

Di che cosa è fatto il mondo?

La ricerca della natura ultima della realtà

La realtà non è come ci appare

La struttura elementare delle cose

Raffaello Cortina Ed. 2014

Carlo Rovelli

Fisico, Prof. ordinario presso Università di Aix-Marseille

E' uno dei fondatori della **gravità quantistica a loop**.

Ha scritto anche [Sette brevi lezioni di fisica](#)

[La scheda di Carlo Rovelli su Wikipedia](#)



L'universo matematico

La ricerca della natura ultima della realtà

Edizioni Bollati Boringhieri 2014

Max Tegmark

Cosmologo, Professore presso il MIT

Sostiene che tutte le strutture che esistono matematicamente esistono anche fisicamente

[La scheda di Max Tegmark su Wikipedia](#)



Di che cosa è fatto il mondo?

- **Carlo Rovelli:** di campi quantistici covarianti
- **Max Tegmark:** di strutture matematiche

Ma il mondo non era fatto di ...

- Particelle
- Spazio
- Tempo



La nascita della scienza moderna

- Nel 1510 circa **Copernico** descrive corpi celesti che girano intorno al Sole, Terra compresa, modificando dopo oltre 1000 anni il sistema tolemaico (l'Almagesto di Tolomeo è del 150 d.C. circa)
- Le tre leggi matematiche di **Keplero** (1608-1619) consacrano definitivamente il sistema eliocentrico di Copernico.
- Tra il 1609 e il 1610 **Galileo** utilizza il cannocchiale per osservare il cielo e scopre anelli intorno a Saturno, montagne sulla Luna, fasi di Venere, satelliti intorno a Giove. Ciascuno di questi fenomeni rende più plausibile l'idea di Copernico.

L'intuizione del genio

La grande idea di Galileo:

- se i movimenti nel cielo seguono leggi matematiche precise
- se la Terra è un pianeta come gli altri e quindi fa parte del cielo
- *allora* anche sulla Terra devono esistere leggi matematiche precise che governano il moto degli oggetti.

Come si muovono sulla Terra i corpi quando cadono?

- La velocità aumenta in modo regolare nel corso della caduta.
- L'accelerazione è la stessa per tutti i corpi ed è uguale a 9,8 metri al secondo per secondo ($9,81 \text{ m/s}^2$).
- $s = (\frac{1}{2}) * a * t^2$: prima legge matematica scoperta per i corpi terrestri.

Così in cielo come in terra!

- **Newton** nel 1687 riesce a combinare i risultati di Galileo e di Keplero. Immaginando che esista una piccola Luna che ruoti attorno alla Terra ad una distanza minima calcola dalle leggi di Keplero la sua velocità ipotetica e, di conseguenza, la sua accelerazione: 9,8 metri al secondo per secondo!
- Quindi la causa che fa girare la piccola luna sulla sua orbita deve essere la stessa causa che fa cadere i corpi sulla Terra.
- Newton ha appena scoperto la **forza di gravità**, una delle quattro forze fondamentali che governano la natura: $F=G*(M_1*M_2)/r^2$

Di che cosa è fatto il mondo secondo Newton (et al.)



Figura 2.1 Di che cosa è fatto il mondo?

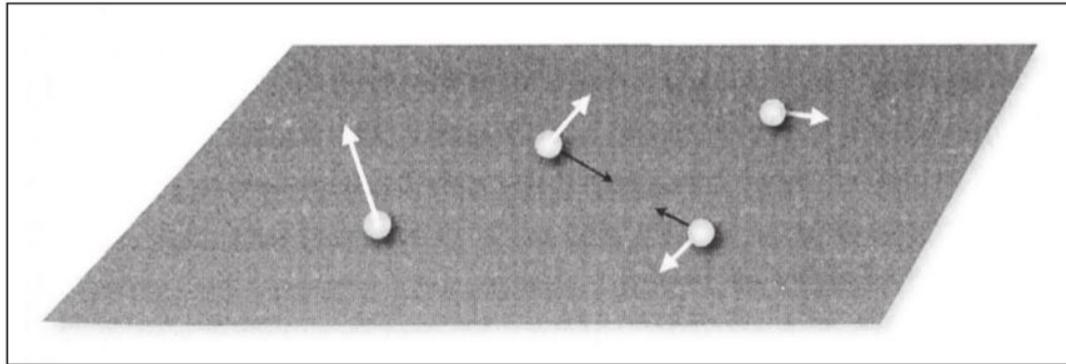


Figura 2.2 Il mondo di Newton: particelle che si muovono nello spazio, nel corso del tempo, attirandosi per mezzo di forze.

