

Introduzione alla Fisica delle Particelle Elementari:

*Un viaggio nell'estremamente piccolo alla scoperta
dei segreti della materia*

Martino Margoní

- Un po' di storia
- Il Modello Standard: particelle e interazioni
- Il Bosone di Higgs: teoria e esperimenti al Large Hadron Collider del CERN

Introduzione

La Fisica di base fa sue alcune delle domande fondamentali del Pensiero dall'antichità ad oggi:

- Da cosa è costituito l'Universo?
- Quali sono le leggi che lo governano?
- In che "direzione" evolve?
- Quali sono i componenti ultimi della materia?
- Come interagiscono tra di loro?



Non il "motivo", ma il "meccanismo"!
Si studia l'elementare per capire il macroscopico!
... sperando di fare un po' di ordine!



Di cosa è fatto il mondo?

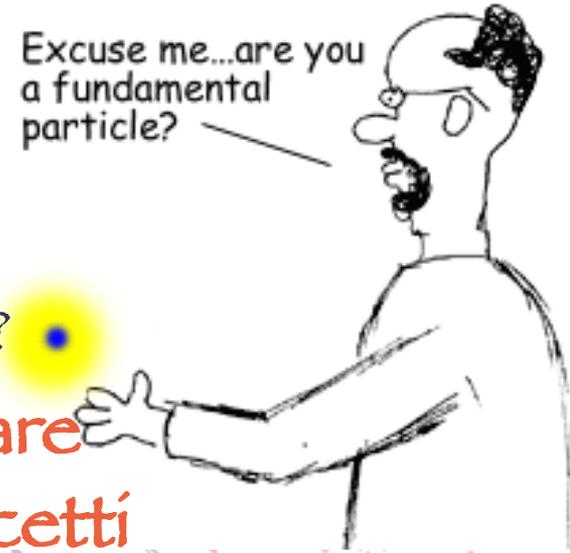
- La materia è un agglomerato di pochi elementi “fondamentali” e “elementari”, che costituiscono tutto l'Universo.
- La parola “elementare” è una parola chiave:
 - Oggetto privo di struttura interna (non composto)

• Domande:

- Esistono mattoni elementari?
(Democrito, 460 A.C.)
- Quali sono?
- Come determinano le proprietà dell'Universo?

Un'altra cosa “fondamentale” è utilizzare il Metodo Scientifico = limitare i preconcetti (da Galileo alle “blind analyses”)!

– INFN & Università di Padova



Excuse me...are you a fundamental particle?

Un po' di ordine...

Alchimia → Chimica (1700-1800)

- Classificazione degli atomi in base alle proprietà chimiche
- Evidenza di una "periodicità" (Mendeleev)
- **Indicazioni di una struttura comune degli elementi (atomo: nucleoni, orbitali elettronici)**

ELEMENTS

Hydrogen	1	Strontian	46
Azote	5	Barytes	68
Carbon	5	Iron	50
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	24	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	42	Mercury	167

Periodic Table of the Elements

1	2											3	4	5	6	7	8	9	10	
H	He											B	C	N	O	F	Ne			
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar			
Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	— VII —	IB	IIB	III A	IV A	V A	VI A	VII A	0					
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113								

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

... ma l'atomo è "elementare"? NO!

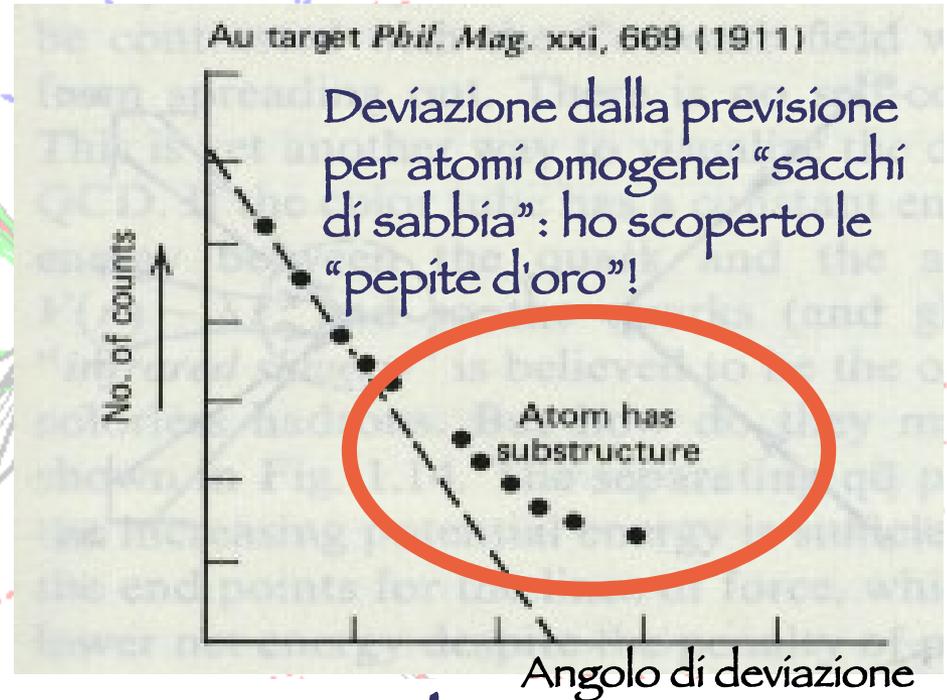
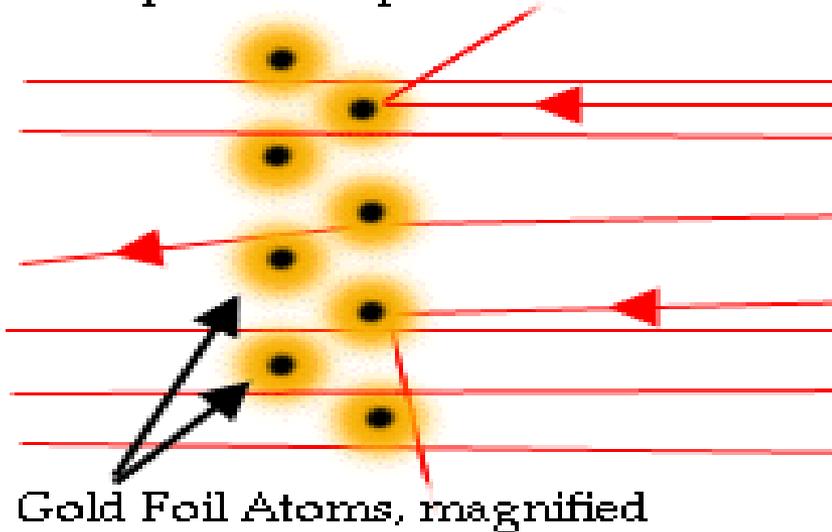
Il Metodo "Tex Willer"



- Un sacco contiene sabbia, l'altro pepite d'oro: come faccio a scegliere senza toccarli? **Osservo la deviazione dei proiettili!**
- Analogamente, "sparo" all'atomo, usando particelle α come proiettili e osservo la loro deviazione.
- Particelle α : nuclei di Elio da decadimenti di nuclei pesanti

Il Modello di Rutherford

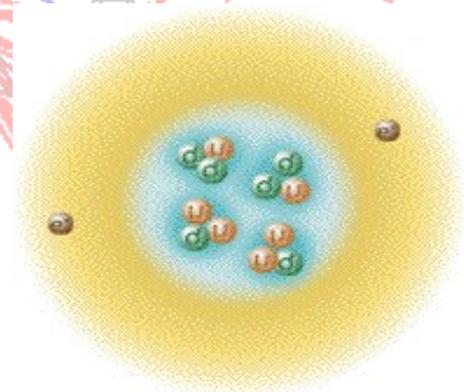
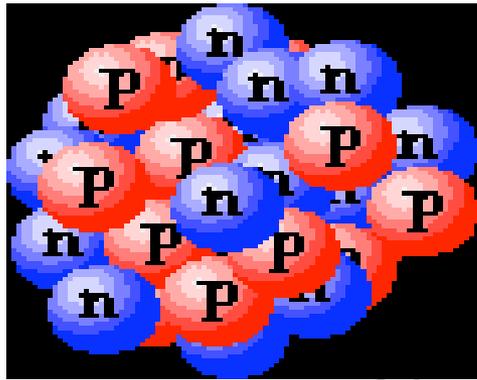
The Positive Nucleus Theory
Explains Alpha Deflection



Risultato: L'atomo contiene un nucleo con carica positiva di raggio $< 10 \text{ fm}$ [$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$]

...ma il nucleo e' "elementare"? NO!

- Il **nucleo** e' composto da protoni (carica elettrica positiva) e neutroni (privi di carica elettrica, ipotizzati da Rutherford)
- Anche i **protoni** e i **neutroni** (Chadwick 1932) hanno una struttura: sono composti da particelle elementari: i **quarks**.



...Ma per capire cio' ci vollero proiettili di maggiore energia delle particelle α ... raggi cosmici e acceleratori.

Energie sempre maggiori

Facendo urtare una particella accelerata contro una ferma, una parte dell'energia disponibile viene sprecata perche' la seconda particella viene "trascinata via".

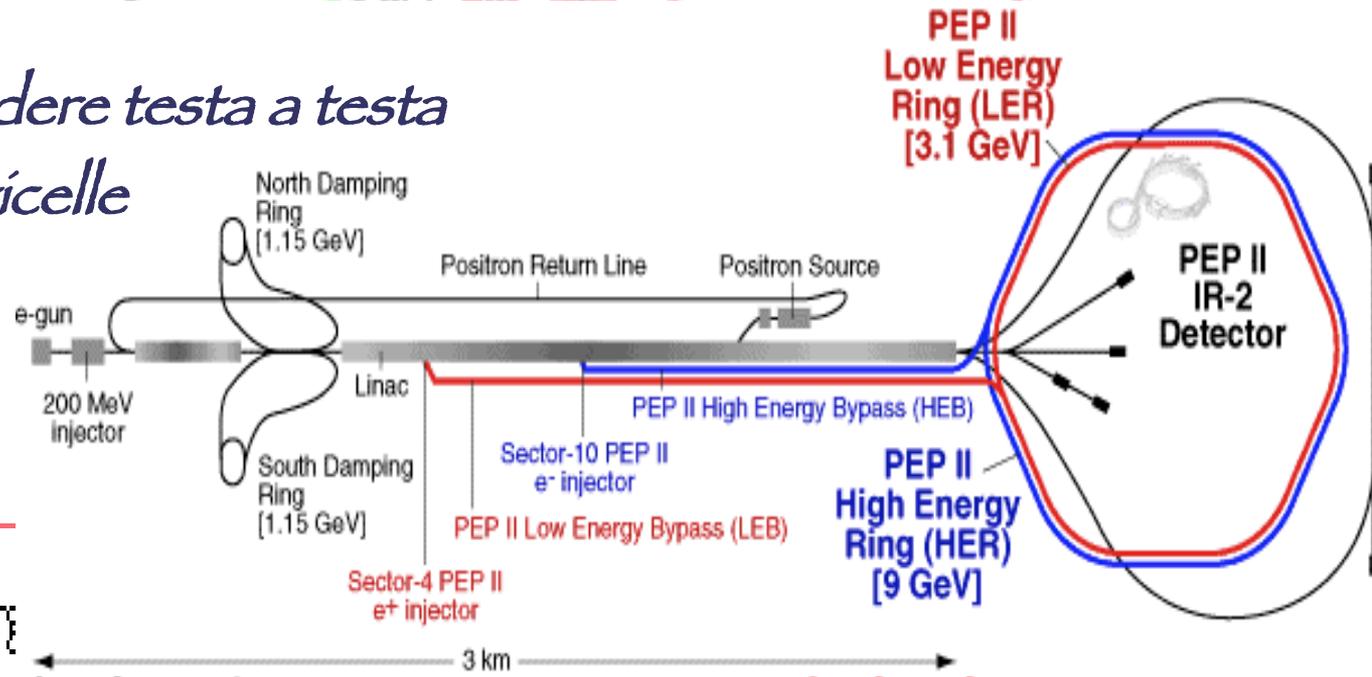


IDEA!: fare collidere testa a testa due fasci di particelle

Heh-heh. I have a lot of kinetic energy!

