

La Fisica delle Particelle Elementari e la collaborazione italiana all'esperimento CMS del CERN

Giornate della cultura e della lingua italiana a
Fiume, 9-22 ottobre 2012

Martino Margoní

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



Un po' di Storia

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?



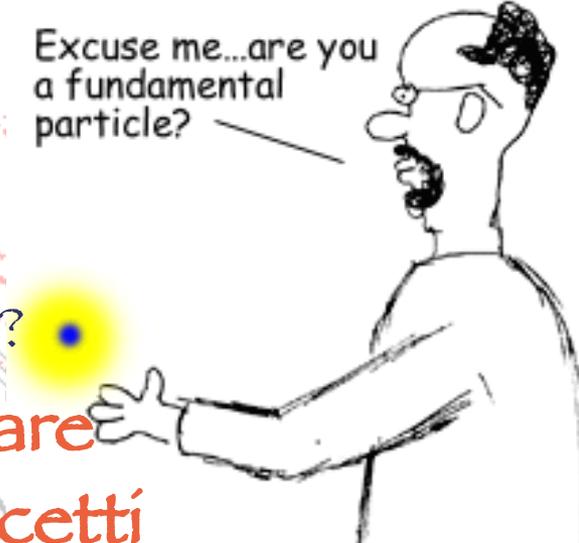
*Si studia l'elementare per capire il macroscopico
... sperando di fare un po' di ordine!* 😊

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”)!


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

IA																																				0
1	2																	19	20																	2
3	4																	5	6	7	8	9	10													
11	12																	13	14	15	16	17	18													
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																			
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																			
55	56	*La	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																			
87	88	+Ac	104	105	106	107	108	109	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!

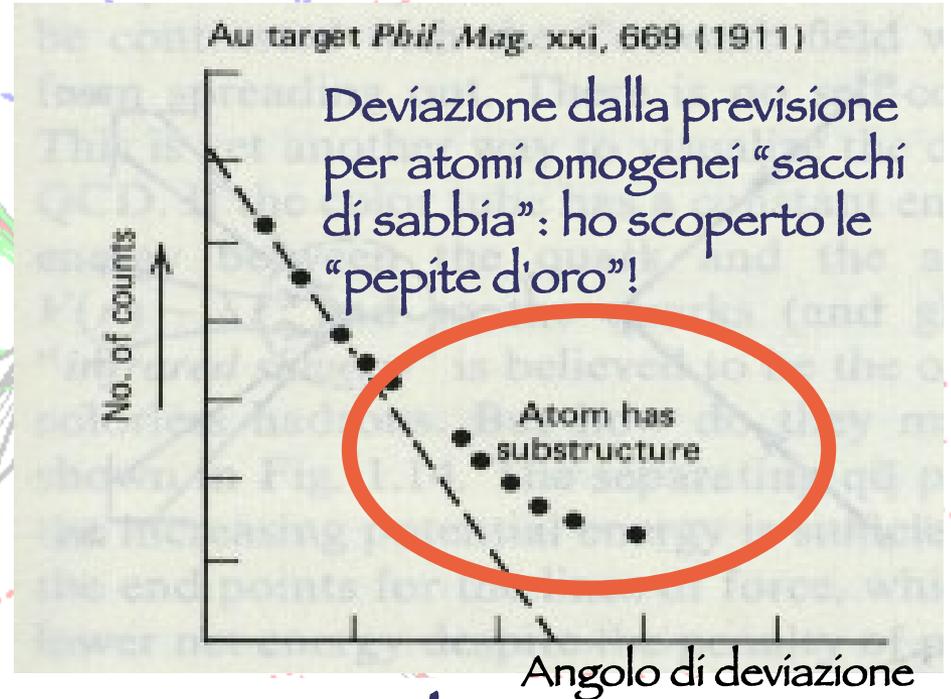
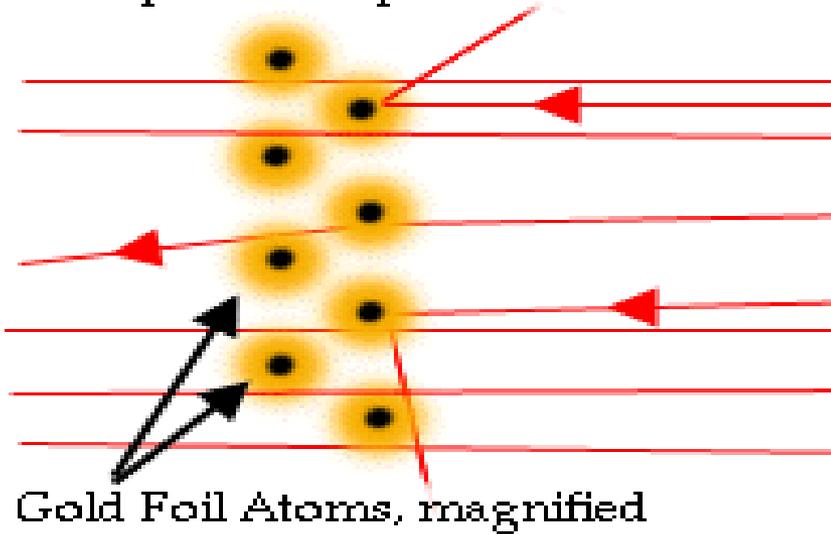
Il Metodo "Tex Willer"



