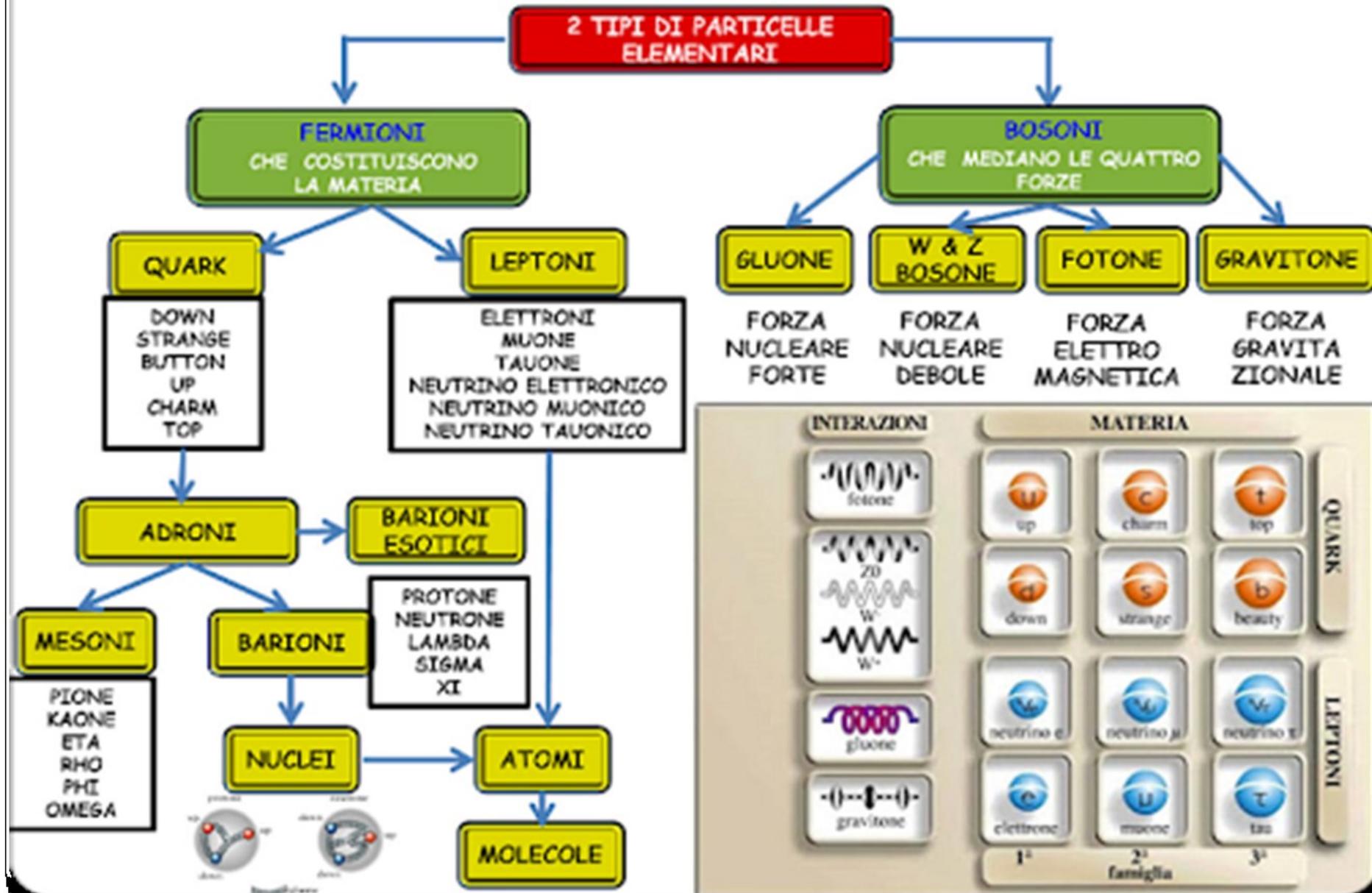


IL BOSONE DI HIGGS

Secondo il «MODELLO STANDARD» ogni particella e forza esistente in natura viene ridotta a poche elementi costitutivi fondamentali:



RIASSUNTO DEL RIASSUNTO...

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

PERCHE' COSI GRANDI DIFFERENZE NEL VALORE DELLE MASSE

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

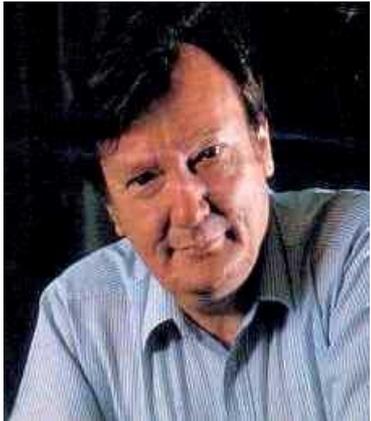
Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon		0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon		0

Siamo così al punto di partenza: per spiegare almeno una parte del tutto sono necessari sei quark (u, d, s, c, b, t) e le relative antiparticelle, sei leptoni (elettrone, mu e tau più tre tipi di neutrini) e le relative antiparticelle, più tutta la schiera dei vettori di campo (bosoni), la teoria che ha permesso di descrivere con correttezza queste particelle e le loro interazioni si chiama **MODELLO STANDARD**. Non è proprio possibile restringere ulteriormente il campo, e spiegare il tutto con un numero minore di personaggi?