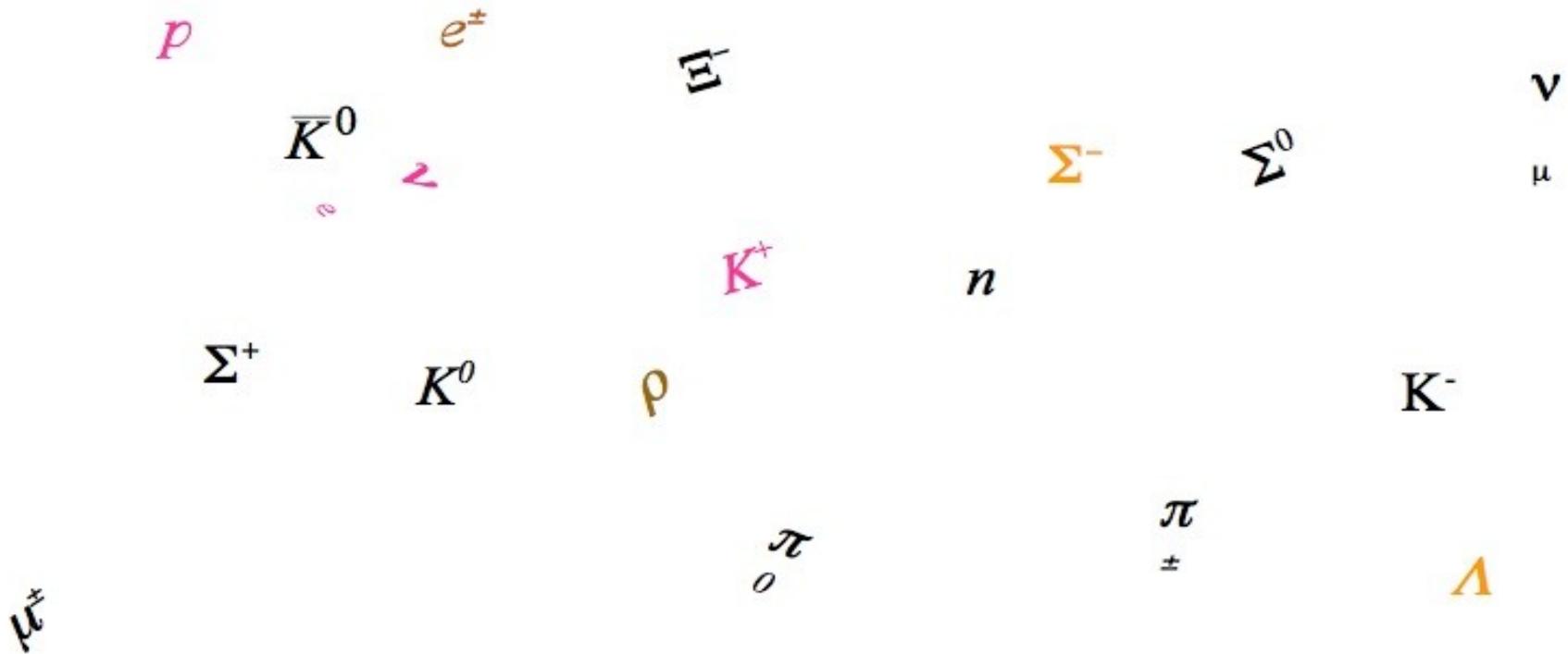


energy + energy = lots of energy



Dov'è l'ordine?

Con i nuovi acceleratori di particelle e nuovi rivelatori (camera a bolle) a disposizione i fisici delle particelle negli anni 50 si divertirono un mondo...



Ordine e Costituenti "elementari" (?)

Gell-Mann e Zweig proposero che gran parte delle particelle prodotte con gli acceleratori (gli "adroni") fossero costituite da tre oggetti che vennero chiamati "quarks"



I quark hanno cariche elettriche pari a $2/3$ (u), $-1/3$ (d), $-1/3$ (s) della carica del protone

p	uud	Δ^{++}	uuu	K^+	$u\bar{s}$
n	udd	Δ^+	uud	K^0	$d\bar{s}$
π^+	$u\bar{d}$	Δ^0	udd	K^-	$s\bar{u}$
π^0	$u\bar{u}$	Δ^-	ddd	K^0	$s\bar{d}$
π^-	$d\bar{u}$	Ω	sss		

Dove sono i quarks?

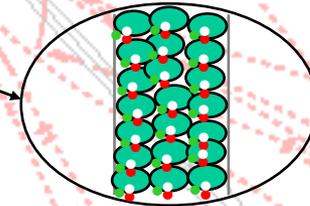
Questa descrizione e' molto interessante, ma i quark erano ancora entita' matematiche...

- Fino a che l'esperimento confermo' la loro esistenza!

Ripetiamo l'esperimento di Rutherford ad energie MOLTO piu' alte...

elettrone

Protone



Sempre con il metodo di Tex Willer si verifico' che il protone e' costituito da altri oggetti "piu' elementari"! ...Ma i quarks "liberi" non esistono!

Cosa significa "elementare"?

Il concetto di "elementare" si è evoluto nel tempo:

Fisica atomica (~1900):

atomo ($r \sim 10^{-10}$ m)

Fisica nucleare (~1930):

nucleo ($r \sim 10^{-14}$ m),

nucleone ($r \sim 10^{-15}$ m)

Fisica delle particelle (oggi):

quarks (costituenti dei nucleoni)

e leptoni (elettrone) ($r \sim 10^{-18}$ m)

... e poi?



atoms have electrons ...



orbiting a nucleus ...

which is made of protons ...



... and neutrons

which are made of quarks, up-quarks and down-quarks ...



which are at the current limit of our knowledge.

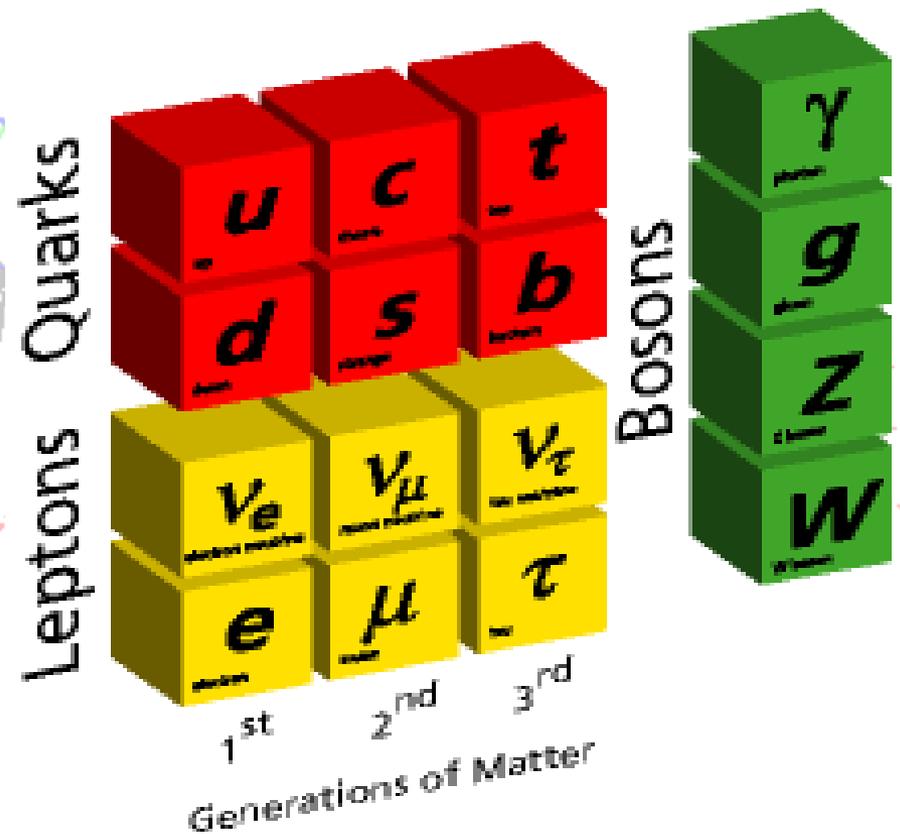
Il Modello Standard

- Nel Modello Standard esistono due generi di particelle:
 - Particelle materiali: la maggior parte delle particelle materiali finora conosciute è composta di particelle “più elementari” (quark). C'è anche un'altra classe di particelle materiali elementari, i leptoni (un esempio è l'elettrone) che non formano altre particelle.
 - Particelle mediatrici di forza: Ogni tipo di interazione agisce “mediante” una o più particelle mediatrice di forza (un esempio è il fotone).

Il Modello Standard

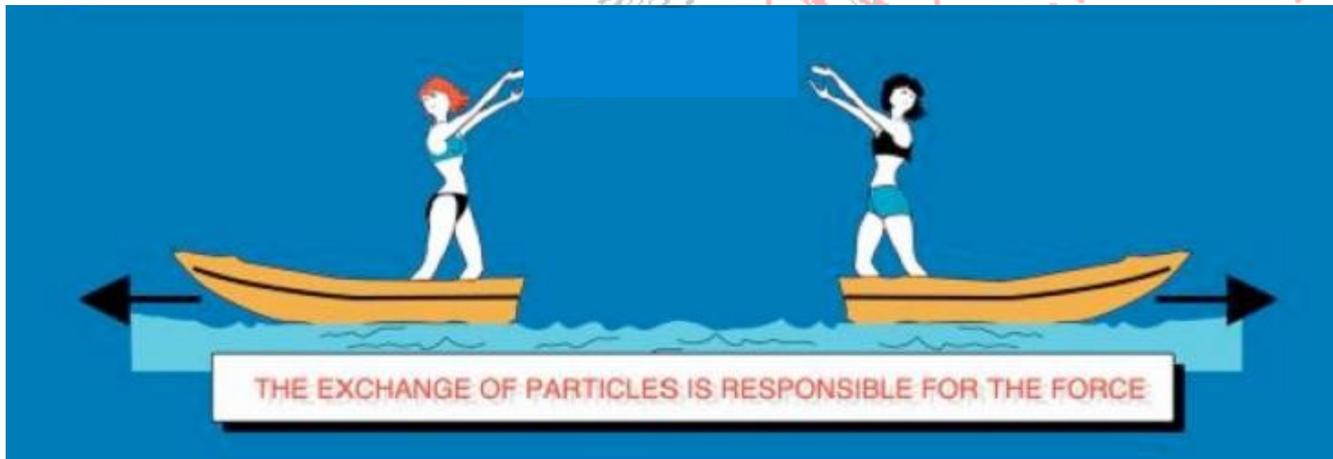
- Il Modello Standard descrive:
 - tutta la materia
 - tutte le forze dell'universo (escludendo per ora la gravità)
- La sua bellezza sta nella capacità di descrivere centinaia di particelle e interazioni complesse con “poche” particelle elementari e interazioni fondamentali

Elementary Particles



Effetti non visibili

- Tutte le interazioni (o forze) che riguardano le particelle materiali sono dovute ad uno scambio di **mediatori**.
- Quelle che noi chiamiamo comunemente "forze" sono gli effetti dei mediatori di forza sulle particelle materiali.



