

# LA TEORIA `STANDARD` DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

AD Polosa



# BREVE SOMMARIO

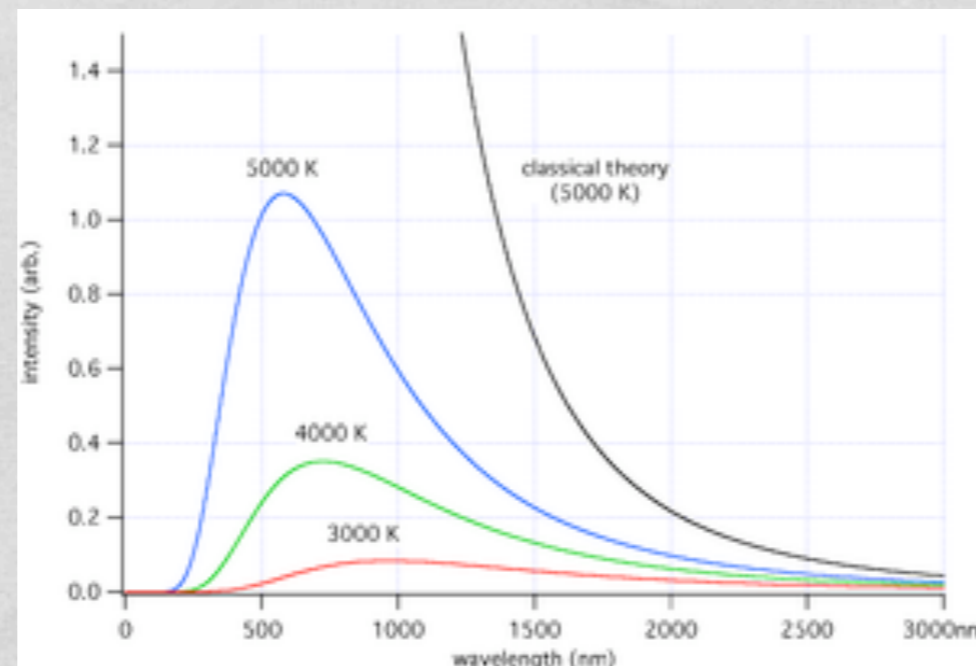
- Numeri e Dimensioni
- Prevedere l'insorgenza di fenomeni nuovi
- Superconduttività ed il bosone di Higgs
- Il Bosone di Higgs e l'attesa di fisica nuova



# PROLOGO

## 1900, LA RIVOLUZIONE DEI QUANTI

- Problema: Radiazione da corpi incandescenti e ‘catastrofe ultravioletta’



Il problema nasce dall'uso del principio classico di equipartizione della energia per la descrizione della radiazione di corpo-nero a una certa temperatura  $T$ .

il numero di *modi di oscillazione* del campo em in una cavità *tridimensionale* è proporzionale al quadrato della frequenza



# PROLOGO

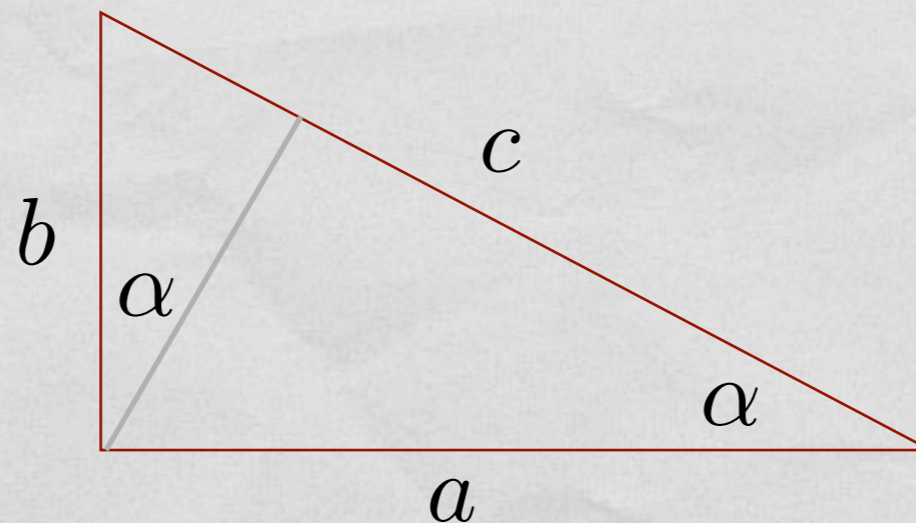
## 1900, LA RIVOLUZIONE DEI QUANTI

- **Planck:** la radiazione puo` essere emessa solo in pacchetti con energia  $\mathcal{E} = h \nu$ .  $h$  e` una nuova costante fondamentale della natura.
- **Einstein:** non solo i corpi incandescenti emettono la radiazione in pacchetti di energia ma, in *generale*, la radiazione consiste in *multipli della energia di Planck*: tutto cio` che oscilla esiste in dati pacchetti di energia.
- **De Broglie:** tutto cio` che ha energia ha anche una data frequenza di oscillazione (per es. una palla da calcio!).
- **Shrodinger:** trasforma l'ipotesi di De Broglie in equazioni matematiche.
- **Bohr:** l'intepretazione di Copenhagen ...



