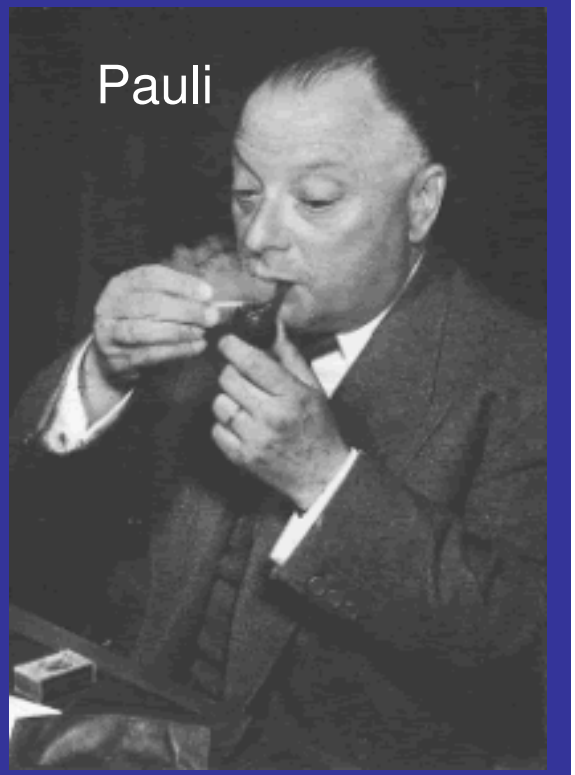
# Introduzione alla Meccanica Quantistica

Damiano Caprioli (SNS Pisa)

Comune e Biblioteca di Gorla Minore (VA)

# Il principio di esclusione

- Manca ancora un ingrediente fondamentale per capire la struttura atomica: fino a quanti elettroni possono popolare lo stesso orbitale?
  - È chiaro che se non ci fosse un limite, lo stato fondamentale di un atomo vedrebbe tutti gli elettroni nell'orbitale di energia più bassa




- Nel 1927 il fisico teorico austriaco W. Pauli formula il principio di esclusione che oggi porta il suo nome: *"Non possono esistere due elettroni con tutti i numeri quantici uguali"*
  - Quanti elettroni possono esserci in un orbitale definito da (n,l,m)?
  - Solamente 2: uno con spin Up e uno con spin Down
- Il principio di esclusione si applica a tutte le particelle che hanno spin semi-intero (detti fermioni) come elettroni, protoni, neutroni e neutrini che hanno spin 1/2, ma non a quelle con spin intero (detti bosoni), come i fotoni
- L'idea di Pauli fu osteggiata da molti, perfino da Heisenberg!

# La morte di una stella

- Quando una stella esaurisce tutto il combustibile (H ed He) a disposizione, la gravità tende a farla collassare , finché qualche altra forma di pressione riesce a stabilizzare la struttura
- Se la massa rimanente della stella è minore di 1.4 masse solari, si forma una nana bianca

  - È una stella piccola (delle dimensioni della Terra) e densa (un cucchiaino della sua materia pesa una tonnellata!) in cui la pressione è garantita dagli elettroni, grazie al principio di esclusione di Pauli
  - Un gas di particelle che non possono comprimere per motivi quantistici si dice degenere, e le sue proprietà sono state studiate da Fermi e Dirac
  - È destinata a raffreddarsi molto lentamente fino a spegnersi, lasciando un enorme cristallo, solitamente di C o di O
  - Sirio, la stella più luminosa del nostro cielo, che dista solo 8.6 anni luce da noi, ha una compagna (Sirio B) che è una nana bianca