$$S = \left(\frac{1}{2}\right) * a * T^2$$

$$F = G * (P_1 * P_2) / S^2$$

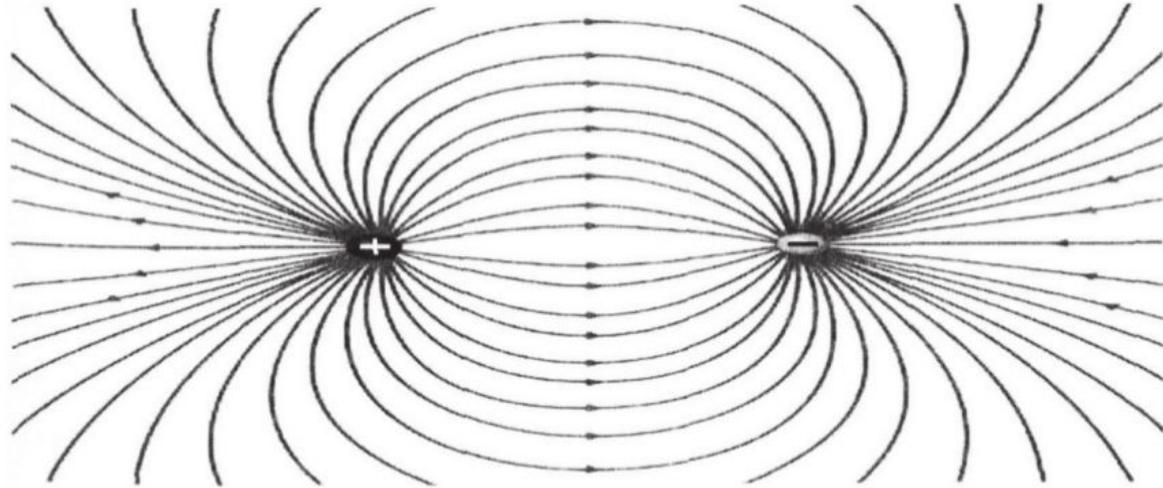
Manca ancora qualcosa

- Cosa tiene insieme la materia per formare corpi solidi?
- Cosa tiene uniti gli elettroni negli atomi, gli atomi nelle molecole e che genera i fenomeni chimici?

E' la forza elettromagnetica

- Venne compresa da Michael Faraday (lo “sperimentale”) e James Clerk Maxwell (il “matematico”)
- Insieme alla forza di gravità governa quasi tutti i fenomeni osservabili in natura

Il concetto di campo



Una gigantesca ragnatela invisibile di linee infinitamente sottili che riempiono tutto lo spazio intorno a noi e “portano in giro” la forza elettrica e la forza magnetica (@ Faraday)

L'illuminazione di Maxwell

Maxwell nel 1865 traduce Faraday in una pagina di equazioni che ...

- descrivono il comportamento dei campi elettrico e magnetico
- vengono usate per disegnare antenne, radio, computer

E spiegano la luce!

Maxwell si rende conto che le sue equazioni prevedono che le linee di Faraday possano vibrare e ondulare proprio come le onde del mare.

Le ondulazioni delle linee di Faraday corrono a una velocità che Maxwell calcola e che risulta essere ... esattamente uguale alla velocità della luce!

Di che cosa è fatto il mondo secondo Faraday e Maxwell

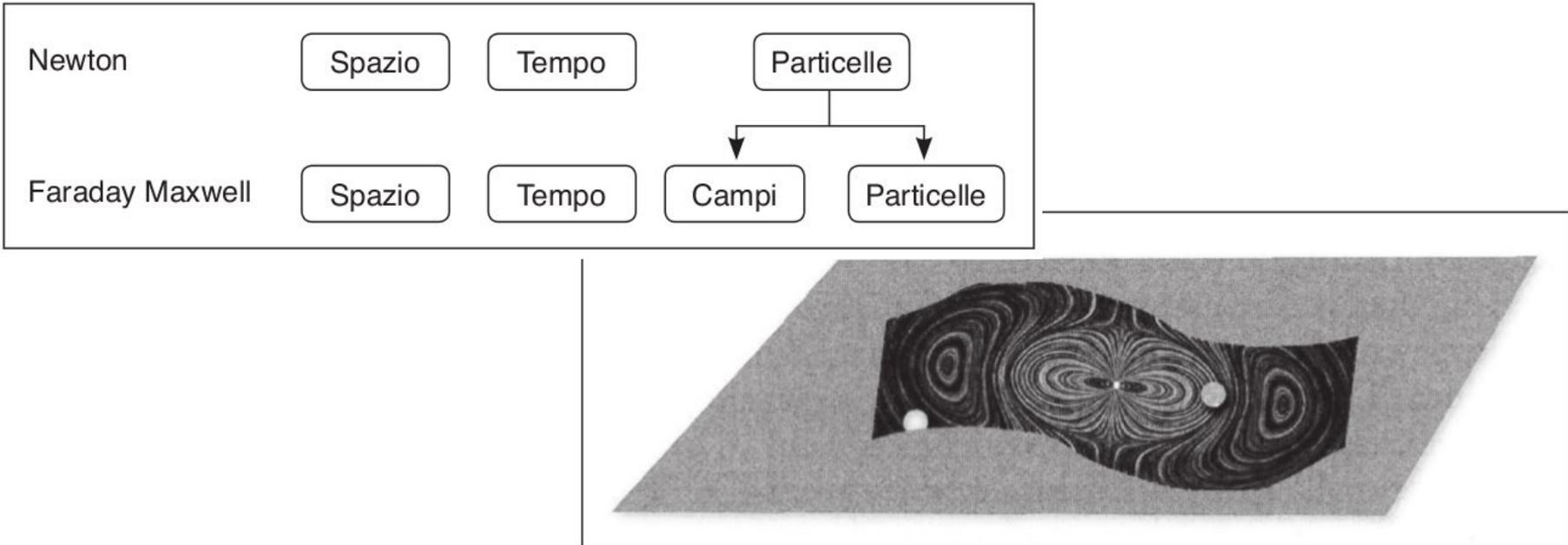


Figura 2.6 Il mondo di Faraday e Maxwell: particelle e campi che si muovono nello spazio, nel corso del tempo.

Gli atomi: 2300 anni di dubbi

“Io non credo che gli atomi esistano!”