Caratteristiche delle interazioni

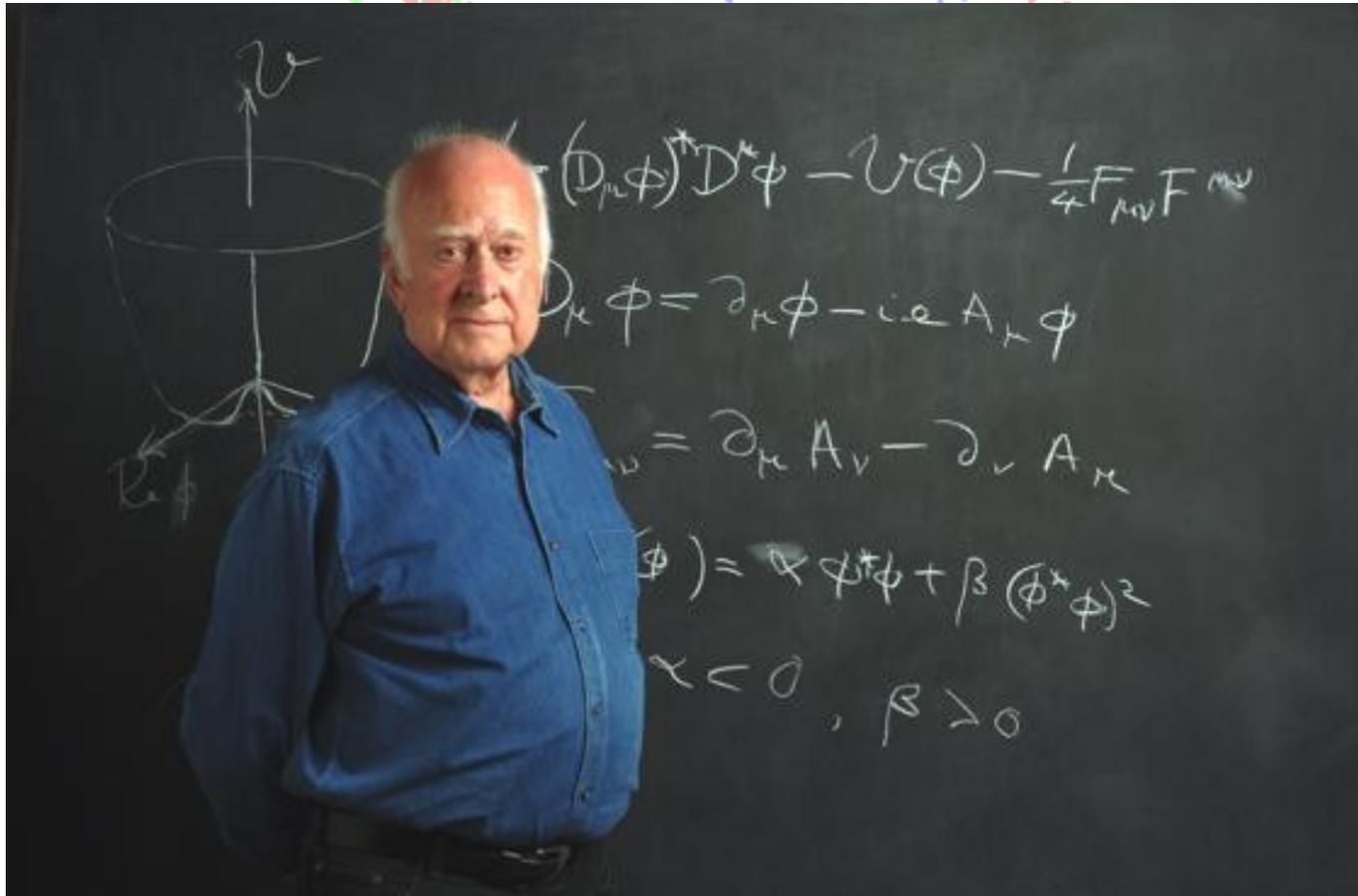
Le interazioni si differenziano per : particella che funge da mediatore, intensità, sorgente, raggio d'azione e tipo di particelle interessate:

Interazione	Sorgente	Mediatore	Intensità relativa	Raggio
Gravitazionale	m	Gravitone	10^{-38}	∞
Nucleare Debole	q debole	W, Z ⁰	10^{-5}	10^{-15} m
Elettromagnetica	q elettrica	Fotone	10^{-2}	∞
Nucleare Forte	"colore"	Gluone	1	10^{-15} m

Come vedremo in seguito, W e Z sono state scoperte da Carlo Rubbia et al. al CERN nel 1980!!

Il Gravitone non è ancora stato scoperto!

Il Bosone di Higgs... questo sconosciuto



Interazione elettromagnetica

$$\mathcal{L} = A_\mu \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) A^\mu$$

Questo non è un geroglifico! È l'equazione che descrive la propagazione del fotone nel vuoto, alla velocità della luce $c = 2.997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. **Attenzione: il fotone ha massa nulla e per questo corre così tanto!** (ancora imbattuto...)

- Esempio: Interazione tra due elettroni:

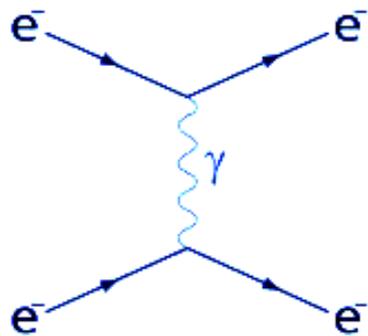


Grafico di Feynman della diffusione Moeller $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ mediata da scambio di fotone (γ)

Interazione Debole

- Posso usare lo stesso formalismo per descrivere l'interazione debole?
- Esempio: Interazione tra un elettrone e un neutrino:

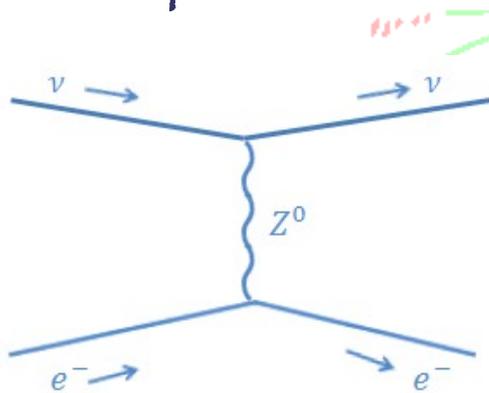
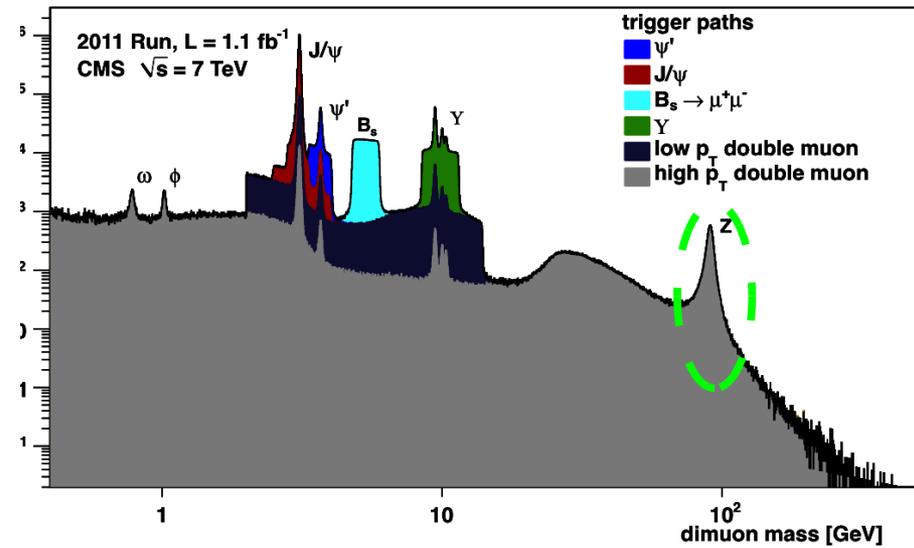
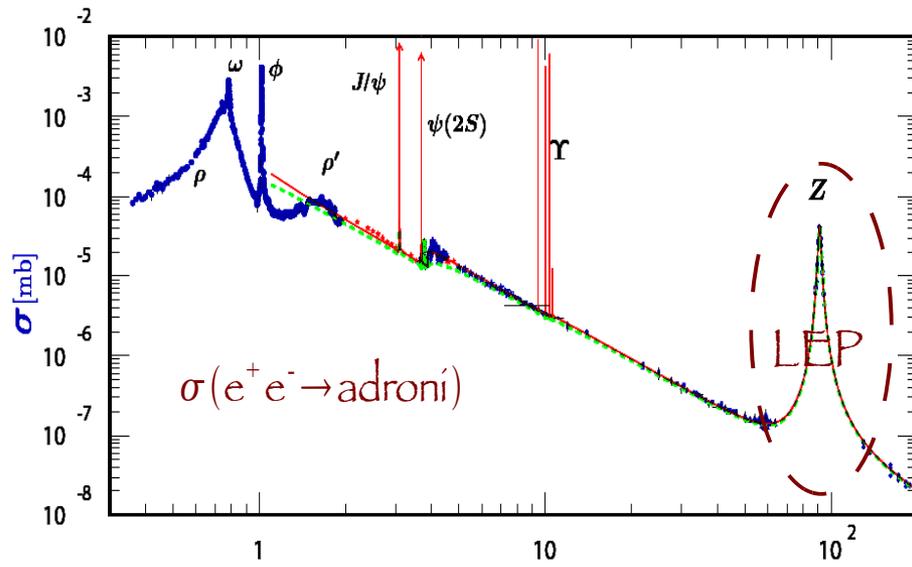


Grafico di Feynman della
diffusione $\nu e^- \rightarrow \nu e^-$
mediata da scambio del vettore neutro (Z^0)

- Risposta: sì... però solo se riesco a scoprire i mediatori dell'interazione debole e se riesco a modificare il “geroglifico” mostrato prima!!

Primo: scoprire i mediatori!

- W,Z osservate nel 1980 al CERN (C.Rubbia)
- prodotte a iosa in collisioni e^+e^- (LEP)
- ... e pp (LHC)



Secondo: Modificare le equazioni!!

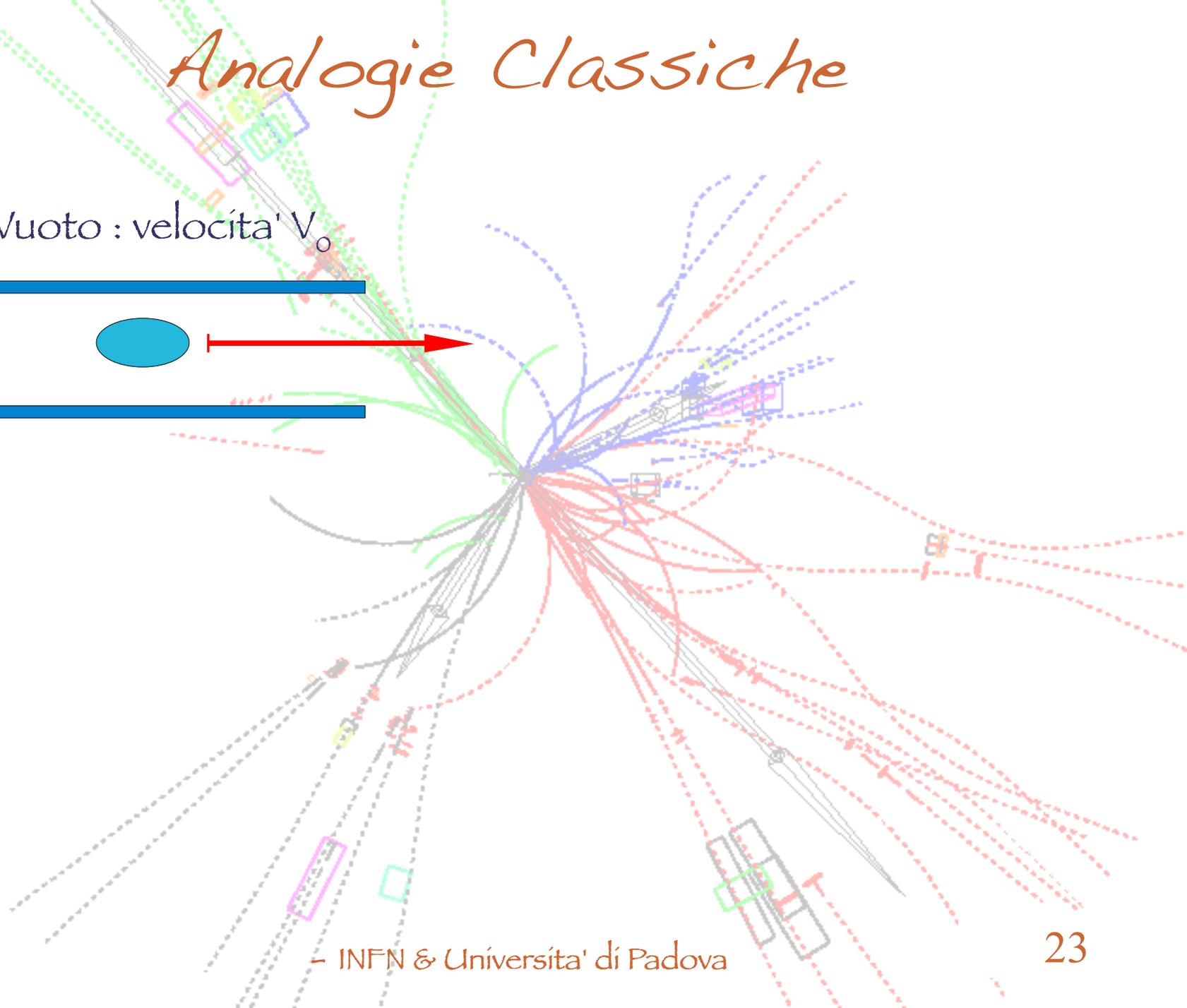
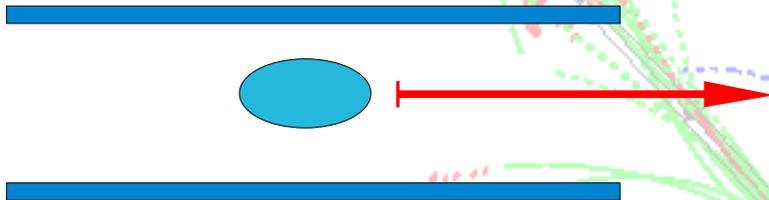
- A differenza del fotone, W e Z hanno massa... e non piccola: pesano circa come 90 protoni!
- Se prendo il “geroglifico” e ci inserisco a mano la massa di W e Z, ottengo un modello che non funziona più perché molti calcoli mi danno come risultato ∞ !!
- Ho due possibilità:
 - 1) Cambio lavoro... ☹️
 - 2) Chiamo in aiuto il Prof. Higgs 😊

Meccanismo di Higgs

- Il “vuoto” e` lo stato in cui l'energia e` minima.
- Introduco un nuovo “campo” (=particella) che e` una “eccitazione del vuoto” e permea tutto lo spazio.
- L'interazione delle varie particelle con questo campo le frena e genera la loro massa.
- In questo modo non ho piu` calcoli che danno ∞ !
- Tra le infinite possibilita` per la scelta del vuoto, la Natura ne sceglie una (si parla di simmetria spontaneamente rotta).

