato con integrazione in 2<sup>a</sup> parte "Spazio Geometria Fisica" di scritti di vari altri autori storici, 1967 editore Boringhieri.
- Bertrand Russell *I fondamenti della geometria* Edizione Newton Compton, 1975.

### 4.5 Voci correlate

- Dimensione
- Dimensione parallela
- Iperspazio

- Politopo
- Sezioni ipercubiche ortoassiali
- Spazio di Minkowski
- Spaziotempo
- Teorema delle intersezioni dimensionali

### 4.6 Altri progetti

-  **Commons** contiene immagini o altri file su **Quarta dimensione**

### 4.7 Collegamenti esterni

- <http://www.torinoscienza.it/ricerca?q=dimensione>
- <http://tetraspace.alkaline.org/>

# Capitolo 5

## Iperspazio

Con il termine matematico **iperspazio**, introdotto nella letteratura matematica da Arthur Cayley nel 1867<sup>[1]</sup>, si designa in genere uno spazio avente un numero di dimensioni geometriche superiore alle 3 dello spazio<sup>[2]</sup> fisico.

Il termine è stato utilizzato anche nella narrativa fantascientifica come un artificio per poter aggirare il limite della velocità della luce nel comune spazio tridimensionale, e poter così effettuare un viaggio interstellare più veloce della luce, tipicamente a bordo di un'astronave.

### 5.1 L'iperspazio nella fantascienza

Il viaggio nell'iperspazio (o attraverso di esso) è spesso usato nelle storie di fantascienza. I più noti esempi sono la saga di *Guerre stellari* o anche il ciclo della Fondazione di Isaac Asimov. In particolare l'iperspazio sarebbe una specie di foglio di universo nel quale le normali leggi della fisica non sembrano valere più. Nell'universo di *Star Trek* le astronavi sfruttano la propulsione a curvatura per raggiungere remoti sistemi stellari in pochi giorni o talvolta poche ore, e i tunnel spaziali (*wormhole*) per viaggiare addirittura in quadranti diversi della nostra galassia.

Termine usato anche nella serie del gioco per PC HomeWorld, navi che viaggiano per lunghe distanze usando l'iperspazio.

#### 5.1.1 Iperspazio geometrico

Il concetto di iperspazio inteso come artificio *geometrico* al fine di aggirare i limiti imposti dalla Relatività ristretta, si ritrova *in nuce* già nel racconto *I sogni nella casa stregata* (1933) di Howard Phillips Lovecraft, sebbene non vi compaiano astronavi, ma è compiutamente utilizzato e sviluppato l'anno seguente da Jack Williamson nel ciclo della *Legione dello spazio*.

Essenzialmente l'idea proposta è che, sebbene due punti nello spazio a 3 dimensioni possano apparire molto distanti, gli stessi punti in un iperspazio con un numero superiore di dimensioni siano collegati da una traiettoria di lunghezza notevolmente più breve. Ossia, quella

che appare come geodetica in 3 dimensioni, non è la vera geodetica nell'iperspazio.

In tal modo, pur non oltrepassando la velocità della luce, sarebbe possibile percorrere in tempi ragionevoli grandi distanze. È chiaro che si tratta di un concetto in parte mutuato dalla relatività generale.

#### 5.1.2 Iperspazio *tachionico*

Più recentemente il termine iperspazio è stato usato nella fantascienza letteraria e cinematografica, ad esempio nella saga di *Guerre stellari* o anche nel ciclo della Fondazione di Isaac Asimov per indicare il tragitto di viaggio spaziale ad una velocità realmente superiore a quella della luce (300.000 km/s circa). In particolare l'iperspazio sarebbe il mezzo in cui si muovono i tachioni, la cui velocità non è mai inferiore a quella della luce e non ha limite verso l'alto. Si teorizza che tale spazio sia dotato di quattro dimensioni spaziali.

### 5.2 Lo spazio-tempo come precursore del concetto di iperspazio

Albert Einstein, con la teoria della "Relatività ristretta", fu il primo fisico ad introdurre e rendere fisicamente 'palpabile' al grande pubblico un iperspazio a quattro dimensioni  $(x,y,z,t)$ , inglobando il tempo 't' nel comune spazio tridimensionale  $(x,y,z)$  e creando il famoso spazio-tempo einsteiniano. Anche se a prima vista ciò può apparire un semplice artificio matematico-geometrico, esso è in realtà una tangibile entità, nel senso che con la nuova teoria la vecchia distanza tra due punti nello spazio assume ora un significato di distanza spazio-temporale unificata (non solo spazio, non solo tempo ma entrambi). Così il vecchio intervallo spaziale della fisica Newtoniana, ovvero quello che noi chiamiamo comunemente "distanza", viene rimpiazzato da un nuovo intervallo spazio-temporale: Einstein, postulando la costanza della velocità della luce in ogni condizione di moto relativo, giunse alla conclusione che in qualsiasi moto relativo tra due sistemi, come ad esempio la terra ed un'astronave in volo, l'intervallo  $I$  nello spazio quadridimensionale  $(x,y,z,t)$  si conserva.