- 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

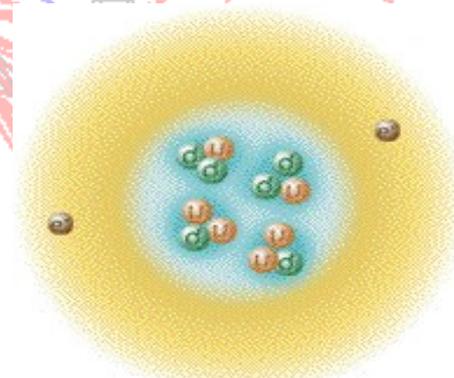
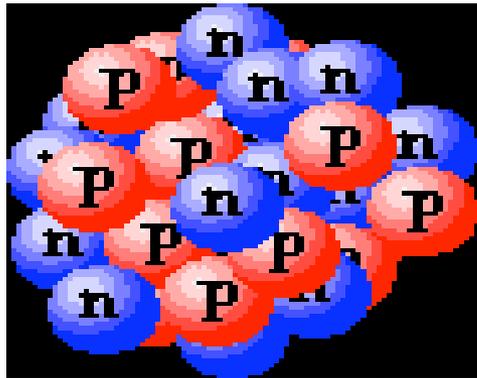
The Positive Nucleus Theory
Explains Alpha Deflection



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...

Per vedere di cosa è fatta la materia...

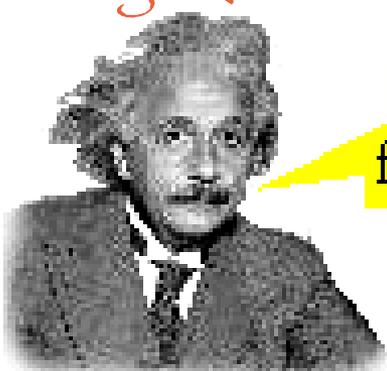
- Bisogna guardare con lo strumento giusto!
- La lunghezza d'onda della sonda deve essere più piccola dell'oggetto da studiare
- $\lambda \sim 1/E$:
 - Cellula ($d \sim 10^{-5} \text{m}$): luce visibile $E \sim \text{eV}$
 - Virus ($d \sim 10^{-8} \text{m}$): microscopio elettronico $E \sim \text{keV}$
 - Protone ($d \sim 10^{-15} \text{m}$): acceleratore $E \sim \text{GeV}$
 - Quark ($d < 10^{-18} \text{m}$): LHC $E \sim 10 \text{TeV}$

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
- Per produrre altre particelle sfruttando l'equivalenza di massa e energia ($E=mc^2$)



Mass is just a form of energy!

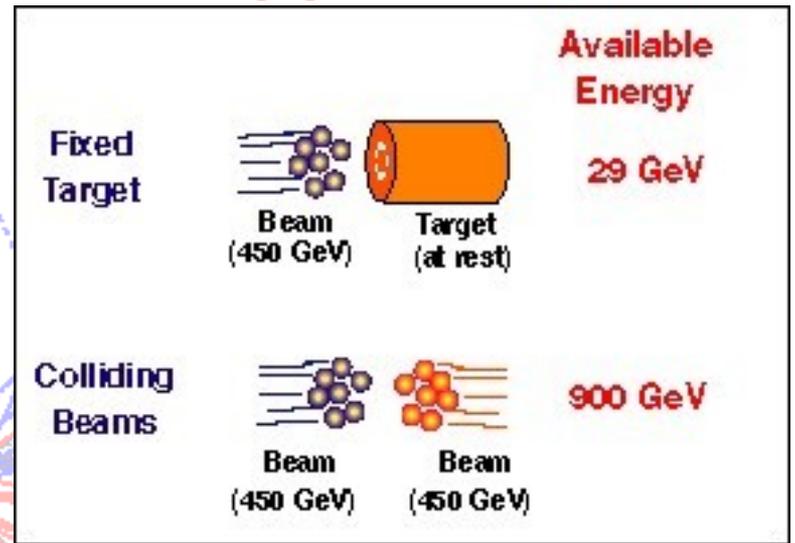
Grande luminosità:

- Il numero di urti al secondo con produzione di particelle ("eventi") è pari al prodotto della "Sezione d'urto" (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):

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

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".