Carlo Rubbia

Lo stesso Modello Standard presenta delle lacune, essendo per esempio incompatibile con la Relatività Generale di Einstein. Qualcuno ha provato allora ad andare oltre, proponendo teorie più o meno complesse. Quella che fino ad ora ha avuto più fortuna è stata la teoria delle SUPERSTRINGHE.

L'incompletezza del Modello Standard

- Nonostante i suoi enormi successi, il Modello Standard non è del tutto soddisfacente
 - Vi sono ben 19 parametri liberi di cui non è data spiegazione: le masse di quarks e leptoni, la forza degli accoppiamenti...
 - Non è data alcuna spiegazione della interazione gravitazionale
 - La teoria soffre di problemi di autoconsistenza
 - Non è spiegata l'asimmetria fra materia e antimateria nell'universo
 - Nemmeno la materia oscura dell'universo vi trova spiegazione
- Cosa c'è oltre ?
 - GUT, teorie che cercano di unificare la QCD con le interazioni elettrodeboli e la gravità ipotizzando nuove simmetrie
 - Supersimmetria: una ipotizzata simmetria fra particelle a spin $\frac{1}{2}$ (leptoni e quarks) e particelle a spin intero (bosoni vettori).
Implica l'esistenza di un "superpartner" per ogni particella elementare conosciuta
 - Superstringhe: le particelle elementari sono stringhe vibranti in un mondo a 10 dimensioni
 - Leptoquarks, technicolor, large extra dimensions, preoni...

Quali problemi rimangono?

Il Modello Standard permette di risolvere molti dei problemi sulla struttura e la stabilità della materia con i suoi sei tipi di quark, sei tipi di leptoni, e quattro tipi di forze.

Ma il Modello Standard lascia aperte molte altre questioni:

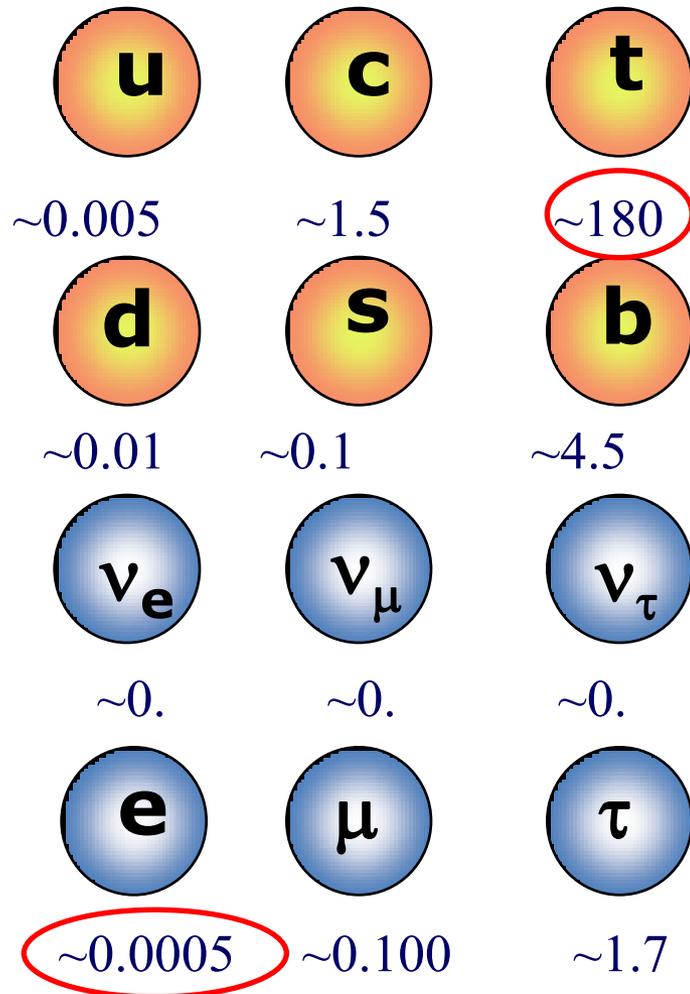
- Perché ci sono tre tipi di quark e di leptoni per ciascuna carica?
- C'è qualche regolarità nella distribuzione delle loro masse?
- Ci sono altri tipi di particelle o forze ancora da scoprire con acceleratori più potenti?
- I leptoni e i quark sono davvero fondamentali, o hanno anche loro una struttura interna?
- Come possiamo includere nel modello anche l'interazione gravitazionale?
- Quali particelle costituiscono la materia oscura dell'universo?

Ma innanzitutto il quesito.....



Da dove viene la massa delle particelle fondamentali?

Massa (GeV)



<u>Le particelle forza</u>	Massa
g gluoni (8)	0
γ fotone	0
W^+, W^-, Z bosoni	80/90 GeV

Il modello standard non predice le masse delle particelle.

I valori delle masse sono stati misurati sperimentalmente

Da dove viene la massa delle particelle composte (adroni)?