Dichiarazione del fisico e filosofo Ernst Mach (mentore di Einstein), alla fine di una conferenza di Boltzmann (altro grande fisico) all'Accademia Imperiale della Scienza a Vienna, 1897.

La materia è costituita da particelle minuscole e indivisibili (atomo, dal greco ἄτομος - àtomos -, indivisibile,)

Democrito, 400 a.C.

1905 - Il ciclone Einstein

Nel 1905 Albert Einstein, un venticinquenne ribelle e irrequieto che aveva studiato fisica, ma non era riuscito a trovare impiego come fisico, e quindi sbarcava il lunario lavorando come impiegato nell'ufficio di brevetti di Berna, spedisce alla più prestigiosa rivista di fisica del tempo, gli *Annalen der Physik*, 4 articoli:

- la prova che gli atomi esistono (moto browniano)
- la relatività speciale (relatività ristretta, 2 articoli)
- l'origine della meccanica quantistica (che gli frutta il premio nobel)

Albert e i limiti di velocità

- Due degli articoli scritti da Einstein nel 1905 introducono la teoria della **relatività speciale** (in Italia **relatività ristretta**).
- La relatività speciale risolve una contraddizione tra la meccanica newtoniana e le equazioni di Maxwell: secondo Maxwell la velocità della luce è “fissa”, secondo Newton la velocità è sempre “velocità di qualcosa rispetto a qualcos’altro” (velocità = concetto relativo)
- La **velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali**, indipendentemente dalla velocità dell'osservatore o dalla velocità della sorgente di luce.

L'intuito non funziona più

- Il nostro intuito conosce passato e futuro.
- La relatività speciale introduce il “**presente esteso**”: fra il passato e il futuro di ciascun evento esiste una “zona intermedia”, una zona che non è né passata né futura.
- La durata di questa “zona intermedia” è molto piccola, e dipende dalla distanza: un millesimo di secondo agli antipodi, pochi secondi sulla Luna, un quarto d'ora su Marte
- Il presente esteso “qui vicino” dura troppo poco e non siamo abbastanza “mentalmente lesti” per notarlo.

Dialogo con un marziano

- Terrestre h 8:00: “Ciao Marziano” \Rightarrow Verso Marte (15 minuti)
- Marziano h 8.15: “Ciao Terrestre” \Rightarrow Verso Terra (15 minuti)
- Terrestre h 8.30: “Tutto bene su Marte?” \Rightarrow Verso Marte (15 min.)
- Marziano h 8.45: “Sì grazie e da voi?” \Rightarrow Verso Terra (15 minuti)
- ...
- **Questo quarto d'ora non è “accorciabile”**

Spaziotempo e ... “materienenergia”

- Spazio e tempo sono intimamente legati (**spaziotempo**) ...
- ... ma non è tutto!
- Prima esistevano due principi distinti
1: la massa si conserva - 2: l'energia si conserva
- Dopo rimane un solo principio: si conserva la somma di massa ed energia e quindi l'una si può trasformare nell'altra, ovvero ...

$$E=mc^2$$

Cos'è lo spazio vuoto?

- Einstein capisce che la relatività speciale non quadra con quanto si sapeva allora sulla gravità.
- Allora infatti era stato scoperto il campo elettromagnetico che “trasportava” le forze elettrica e magnetica, ma nulla si sapeva di un analogo **campo gravitazionale**. Secondo Einstein anche questo doveva esistere.
- Rimaneva inoltre un altro problema: quello dello “**spazio vuoto**”: cos'è questo misterioso contenitore nel quale si trovano le particelle? **E' qualcosa o non è niente?**

La più bella delle teorie

La relatività generale (1915)