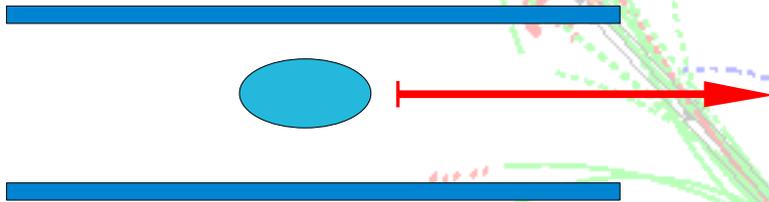
Analogie Classiche

Vuoto : velocità V_0

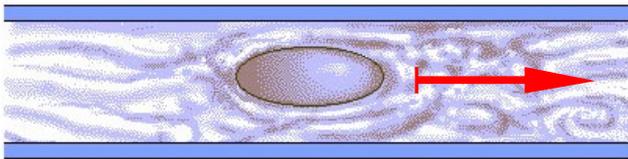


Analogie Classiche

Vuoto : velocità V_0

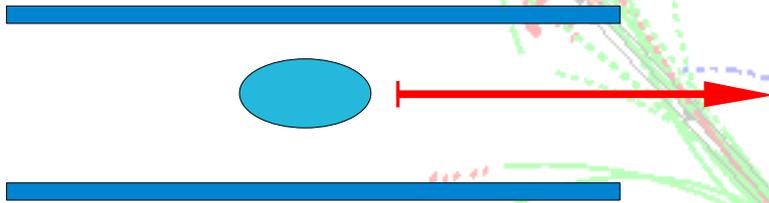


Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$, $a = -kv$



Analogie Classiche

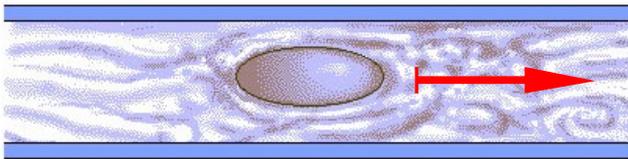
Vuoto : velocità V_0



Vuoto classico : $M=0$, $v=c$

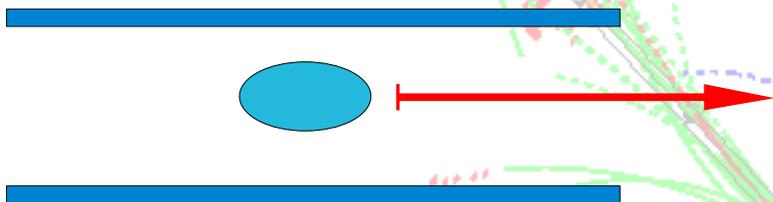


Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$, $a = -kv$



Analogie Classiche

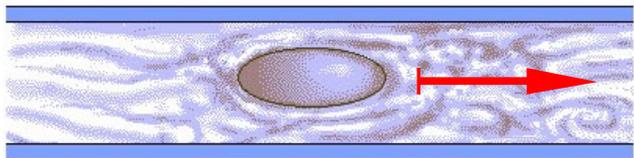
Vuoto : velocità V_0



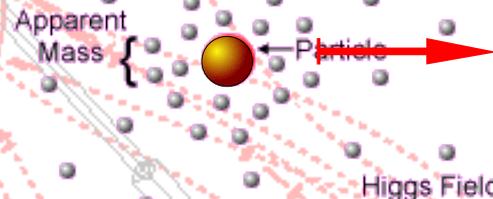
Vuoto classico : $M=0, v=c$



Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$



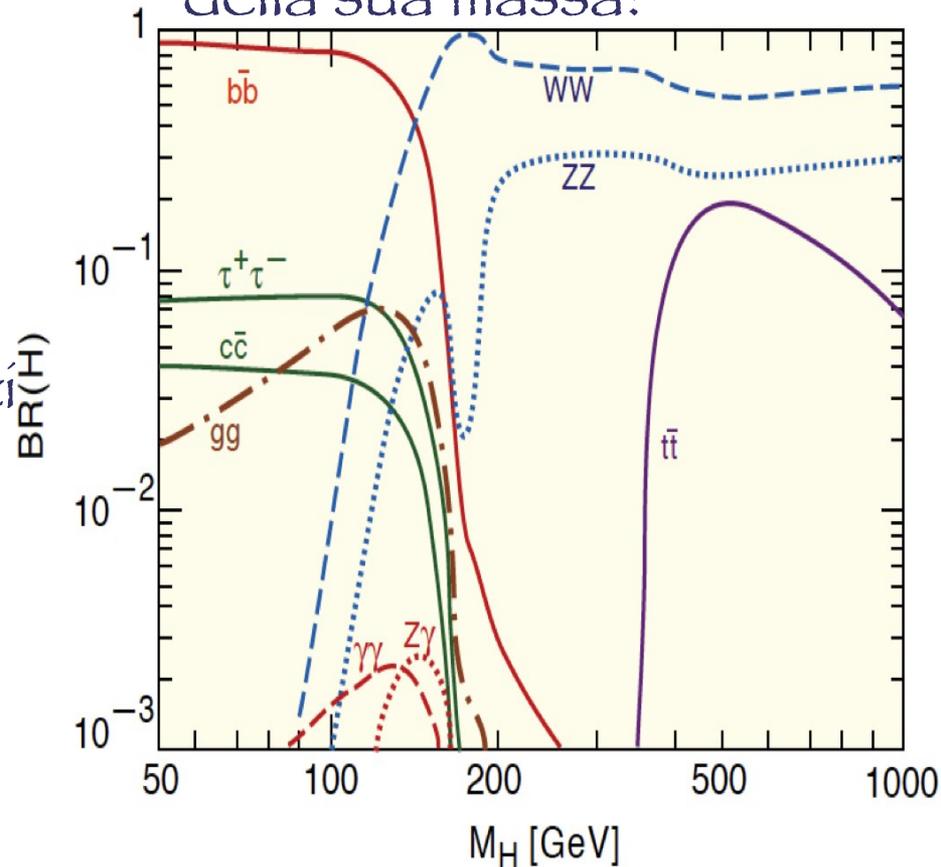
Vuoto di Higgs : $M = \frac{1}{2} g v$ $v < c$



Higgs: Come lo cerco?

- Il Bosone di Higgs puo' essere ricercato in svariati modi legati ai diversi possibili decadimenti
- L'efficacia della ricerca dipende:
 - dall'accoppiamento dell'Higgs con i suoi prodotti di decadimento
 - dall'entita' dei processi parassiti simili al segnale ricercato

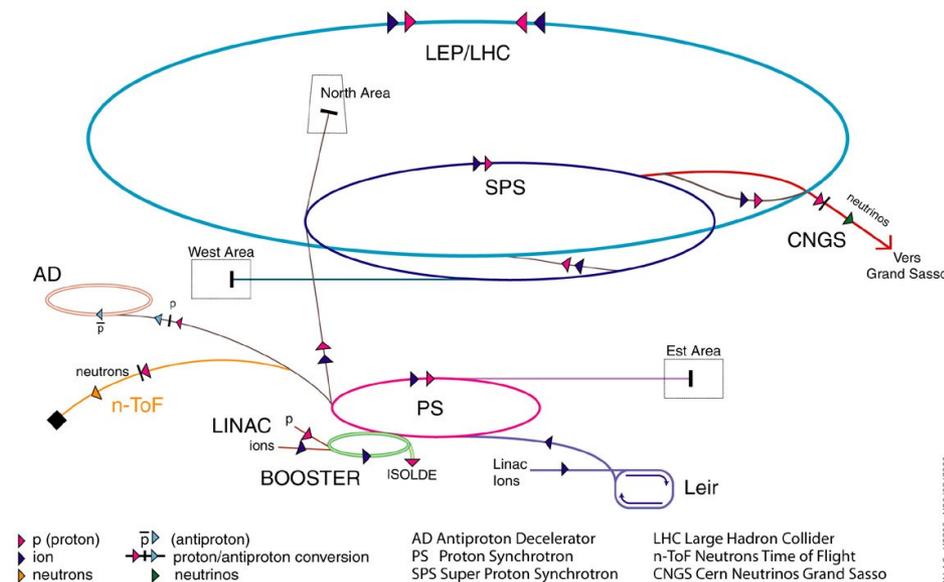
Probabilita' di decadimento dell'Higgs nelle diverse modalita' ("canali") in funzione della sua massa:



Il Large Hadron Collider

- LHC e' lo stadio finale di un sistema complesso che utilizza svariati acceleratori in cascata

Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



- Il penultimo stadio (SPS) e' l'acceleratore progettato da Carlo Rubbia per osservare W e Z nei primi anni 80