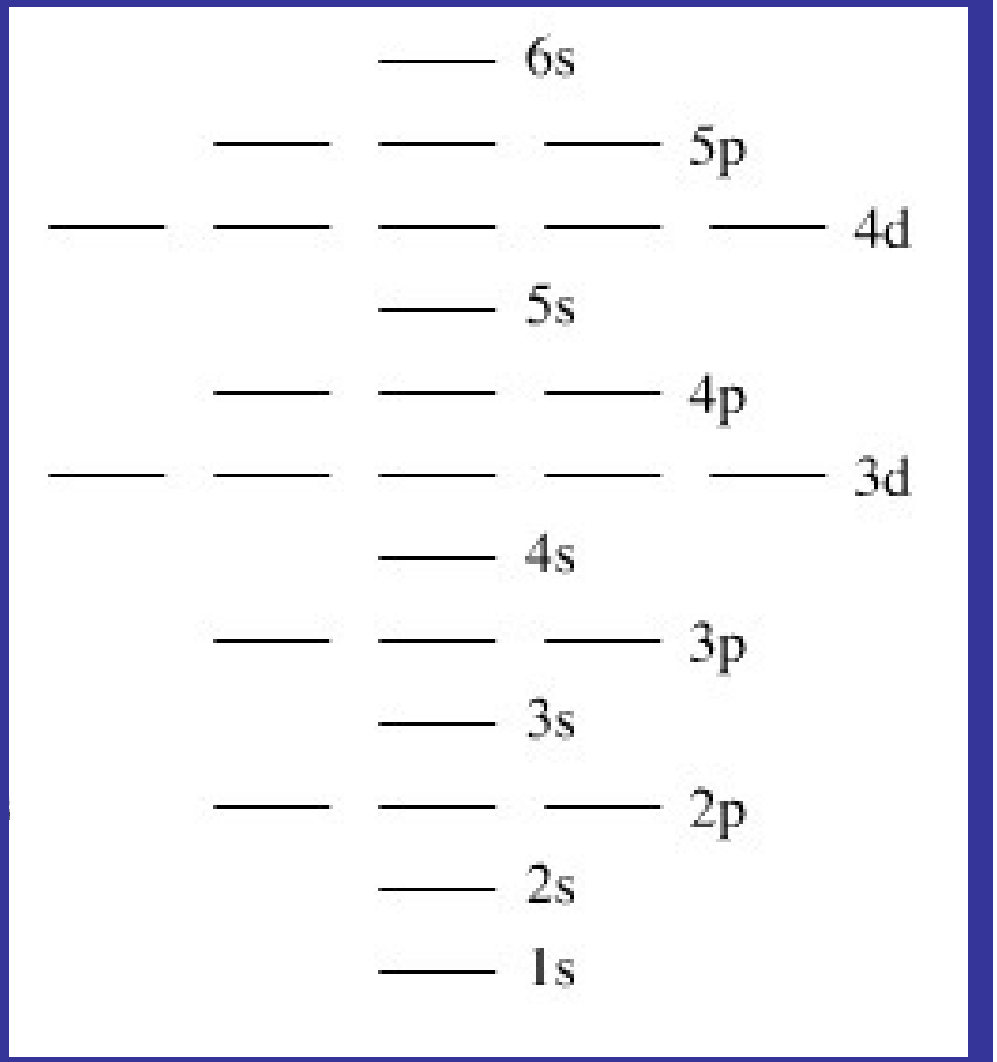
# Le stelle di neutroni

- Se la massa rimasta dopo l'esplosione è compresa tra 1.4 e 2-3 masse solari si forma una stella di neutroni, poiché la densità e le temperature sono così alte da favorire processi β inversi: $p+e^- \rightarrow n+\nu$
  - È una stella estremamente piccola (circa 6 km di raggio) e densa (circa 1 miliardo di ton al $cm^3$!) composta prevalentemente da neutroni degeneri
  - Può avere un campo magnetico enorme, e ruotare su sé stessa molto rapidamente, e allora si parla di una pulsar radio
- Il processo di neutronizzazione è rapido (circa 1 secondo): il risultato è una stella estremamente dura, su rimbalza tutta la materia che sta cadendo dando vita alla esplosione detta di supernova
  - Ma com'è possibile che la materia rimbalzi più in là di dove è partita?
  - Sono i tantissimi neutrini prodotti che aiutano a soffiare via gli strati esterni!