Lo spazio di Newton è il campo gravitazionale

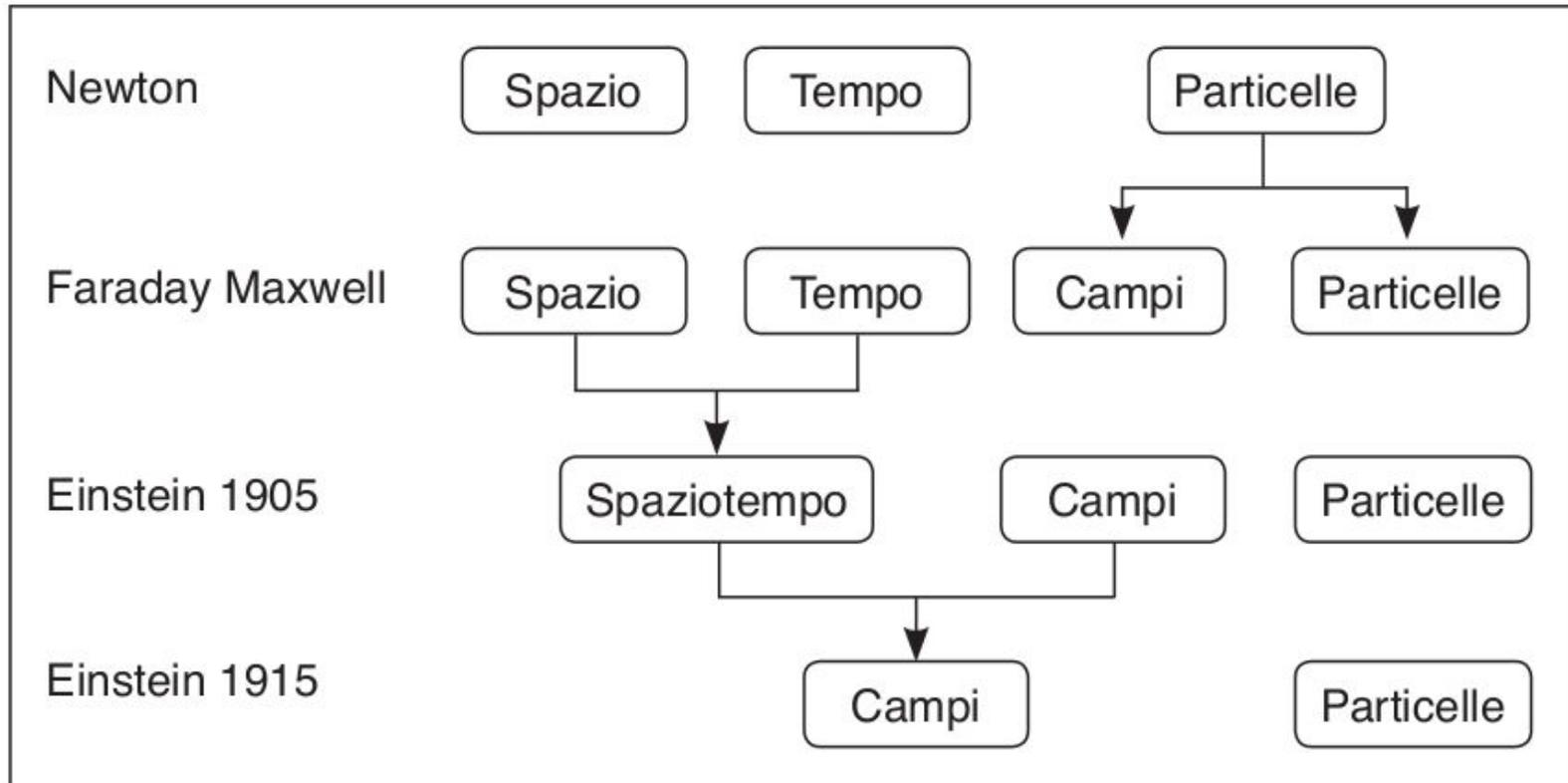
Per la precisione il campo gravitazionale è lo spaziotempo della Relatività Speciale, ma essendo un campo non è piatto e fisso, ma si muove, ondeggia ed è descritto da equazioni matematiche, esattamente come il campo di Maxwell e le linee di Faraday

Dal Big Bang ai buchi neri

Le strane previsioni della relatività generale

- L'Universo si espande a seguito del **Big Bang**
- Sul bordo di una stella **lo spazio si curva** e la luce viene deviata
- **Si curva anche il tempo**, che sulle vette passa più velocemente
- Se una stella ha massa a sufficienza quando muore genera un **buco nero**: regione dello spaziotempo con un campo gravitazionale così forte e intenso che nulla al suo interno può sfuggire all'esterno, nemmeno la luce
- Lo spazio si increspa come la superficie del mare. Le increspature sono l'analogo delle onde elettromagnetiche: previste da Einstein nel 1916 e scoperte nel 2016 si tratta delle **onde gravitazionali**

Di che cosa è fatto il mondo secondo Einstein



E non hai visto ancora niente!

Il magico mondo dei quanti

- Nel 1900 Max Planck scopre che per descrivere correttamente in termini matematici il campo elettrico in equilibrio all'interno di una scatola calda bisogna immaginare che l'energia del campo sia distribuita in “grani” (quanti)
- Questo significa che **l'energia non può variare in modo continuo, ma solo “a scalini”**.
- Per Max Planck questo era solo un trucco matematico per descrivere la realtà. Fu ancora Einstein a comprendere nel 1905, nell'ultimo articolo inviato agli *Annalen der Physik* che i quanti erano “reali”, scoprendo i “grani di luce”, cioè i **fotoni**

Grandinate di fotoni

- Nelle cellule fotoelettriche alcune sostanze quando vengono colpite dalla luce generano una debole corrente elettrica (emettono elettroni).
- E' l'**effetto fotoelettrico**, ovvero la luce che quando colpisce gli atomi "dà una spinta" agli elettroni (cioè trasmette energia) facendoli "saltare fuori".
- Einstein scopre che l'effetto fotoelettrico non dipende dalla "quantità" di luce (intensità), ma dal "colore" (frequenza). Come mai?
- Perché un elettrone non viene "sbalzato fuori" se viene colpito da tanti grani, ma se il grano di luce (fotone) ha energia sufficiente.
- E' come quando grandina: basta un chicco grande per causare danni, mentre tanti chicchi piccoli sono innocui.

La fisica di Star Trek

- Moto browniano: **la materia è fatta di grani** (atomi).
Effetto fotoelettrico: **la luce è fatta di grani** (fotoni).
- Niels Bohr (1913): gli elettroni esistono solo su orbite situate a “**distanze speciali**” (energie permesse) dal nucleo e “**saltano**” da un’orbita all’altra (una specie di **teletrasporto** alla Star Trek ...).
- Werner Heisenberg, tra il 1925 e il 1927 (a 25 anni circa) scrive le prime vere equazioni della meccanica quantistica (tra cui il famoso principio di indeterminazione), secondo le quali **l’elettrone non esiste sempre ma solo quando interagisce**, si “materializza” in un luogo solo quando “entra in relazione” con un fotone.