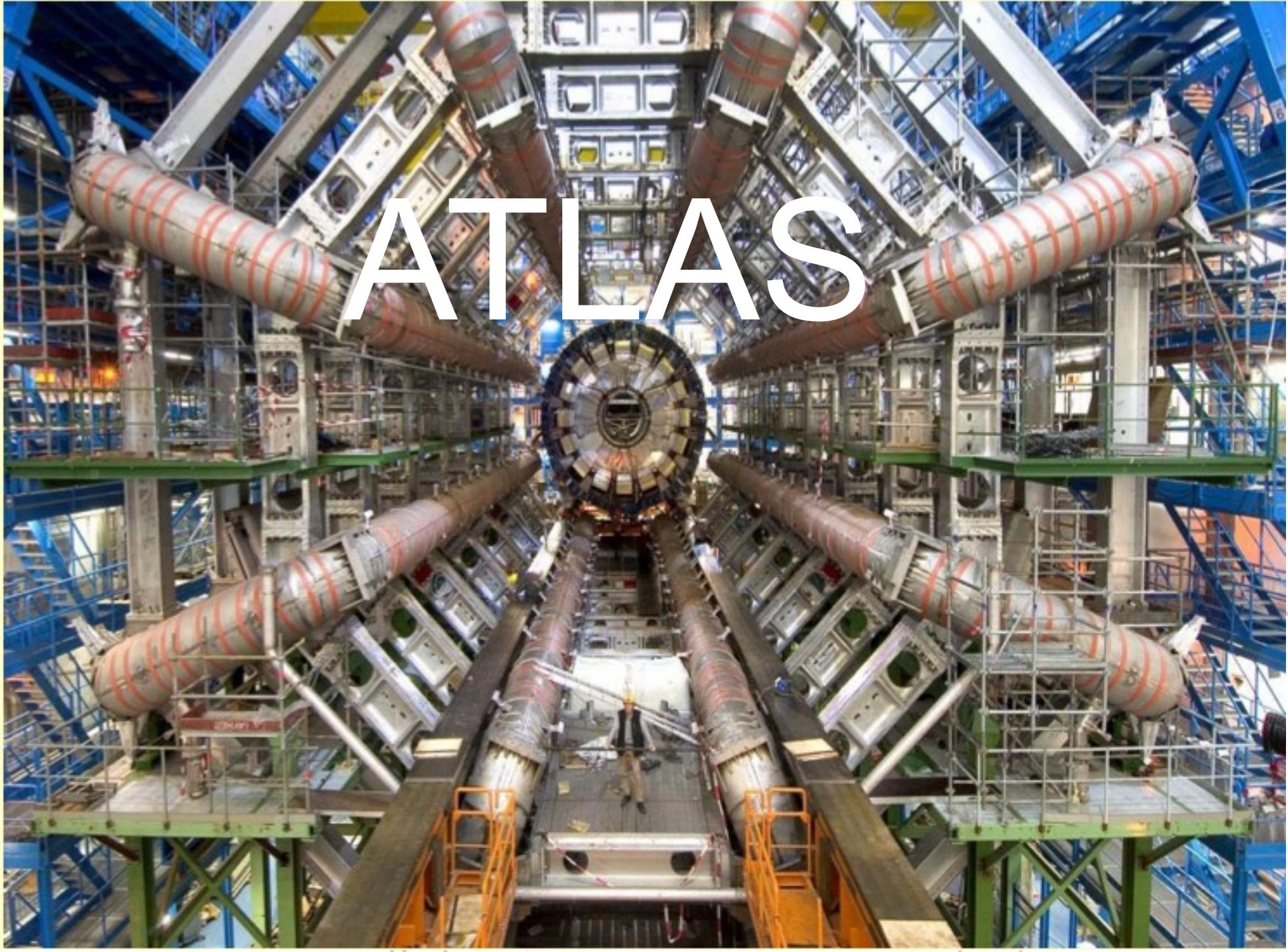
La misura degli eventi a LHC



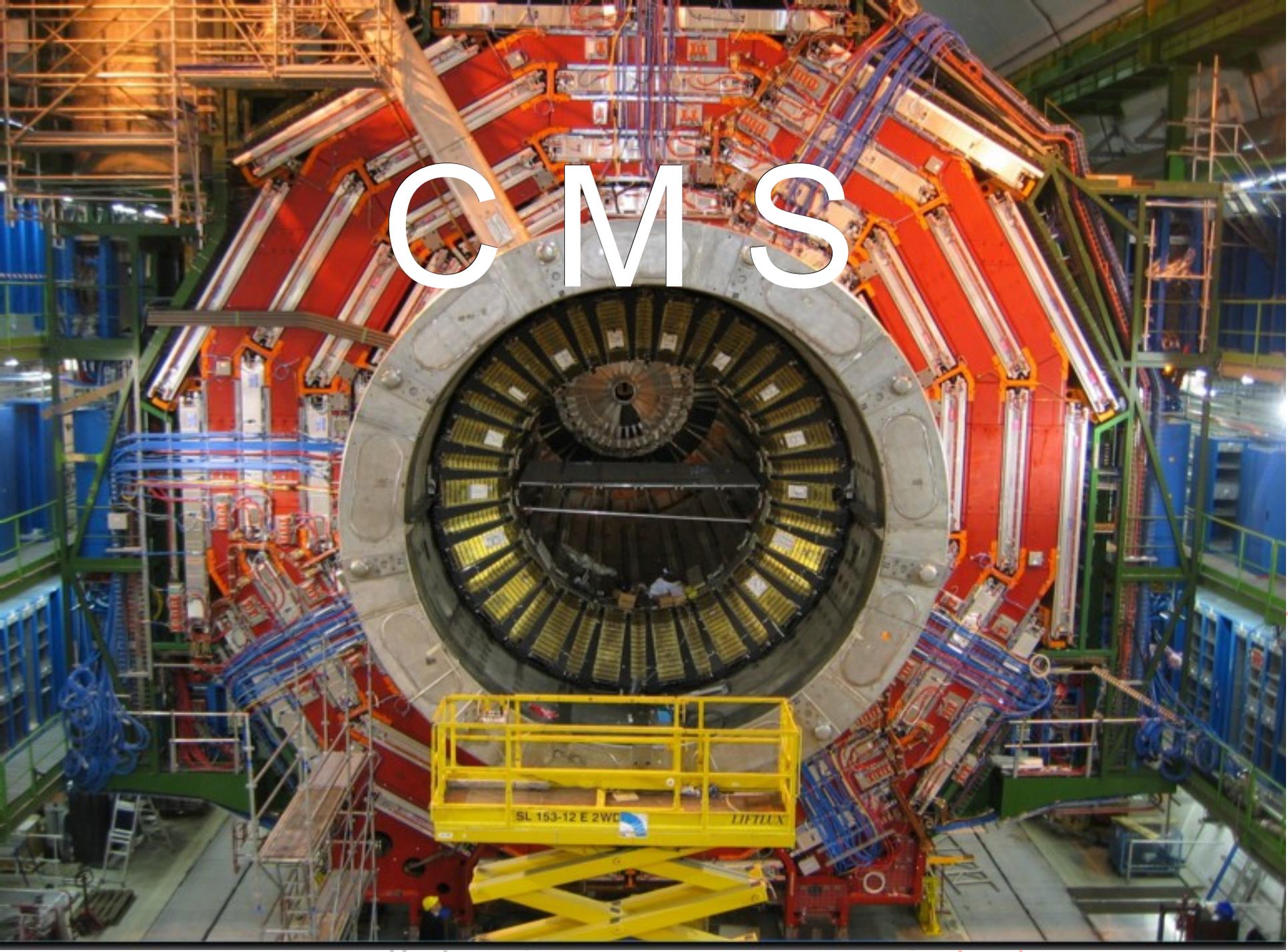
Date le energie altissime, e l'enorme numero di particelle prodotte, servono rivelatori:

- estremamente grandi
- estremamente granulari
- estremamente veloci
- il più possibile ermetici (cioè, privi di buchi)

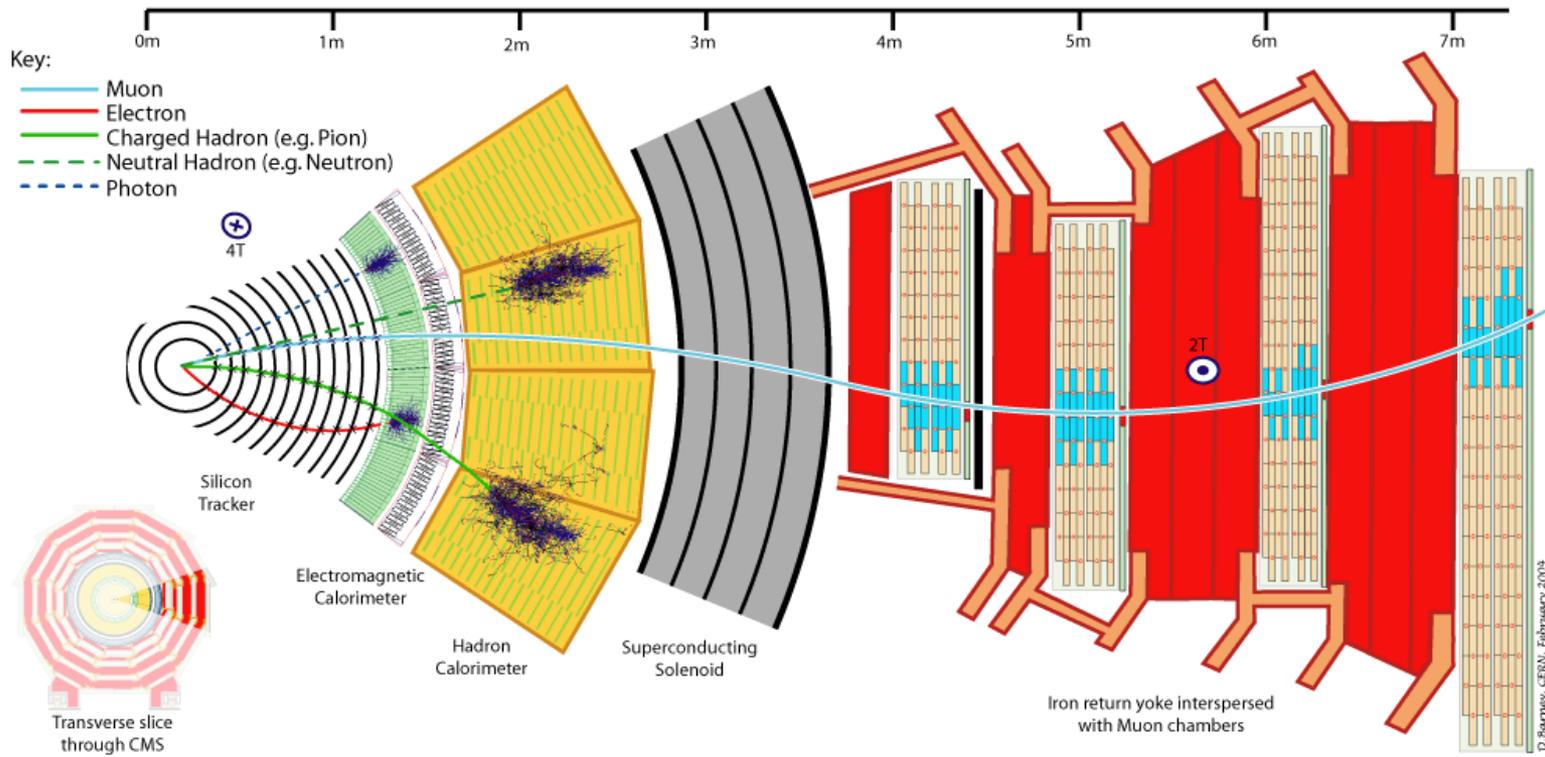
ATLAS



CMS



CMS



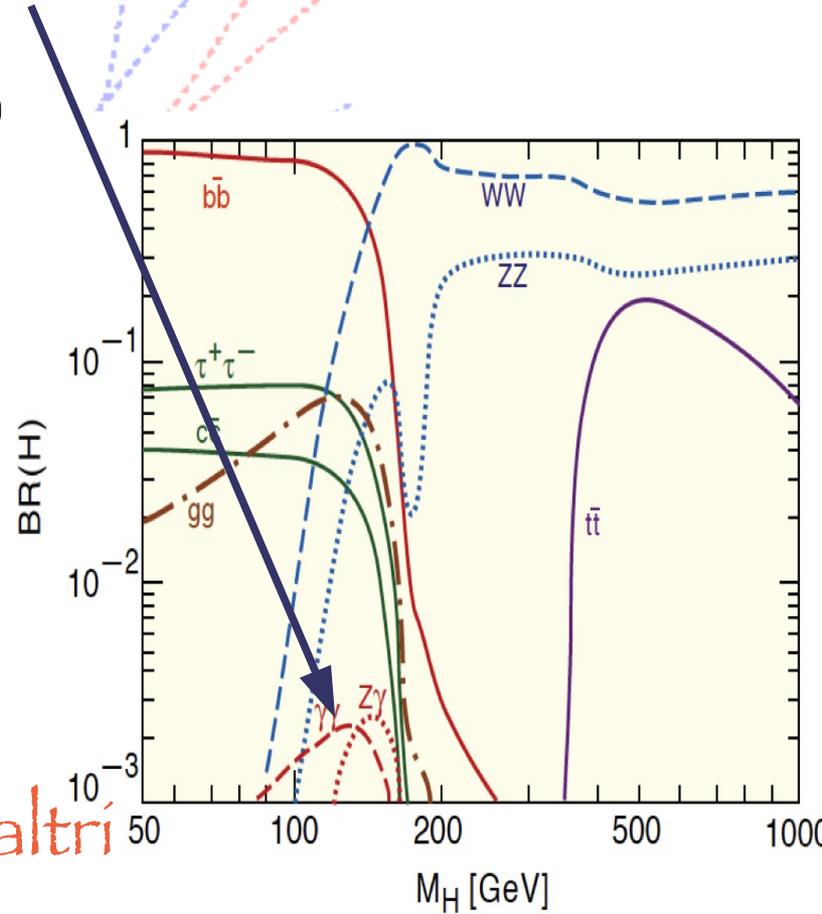
Un esempio : $H \rightarrow \gamma\gamma$

Questo "canale" copre un margine molto ristretto :

- 0.1-0.3 % se $M_H \sim < 200$ GeV ☹️

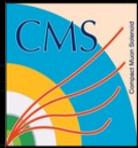
Tuttavia:

- alta efficienza per i fotoni 😊
- misura precisa della massa 😊
- fondi abbastanza bassi 😊