# ANALISI DIMENSIONALE

Supponiamo di non sapere nulla di geometria.  
Tuttavia possiamo asserire che l'area del triangolo rettangolo in figura e'



$$\sim c^2 f(\alpha)$$

ma allora

$$c^2 f(\alpha) = b^2 f(\alpha) + a^2 f(\alpha)$$

ma questo, semplificando  $f$ , e' il teorema di Pitagora!



# ELECTRONVOLT

L' *electronvolt* e' una misura di energia:

e' l'energia cinetica che guadagna un singolo elettrone quando viene accelerato da una differenza di potenziale (una pila) di un Volt

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

... potenze di dieci

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$



# QUANTO E' GRANDE UN ATOMO?

$$\hbar \simeq 6.6 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{sec}$$

$$c \simeq 3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$e^2 / 4\pi\hbar c \equiv \alpha \simeq 1/137$$

La taglia caratteristica di un atomo (raggio di Bohr) si ottiene dalle masse misurate di e,p e dalle costanti fondamentali

$$m_e \simeq 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p \simeq 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$a_B = \hbar / (m_e c \alpha) = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$$



# QUANTO E' GRANDE IL NUCLEO DI UN ATOMO?

La legge di proporzionalita` fra il volume della materia nucleare ed il numero di particelle  $A$  e` espressa dalla relazione

$$R = r_0 \times A^{1/3}$$

Facendo diffondere elettroni penetranti da atomi si e` trovato che

$$r_0 \simeq 1 \times 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$

leggi 'un Fermi'



# QUANTO E' GRANDE UN ELETTRONE?

La **'auto-energia'** di un elettrone sferico di raggio  $r$  (cfr potenziale di Coulomb) deve essere minore della sua energia a riposo

$$\mathcal{E} = e \times \frac{e}{4\pi r} = \frac{e^2 \hbar c}{(4\pi \hbar c) r} = \frac{\alpha}{r} \hbar c \lesssim m_e c^2$$

... ma allora

$$r \gtrsim 3 \text{ fm}$$

**Un singolo elettrone è più grande di un intero nucleo atomico con  $A \sim 27$  !!**



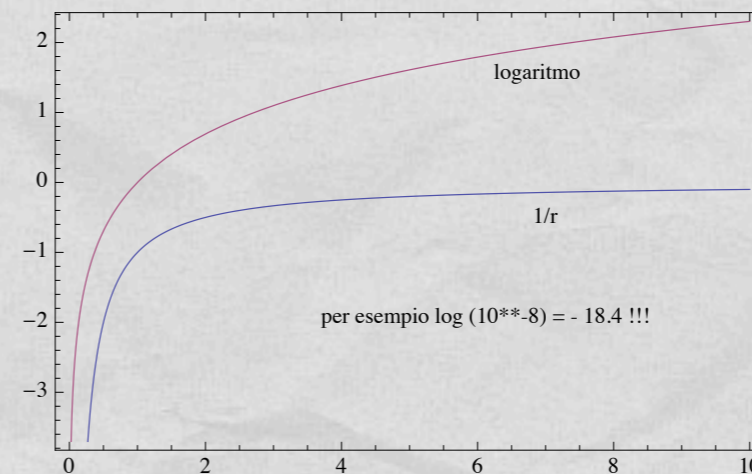
# NUOVA FISICA ENTRO

$$\mathcal{E} \lesssim m/\alpha \simeq 68 \text{ MeV}$$

C'è qualcosa che non va: deve esserci un qualche meccanismo fisico che eviti questo problema.  
Invero c'è fisica nuova: esiste un gemello dell'elettrone ma con carica opposta: il **positrone (e+)**...

Assodata l'esistenza del positrone, la teoria che descrive le interazioni di elettroni & positroni & fotoni permette di mostrare che l'**autoenergia** dell'elettrone alle piccole distanze non cresce come  $1/r$  ma *\*solo\** come

$$\sim \ln \left( \frac{mc}{\hbar} r \right)$$



Contributi all'energia di questo tipo sono più piccoli della massa dell'elettrone anche alla lunghezza di Planck ...  
... cos'è la lunghezza di Planck?