Il protone e' composto da 3 quark: **uud**

La somma delle masse dei quark **uud** e' molto piu` piccola dalla massa del protone:

$$m_{up} + m_{up} + m_{down} \neq m_{protone}$$

$$0,005 + 0,005 + 0,01 \neq 0,938 \text{ GeV}/c^2$$

La differenza di massa e' dovuta alle interazioni tra i quark. Anche se *in teoria* si sanno calcolare queste interazioni, in pratica non si riescono ad ottenere le masse degli adroni.

Idea chiave:

Nel Modello Standard le particelle non hanno massa.

Consideriamo il quark top e l'elettrone:

Il quark top pesa oltre 300.000 volte piu`dell'elettrone.

ma.....

**Secondo il modello standard entrambe hanno massa nulla!
invece**

Sembrano che abbiano massa perche` si muovono (con fatica)
interagendo con il campo immaginato da Higgs e company

La massa e' una proprieta' che viene acquisita attraverso
l'interazione con il bosone di Higgs:le particelle sembrano
avere massa perche` interagiscono con il bosone di Higgs e
diventano piu` difficili da spostare.

Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

Il Modello Standard lasciava aperta ,tra le molte altre questioni,la domanda:
da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?

L'idea di [Higgs-Brout-Englert-Guralnik-Hagen-Kibble](#) era abbastanza semplice.

Di fronte ai numerosi tentativi di capire l'origine della massa, Higgs e gli altri redassero un articolo in cui descrivevano come nella fisica teorica ci fosse ancora posto per un nuovo tipo di campo.

Il nuovo campo, che sarebbe andato ad aggiungersi a quelli già noti, come il campo gravitazionale e quello elettromagnetico, [sarebbe apparso](#) durante il raffreddamento della palla di fuoco nata con il Big Bang e destinata a trasformarsi nel nostro Universo;

l'interazione con questo campo avrebbe conferito ad alcune particelle un'inerzia da cui sarebbe poi derivata quella proprietà che oggi chiamiamo **massa**.



Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?

Inizialmente l'articolo fu rifiutato dalla redazione della rivista «Physics Letters» come «privo di un'evidente rilevanza fisica». Higgs e gli altri lo riscrissero, cercando di dare all'idea un'applicazione concreta, e suggerirono che il campo potesse avere a che fare con la forza che teneva insieme i costituenti del nucleo; anche così, però, questa ipotesi non sembrava avere una grande utilità.

Poi, però, arrivarono Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Abdus Salam, che cercarono di unificare la forza elettromagnetica con la forza nucleare debole.

La teoria delle forze elettromagnetiche, nota come elettrodinamica quantistica, e la teoria della forza «debole», responsabile di alcuni tipi di radioattività e della fusione nucleare all'interno del Sole, sembravano due facce di una stessa medaglia

Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?

Weinberg e Salam dimostrarono che le cose stavano proprio così e le unificarono in un'unica teoria «elettrodebole».

C'era però un problema: la nuova teoria aggiungeva al cosiddetto zoo delle particelle due oggetti che nessuno aveva ancora mai osservato: i **bosoni W e Z** (un bosone = particella che trasmette una forza).

<u>Le particelle forza</u>	Massa
g gluoni (8)	0
γ fotone	0
W⁺, W⁻, Z bosoni	80/90
	GeV

Il fatto piuttosto imbarazzante era che queste particelle erano dotate di massa. Doveva esserci qualcosa di sbagliato: il bosone più famoso, infatti, è il fotone, che trasmette l'interazione elettromagnetica, **e il fotone è privo di massa.**

Se nella teoria unificata il fotone e i bosoni W e Z, avevano compiti simili, dovevano essere legati da qualche tipo di «simmetria».

Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?

Il fatto che di questa simmetria non ci fosse traccia spinse i fisici a sospettare che venisse infranta da qualcosa, proprio come l'aggiunta di un grosso peso a una bilancia da cucina perfettamente calibrata ne rovinerà la taratura.

Ma da dove veniva quel peso?

Cosa ha provocato questa rottura della simmetria iniziale

Era a questa domanda che il campo di Higgs si proponeva come risposta

Alla fine del 1967 il campo di Higgs era stato incorporato da Weinberg e Salam nella teoria elettrodebole, e nel 1983, come sappiamo, i bosoni W^\pm e Z^0 furono osservati al CERN da Rubbia, proprio come avevano previsto gli autori della teoria del Modello Standard.

A quanto pareva, l'odissea della fisica delle particelle si poteva ritenere conclusa in modo soddisfacente..

Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?

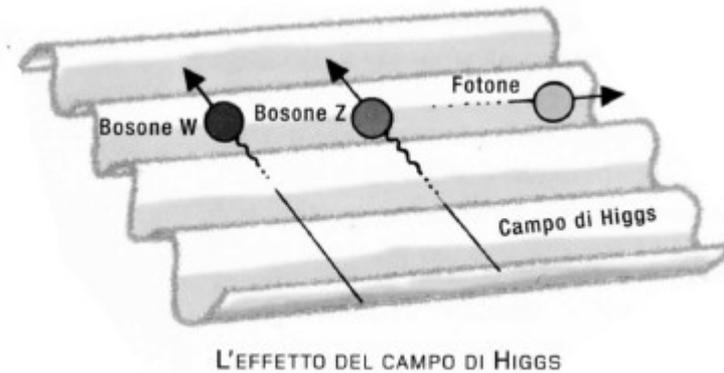
Si può immaginare il campo di Higgs in tanti modi; ad esempio, pensare a far scorrere un dito lungo una delle scanalature di una lastra di metallo ondulato.