### 5.3 Note

- [1] Inoltre, sempre di Cayley: “the quasi-geometrical representation of conditions by means of loci in hyperspace,” in *Mathematical Papers* vol. VI, p. 191. (1893).
- [2] Quindi, lo stesso spazio-tempo è un iperspazio a 4 dimensioni.

### 5.4 Bibliografia

- *Renato Giovannoli*, “La scienza della fantascienza”, Bompiani, Milano, 1991

## 5.5 Fonti per testo e immagini; autori; licenze

### 5.5.1 Testo

- **Meccanismo di Higgs** *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/wiki/Meccanismo%20di%20Higgs?oldid=69587751> *Contributori:* Sbisolo, Gac, Hellig, Altair, Alfiobot, Helios, YurikBot, Huatulco, Felyx, Chobot, SunBot, Eskimbot, Cog, Codas, Wiso, Elitre, Montinar, BomBot, Thijs!bot, Sumail, TXiKiBoT, VolkovBot, Phantomas, Pracchia-78, DragonBot, Restu20, ^musaz, Jacopo Werther, Poldo328, SpBot, Luckas-bot, FrescoBot, Ptbougourou, AttoBot, ArthurBot, Marco27Bot, Franco3450, Xqbot, RibotBOT, RedBot, Alph Bot, EmausBot, Vernice Fresca, WikitanvirBot, MerlIwBot, Goltavor, Daniele Vadrucchio, Atarubot, Botcrux, AlessioBot, Addbot, MarsPF2 e Anonimo: 69
- **Tachione** *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/wiki/Tachione?oldid=69106980> *Contributori:* Snowdog, Robbot, Eskimo, Laurentius, Hellig, Mar-cok, Paginazero, Carnby, No0tic, ZeroBot, Ninja, Guam, Mitchan, YurikBot, Pietrodn, NeRi, Zwobot, Massimiliano Lincetto, SunBot, CruccoBot, Jalo, Iaga, Ylebru, Elwood, Estragon, Cog, Paulatz bot, Pequod76, AaMm, Tridim, AD10492, IIPisano, Rgrg, Larry Yuma, GIOV, LiljaBot, Pallochina, Beren023, Sirabder87, Drow, Lorenz-pictures, .anacondabot, .snoopybot., JAnDbot, Vituzzu, GIM, Sanfo, MelancholieBot, X-Dark, Balabot, Toobazbot, Plink, Aibot, VolkovBot, BetaBot, Pensareadaltro, Megalexandros, BotMultichill, SieBot, Alexyan, Phantomas, OKBot, Pracchia-78, ITA32, Ask21, Lissen, Danyele, Digital Quake, ^musaz, MaEr, Tombot, FixBot, Poldo328, LaaknorBot, Luckas-bot, Nallimbot, FrescoBot, Heiji, SassoBot, Xqbot, AushulzBot, RibotBOT, Bruno Cocciaro, Jakkar, Mazzamazza91, Alessandro Crisafulli, EmausBot, Harukanaru, Taueres, Shivanarayana, Asgolacchia, Atarubot, Quantix, Makecat-bot, Ocbright, Addbot, Euparkeria, Biasini Edoardo e Anonimo: 81
- **Linea di universo** *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/wiki/Linea%20di%20universo?oldid=65092444> *Contributori:* Massimiliano Lincetto, Ylebru, Drow, MelancholieBot, RolloBot, VolkovBot, Simo82, Abbot, SieBot, Phantomas, STBot, DragonBot, Alexbot, ^musaz, Tombot, M&M987, Poldo328, Luckas-bot, FrescoBot, Cinnamologus, Francesconwikipedia, Ptbougourou, Almabot, Caig, RedBot, GrouchoBot, EmausBot, GnuBotmarcoo, Makecat-bot, Botcrux, AlessioBot, Addbot, Andrea Galanti e Anonimo: 8
- **Quarta dimensione** *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/wiki/Quarta%20dimensione?oldid=69023082> *Contributori:* Carlomorino, Jalo, Eumol-po, Mr buick, Avemundi, X-Dark, Guido Magnano, Fontema, Pracchia-78, Azrael555, Dr Zimbu, No2, Jacopo Werther, SilvononBot, Sneutrino, Luckas-bot, FrescoBot, MapiVanPelt, Xqbot, Andrisano Antonio, Dega180, Michele-sama, Nubifer, Tenebroso, EmausBot, Zé-roBot, Shivanarayana, ChuispastonBot, Bradipo Lento, WikitanvirBot, Massimiliano Panu, MerlIwBot, Iovirgiliob, AvvocatoBot, Ossistyl, Vincenzo Bono, Adalingio, Addbot, Mat4free e Anonimo: 30
- **Iperspazio** *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/wiki/Iperspazio?oldid=56905160> *Contributori:* Gac, Marcok, ZeroBot, YurikBot, Riccardov, Senpai, Ylebru, Jacopo, Basilerio, Cog, Osmosis, The man of ice, Alemito, Superchilum, AD10492, IIPisano, Riccardobot, Drow, .anacondabot, JAnDbot, GIM, Minelita, Plink, Kaboot, Clyde54, Avesan, SanniBot, SieBot, Davide Manca, BotSimo82, PixelBot, No2, FrescoBot, Ptbougourou, Daniele Pugliesi, Xqbot, Cruscant3, Ripchip Bot, EmausBot, ValterVBot e Anonimo: 12