Nessuna previsione certa

- Secondo Heisenberg la posizione di una particella è definita solo in certi istanti ben precisi, quelli in cui interagisce con qualcos'altro. Paul Dirac universalizza il concetto e va molto oltre ...
- Non solo la posizione, **NESSUNA VARIABILE** è definita nel periodo tra un'interazione e la successiva!
- In un'interazione **TUTTE** le variabili fisiche possono assumere solo certi valori e non altri.
- Non possiamo calcolare con certezza dove l'elettrone comparirà, ma solo la **probabilità** che compaia qui o là. Non esiste una previsione univoca!
- Questa mancanza di determinismo è evidente a scala molto piccola ed è intrinseca alla natura, ma non viene notata alle nostre scale.

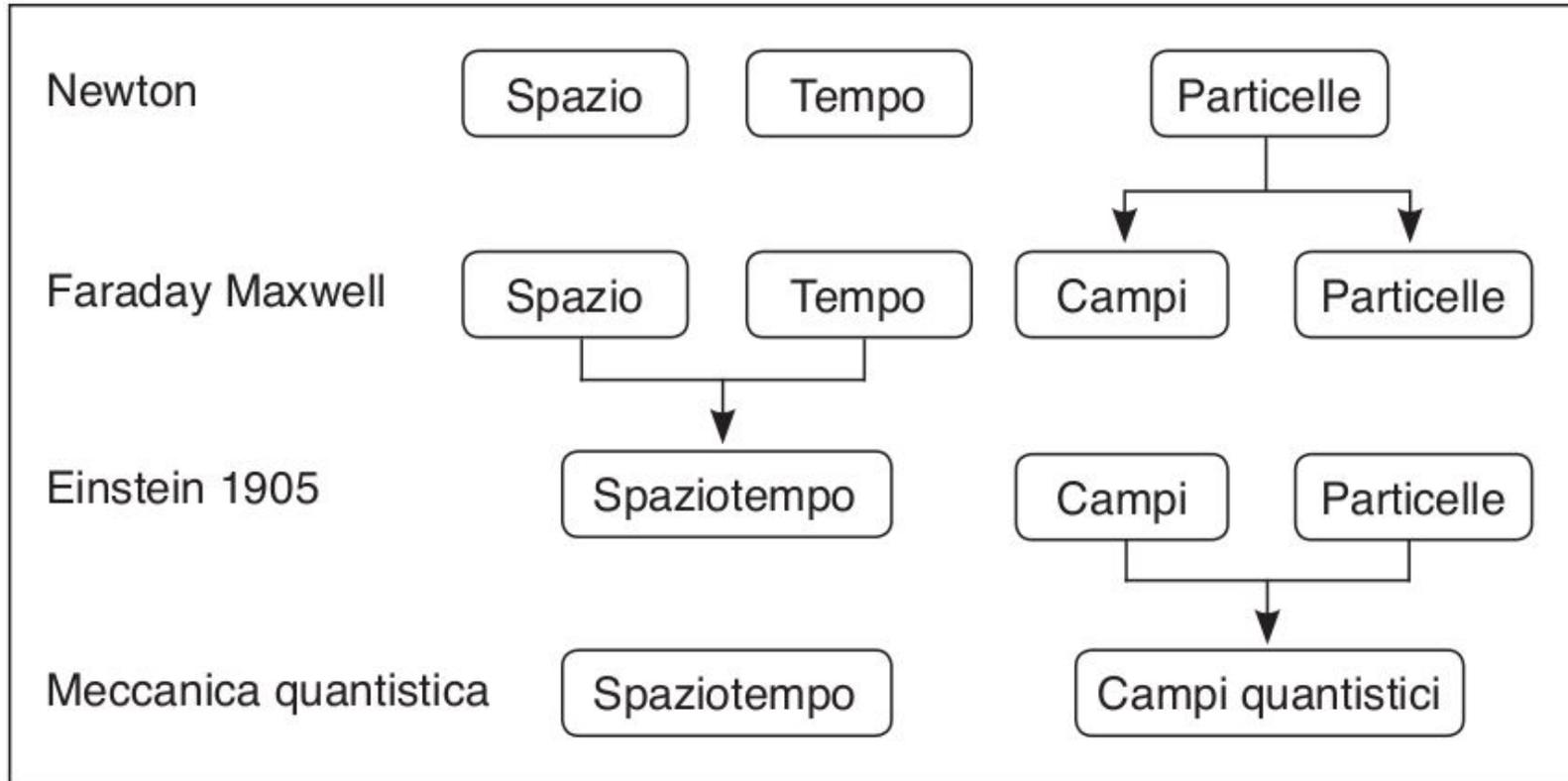
Le tre rivoluzioni quantistiche

- La materia e la luce sono “**granulari**”, cioè le loro variabili possono assumere un numero di valori finito. Quindi **l'informazione** che esiste in un sistema è **finita**.
- La meccanica quantistica introduce un elementare indeterminismo nel cuore del mondo. **Il futuro è genuinamente imprevedibile**.
- La teoria non descrive dov'è una particella, ma dove la particella “si fa vedere dalle altre”. Il mondo delle cose esistenti è ridotto al mondo delle interazioni possibili. La realtà è ridotta a interazione. Ovvero **la realtà è ridotta a relazione**.

Addio anche alle particelle ...