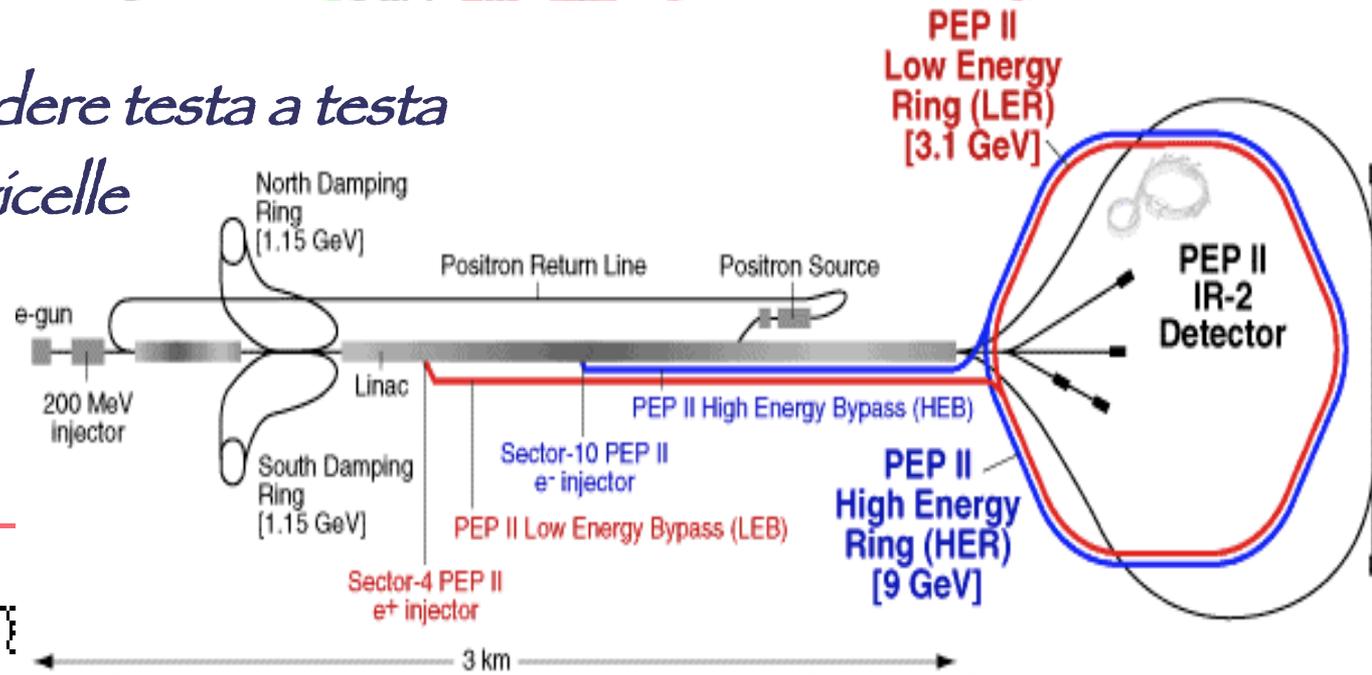


IDEA!: fare collidere testa a testa due fasci di particelle

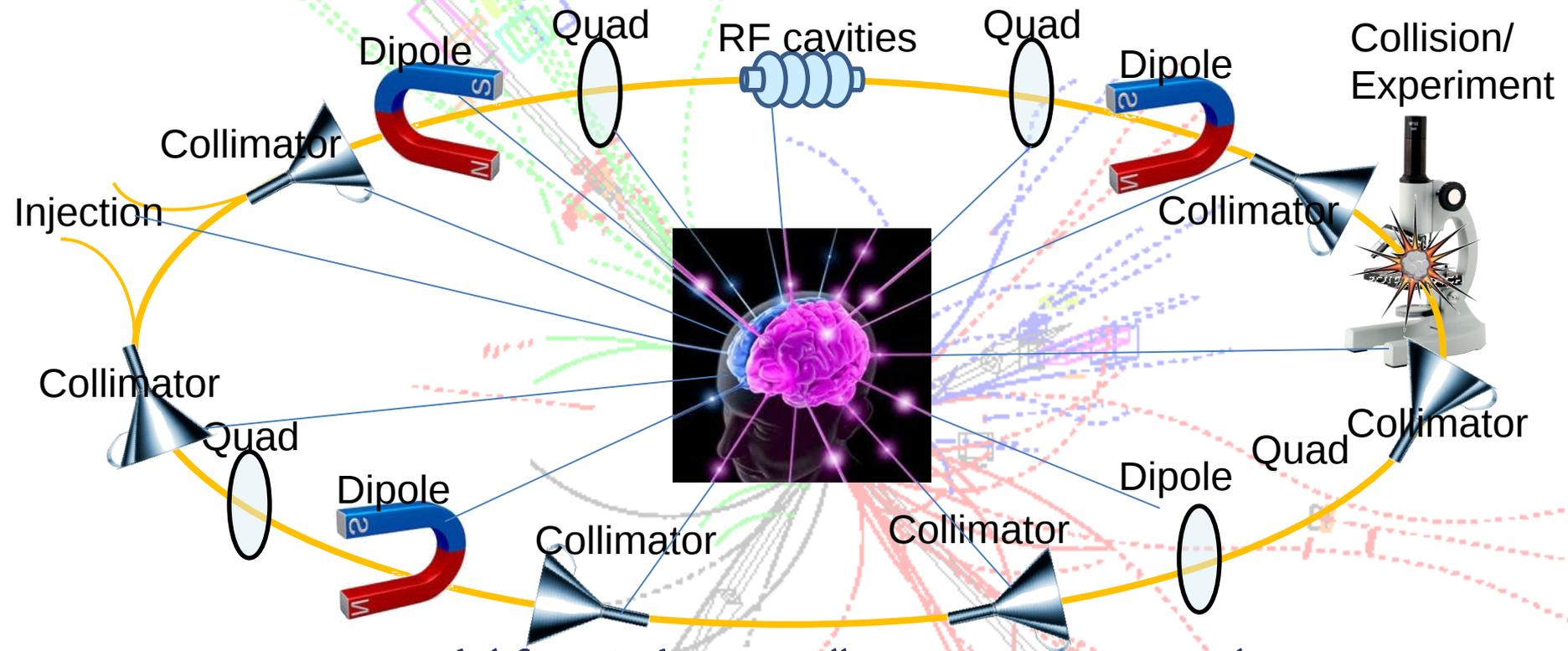
Heh-heh. I have a lot of kinetic energy!