### 5.5.2 Immagini

- **File:8-cell-simple.gif** *Fonte:* <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/8-cell-simple.gif> *Licenza:* Public domain *Contributori:* Originally from en.wikipedia; description page is/was here. *Artista originale:* Original uploader was JasonHise at en.wikipedia
- **File:AIP-Sakurai-best.JPG** *Fonte:* <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/AIP-Sakurai-best.JPG> *Licenza:* Public domain *Contributori:* Opera propria *Artista originale:* self
- **File:CMS\_Higgs-event.jpg** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/CMS\\_Higgs-event.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/CMS_Higgs-event.jpg) *Licenza:* CC BY-SA 3.0 *Contributori:* <http://cdsweb.cern.ch/record/628469> *Artista originale:* Lucas Taylor
- **File:Commons-logo.svg** *Fonte:* <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Commons-logo.svg> *Licenza:* Public domain *Contributori:* This version created by Pumbaa, using a proper partial circle and SVG geometry features. (Former versions used to be slightly warped.) *Artista originale:* SVG version was created by User:Grunt and cleaned up by 3247, based on the earlier PNG version, created by Reidab.
- **File:Cube.svg** *Fonte:* <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Cube.svg> *Licenza:* CC BY-SA 2.5 *Contributori:* ? *Artista originale:* ?
- **File:Exquisite-kfind.png** *Fonte:* <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f1/Exquisite-kfind.png> *Licenza:* GPL *Contributori:* www.kde-look.org *Artista originale:* Guppetto
- **File:Fanta\_logo.svg** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d2/Fanta\\_logo.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d2/Fanta_logo.svg) *Licenza:* CC-BY-SA-3.0 *Contributori:* w:it:Immagine:Fanta\_logo.png *Artista originale:* User:Dzag
- **File:Gravitation\_space\_source\_(elaboration).png** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Gravitation\\_space\\_source\\_%28elaboration%29.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Gravitation_space_source_%28elaboration%29.png) *Licenza:* CC-BY-SA-3.0 *Contributori:* Gravitation\_space\_source.png *Artista originale:* Gravitation\_space\_source.png: Superborsuk
- **File:Linea\_universo.svg** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2a/Linea\\_universo.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2a/Linea_universo.svg) *Licenza:* Public domain *Contributori:* own work by uploader, derived from Image:ight cone it.svg *Artista originale:* Ylebru
- **File:Math.svg** *Fonte:* <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Math.svg> *Licenza:* Public domain *Contributori:* Opera propria *Artista originale:* Johannes Rössel (talk)
- **File:Mecanismo\_de\_Higgs\_PH.png** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Mecanismo\\_de\\_Higgs\\_PH.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Mecanismo_de_Higgs_PH.png) *Licenza:* CC-BY-SA-3.0 *Contributori:* ? *Artista originale:* ?
- **File:Nuvola\_apps\_katomic.png** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/Nuvola\\_apps\\_katomic.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/Nuvola_apps_katomic.png) *Licenza:* GFDL con disclaimer *Contributori:* ? *Artista originale:* ?
- **File:Standard\_Model\_of\_Elementary\_Particles\_it.svg** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles\\_it.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Standard_Model_of_Elementary_Particles_it.svg) *Licenza:* CC BY 3.0 *Contributori:*

- `Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg` *Artista originale:* `Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg`: MissMJ
- **File:Tachyon03.gif** *Fonte:* <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Tachyon03.gif> *Licenza:* CC-BY-SA-3.0 *Contributori:* en:Image:Tachyon03.gif *Artista originale:* en>User:TxAlien, upload by User:ZOiDberg
- **File:Wooden\_hourglass\_3.jpg** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Wooden\\_hourglass\\_3.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Wooden_hourglass_3.jpg) *Licenza:* CC-BY-SA-3.0 *Contributori:* Opera propria *Artista originale:* User:S Sepp
- **File:World\_line2-it.svg** *Fonte:* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/43/World\\_line2-it.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/43/World_line2-it.svg) *Licenza:* CC BY-SA 3.0 *Contributori:*
- `World_line2.svg` *Artista originale:*
- derivative work: Ylebru ([talk](//commons.wikimedia.org/wiki/User_talk:Ylebru "User talk:Ylebru"))

### 5.5.3 Licenza dell'opera

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0