Nel modello standard è quello che succede ai bosoni W e Z.

Mentre il fotone si muove sempre seguendo le scanalature del campo di Higgs, le altre due particelle si muovono nella direzione perpendicolare, incontrando una resistenza che si traduce in una massa.

Per dimostrare che il campo di Higgs conferisce realmente all'Universo una «venatura» direzionale, che fa sentire il suo effetto sui bosoni W e Z e sui fermioni ma non sul fotone, c'è solo un modo:

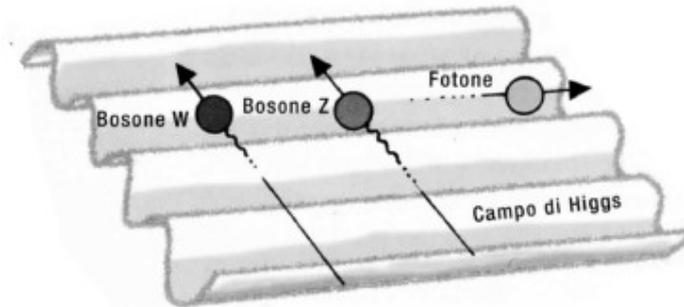
trovare la particella associata a quel ' campo '.



Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?

Ogni campo ha la sua particella associata.
Il campo elettromagnetico ha il fotone, quello gravitazionale il gravitone (che però nessuno ha ancora mai osservato) e l'interazione forte è mediata dai gluoni.



L'EFFETTO DEL CAMPO DI HIGGS

IL modello standard ha permesso di predire l'esistenza di particelle che poi sono sempre state trovate (a parte il bosone di Higgs - almeno fino al 2012), e in molti casi la teoria ha indicato anche con precisione dove andare a cercarle.

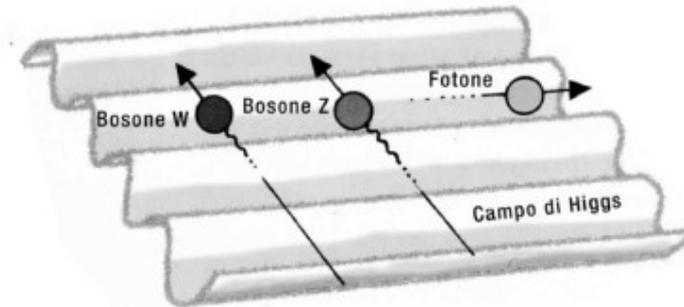
Il modello standard non permette di prevedere tutto sulla natura ed il comportamento delle particelle .

Ne è un esempio il fatto che ventisei delle sue costanti fondamentali debbano essere misurate sperimentalmente per poi essere inserite nelle equazioni,,

Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?

Per trovare alcune particelle, poi, è stato necessario procedere per tentativi. Tra la previsione dell'esistenza del quark TOP, una delle particelle fondamentali, e la sua effettiva scoperta, sono passati vent'anni.



L'EFFETTO DEL CAMPO DI HIGGS

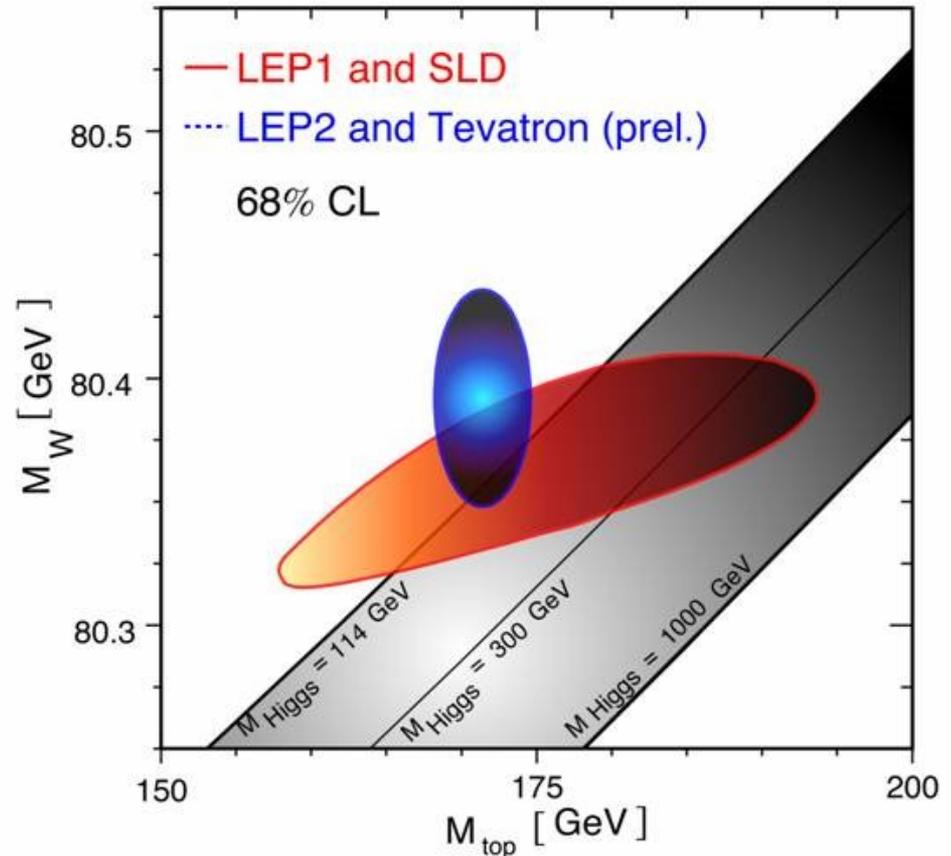
Una delle ragioni è che la teoria non dava alcuna indicazione sulla regione di massa da esplorare (alla fine lo si è trovato a 175 GeV).