Nebulosa del Granchio

# Il contributo di più elettroni

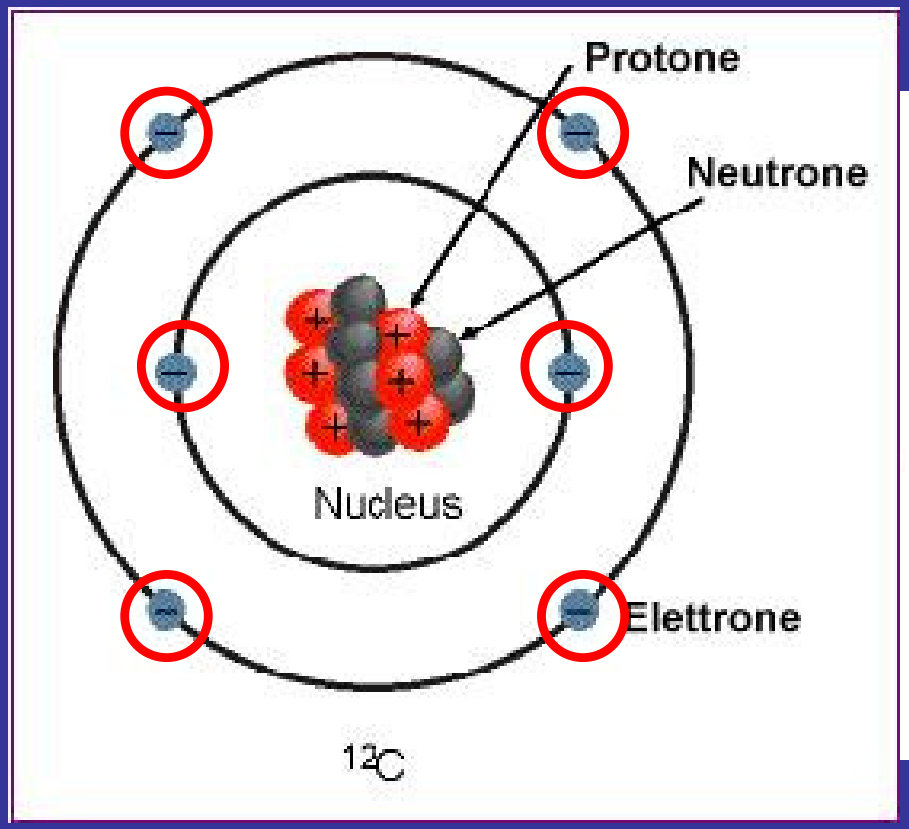
- Un atomo con più elettroni ha proprietà leggermente diverse, poiché ogni elettrone oltre al primo non sente solo l'effetto del nucleo, ma anche della nuvola elettronica
- La trattazione precedente, con il numero quantico n che indica i livelli energetici, vale solo per l'idrogeno:
  - Gli elettroni hanno un momento magnetico intrinseco, come se fossero delle piccole calamite (si può spiegare in termini di carica elettrica ruotante)
  - Maggiore è il momento angolare orbitante (maggiore è l), più forte sarà l'interazione magnetica
- È un effetto relativistico che prende il nome di interazione spin – orbita
  - Ci sono poi altri effetti che fanno dipendere l'energia anche da m…

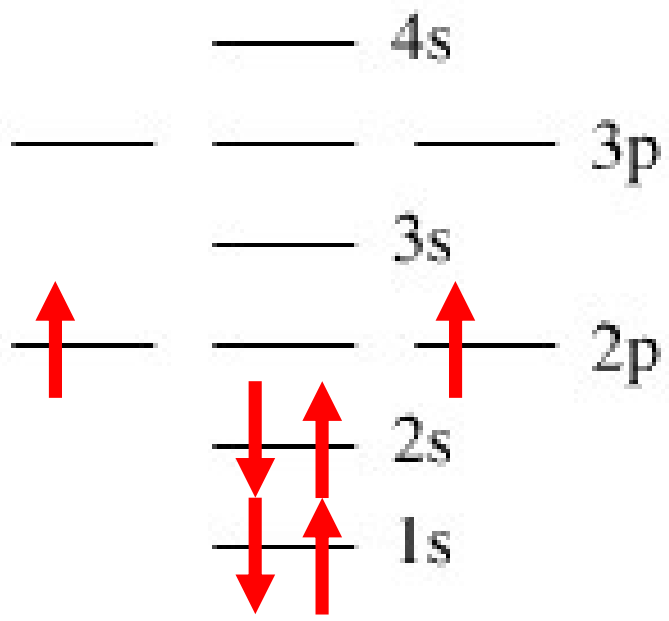



Corretta disposizione dei livelli energetici, con la notazione s (l=0), p (l=1), d (l=3), e, f, …

