

Quanti e Relatività

Hic sunt leones

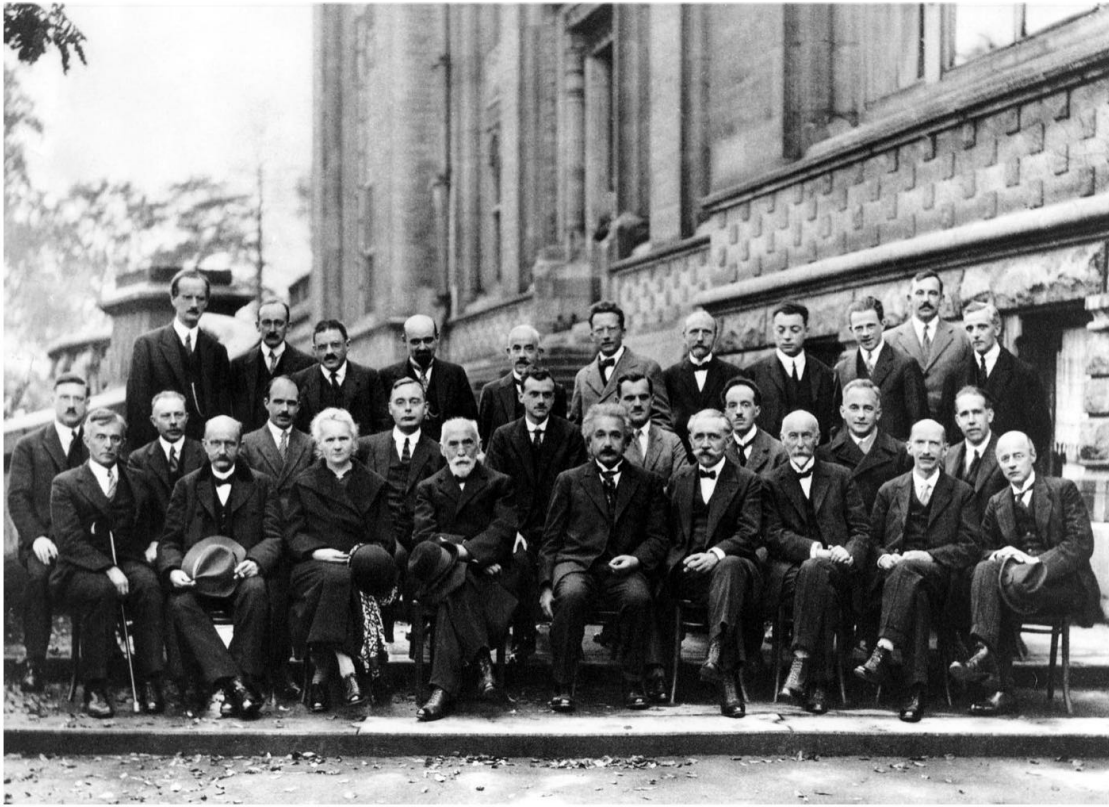
Caro Augusto,

la questione che hai sollevato, “compatibilità tra teoria quantistica e Relatività Generale”, è nientedimeno che il problema centrale che ha tenuto impegnato invano Albert Einstein, fino alla morte, alla ricerca di una “teoria unificata”. In tempi recenti i Fisici hanno pensato di poter trovare una soluzione in termini della “Teoria delle Stringhe”, che individua a una scala ben più bassa delle dimensioni subnucleari (quarks) e cioè alla “scala di Planck” una possibile formulazione in termini di oggetti estesi che si fonderebbero a formare quarks e leptoni, nonché a fornire le particelle che mediano le interazioni, compresa la Gravitazione. Purtroppo la teoria al momento è inconcludente - troppe arbitrarietà nella definizione della teoria e difficoltà insormontabili nello studio della teoria nel limite in cui dovrebbe riprodurre la fisica nota. Quindi su questo non ti posso dare illuminazioni, al momento è un fatto di *fede*.

Tuttavia qualcosa di sensato si può dire sull’interfaccia tra quanti e relatività. Però bisogna premettere qualcosa per impostare il quadro generale.