- Completata la formulazione generale della meccanica quantistica Dirac la applica direttamente ai campi e la rende coerente con la relatività speciale. E scopre che **campi e particelle sono la stessa cosa**:
 - i fotoni sono i quanti del campo elettromagnetico.
 - tutte le particelle in generale sono quanti di un “campo quantistico”.
- Nell’ambito della “teoria quantistica dei campi” di Dirac nel corso del XX secolo l’elenco dei campi fondamentali viene messo a punto e oggi abbiamo il “**modello standard delle particelle elementari**” che descrive bene tutto ciò che vediamo tranne la *materia oscura* e la gravità.
- Il bosone di Higgs è l’ultimo di questi campi che è stato rivelato (2012).

Di che cosa è fatto il mondo secondo la meccanica quantistica



Tutto giusto, tutto sbagliato!

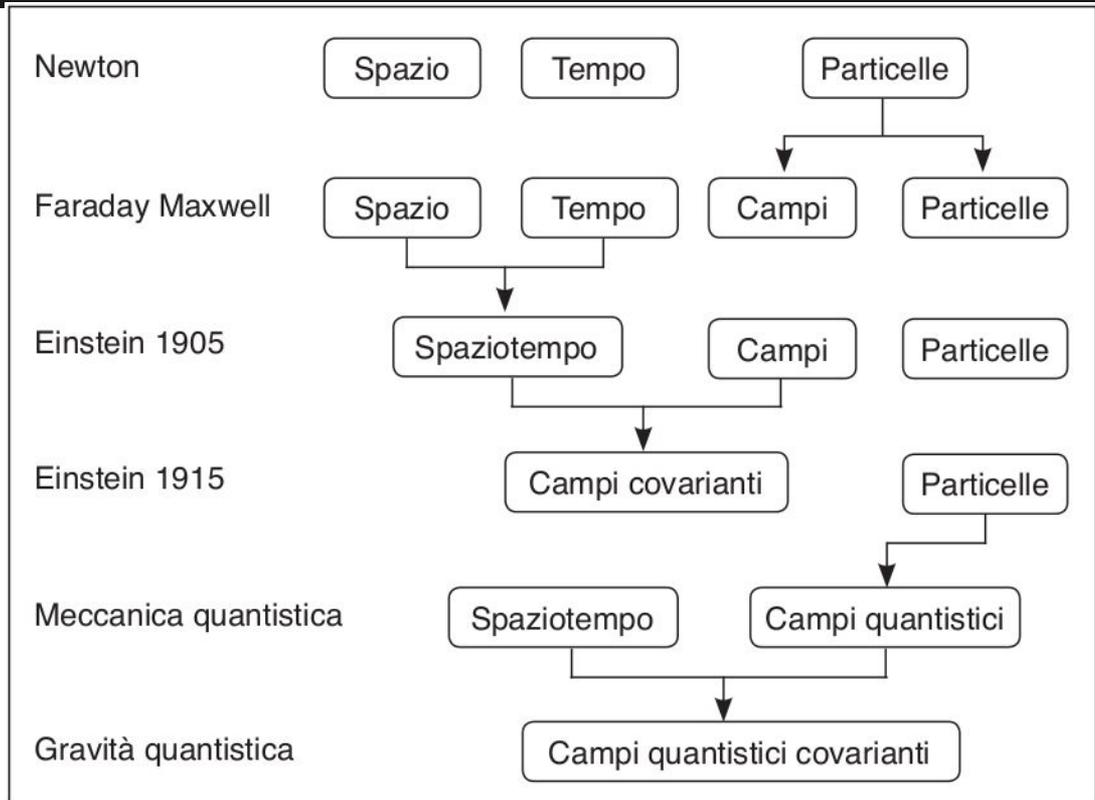
Relatività generale e meccanica quantistica non possono essere entrambe giuste!

- Nella relatività generale il campo gravitazionale è descritto senza tener conto che i campi sono quantizzati, mentre la meccanica quantistica è formulata senza tener conto che lo spaziotempo si incurva ed è soggetto alle equazioni di Einstein.
- Siccome funzionano entrambe terribilmente bene “manca qualcosa”: la zona grigia è quella in cui entrambe diventano importanti. Dove? Sul confine dei buchi neri oppure nel Big Bang. Impossibile? Forse no. [Riprodurre in laboratorio l'evaporazione di un buco nero \(Da “Le Scienze”\)](#)
- Più in generale non sappiamo come siano fatti spazio e tempo a scala molto piccola, è di questo che si occupa la “gravità quantistica”.

Di che cosa è fatto il mondo: meccanica quantistica relazionale

Lo spazio e il tempo continui sono una visione approssimata a larga scala della dinamica dei quanti di gravità.

I quanti di gravità sono il modo in cui spazio e tempo interagiscono.



Relazione? No, ubiquità!