energy + energy = lots of energy



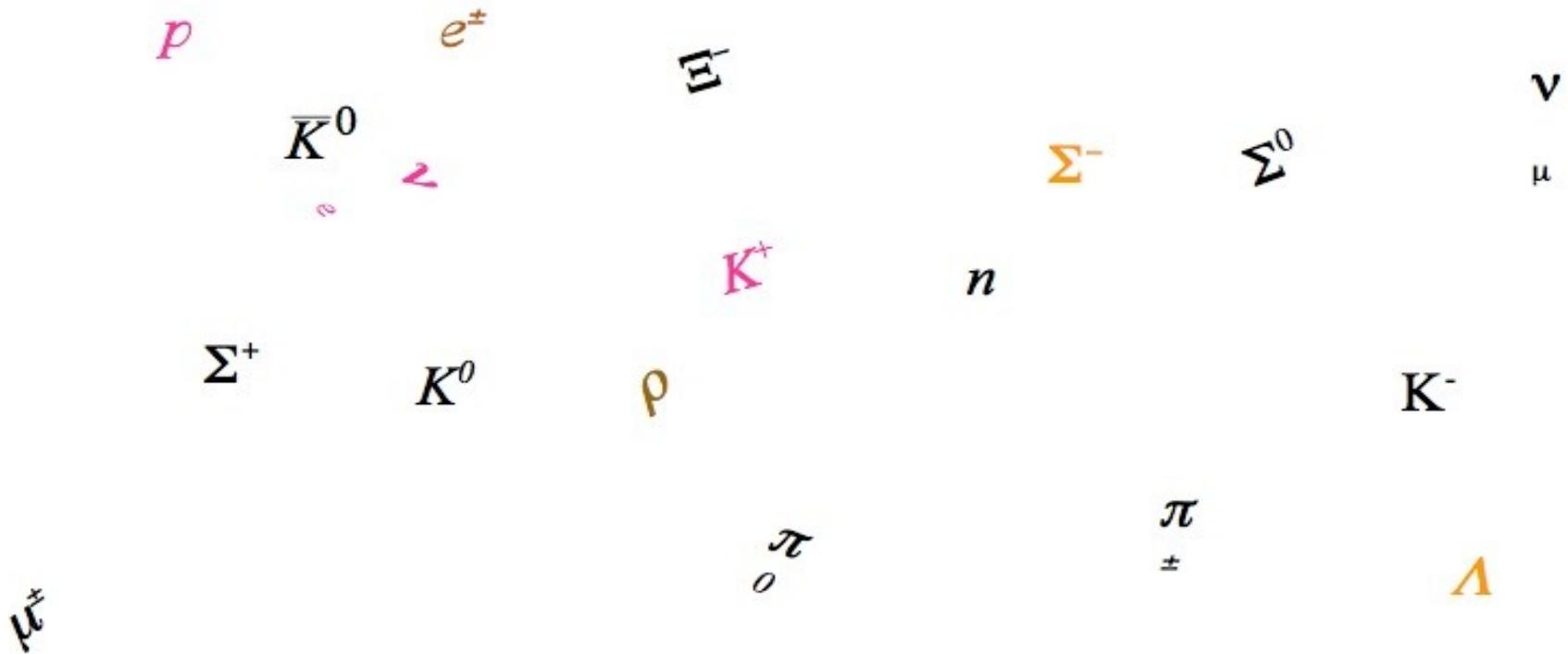
Lo schema di un collisore



- Sistema iniezione del fascio di particelle (tipicamente acceleratori più piccoli)
- Cavità a radio frequenza per accelerare
- Magneti dipoli (più altri correttori) per mantenere il fascio in traiettoria circolare
- Esperimenti (detectors) nei punti di collisione

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"

UP

DOWN

Strange

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?

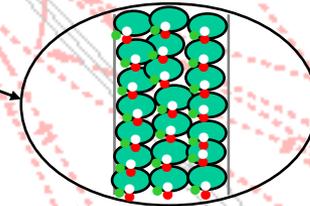
Questa descrizione e' molto interessante, ma i quark erano ancora entita' matematiche...