Purtroppo, con il bosone di Higgs si era nella stessa situazione. Avrebbe dovuto essere da qualche parte, ma nessuno sapeva realmente dove. E così si è continuato a costruire acceleratori di particelle sempre più grandi, con la speranza di individuare prima o poi l'energia giusta per verificarne l'esistenza.

Il modello standard non permette di prevedere tutto sulla natura e comportamento delle particelle .

All'inizio Cosa si sapeva dell'Higgs (& company) ?

- Sapevamo molte cose:
 - Come può essere prodotto
 - Con che frequenza
 - Come decade e con che probabilità
- Ma **non** quale massa avesse!
 - La massa del bosone di Higgs dipende da altri parametri del Modello Standard in maniera molto debole
 - Tuttavia, misurando con precisione tutto il resto, abbiamo una buona indicazione di quale può essere la sua massa



Ciò permetteva di prevedere che si era vicini a scoprirlo!

Il bosone di Higgs. cos'è



- E' la conseguenza osservabile del meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole
 - Non esistono altri meccanismi consistenti con il modello standard per spiegare la massa dei bosoni vettori
- Ipotizzato più di quarant'anni fa, è stato osservato dopo febbrili ricerche
- La sua ricerca era in corso anche al Tevatron di Chigago
 - Gli esperimenti CDF e D0 speravano di poterlo scoprire entro il 2009
 - Dopo tale data, come sappiamo ,sara' LHC – il nuovo potentissimo sincrotrone in funzione al CERN – nel 2012 a trovare e studiare in dettaglio finalmente questa particella

Gli esperimenti all'acceleratore LHC hanno determinato che la sua massa è superiore a 114 GeV,

Il campo di higgs

Come funziona il campo di Higgs

- Tutte le particelle elementari sono immerse nel "campo di Higgs"
- Il campo può essere immaginato come una melassa che le invischia e ne frena il movimento o come l'acqua che frena il nuotatore
- Questa azione di freno è quel che noi chiamiamo **massa**, o anche **peso**
- Il campo di Higgs non esisteva subito dopo il Big Bang. Si è formato quando l'universo si è raffreddato: a quel punto la materia è diventata pesante



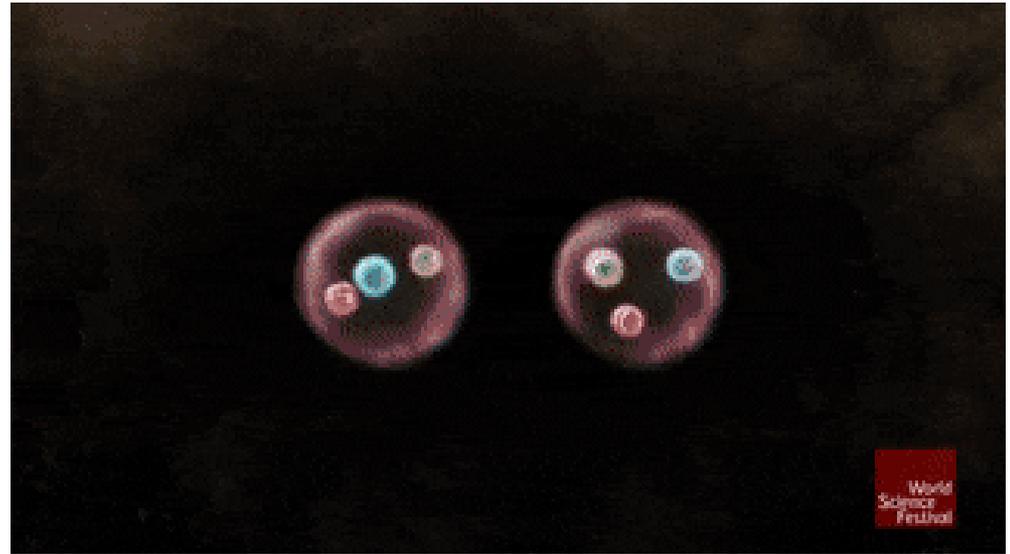
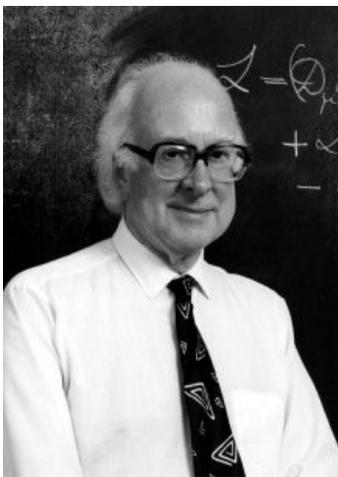
Particelle di massa piccolissima o zero (fotoni, elettroni, ecc.)