# LUNGHEZZA DI PLANCK

La forza fra due masse:

$$F = G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$m^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$

Si puo' costruire allora un'altra scala di lunghezza (esercizio)

$$G_N \simeq 6.7 \times 10^{-45} \hbar c \left( \frac{c^4}{\text{MeV}^2} \right)$$

$$\ell = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}} \simeq 1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$$



# NUOVA FISICA

Nel lentissimo percorso verso la lunghezza di Planck, di nuova fisica se ne è già scoperta tanta: interazioni deboli (radioattività) ed interazioni forti (coesione nucleare). Si sono scoperte moltissime

## **nuove particelle**

(ricordate il caso del positrone) che regolano e partecipano a queste interazioni.

L'origine di una delle loro caratteristiche più evidenti e tangibili, *la massa*, è motivo di grande studio.

L' LHC permetterà di scendere a distanze come

$10^{-19}$  m ... e fin qui l'elettrone è puntiforme

**C'è nuova fisica a queste scale? Perché si ha motivo (e speranza) di crederlo? Si può imparare qualcosa sulla origine delle masse scendendo a tali distanze?**



# FORZE E PARTICELLE

**Lo scambio di una particella puo` produrre una forza!**

Due particelle che interagiscono attraverso lo scambio di una particella (scalare) di massa  $m$  si attraggono secondo:

$$\mathcal{E} = -\frac{e^{-\frac{mc}{\hbar}r}}{4\pi r}$$

**Attrazione = abbassare la propria energia stando piu' vicini**

**Repulsione = abbassare la propria energia stando piu' lontani**



# NEWTON E COULOMB

Come mai la forza gravitazionale di Newton e quella elettrica di Coulomb obbediscono entrambe alla legge

$$\frac{1}{r^2}$$

...perche' sono **mediate** da particelle **senza massa**

n.b. per 'esperti' ... la forza e' il gradiente della energia potenziale ...



# SUPERCONDUTTIVITA`

Alcuni materiali in particolari condizioni (basse temperature) conducono la corrente elettrica senza resistenza alcuna.

- Il materiale non tollera neanche la piu` piccola differenza di potenziale (che verrebbe immediatamente neutralizzata da una corrente elettrica)
- Analogamente anche i campi magnetici sono estromessi dal materiale (questi indurrebbero delle correnti che non incontrando resistenza neutralizzerebbero il campo magnetico all'interno del materiale)

... il rotazionale del campo elettrico si oppone alla variazione di campo magnetico

All' interno di un superconduttore i campi elettromagnetici hanno un **raggio di azione finito** ... come se il **fotone**, mediatore della interazione elettromagnetica, avesse **massa!**



# BOSONI



I bosoni sono particelle a cui piace fare in massa la stessa cosa: in particolare sono propensi a '**condensare**' nello **stato** ad **energia piu` bassa possibile**. Assomigliano agli italiani ...

In questo stato si possono ancora muovere ma non gli si puo` cavare piu` nessuna energia (energy gap).

Le supercorrenti che fluiscono **senza resistenza** nei superconduttori sono trasportate da bosoni (coppie di Cooper)



# LA GENERAZIONE DELLE MASSE

‘Il meccanismo di Higgs e’ come il partito comunista: controlla le masse’\*

l’Higgs non lo abbiamo ancora visto, e quanto al partito comunista ... non ce n’è piu’ traccia ...

L’idea e` che lo spazio vuoto sia una specie di *superconduttore* in cui le supercorrenti sono trasportate da certi bosoni elementari che chiamiamo bosoni di Higgs  
(Brout-Englert-Kibble)

**I campi elettromagnetici-deboli hanno un raggio di azione finito:  
i mediatori della forza elettrodebole acquistano massa**

\* da Gian Giudice



# IL VUOTO

`Every manifestation, no matter how fantastic, has its *chance* of reality`\*

... **non tanto vuoto!!** ... come abbiamo già detto brulica di bosoni di **Higgs**  
**ma non solo** ...