- 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

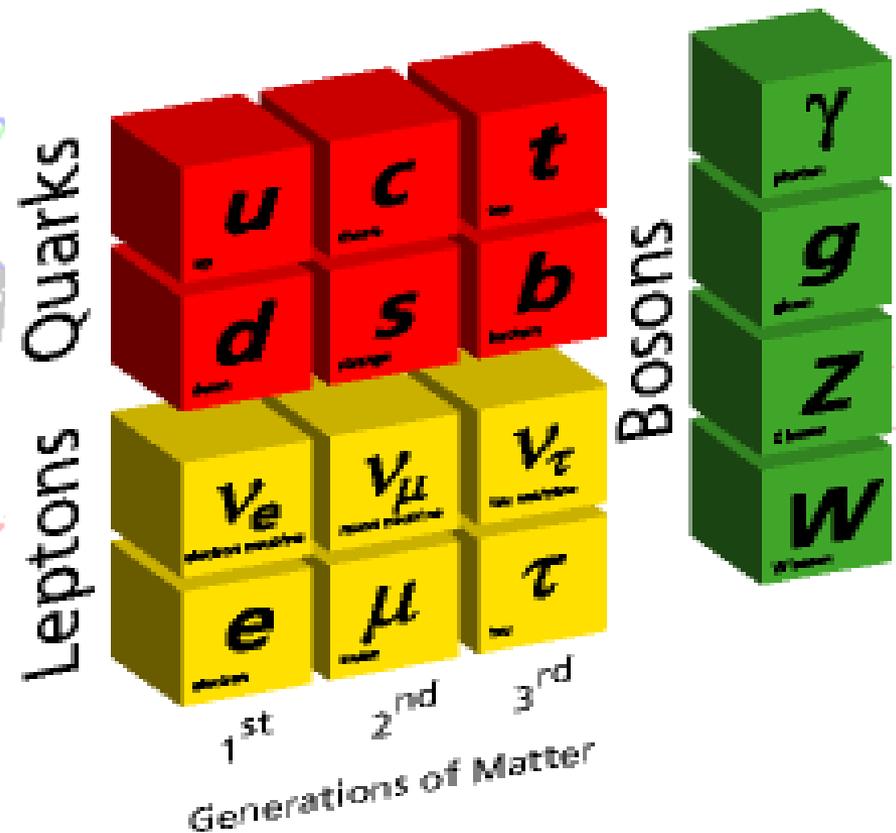
Il Modello Standard

- È la teoria che descrive le particelle elementari e le loro interazioni. Prevede 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

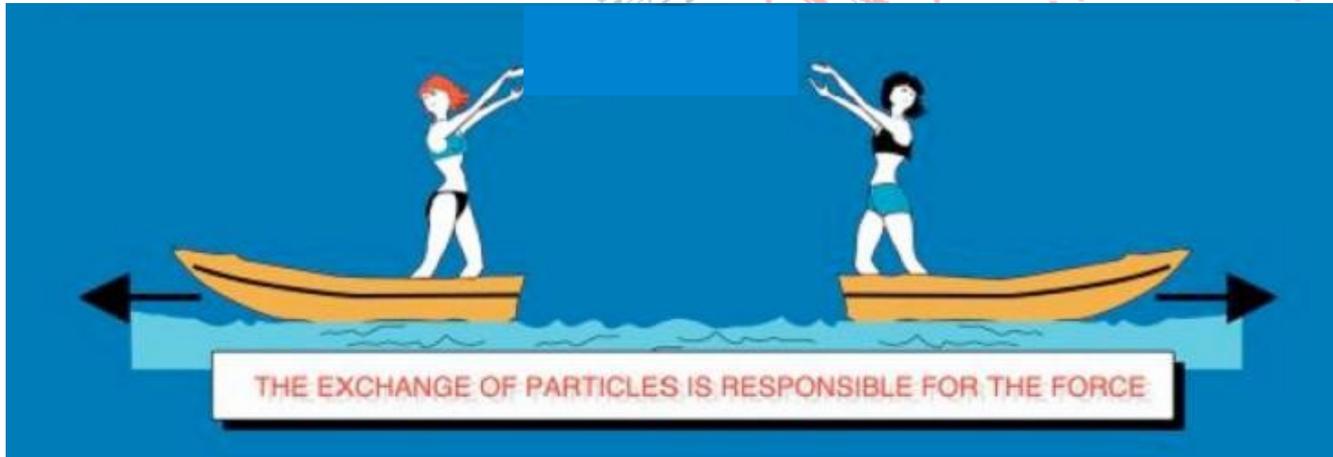
- Il Modello Standard descrive:
 - tutta la materia
 - tutte le forze dell'universo (escludendo per ora la gravità)
- La sua bellezza sta nella capacità di descrivere centinaia di particelle e interazioni complesse con “poche” particelle elementari e interazioni fondamentali

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!

Abbiamo capito tutto? NO!!