Particelle di massa media (muoni, ecc.)

Particelle di grande massa (quark top e altre)

La fisica prevede che un campo di forze si esprima sempre attraverso una particella

● La particella che corrisponde al campo di Higgs è il bosone di Higgs



The Standard Model

Fermions			Bosons		
Quarks	u up	c charm	t top	Force carriers	
	d down	s strange	b bottom		
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino		
Leptons	e electron	μ muon	τ tau		γ photon
					Z Z boson
					W W boson
			g gluon		
			Higgs* boson		

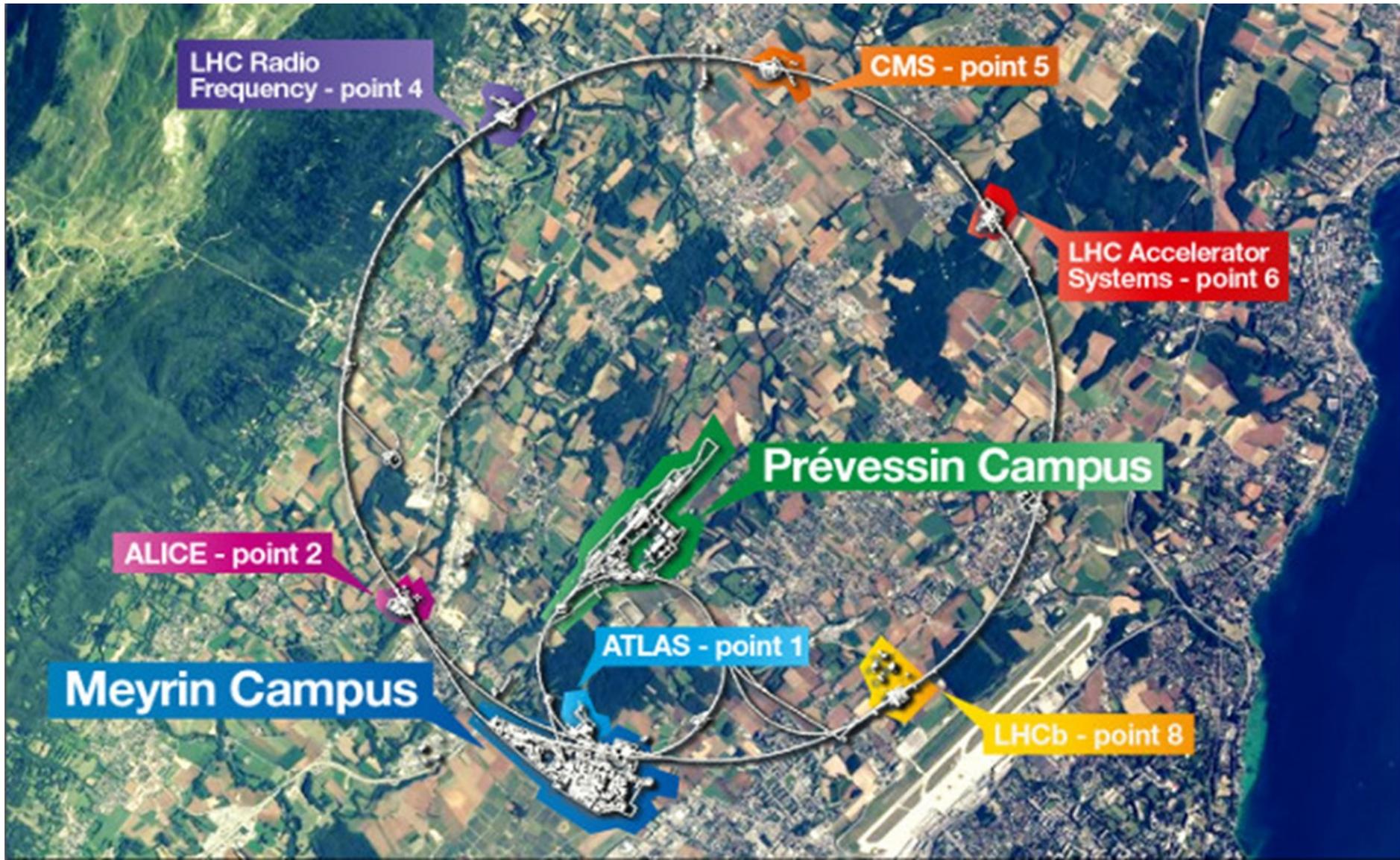
*Yet to be confirmed

Domanda: perche' l'elettrone si accoppia meno del quark top con il bosone di Higgs ed e' quindi piu' leggero?