1. Simmetrie spazio-temporali
2. Interazioni fondamentali
3. Quantizzazione dell’elettromagnetismo, delle interazioni deboli e di quelle forti.
4. Un suggerimento qualitativo: il dibattito tra Bohr e Einstein al congresso Solvay.

Nella foto che segue: sono i partecipanti al Congresso Solvay del 1927, c’erano i migliori cervelli in circolazione, Einstein, Bohr, Heisenberg, Dirac,



A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger, J. E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin;

P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H. A. Kramers, P. A. M. Dirac, A. H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr; Arthur Compton

I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch.-E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson

Fifth conference participants, 1927. Institut International de Physique Solvay in Leopold Park.

Born, Planck, Compton, Curie, De Broglie, Lorentz, ... Nel successivo congresso del 1930 si svolse l'incontro di boxe intellettuale tra Einstein e Bohr.

Simmetrie spazio-temporali

Le teorie fisiche che si sono avvicinate negli anni a partire da Newton sono caratterizzate da quale è la simmetria spazio-temporale cui obbediscono. Newton ambientava la sua Fisica nello spazio assoluto e la

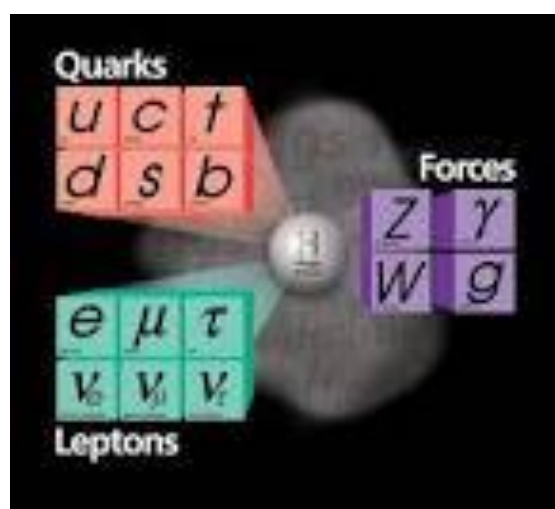
sua meccanica che regola il moto del Sistema Solare secondo il modello Copernicano rispetta la simmetria Galileiana, secondo cui le leggi fisiche sono invarianti passando da un sistema di riferimento ad un altro che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto al primo. Galileo descrive questo principio nel “Dialogo sui Massimi Sistemi del Mondo” quando parla della stiva di un grande vascello dove sono insetti e uccellini che volano al suo interno senza che si possa determinare dal loro volo se la nave è ferma o in moto su un mare tranquillo. Questo è il “Gruppo di Galileo”.

Alla fine del XIX secolo senza molto rumore ci si era accorti che le equazioni di Maxwell che descrivono l'elettromagnetismo e sono quindi alla base delle odierne telecomunicazioni, NON rispettano la simmetria di Galileo. Si ipotizzò che le equazioni valgono solo nel sistema di riferimento connesso rigidamente all'ETERE, e questo suscitava un certo imbarazzo perchè questo “mezzo luminifero” non si poteva mettere in evidenza in alcun modo. Lorentz ipotizzò che corpi in movimento si contraessero nella direzione della propria velocità, l'idea essendo che la forma di un corpo dipende dalle forze elettromagnetiche che tengono insieme le molecole e questo riconciliava la simmetria Galileiana con le equazioni di Maxwell. Questo però non portò ad alcuna formulazione consistente fino all'arrivo dell'impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna, Albert Einstein, che gettò nella spazzatura l'etere e formulò una teoria semplicissima, denominata Relatività (*speciale* per distinguerla poi dalla *generale*). La teoria è formulata in modo assiomatico sulla base di pochi principi, uno dei quali è difficile da accettare: *la luce viaggia alla stessa velocità nel vuoto rispetto a qualunque sistema di riferimento*. Questo era l'elemento chiave di rottura con Newton e Galileo. Le equazioni di Maxwell si trovano a loro agio nella nuova simmetria spazio temporale, che prevede che *anche il tempo si trasforma passando da un riferimento all'altro*. La meccanica dovette essere adattata al nuovo schema, ma per le velocità coinvolte sulla Terra o anche per i Pianeti le differenze erano trascurabili. Essenzialmente le correzioni sono proporzionali al quadrato del rapporto v/c , e dato che $c=300000 \text{ km/s}$ il rapporto per una macchina di FI è un misero $300 \text{ km/h} / 300000 \text{ km/sec} = \text{sec/h} / 1000 \sim 3/10000000$

che al quadrato fa 10^{-13} ... Però chiaramente i protoni a LHC vanno un pó piú veloci e la relatività è indispensabile.