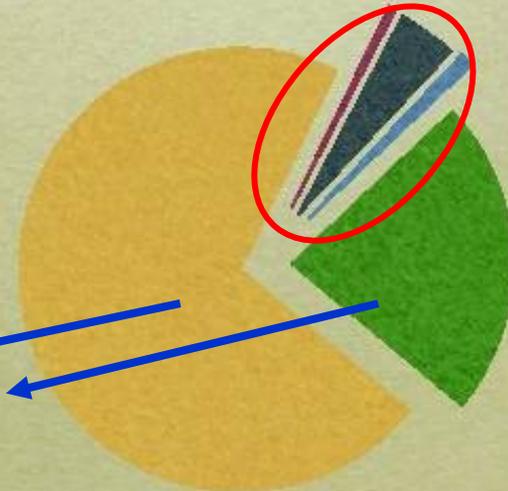
Il "bilancio energetico" dell' Universo:

- Stars and galaxies are only ~0.5%
- Neutrinos are ~0.1–1.5%
- Rest of ordinary matter (electrons, protons & neutrons) are 4.4%
- Dark Matter 23%
- Dark Energy 73%
- Anti-Matter 0%

- stars
- baryon
- neutrinos
- dark matter
- dark energy

Questo e' cio' che al momento conosciamo dell' Universo (~5%)!

Questo e' cio' che NON conosciamo



Questioni aperte (alcuni esempi)

- perché le “famiglie” di particelle (“repliche”, ad esempio, dell’ elettrone e del suo neutrino: leptone “mu”, leptone “tau”) sono 3? (sono davvero 3?)

- qual è l’ origine delle masse, e perché sono così diverse
($m_\mu \sim 200 m_e$; $m_\tau \sim 3400 m_e$ ($\sim 1.7 m_{\text{protone}}$!)
per i quarks: $m_{\text{beauty}} \sim 5 m_{\text{protone}}$, $m_{\text{top}} \sim 170 m_{\text{protone}}$!)

- verifica del meccanismo che fornisce la massa ai ‘mediatori’ delle interazioni (bosone di Higgs, vedi dopo...)

- c’è una struttura nei quarks e nei leptoni? (qual è il limite che possiamo porre sulla loro natura ‘puntiforme’?)

- ci sono altre particelle che non abbiamo visto (es. particelle “supersimmetriche”) candidati della “materia oscura”?

- asimmetria materia-antimateria nell’ Universo...

A schematic diagram of the Large Hadron Collider (LHC) tunnel at CERN. The diagram shows a central circular tunnel with four main beam lines extending outwards. The beam lines are color-coded: green (top-left), blue (top-right), red (bottom-right), and grey (bottom-left). Various detector locations are marked with colored rectangles and labels: ATLAS (purple), CMS (green), LHCb (red), and ALICE (blue). The text 'Il Large Hadron Collider del CERN' is overlaid in a large, orange, cursive font.

Il Large Hadron Collider del CERN



IL CERN



Scopi:

- ✓ Costruire acceleratori di particelle da mettere a disposizione della comunità scientifica di tutto il mondo
- ✓ Partecipare alla realizzazione degli esperimenti che "sondano" la materia fino alle massime energie disponibili
- ✓ Sviluppare nuove tecnologie (hardware e software) per la ricerca in campo delle particelle elementari
- ✓ Promuovere la cooperazione scientifica internazionale

- INFN & Università di Padova



Gli stati membri del CERN

The Twenty Member States of CERN



Member States (Dates of Accession)

 AUSTRIA (1959)	 DENMARK (1953)	 GREECE (1953)	 NORWAY (1953)	 SPAIN (1/1961-12/1968-1/1983)
 BELGIUM (1953)	 FINLAND (1991)	 HUNGARY (1992)	 POLAND (1991)	 SWEDEN (1953)
 BULGARIA (1999)	 FRANCE (1953)	 ITALY (1953)	 PORTUGAL (1996)	 SWITZERLAND (1953)
 CZECH FR (1993)	 GERMANY (1953)	 NETHERLANDS (1953)	 SLOVAK FR (1993)	 UNITED KINGDOM (1953)

La partecipazione italiana al CERN

● 1953: L'Italia è uno dei 12 Paesi fondatori del CERN, pensato per rilanciare la Fisica europea dopo la fine della seconda guerra mondiale. Edoardo Amaldi è uno dei pionieri



● 1984: Carlo Rubbia e Simon van der Meer vincono il premio Nobel per il raffreddamento stocastico e la scoperta dei mediatori W e Z



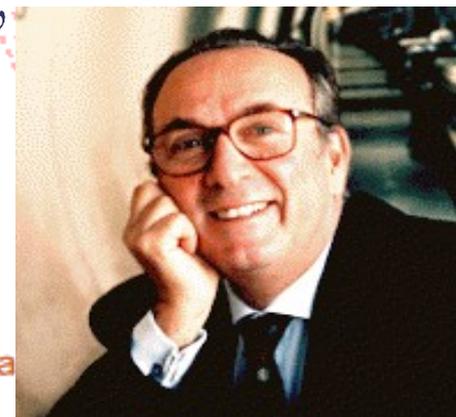
Carlo Rubbia



Simon van der Meer



● Il CERN oltre a molti capi di esperimenti, ha avuto tre direttori generali italiani:
Edoardo Amaldi 1952-1954
Carlo Rubbia 1989-1993
Luciano Maiani 1999-2003