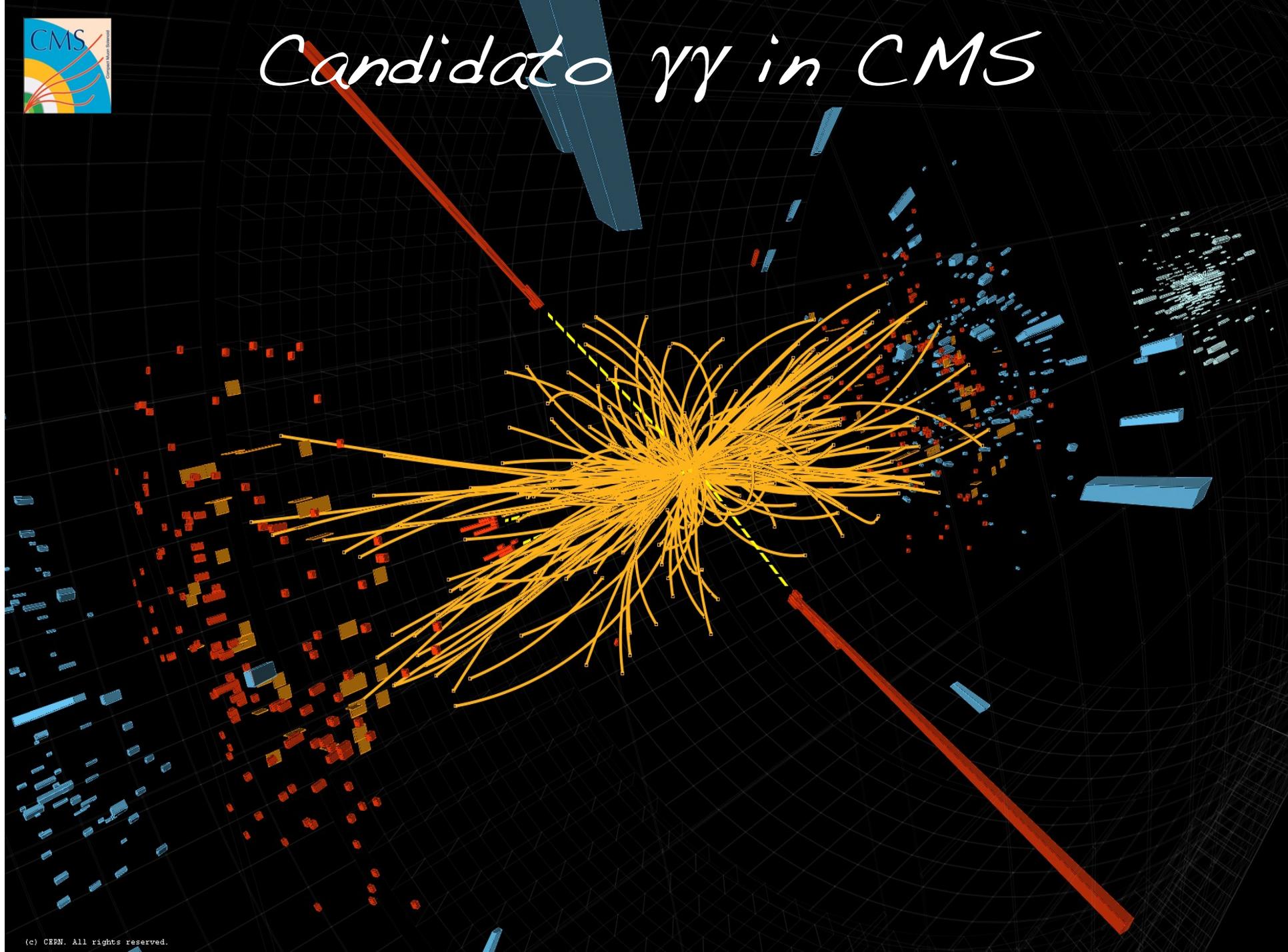


Perche' vi mostro questo e non altri canali piu' promettenti?

La risposta alle pagine seguenti...



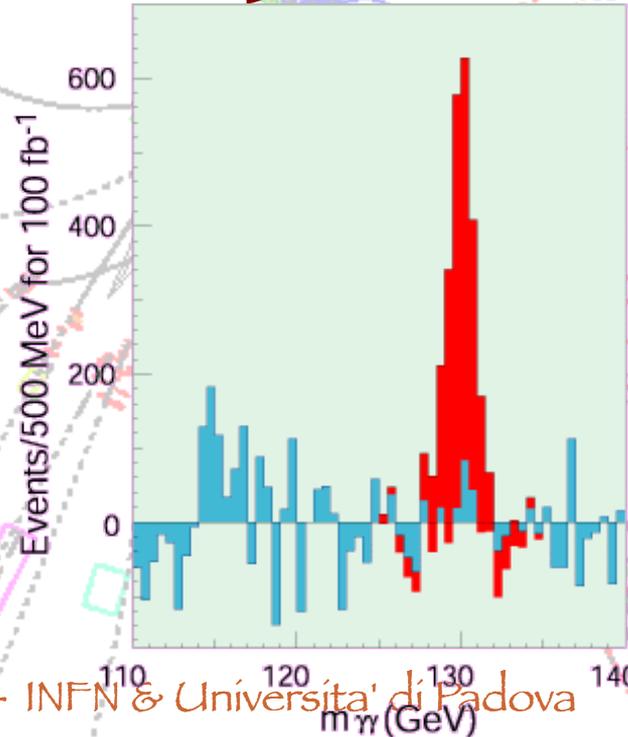
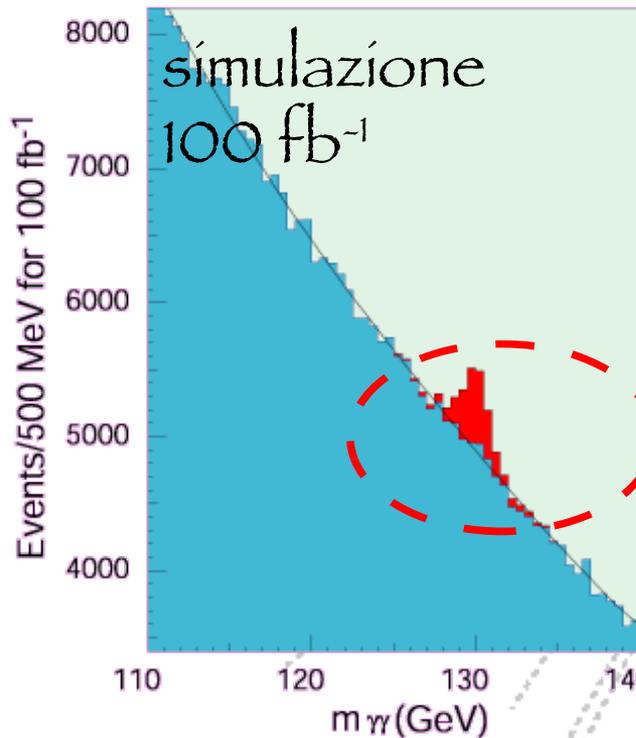
Candidate $\gamma\gamma$ in CMS



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- misuro energia e direzione dei due fotoni
- calcolo la "massa invariante" :

$$\left. \begin{aligned} E_H &= E_1 + E_2 \\ \vec{p}_H &= \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{aligned} \right\} M_H^2 = E_H^2 - \vec{p}_H \cdot \vec{p}_H$$



Attenzione: questa è la simulazione. Se l'avessi trovato, dovrei vedere qualcosa di simile al grafico rosso alla pagina seguente...

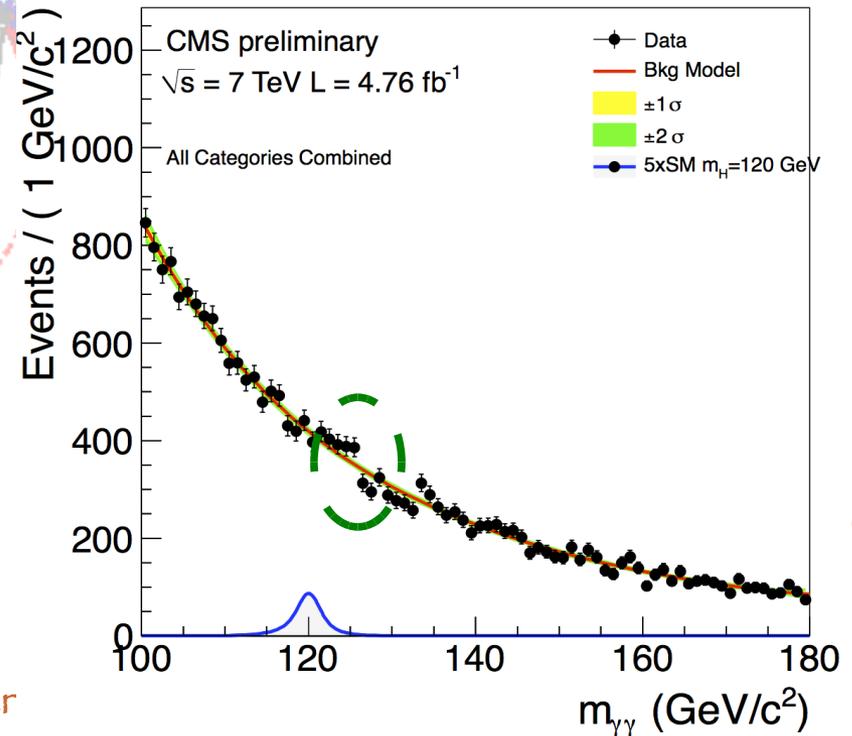
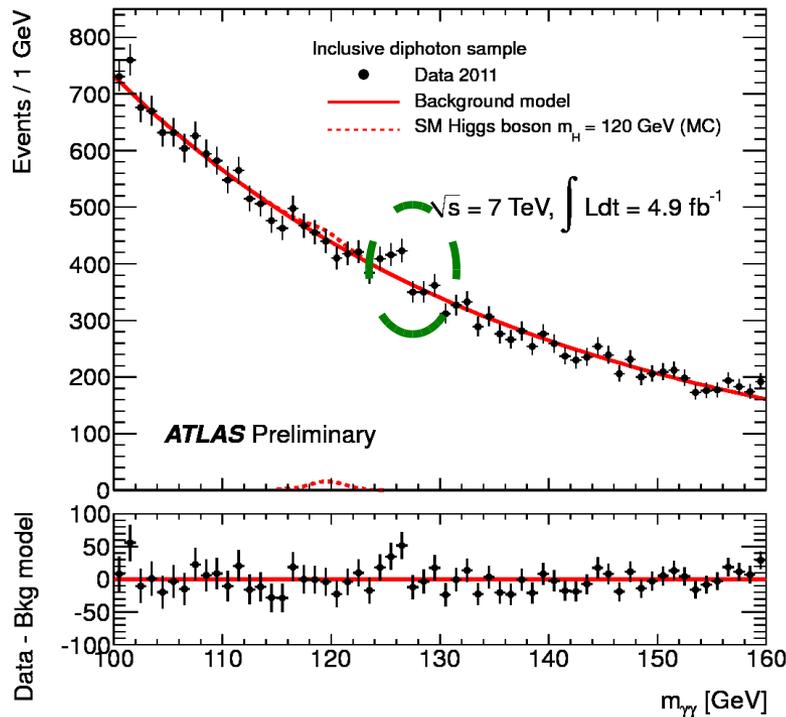
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- C'e' qualcosa che sembra un eccesso nella stessa regione di massa: L'ho trovato?

● Giornalisti: SI'

● Fisici: Non posso ancora dirlo!