# Costruire un atomo

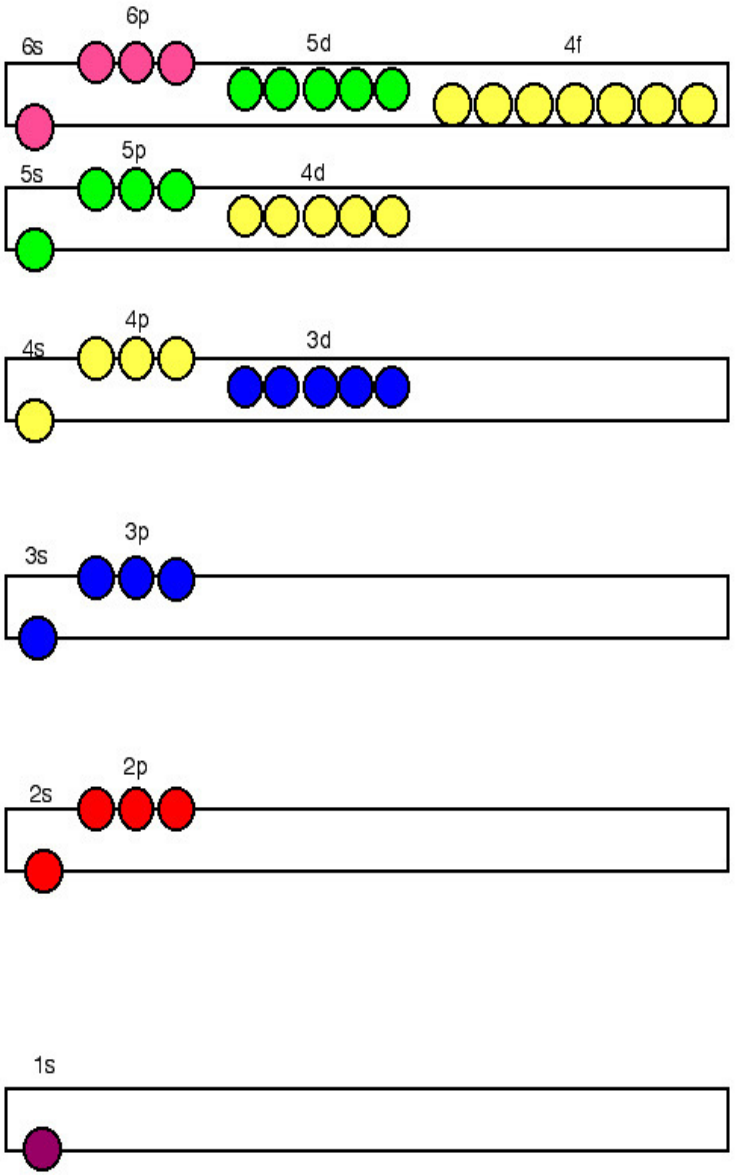
- Per capire come funziona la configurazione elettronica, proviamo a costruire l'atomo di carbonio con quanto visto finora
- L'atomo di carbonio ha un nucleo composto da 6 protoni e 6 neutroni, e ovviamente 6 elettroni