Il Large Hadron Collider

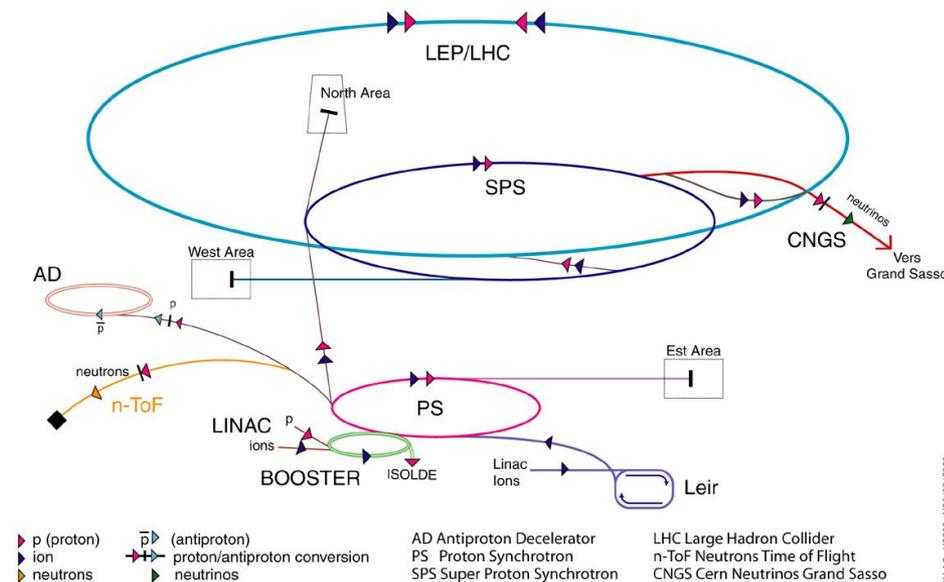
L'acceleratore piu' grande e potente mai costruito: anello di ~27 km a 100 metri al di sotto della superficie



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)

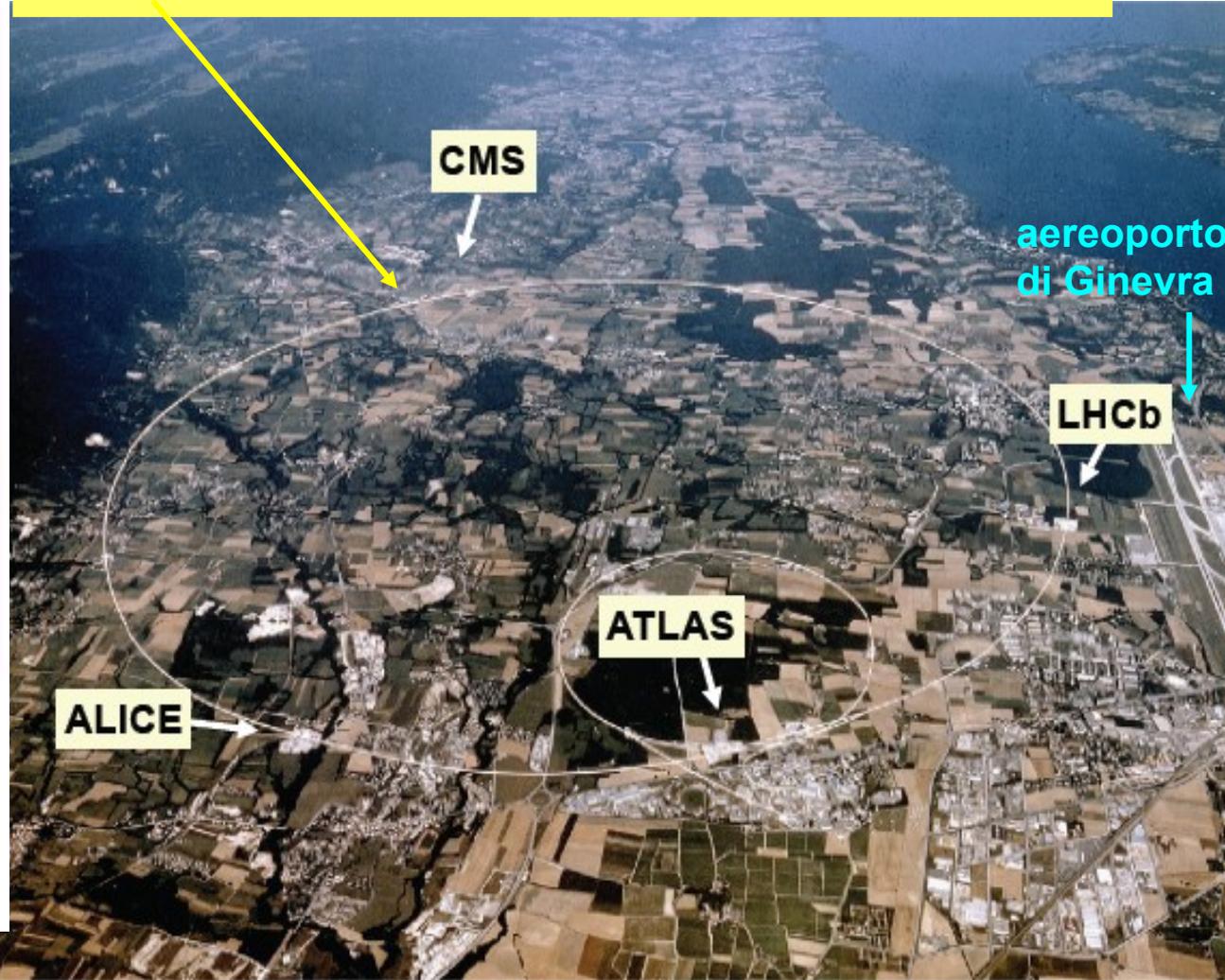
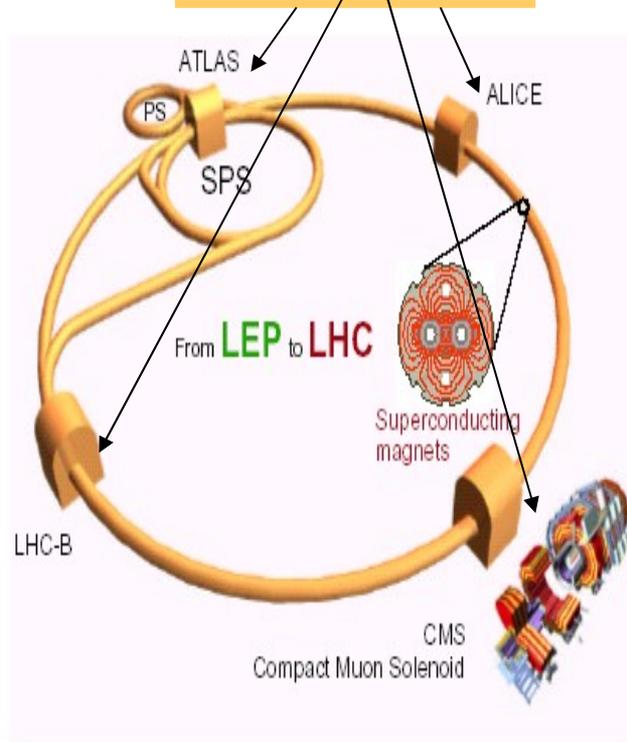