Contro l'interpretazione di Rovelli

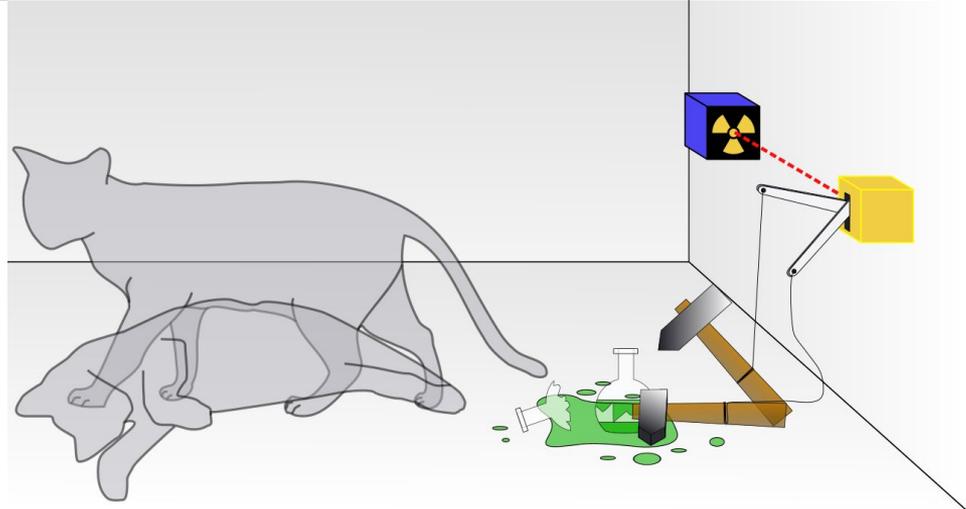
- Se sappiamo cosa stanno facendo tutte le particelle del nostro universo in questo preciso momento, esiste un'equazione che ci permette di calcolare cosa faranno in futuro?
- Sì, è l'equazione d'onda o equazione di Schrödinger (scoperta dal fisico austriaco Erwin Schrödinger), in cui la funzione d'onda rappresenta la possibilità che una particella si trovi in un punto piuttosto che in un altro (descrive una “nuvola” di probabilità)
- **Se la prendo sul serio** e non come un ausilio di calcolo sembra anche descrivere la **particella** come se si trovasse contemporaneamente **in più posti** mentre non viene osservata!

Copenaghen al collasso

- L'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica è quella maggiormente condivisa fra gli studiosi.
- Si ispira fundamentalmente ai lavori svolti nella capitale danese da Niels Bohr e da Werner Heisenberg attorno al 1927.
- Indeterminismo: il futuro è genuinamente imprevedibile.
- E' priva di senso la domanda: «Dov'era la particella prima che ne misurassi la posizione?», in quanto **la meccanica quantistica studia esclusivamente quantità osservabili e misurabili.**
- La misurazione causa il «**collasso della funzione d'onda**», che è **costretta dal processo di misurazione ad assumere uno dei valori permessi.**

Il gatto di Schrödinger

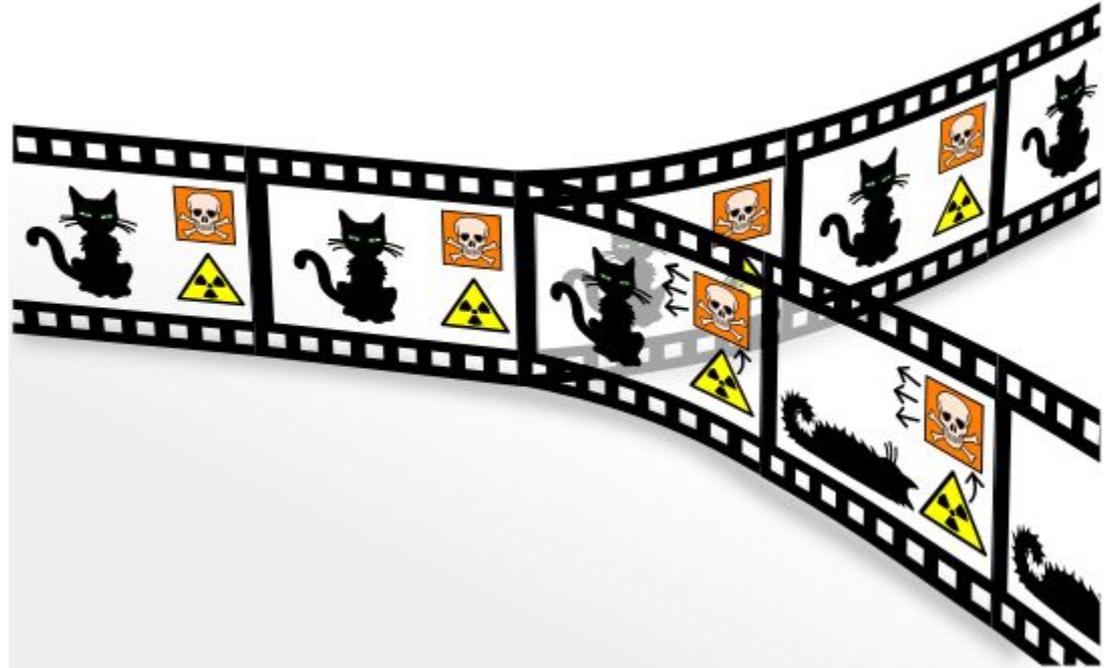
- C'è un gatto in una scatola.
- Contatore Geiger con una minuscola porzione di sostanza radioattiva che decada in un'ora con una probabilità del 50%.
- Se l'evento si verifica il contatore lo segnala e aziona un relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro.
- Dopo 1 ora la funzione d'onda descrive il sistema in una sovrapposizione esatta di stato "gatto vivo" e "gatto morto".



Collasso? No, l'Universo si sdoppia!

L'interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica

Una misurazione o una osservazione ha come conseguenza la divisione della nostra realtà in molti mondi, in cui diversi risultati sono possibili: **quindi la funzione d'onda non collassa.**



Di che cosa è fatto il mondo: l'ipotesi dell'universo matematico

- E' stata proposta da Max Tegmark
- Estende L'interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica.
- Esiste una realtà esterna totalmente indipendente da noi umani (anche Einstein la pensava così)
- La nostra realtà fisica esterna è una struttura matematica
- Tutte le strutture che esistono matematicamente esistono anche fisicamente.