Interazioni fondamentali

La Relatività (1905) non entrò subito nella ricerca di Fisica Atomica che dal 1913 si sviluppò a partire dal modello di atomo di Bohr e poi ottenne una formalizzazione molto precisa nella Meccanica Ondulatoria di Schroedinger e nella Meccanica Quantistica di Heisenberg, Born e Jordan, con la benedizione di Bohr (1925/26). La nuova teoria rende conto perfettamente della struttura dell'atomo, dei suoi livelli di energia e della sua interazione con la radiazione. Effetti finiti dalla Relatività trovarono una soluzione molto brillante nella teoria di Dirac che spianò la strada a una piena e consistente teoria quantistica/relativistica delle interazioni tra particelle elementari che culminò negli anni '60 nel cosiddetto Modello Standard associato ai nomi di Glashow, Weinberg e Salam. La teoria descrive le interazioni tra particelle di tipo elettromagnetico, deboli e forti ed è stata confermata con altissima precisione al LEP e all'LHC in epoche recenti. Il settore "forte" permette oggi di calcolare le masse di quelle che negli anni '50 venivano chiamate "particelle elementari", ma sono in realtà identificabili come stati legati di quarks, (up, down, strange, charm, top e bottom).



Quantizzazione dei campi

Qui posso solo veleggiare: i campi che descrivono le interazioni fondamentali tra quarks e leptoni sono “quantizzati”, seguono cioè le regole della Fisica Quantistica, incluso il famoso “principio di indeterminazione” di Heisenberg. Capire cosa è un campo quantizzato richiede una base di Fisica Teorica (III anno) più due anni di specialistica. Il trattato di Weinberg in due volumi è ... appena sufficiente! Dunque non insisto. Solo c'è da dire che la Gravità è assente da questa teoria così elegante e precisa - in realtà tanto elegante non è perchè contiene circa 16 parametri arbitrari da adattare agli esperimenti e questo di per sé ci dice che non è stato trovato il principio ultimo. Al contrario la teoria della Relatività Generale, formulata da Einstein nel 1915 alla fine di un periodo di gestazione durato almeno un paio d'anni, ha il pregio inestimabile di non contenere alcun parametro addizionale rispetto alla meccanica di Newton e all'elettromagnetismo, dunque G e c (costante di Newton che entra nella legge di attrazione universale $\frac{GMm}{r^2}$ e la velocità della luce).

Senza parametri liberi una teoria o è confermata dall'esperimento o è da buttare. Nelle parole di Richard Feynman,

*In general, we look for a new law by the following process: First we guess it. Then we – now don't laugh, that's really true. Then we compute the consequences of the guess to see what, if this is right, if this law that we guessed is right, to see what it would imply. And then we compare the computation results to nature, or we say compare to experiment or experience, compare it directly with observations to see if it works. If it disagrees with experiment, it's wrong. In that simple statement is the key to science. **It doesn't make any difference how beautiful your guess is, it doesn't make any difference how smart you are, who made the guess, or what his name is. If it disagrees with experiment, it's wrong. That's all there is to it.***