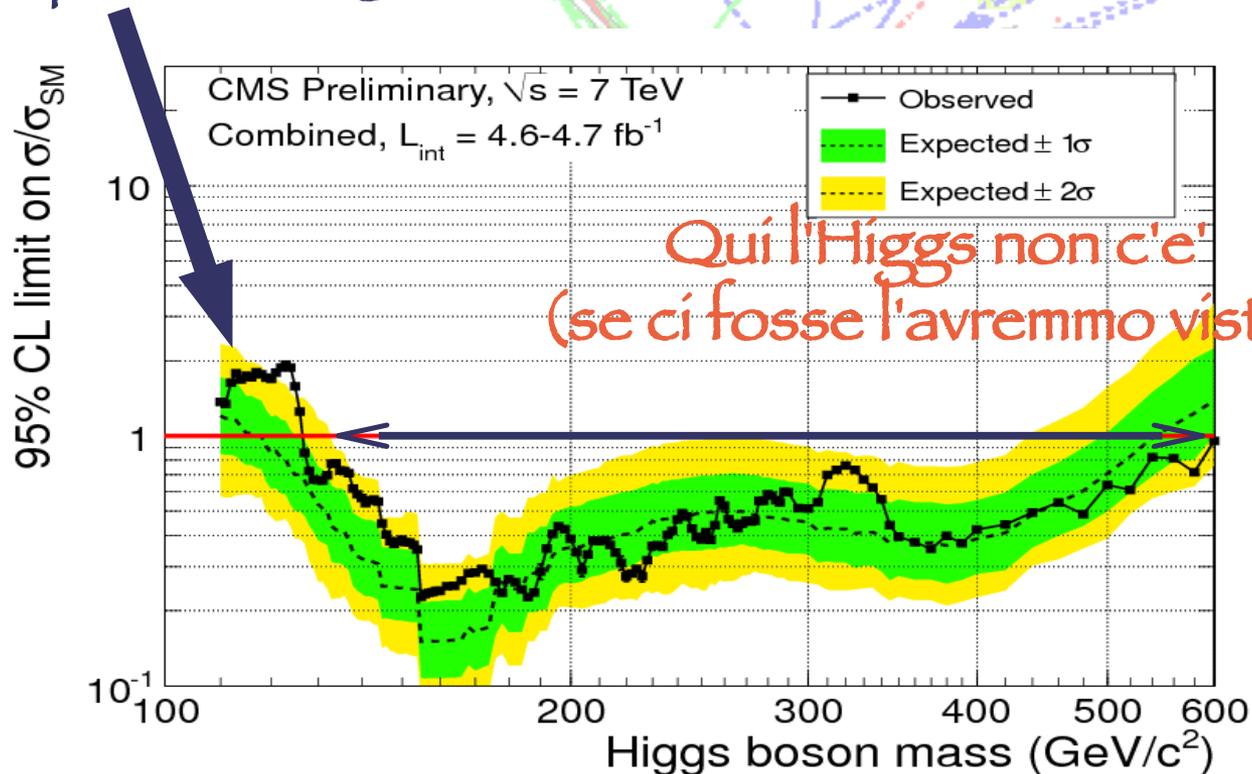
dati, 5 fb⁻¹



niver

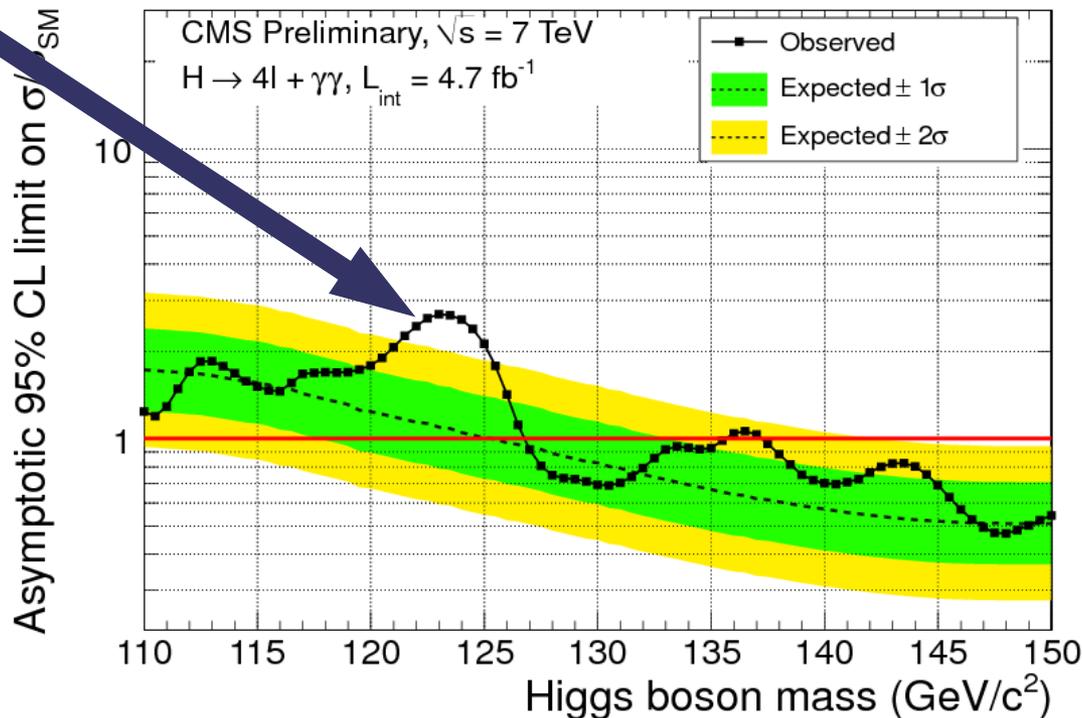
Combinazione delle varie misure

- L'Higgs NON E' ancora stato scoperto, ma e' stato grandemente limitato il suo "campo di esistenza"
- c'e' poi una regione interessante



Zoom

- Nella regione tra 122 – 126 GeV i dati si discostano un po' da quello che ci aspetteremmo in assenza di Higgs
- Curiosamente, anche ATLAS osserva un eccesso analogo all'incirca nella stessa regione
- L'eccesso però non è ancora statisticamente significativo



Conclusioni sull'Higgs

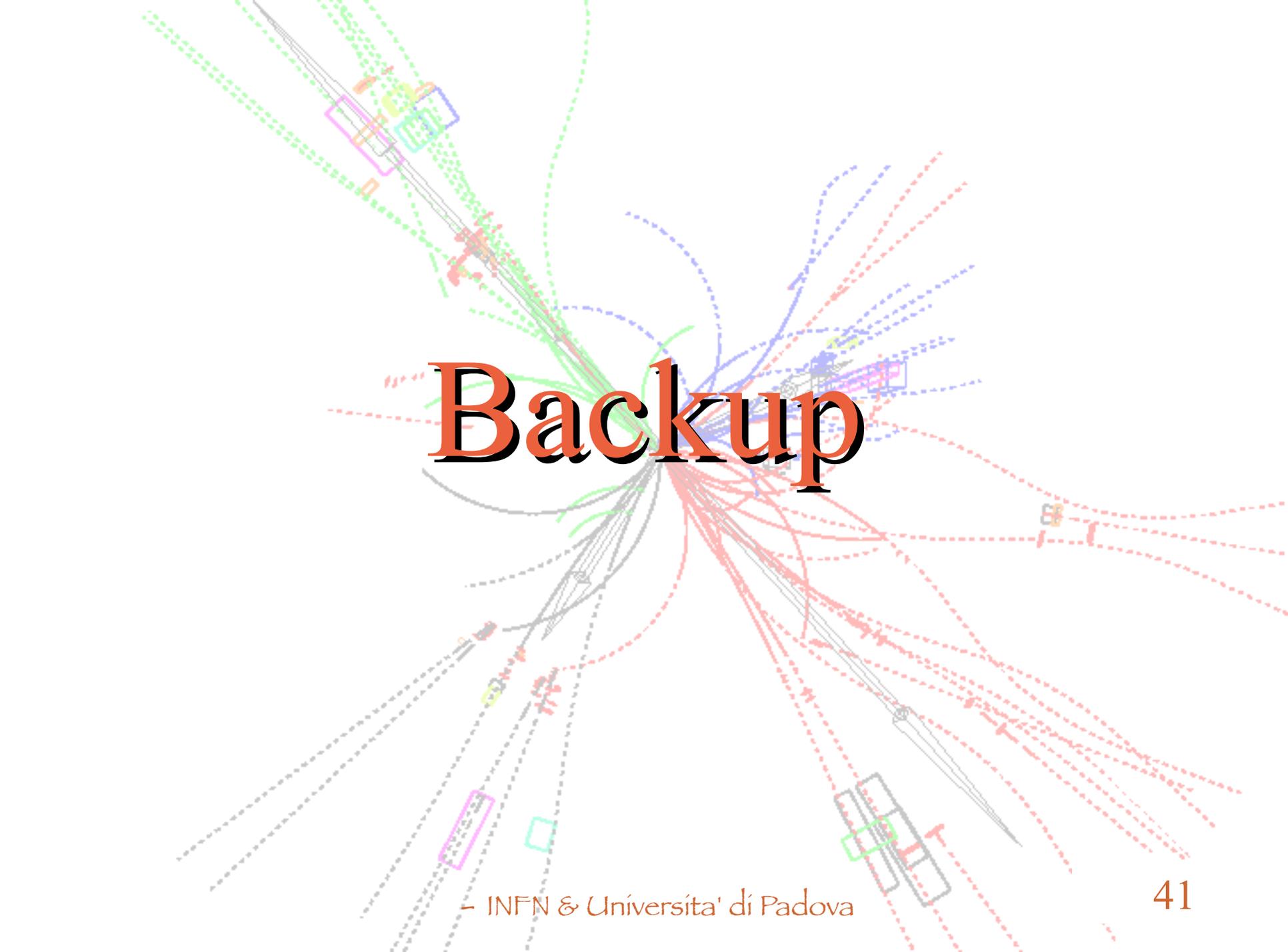
- Il meccanismo di Higgs è il paradigma preferito per assegnare la massa a tutte le particelle – e quindi alla materia
- Le ricerche a LEP (1990-2000) hanno escluso l'esistenza di un Higgs leggero ($M_H < 115 \text{ GeV}$)
- Dopo due anni di piena attività, le ricerche a LHC escludono un Higgs con massa $M_H > 128 \text{ GeV}$

ma ci sono indizi interessanti $\sim 125 \text{ GeV}$

- Nel 2012 LHC produrrà il quadruplo degli eventi finora raccolti e arriveremo ad una conclusione definitiva

Conclusioni

- Il lavoro del **fisico delle particelle** è una avventura affascinante che punta alla conoscenza dei principi che regolano il mondo che ci circonda.
- Perché la **Scienza progredisca**, la mente deve essere sgombra da **preconcetti e da timori riverenziali...** ma i risultati devono essere **controllati e riproducibili!**
- Anche se non è motivata direttamente dall'applicazione tecnologica, la fisica di base ha modificato la vita di tutti i giorni (medicina: dalla radiografia, alla radioterapia, alla radiazione di sincrotrone, adroterapia, PET,...). Questa ricerca ha una forte ricaduta economica sulle industrie a elevata tecnologia.



Backup

L'atomo è "fondamentale"?

Alchimia → Chimica (1700-1800)

- Classificazione degli atomi in base alle proprietà chimiche
- Evidenza di una "periodicità" (Mendeleev)
- Indicazioni di una struttura comune degli elementi (atomo: nucleoni, orbitali elettronici)

ELEMENTS

Hydrogen	1	Strontian	46
Azote	5	Barytes	68
Carbon	5	Iron	50
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	24	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	42	Mercury	167

Periodic Table of the Elements

	IA																		0	
1	1 H	IIA																		2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne			
3	11 Na	12 Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	VII	IB	IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
6	55 Cs	56 Ba	*La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
7	87 Fr	88 Ra	+Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110	111	112	113							

* Lanthanide Series

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

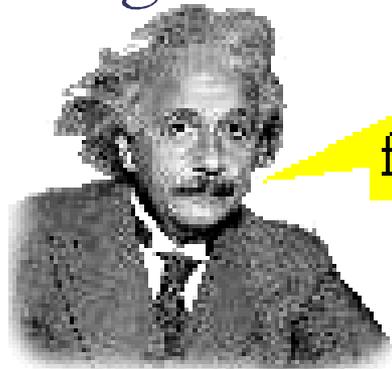
+ Actinide Series

Acceleratori

Negli acceleratori moderni le particelle cariche vengono accelerate da campi elettromagnetici variabili all'interno di cavità risonanti. Questi dispositivi devono avere:

Grande energia:

- Più voglio entrare nei dettagli del bersaglio, più il proiettile deve avere "lunghezza d'onda" corta ($\lambda = h/mv$);
- Per produrre altre particelle sfruttando l'equivalenza di massa e energia ($E = mc^2$)



Mass is just a form of energy!

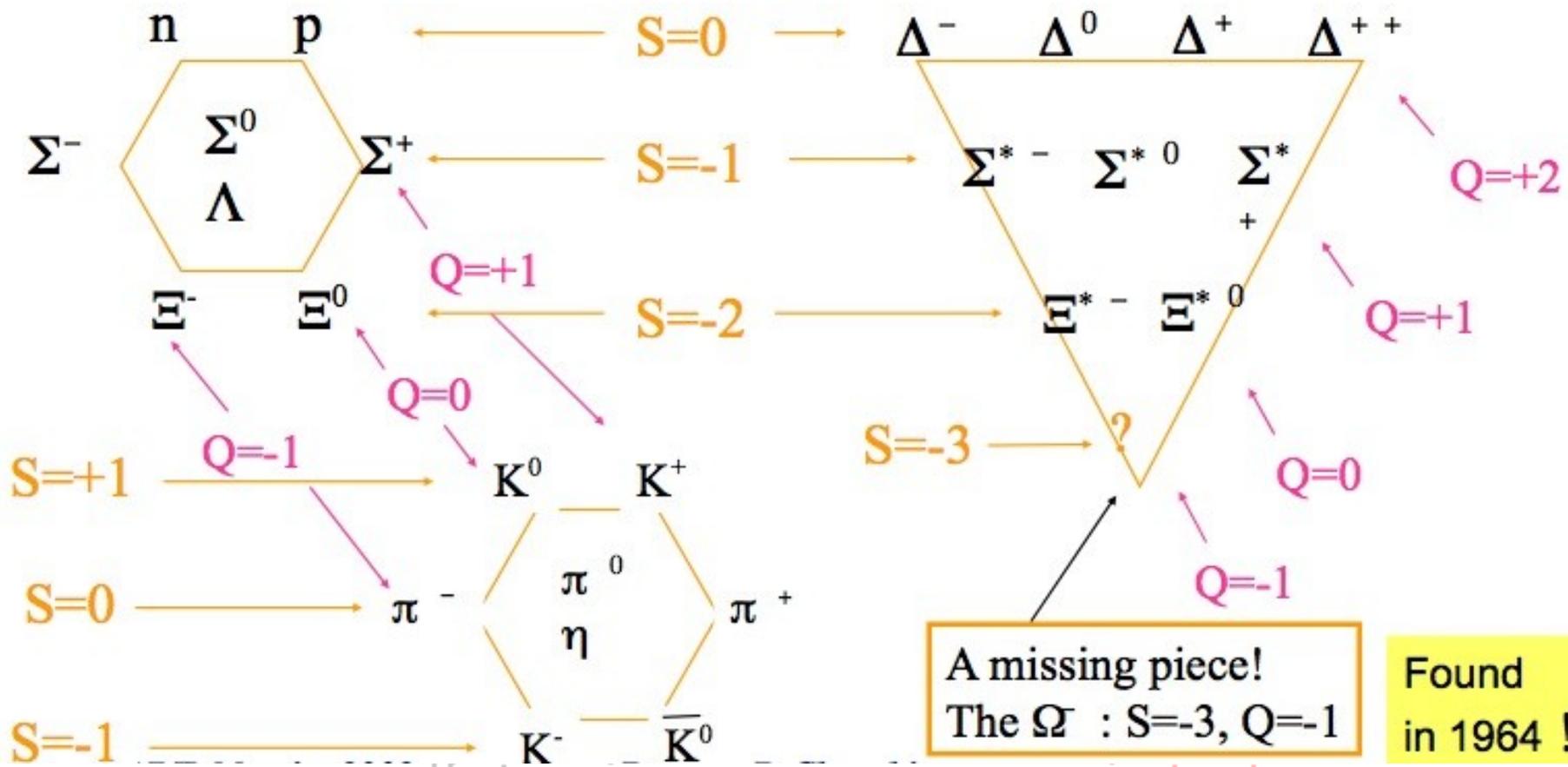
Grande luminosità:

- Il numero di urti al secondo con produzione di particelle ("eventi") è pari al prodotto della "Sezione d'urto" σ (probabilità che il fenomeno si manifesti) per la "Luminosità" L dell'acceleratore (numero di particelle che si "incontrano" per unità di tempo e di superficie):

$$\frac{dN}{dt} = \sigma * L$$

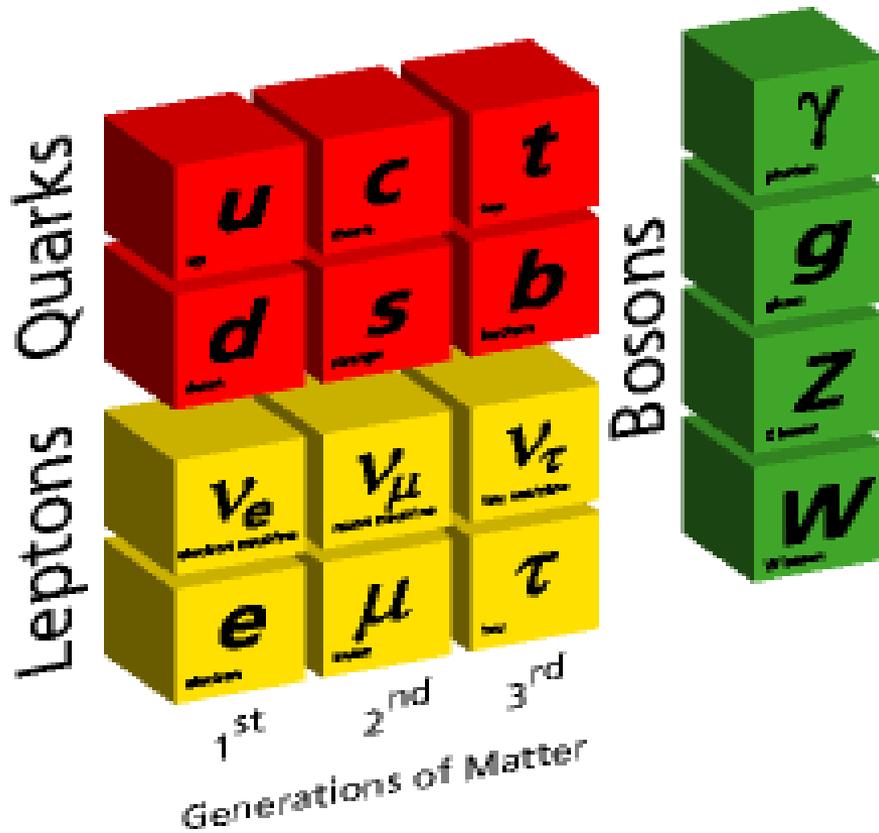
Il modello a Quark

Nel 1961 Gell-Mann & Ne'eman ebbero per la fisica delle particelle lo stesso ruolo di Mendeleev 100 anni prima con gli atomi "fondamentali"



I leptoni

Elementary Particles

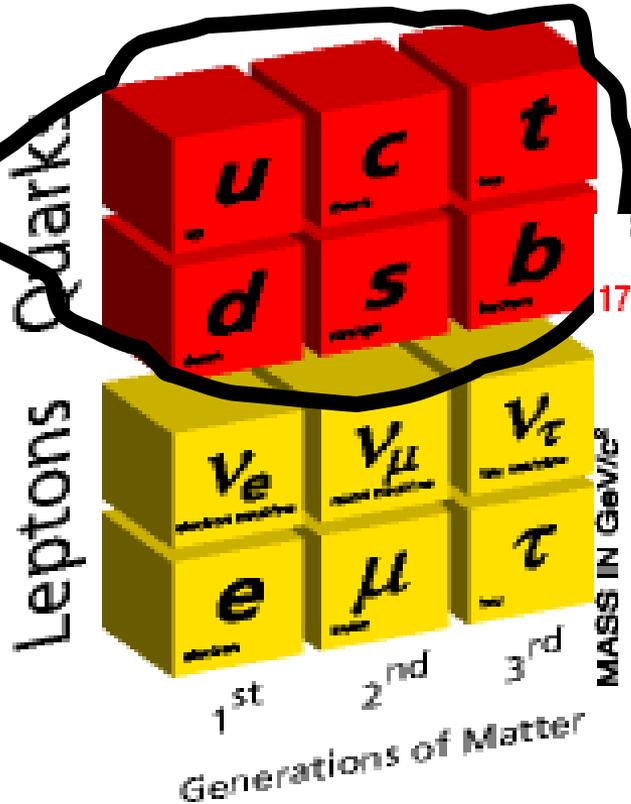


- I leptoni sono sei:
 - tre hanno carica elettrica (negativa)
 - tre non hanno carica elettrica
- Il leptone carico più conosciuto è l'elettrone (e). Gli altri due leptoni carichi sono il muone (μ) e il tau (τ)
 - Muone e tau sono repliche dell'elettrone con massa più grande
- I leptoni neutri si chiamano neutrini:
 - c'è un neutrino corrispondente a ogni leptone carico
 - hanno massa molto piccola (ma non nulla)

I quarks

Elementary Particles

Ci sono 5 ordini di grandezza tra le masse del quark piu' leggero e piu' pesante



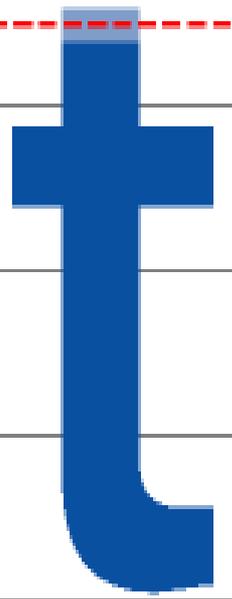
MASS IN GeV/c²

174.3

$M(\text{top}) = 172.9 \pm 1.1 \text{ GeV}/c^2$

0.005 up
0.01 down
0.15 strange
1.5 c charm
5.0 b bottom
top

QUARKS

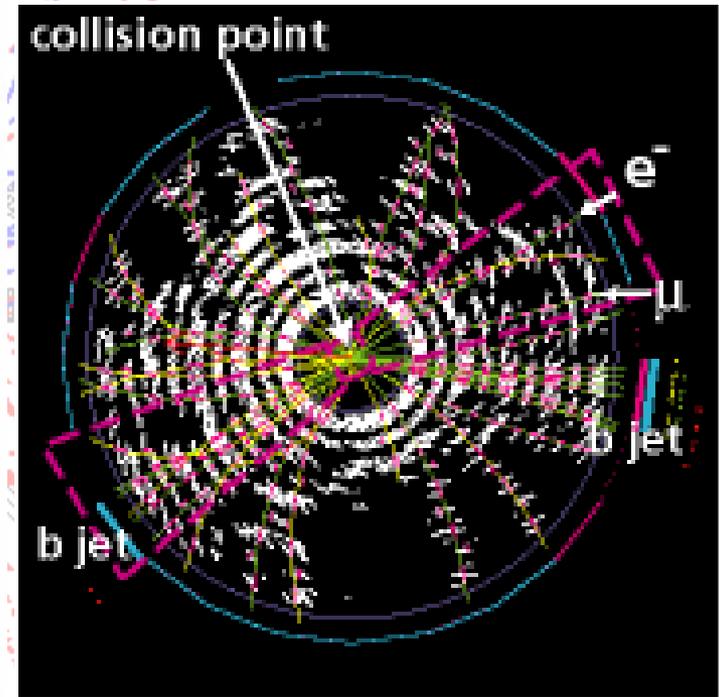
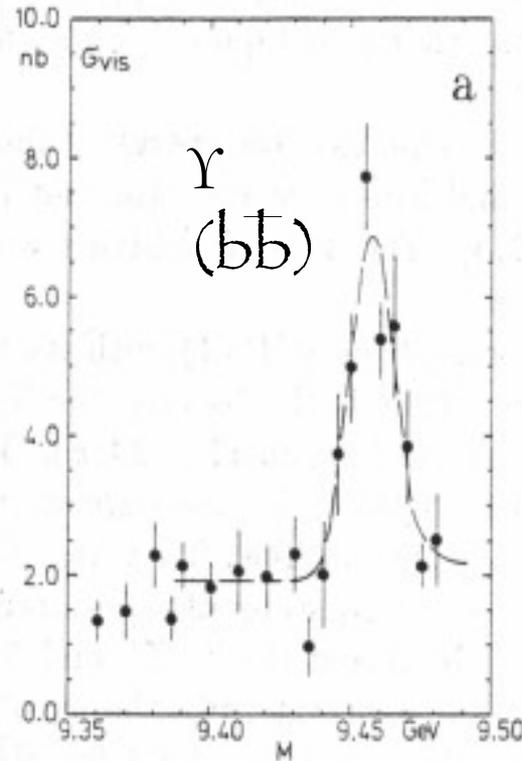
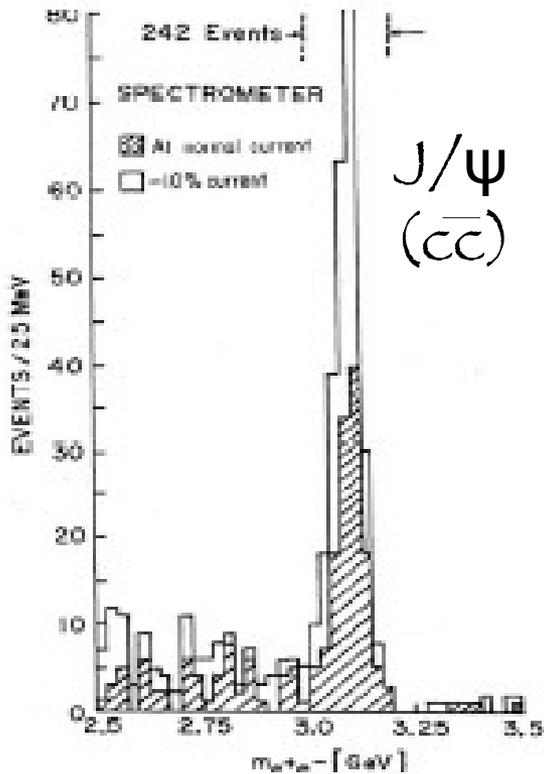


I quarks charm, top e bottom

1974: scoperta del c

1977: scoperta del b

1994: scoperta del t



Mesoni: particelle formate da una coppia quark-antiquark.

Il quark top vive 10^{-25} s, troppo poco per poter "adronizzare"...

Ricerca del Bosone di Higgs @ LHC

- Collisioni protone protone alla massima energia
- Scopo: convertire parte dell'energia cinetica dei protoni nell'energia di massa dell'Higgs
- Identificare l'Higgs frugando tra le particelle effettivamente osservate