Attualmente non abbiamo una risposta a una domanda cosi' ovvia

Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene LA MASSA DELLE PARTICELLE?



Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

da dove proviene **LA MASSA DELLE PARTICELLE?**

Large Hadron Collider non è il primo acceleratore di particelle progettato per rivelare il bosone di Higgs.

Non essendo possibile sapere in anticipo a quali energie lo si poteva trovare - anche se il modello standard indicava un valore probabile di 96 GeV, i fisici speravano di trovarselo davanti ad ogni nuovo acceleratore di particelle



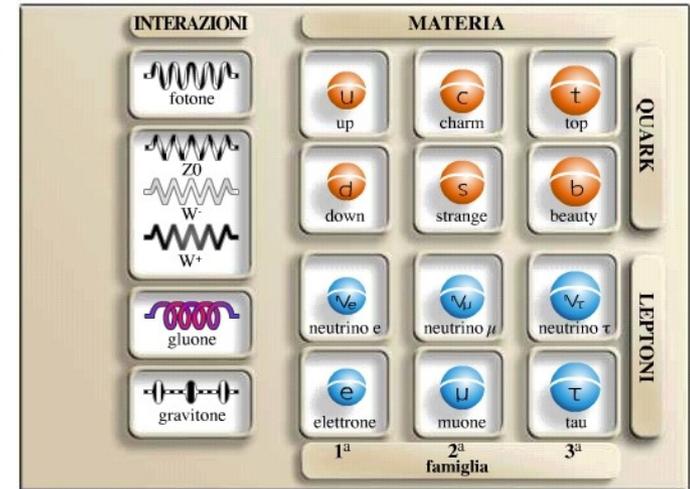
La massa del bosone di Higgs è strettamente correlata alla massa del quark top e a quella del bosone W. Man mano che gli scienziati miglioravano la precisione sulla massa di queste due particelle, l'intervallo di energia in cui ci si poteva aspettare di veder comparire il bosone di Higgs si restringeva.

L'ultimo aggiornamento sulla massa del bosone W aveva fissato il valore più probabile della massa del bosone di Higgs intorno a 153 GeV; la caccia era aperta.

Che cosa è la particella di DIO (il bosone di Higgs)

I fisici erano all'epoca impegnati a mettere ordine nell'enorme "zoo delle particelle" emerse dai precedenti esperimenti.

Si era scoperto che era possibile dividere le particelle in due grandi famiglie: i fermioni (QUARK, ELETTRONI E NEUTRINI), che

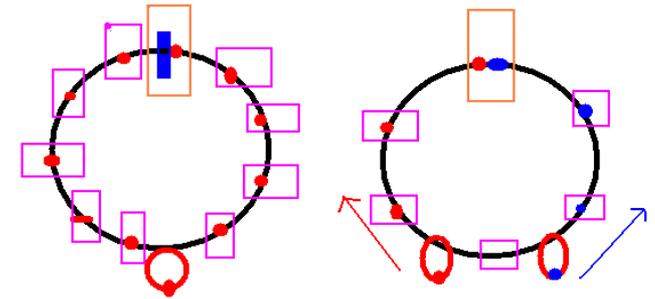


compongono la materia (e sono tutti dotati di massa), e i bosoni FOTONI, GLUONI, W[±] e Z⁰, a cui spetta il compito di mediatori delle forze fondamentali, ossia di tenere unito l'universo (alcuni di loro sono privi di massa)

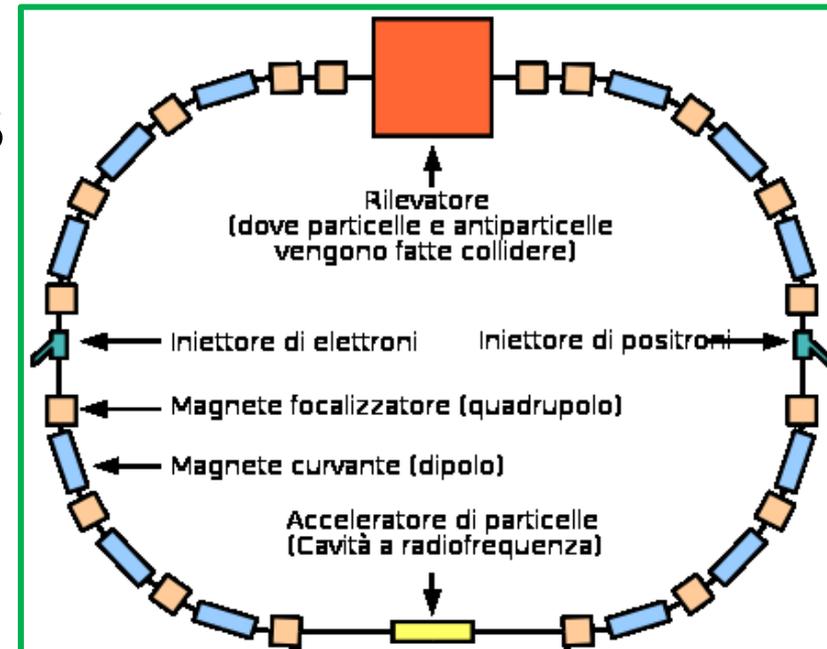
la particella di DIO ed il PROTOSINCROTRONE)

In principio ci fu il ProtoSincrotone entrato in funzione al CERN nel 1959 dal diametro di 200 metri: un gigantesco microscopio ed al tempo stesso una specie di grosso martello costruito per scoprire cosa si nasconde dentro le particelle subatomiche.