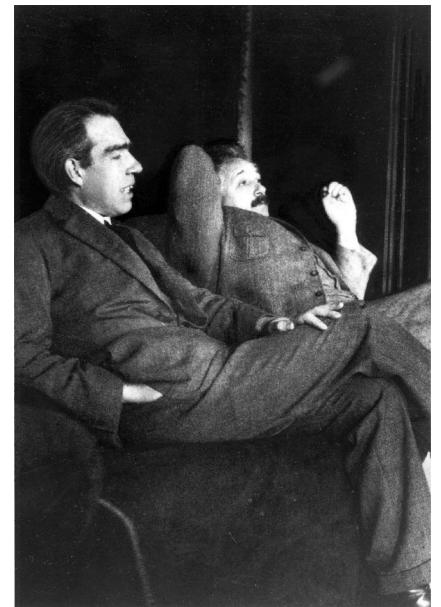
E l'esperimento confermò la nuova teoria di Einstein, effetti fini astronomici, deflessione dei raggi luminosi dalle stelle al passaggio radente sul Sole, "red shift" nella luce dalle stelle, etc. e oggi la RG è utilizzata dagli ingegneri per programmare il GPS! Anche per questo sarebbe necessario uno studio di anni, la "bibbia" ancora è il testo di Weinberg "*Gravitation and Cosmology*" oppure Thorne-Misner-Wheeler "*Gravitation*". MA, ma, la teoria non si riesce a quantizzare. Quello che mi chiedevi una volta, i "gravitoni" si possono considerare atomi di spazio-tempo? E' questa la grossa difficoltà, sappiamo ormai come quantizzare i campi che vivono **nello** spazio-tempo ma non sappiamo quantizzare **lo** spazio tempo. Da qui però non possiamo saltare alla conclusione che la Relatività Generale sia in contrasto con la teoria quantistica. Ancora non abbiamo evidenza di alcun tipo che esistano fenomeni gravito-quantistici. I fisici, tranne i fissati sulle teorie di stringa o simili (Rovelli ad esempio), si accontentano di avere due categorie di teorie con formulazioni differenti ma non in contrasto. E qui veniamo a un esempio di questa mancanza di contrasto, l'incontro di boxe tra Einstein e Bohr al Solvay 1927.

La discussione tra Bohr e Einstein

Conferenza Solvay 1927

A fine anni '40 un certo P.A. Schilpp, non noto per altre imprese se non per essere professore di filosofia nella Northwestern U. , Illinois, fu incaricato di raccogliere i contributi di un gruppo di qualificati fisici e filosofi per una raccolta in onore di Albert Einstein. In Italia la traduzione a cura di Boringhieri uscì nel '58 e uno studente dello scientifico Marconi investì i soldi ricevuti per il suo 17^o compleanno per acquistare il volume da una cartoleria di via Farini. Questo fatto gli indirizzò definitivamente l'orientamento per il futuro, no alla filosofia e sí alla Fisica! Il libro contiene soprattutto due contributi molto interessanti. Un lungo capitolo scritto dallo stesso Einstein e presentato come il proprio auto-necrologio

scientifico e un altro del suo amico-rivale Niels Bohr che con trattenuta soddisfazione riporta una animata discussione avvenuta con Einstein alla conferenza Solvay. In breve si tratta di questo. Einstein non ha mai digerito la formulazione accettata dai più riguardo la teoria dei quanti e ha più volte tentato di smontarne le basi filosofiche con esperimenti concettuali ben congegnati. L'ultimo in ordine di tempo, noto come EPR (da Einstein, Podolski and Rosen, gli autori dell'articolo su *Physical Review*) ha dato filo da torcere ai fisici per molti decenni, per essere alla fine quasi disinnescato dai lavori di un fisico irlandese attivo al CERN, John Bell. Ma il problema che Einstein sollevò al convegno Solvay riguardava il principio di Heisenberg. Se riesci a smontarlo, crolla tutta l'interpretazione della meccanica quantistica! Einstein immaginò un esperimento concettuale per mettere in crisi il principio di Heisenberg riguardo all'indeterminazione Energia-Tempo: se un processo coinvolge uno scambio di energia ΔE e avviene in un tempo ΔT allora si ha il vincolo $\Delta E \times \Delta T \geq \hbar$. L'indeterminazione posizione-velocità prevede invece che la misura di velocità e di posizione siano necessariamente affette da errori che devono soddisfare la disuguaglianza $m\Delta v \times \delta X \geq \hbar$. Einstein progetta una macchina diabolica che a suo parere scappa dalla relazione di Heisenberg. I dettagli li trovi sul capitolo che ti allego oppure su Wikipedia cercando "*Einstein Bohr debates*" e sarebbe lungo riprodurre qui. Fatto sta che il marchingegno era sottile. Con il trucco di Einstein si sarebbe potuto misurare con precisione arbitraria l'energia di una radiazione emessa e il tempo a cui il processo fosse avvenuto. L'arbitro diede il break e Bohr ebbe tutta la notte per pensarci. Il giorno appresso Bohr arrivò trattenendo la soddisfazione e smontò l'argomento di Einstein *facendo ricorso alla Relatività Generale!* Il massimo, utilizzare l'arma del rivale contro lui stesso. L'argomento consisteva nell'invocare il fatto che il tempo misurato da un qualunque orologio, per quanto preciso - non dipende dalla qualità dello strumento ma è una proprietà intrinseca del tempo - corre a un ritmo più lento se ci si abbassa a livelli di potenziale