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar$$



per breve tempo 'prende in prestito' dal vuoto energia per fare e-e+

\* da Kerson Huang



# IN-NATURALEZZA I

Il vuoto quantistico ribolle di particelle di vita brevissima: il bosone di Higgs interagisce con le particelle con intensità proporzionale alla loro massa (alla loro virtualità). A causa di queste interazioni l'Higgs dovrebbe 'riscaldarsi' fino alla massima energia accessibile alle particelle del vuoto

$$\delta m_H^2 \propto C \times \Lambda^2$$

**Si hanno però forti indizi che l'Higgs sia 'innaturalmente' leggero**

$$m_H \approx 100 \text{ GeV}$$

mentre se si usa come energia massima l'energia di Planck (*~1l usa la legge di Planck*) ...

$$\Lambda \sim 10^{22} \text{ MeV}$$

[...]



# IN-NATURALEZZA II

... allora dovrebbe succedere che

$$C \sim 10^{-34}$$

e questo significherebbe che il contributo delle varie particelle virtuali al 'riscaldamento' dell'Higgs a 'varie temperature' deve cospirare in modo assai preciso per fare una cancellazione (raffreddamento) di una parte su  $10^{34}$

**oppure**

come si è scoperto il positrone, così apparirà altra nuova fisica: nuove particelle. Si pensa /*calcolo di  $C \sim 3 \cdot 10^{-2}$* / che l'equazione

$$\delta m_H^2 \propto C \times \Lambda^2$$

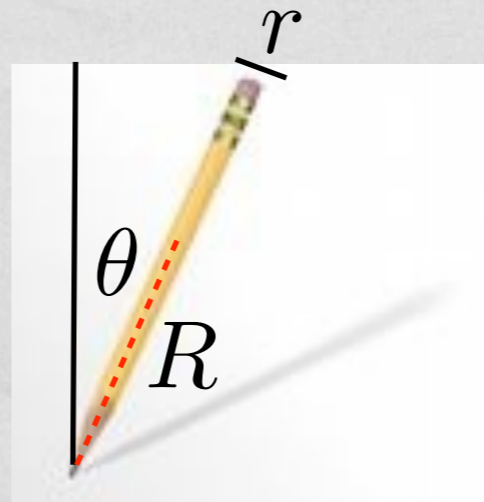
possa quindi considerarsi valida solo solo fino a circa

$$\Lambda \sim 10^6 \text{ MeV} \equiv 1 \text{ TeV} \dots \text{LHC!}$$



# 'FINE TUNING'

e' come tenere in bilico una matita sulla sua punta ...



$$R \sin \theta \simeq R\theta \lesssim r \Rightarrow \theta \lesssim \frac{r}{R}$$

se  $r=1\text{ mm}$  e  $R=\text{diametro del sistema solare}$ , serve che  $\theta$  sia  $10^{-19}$  rad



# OPPURE NO ?

... infondo viviamo in un mondo in cui il sole e la luna hanno un raggio e una distanza dalla terra tali che, con una stupefacente precisione, sembrano dischi uguali nel cielo ...  
si pensi alle eclissi ...

**Perche' e' cosi`? ... e' cosi` e basta!**

E' giusto pensare che il '*fine tuning*' descritto sia **innaturale** e debba quindi **necessariamente** intervenire fisica nuova??





# COME SI VEDE L'HIGGS?

Abbiamo detto che:

- \*\* lo spazio vuoto brulica di bosoni di Higgs.  
*e quindi siamo immersi fra loro!*
- \*\* non possiamo averne una visione 'diretta',
- \*\* ... ma ne vediamo le **conseguenze: il nostro mondo**

**Vogliamo però 'vedere' l'Higgs e per questo si è costruito l'LHC ...**

**Con LHC si vuole eccitare** tutti questi Higgs intorpiditi nello stato di minore energia possibile, che altrimenti sono invisibili.

*'Sara' come soffiare vento su un campo di grano e guardarlo da lontano. Non vedremo le singole spighe muoversi nel vento ma vedremo grandi onde propagarsi lungo il campo'\**

\* Gerard 't Hooft



# CONCLUSIONI

- LHC ci dirà dell'Higgs e sperabilmente di molto altro ...
- Probabilmente il modello standard è solo una descrizione approssimata del nostro mondo. Ma fino a che scala di distanza/energia?
- ... fra un anno sapremo







... E QUAL'E' POI LA MASSA  
DELL' HIGGS?

... 70 KG ... CIRCA! (MVELTMAN)



# LETTURE CONSIGLIATE

- Gerard 't Hooft :: *In Search of the Ultimate Building Blocks* :: Cambridge 1997
- Kerson Huang :: *Fundamental Forces of Nature - The Story of Gauge Fields* :: World Scientific 2007
- Sam Treiman :: *The Odd Quantum* :: Princeton 1999
- Gian Giudice :: *Naturally speaking* :: arXiv:08012562
- Richard Feynman :: *QED* :: Adelphi