L'energia raggiungibile dal protosincrotone era di 25 GeV/c² (gigaelettronvolt), ossia 25 miliardi di elettronvolt: livelli prossimi a quelli esistenti pochi istanti dopo il Big Bang (per contro, la massa-energia di un atomo in atmosfera è di appena 0,03 elettronvolt).



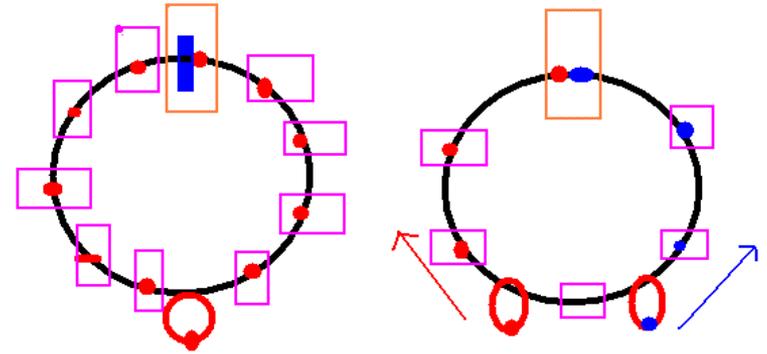
protosincrotroni acceleratori di particelle
anelli di accelerazione e collisioni
magneti superconduttori
bersaglio fisso per collisione-particelle opposte
rivelatore effetti delle collisioni



Che cosa è la particella di DIO (il PROTOSINCROTRONE)

A queste energie, la collisione tra fasci di protoni – i costituenti di base dei nuclei atomici insieme ai neutroni – è in grado di generare particelle sconosciute, che a energie più basse come quelle presenti normalmente in natura non potrebbero esistere, perché destinate a decadere immediatamente in particelle più stabili di massa inferiore, oppure che non possono esistere da sole, come i quark, i costituenti ultimi dei protoni e dei neutroni..

Fu al protosincrotrone che, nel 1974, si scoprirono le tracce delle correnti neutre, un tipo di interazione nucleare predetta da Abdus Salam, Sheldon Glashow e Steven Weinberg (vincitori, nel 1979, del premio Nobel), in grado di confermare la teoria elettrodebole,



protosincrotroni acceleratori di particelle

anelli di accelerazione e collisioni

magneti superconduttori

bersaglio fisso per collisione-particelle opposte

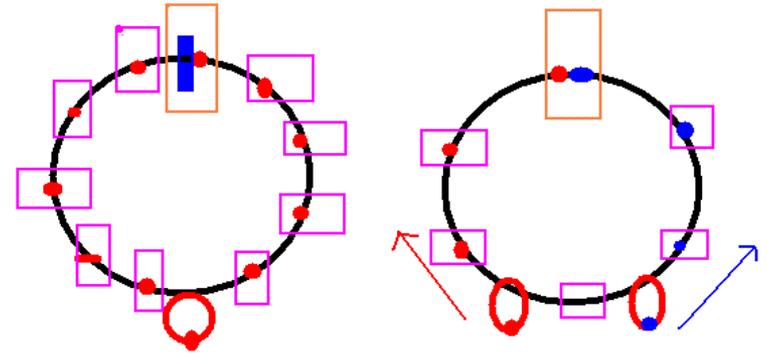
rivelatore effetti delle collisioni

la particella di DIO e il S.P.S

La teoria prevedeva l'esistenza dei bosoni W e Z, ma le energie del protosincrotrone non erano sufficienti a produrli durante le collisioni.

Fu per questo che, nel 1976, lo si sostituì con il superprotosincrotrone, SPS (**Super Proton Synchrotron**), dal diametro di 2,2 chilometri e in grado di raggiungere l'energia di 400 GeV. (200+200)

Nel 1983 i due bosoni saltarono fuori dalle collisioni dei fasci di protoni, portando l'anno successivo al premio Nobel Carlo Rubbia e Simon van der Meer, che avevano condotto gli esperimenti.



protosincrotroni acceleratori di particelle

anelli di accelerazione e collisioni

magneti superconduttori

bersaglio fisso per collisione-particelle opposte

rivelatore effetti delle collisioni

la particella di DIO e il TEVATRON)

Nel frattempo era entrato in funzione il TEVATRON al Fermilab di Chicago, in grado di raggiungere i 500 GeV, ma non era in grado di riuscire a produrre bosoni W e Z in quantità tali da misurarne le proprietà e proseguire la ricerca sul Modello Standard

La scoperta dei bosoni aveva sistemato molti tasselli del Modello

Standard, ma ne occorreavano altri per riuscire a quadrare i conti. Bisognava, soprattutto, capire a cosa fossero dovute le masse così diverse delle particelle