gravitazionale più basso: in pratica due orologi identici uno al livello del mare e uno sulla cima del Monte Bianco vanno a ritmi differenti, sul Bianco l'orologio va più in fretta. Questo effetto, ovvero il "red shift", è stato verificato con grande precisione utilizzando orologi atomici. Ma nel caso di Bohr/Einstein era la questione di principio in ballo. Bohr fu così abile da mostrare che per misurare la variazione di energia bisognava pesare l'apparato in modo che l'energia emessa corrispondesse a una variazione di massa $\Delta E/c^2$ che avrebbe portato l'apparato, appeso a una molla come a una bilancia da fruttivendolo, a spostarsi nel campo gravitazionale. Questo spostamento porta a un'incertezza nel ritmo dell'orologio e a conti fatti la relazione di Heisenberg viene salvata, grazie alla Fisica di Einstein. 1:0 e palla al centro. Pochi anni più tardi Einstein emigrato a Princeton avrebbe fatto un altro tentativo, l'EPR, e lì non bastò una notte di meditazione. Bohr reagì immediatamente ma il suo articolo era così oscuro da lasciare tutti ammutoliti - una massima di Bohr, che io riporto nelle mie lezioni come citazione - era

*Non esprimerti mai in forma più chiara dei
tuoi pensieri*

Niels Bohr

*Pure mathematics is, in its way, the poetry
of logical ideas*

Albert Einstein

Morale: il principio di Heisenberg salvato dalla Relatività Generale. Quindi non vedo contrasto tra teoria dei Quanti e RG, e tuttavia permane il problema attuale della Fisica fondamentale di trovare una formulazione unificata che comprenda tutte le interazioni, compresa la Gravità.

Encl.: note sulla coerenza quantistica e l'esempio di Smolin (che non è suo)

Premessa: qui non parliamo di proprietà quali posizione e velocità di particelle ma di *spin* (polarizzazione nel caso dei fotoni). Gli elettroni sono dotati di un momento angolare intrinseco che non è riconducibile alla formula classica $\vec{x} \wedge \vec{p}$. Si tratta invece di una caratteristica intrinseca degli elettroni, e di altre particelle come protoni e neutroni. L'idea venne a Pauli per sistemare il modello di atomo e renderlo compatibile con il suo "principio di esclusione": due elettroni non possono stare nello stesso stato atomico, ma l'evidenza era che nello stato di energia minima (lo "stato fondamentale") dovevano starci in due (diciamo "congiunti"?)¹ e allora Pauli si inventò lo spin che può assumere giusto due valori $\pm \hbar/2$. A questo spin è associato un momento magnetico, come se l'elettrone oltre a essere una carica elettrica puntiforme fosse anche un micro circuito elettrico. Questo momento magnetico è sensibile ai campi magnetici e ciò si vede facilmente dalla radiazione emessa dagli atomi immersi in campi magnetici (vedi Wikipedia: *effetto Zeeman*). A questo punto si può organizzare l'esperimento (left/right wings). Si prende un fascio di elettroni come esce da un "cannone elettronico", la sorgente di elettroni nei vecchi tubi catodici. Questo fascio è costituito da elettroni con spin orientato in tutte le direzioni. Per l'esperimento occorre polarizzare gli elettroni utilizzando un dispositivo che indicheremo con



e verrà chiamato DST (dispositivo di Stern-Gerlach). Sono dei magneti conformati in modo da creare un campo magnetico non omogeneo. Un magnete è sensibile a un campo magnetico in due modi: ruota intorno alla direzione del campo come una trottola (giroscopio) e viene spinto dalla disomogeneità del campo. Il DST provvede a sdoppiare il fascio di elettroni, diciamo che gli spin diretti verso il basso vengono spinti verso il