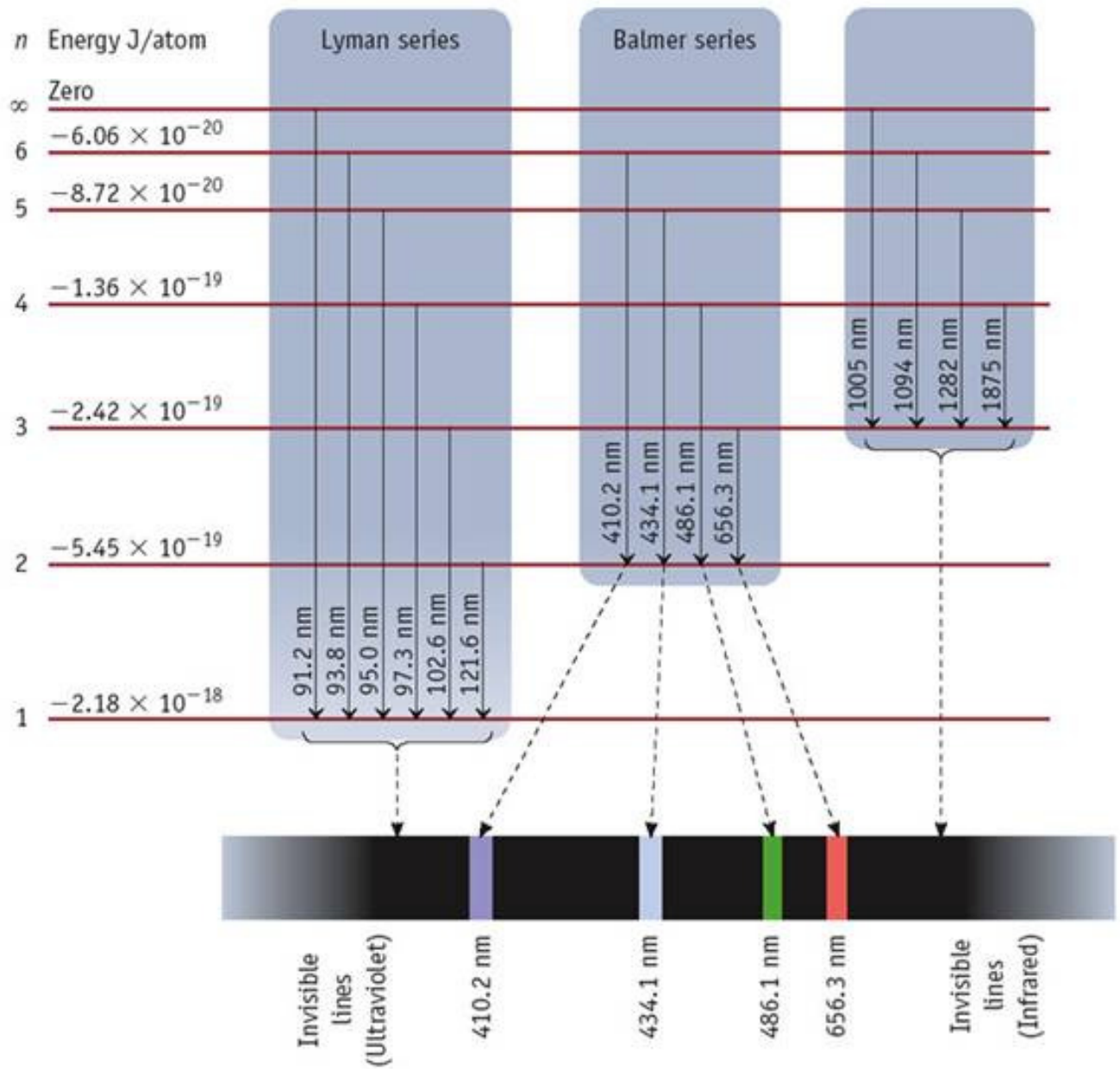



- Regola empirica di Hund: a parità di (n,l), un elettrone preferisce riempire un orbitale (n,l,m) vuoto (tipo delle persone che non si conoscono quando salgono su un treno con tutti gli scompartimenti liberi …)

# I livelli atomici




© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Livelli energetici e linee spettrali dell'atomo di idrogeno

# I colori

- I colori delle cose che vediamo dipendono dalla risposta degli atomi di cui sono fatte alla luce incidente
- Riflessione: alcune frequenze vengono riflesse, ovvero alcuni fotoni vengono assorbiti e subito riemessi con la stessa energia e direzione opposta, come uno specchio
  - Tipico dei metalli, che hanno un passo reticolare molto corto
- Assorbimento: alcuni fotoni vengono assorbiti, e riemessi a frequenze più basse
  - La differenza di energia va in calore
- Diffusione: alcuni fotoni vengono assorbiti e riemessi con la stessa energia, ma in direzione casuale, a 360°
  - Diffusione Rayleigh: luce su atomi di azoto, spiega il blu del cielo
  - Effetto Tyndall: luce su particelle di vapore acqueo, spiega la nebbia