La realtà è matematica

Meccanica quantistica: una coperta troppo corta?

- Le equazioni della teoria, e le loro conseguenze, vengono usate di routine da fisici, ingegneri, chimici e biologi, nei campi più svariati.
- Ma descrivono quello che succede a un sistema fisico, o solo come un sistema fisico “influenzi” un altro sistema fisico?
In altre parole: la realtà essenziale di un sistema che non sta interagendo è indescrivibile (interpretazione di Copenaghen)?
- Oppure è descrivibile ma manca un pezzo alla storia (Tegmark)?
- Oppure dobbiamo accettare l’idea che la realtà sia solo interazione (idea di Rovelli)?

Penso si possa dire che nessuno capisce davvero la meccanica quantistica

Richard Feynman

Le 16 interpretazioni principali (!) della meccanica quantistica

1 Interpretazione statistica

2 Interpretazione di Copenaghen

3 Coscienza causa del collasso

4 Storie coerenti

5 Teoria oggettiva del collasso

6 Interpretazione alla Berkeley

7 Interpretazione a molti mondi

8 Decoerenza quantistica

9 Interpretazione a molte menti

10 Logica quantistica

11 Teorie delle variabili nascoste

12 Interpretazione di De Broglie-Bohm

13 Interpretazione transazionale

14 Meccanica quantistica relazionale

15 Interpretazioni modali della meccanica quantistica

16 Misure incomplete

Fonte: Wikipedia

https://it.wikipedia.org/wiki/Interpretazione_della_meccanica_quantistica

Che fai tu, Luna, in ciel?

- **Albert Einstein**

Veramente lei è convinto che la luna esista solo se la si guarda?

- **Erwin Schrödinger**

Se avessi saputo che la mia equazione d'onda sarebbe stata usata in questo modo, avrei bruciato l'articolo prima di pubblicarlo [...]

Non mi piace e mi pento di averci avuto a che fare

- **Carlo Rovelli**

L'onda di Schrödinger non è un'utile rappresentazione della realtà: è un ausilio di calcolo per permetterci di predire con maggiore precisione dove l'elettrone riapparirà (La realtà non è come ci appare, nota a pagg. 109-110)

Di che cosa è fatto il mondo?

Carlo Rovelli

Di campi quantistici covarianti

Max Tegmark

Di strutture matematiche

Di che cosa è fatto il mondo?

Anassimandro (600 a.C.):

la sostanza del mondo è l'ἄπειρον, l'ápeiron
(il non definito)

Platone (400 a.C.):

esistono le Idee che sono incorruttibili,
ingenerate, eterne e immutabili

Tra scienza e filosofia

Carlo Rovelli

I campi quantistici covarianti rappresentano la migliore descrizione che abbiamo oggi dell' ἀπείρων, l'apeiron, la sostanza primordiale che forma il tutto, ipotizzata dal primo scienziato e primo filosofo, Anassimandro.

Da “La realtà non è come ci appare”, pag. 167

Tra scienza e filosofia

Max Tegmark

Tutte le strutture che esistono sul piano matematico esistono anche sul piano fisico. [...] Possiamo vederlo come una forma radicale di platonismo, per cui tutte le strutture matematiche nel “regno delle idee” di Platone esistono anche “là fuori”, in senso fisico.

Da “L’Universo Matematico”, cap. 12, 1° paragr., Sez. “Democrazia matematica”

La risposta è ... 42!

- [La scienza risponde “42”? - Video youtube](#)
- *I campi quantistici covarianti o le strutture matematiche sono la risposta che stavamo cercando?*
- *Se la realtà è relazione lo è solo a livello subatomico?*
- *Dobbiamo accettare di **vivere nel mistero**?*
Accettare la sostanziale incertezza del nostro sapere vuol dire accettare di vivere immersi nell'ignoranza, e quindi nel mistero
(Carlo Rovelli, La realtà non è come ci appare, p. 228).
- [La scienza può fare a meno della filosofia e della storia?](#)



Per approfondire

Sugli autori dei libri

- [Carlo Rovelli - La realtà non è come ci appare](#) (video youtube)
- [Gli Universi paralleli di Max Tegmark](#) (video youtube - inglese con sottotitoli in italiano)

Relatività

- [Einstein - Relatività \(1° parte - Superquark\)](#) (video youtube)
- [Einstein - Relatività \(2° parte - Superquark\)](#) (video youtube)
- [Superquark - onde gravitazionali](#) (video dal sito RayPlay)

Meccanica quantistica

- [Dualismo onda-particella](#) (video youtube tratto da RAI EDU)
- [L'ubiquità degli atomi](#) (articolo dal sito Zanichelli - Aula di Scienze)
- [Teletrasporto \(entanglement quantistico\)](#) (articolo tratto da "Le scienze")
- [Gatto di Schrödinger](#) (articolo e video youtube tratto da FOCUS)
- [Il bosone di Higgs spiegato da Fabiola Gianotti](#) (video youtube tratto da EuroNews)

[Il mondo e i suoi enigmi: sapienze a confronto. Gabriella Caramore dialoga con Carlo Rovelli](#) (Podcast della trasmissione radiofonica "Uomini e profeti" del 15/6/2014)

Titoli di coda

Grazie!

davide.bettati@gmail.com