¹ La manifestazione più evidente la dà l'atomo di elio in cui due elettroni stanno nello stato di energia minima ma sono dotati di spin opposti.

basso e viceversa. Quindi da un fascio non polarizzato con un DST possiamo crearne uno polarizzato bloccando la parte di fascio che si è spostata per esempio verso il basso. A questo punto abbiamo un fascio di elettroni con lo spin diretto verso l'alto $|up\rangle$.



Immaginiamo adesso di fare attraversare il fascio in un DST orientato non su/giù ma in direzione ortogonale. Rispetto a questa direzione gli elettroni polarizzati “up” si trovano in una sovrapposizione di spin destra/sinistra, una sovrapposizione indicata in mecc. quant. come “sovrapposizione coerente”

$$(|+\rangle + |-\rangle)/\sqrt{2}$$

e questo è prescritto dalla meccanica quantistica al capitolo “momento angolare”. Il simbolo $|\dots\rangle$ inventato da Dirac indica uno stato quantistico e al suo interno si può mettere qualunque etichetta per identificarlo. Il fascio viene separato dal DST in due, diciamo che il + va a sinistra e il - a destra. Se bloccassimo la metà del fascio di destra ci troveremmo un fascio polarizzato “sinistro”, ma se non operiamo alcun blocco e ricongiungiamo i due fasci, ad esempio con opportuni campi elettrici che non interferiscono con lo spin, i due semi-fasci così riuniti si ritrovano ad essere nello stesso stato di partenza, quello di spin $|up\rangle$.

Diciamo che si sono trovati temporaneamente metà polarizzati a sinistra e metà a destra, ma solo allo stato potenziale. Adesso un salto non banale. Si parla di *fasci* ma nella teoria quantistica il fascio può essere reso debolissimo, diciamo un flusso di un elettrone al secondo. Il discorso dello stato up/down si applica a ogni singolo elettrone, e ogni singolo elettrone è descritto da una funzione d'onda che si allarga nello spazio - bisogna pensare a una nuvola che si deforma e si allarga a due tronconi, quello di sinistra con spin orientato a sinistra e l'altro a destra. Il singolo elettrone si trova delocalizzato salvo poi ricomporsi nel caso NON si blocchi uno dei tronconi. Dunque se non si interviene sull'evoluzione dello stato ma lo

si lascia evolvere liberamente, vale la coerenza quantistica. L'elettrone si trova in una sovrapposizione quantistica parte in una stanza e parte in un'altra con spin orientati diversamente, ma se non si effettua una misura di posizione, per esempio non gli si fa attraversare un contatore di particelle, può essere ricomposto e ritrovarsi nello stato di partenza. L'esempio di Smolin a mio giudizio non serve a capire in cosa consiste il fenomeno, perchè in termini umani il fenomeno non si verifica; semmai aiuta a rendersi conto di come sia **CONTRARIO** all'intuizione quello che accade a livello subatomico, che, se tradotto in termini macroscopici, risulta palesemente assurdo.

BELL: ti ho spedito la relazione di un mio ex studente alla prova finale triennale. Non è profonda ma credo abbastanza informativa. La disuguaglianza di Bell si applica all'analisi della correlazione tra spin e costituisce una manifestazione in laboratorio dell'idea che uno stato quantico che si estende spazialmente su distanze macroscopiche senza essere disturbato introduce una correlazione a distanza che Einstein considerava contraria al requisito di località, ma se fosse vissuto fino a vedere gli esperimenti di Aspect avrebbe dovuto arrendersi e magari avrebbe avuto una buona idea per migliorare la nostra comprensione dei fatti. Nota che c'è correlazione tra eventi distanti, ma questo **NON** consente di inviare messaggi, questo sì sarebbe in contrasto con la causalità e con la Relatività .