Effetto Tyndall

# Altre emissioni

- Fluorescenza: è un processo che trasforma luce UV in luce visibile, e cessa non appena si spegne la sorgente
  - Un elettrone sale di parecchi livelli e scende velocemente ma "a gradini"
  - Molti minerali la presentano
  - Lampada di Wood, acqua tonica …
- Fosforescenza: è simile alla fluorescenza, ma l'elettrone finisce per trovarsi su un livello da cui non può scendere, a causa della conservazione del momento angolare. È necessario che salga ancora fino a un livello da cui una transizione è possibile. Dura a lungo.
  - Lancette orologi, ….
- Bioluminescenza: tipica di alcuni animali
  - Lucciole, alcune meduse, krill …

- Triboluminescenza: fenomeno innescato dalla rottura di un contenitore che contiene un isotopo radioattivo (es: $^{40}K$)
  - Bastoncini per la pesca o di emergenza

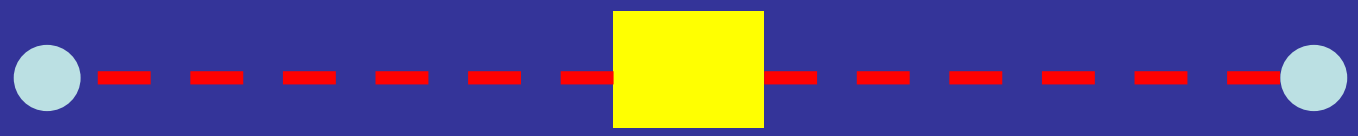
# La scatola di De Broglie

- La Meccanica Quantistica non fu accettata in modo indolore nemmeno da alcuni dei suoi fondatori, come Einstein, De Broglie, Heisenberg e Schroedinger
  - Nessuno però ha mai messo in discussione la sua efficacia nel predire i comportamenti fisici
- De Broglie, per esempio, suggerì il seguente esperimento mentale
  - Immaginiamo di avere un elettrone in una scatola ermeticamente chiusa
  - Supponiamo che, senza aprirla, si inserisca un separatore e che io porti metà scatola a New York
  - Se, ad esempio, apro la scatola di New York e vi trovo l'elettrone, posso dire che l'elettrone ha attraversato l'Atlantico viaggiando con me?

- La Meccanica Quantistica non segue il principio di realtà, il quale afferma:
  - *Esiste uno stato reale di un sistema fisico, che esiste oggettivamente e indipendentemente da qualsiasi osservazione o misura*

# Il paradosso EPR

- È la versione moderna del famoso paradosso enunciato da Einstein, Podolsky e Rosen nel 1935 contro la completezza della teoria dei quanti
- Supponiamo di avere una particella con spin totale $S = 0$, che decade in due particelle di spin ½, emesse in direzioni opposte



- Poiché lo spin totale si deve conservare, è necessario che una delle particelle prodotte abbia spin Up e l'altra spin Down
  - In linea di principio, dovrebbe bastare osservare lo spin di una delle due per predire il valore dello spin dell'altra
- Si potrebbe essere tentati di dire che lo stato fisico prima dell'osservazione è reale, e che è [ up + down ] oppure [ down + up ]
  - Però la Meccanica Quantistica prevede che lo spin totale per un sistema [ up + down ] oppure [ down + up ] lo spin totale possa anche essere $S=1$, per cui una misura sulla particella iniziale poteva anche dare $S=1$, contro l'ipotesi di partenza!
- La Meccanica Quantistica non è compatibile con una descrizione del mondo in termini di stati reali: si accontenta di fare previsioni probabilistiche sui risultati delle misure, che in fondo sono quello che conta

# Meccanica Quantisitca e Relatività

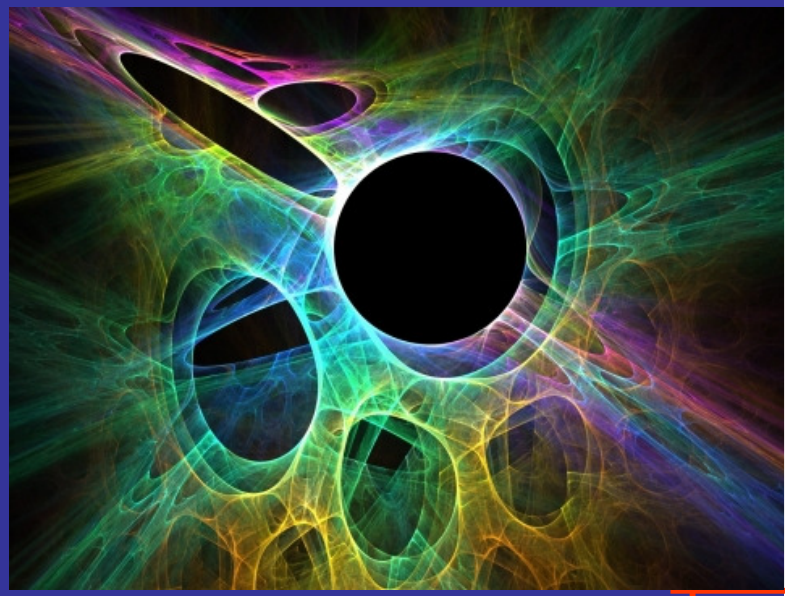
La Teoria della Relatività ristretta enunciata da Einstein nel 1905 assume:

- Il principio di assolutezza della velocità della luce:
  - Qualunque sia la loro natura, spazio e tempo devono essere costituiti così che *la velocità della luce sia la stessa in tutte le direzioni e indipendente dal moto di chi la misura*
- Il principio di Relatività:
  - Qualunque sia la loro natura, *le leggi della Fisica devono essere le stesse in ogni sistema di riferimento*
- Da qui discende che :
  - La velocità della luce nel vuoto è una velocità limite
  - Tempo e spazio sono concetti relativi
  - La simultaneità è un concetto relativo
  - Massa ed energia sono equivalenti

- Il fatto che la simultaneità non sia oggettiva implica che una misura A non può influenzare una misura B, dato che esiste sempre un osservatore per cui B accade prima di A, a sostegno dell'esistenza di stati reali
  - La Meccanica Quantistica non rispetta il principio di località

# La teoria quantistica dei campi

- È la generalizzazione della Meccanica Quantistica che include la Relatività speciale (ma non la Relatività generale)
  - Assume che il concetto fondamentale non siano le particelle, bensì dei campi estesi su tutto lo spazio e tutto il tempo
  - I trasferimenti di energia, che si possono vedere come delle particelle che trasportano una forza, sono quantizzati con la costante di Planck h
- Permette di unificare la forza elettromagnetica e la forza nucleare debole nella forza elettrodebole, ed entrambe con la forza nucleare forte, la Cromodinamica Quantistica
- I riscontri sperimentali di queste teorie in alcuni casi sono eccezionali
  - La relazione tra momento magnetico e spin, detto fattore giromagnetico, dell'elettrone si calcola con 12 cifre significative (misura di Bailey-Picasso, proposta da A. Zichichi)
- Restano ancora grossi dubbi matematici
  - Divergenze, masse e cariche infinite, …
- Manca l'unificazione con la forza di gravità
  - Grande Unificazione, Teoria delle Stringhe?



# Bibliografia

- Le presentazioni, in .pdf e in .ppt, si possono trovare sul sito
  - http://homepage.sns.it/caprioli

- Libri consigliati:
  - W. PAULI, *Fisica e conoscenza*
  - W. HEISENBERG, *Fisica e filosofia*
  - G. GAMOW, *Trent'anni che sconvolsero la Fisica*
  - G. GAMOW, *Le avventure di Mr. Tompkins*
  - R. GILMORE, *Alice nel paese dei quanti*
  - R. GILMORE, *Il quanto di Natale*
  - C. BRUCE, *I conigli di Schroedinger* (teorie alternative alla MQ classica)
  - A. FROVA, *Luce, colore, visione*
  - R. FEYNMAN, *QED* (divulgativo sulla teoria dei campi)
  - J.J. SAKURAI, *Meccanica quantistica moderna* (libro di testo sulla MQ)