- Il penultimo stadio (SPS) e' l'acceleratore progettato da Carlo Rubbia per osservare W e Z nei primi anni 80

Il Large Hadron Collider

4 esperimenti
("rivelatori")

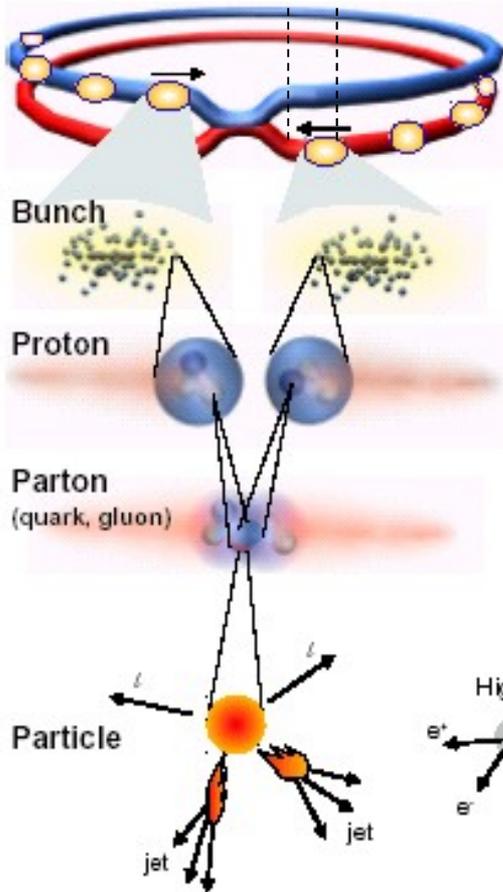
~27 km di circonferenza (stesso tunnel del collisore
Precedente, il LEP, che accelerava elettroni e positroni)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	e+ e-	200 GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
LHC	p p	14 TeV	10^{34}
	Pb Pb	1312 TeV	10^{27}

Il Large Hadron Collider

↔ 25 ns



Proton-Proton	(2835 x 2835 bunches)
Protons/bunch	10^{11}
Beam energy	7 TeV (7×10^{12} eV)
Luminosity	10^{34} cm ⁻² s ⁻¹
Crossing rate	40 MHz
Collisions ≈	$10^7 - 10^9$ Hz

~2800 "pacchetti" distanziati di 25 ns ognuno (in realta', con una struttura a 'treni')

$$T_{\text{giro}} = 2\pi R / c = 88 \mu\text{s}$$

~ 10^{11} protoni/pacchetto

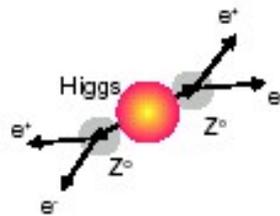
$$E_{\text{beam}} = 8 \text{ TeV} \quad (1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV})$$

$$2800 * 10^{11} * 8 * 10^{12} *$$

$$1.602 * 10^{-19} \text{ Joules} = 360 \text{ MJ per fascio}$$

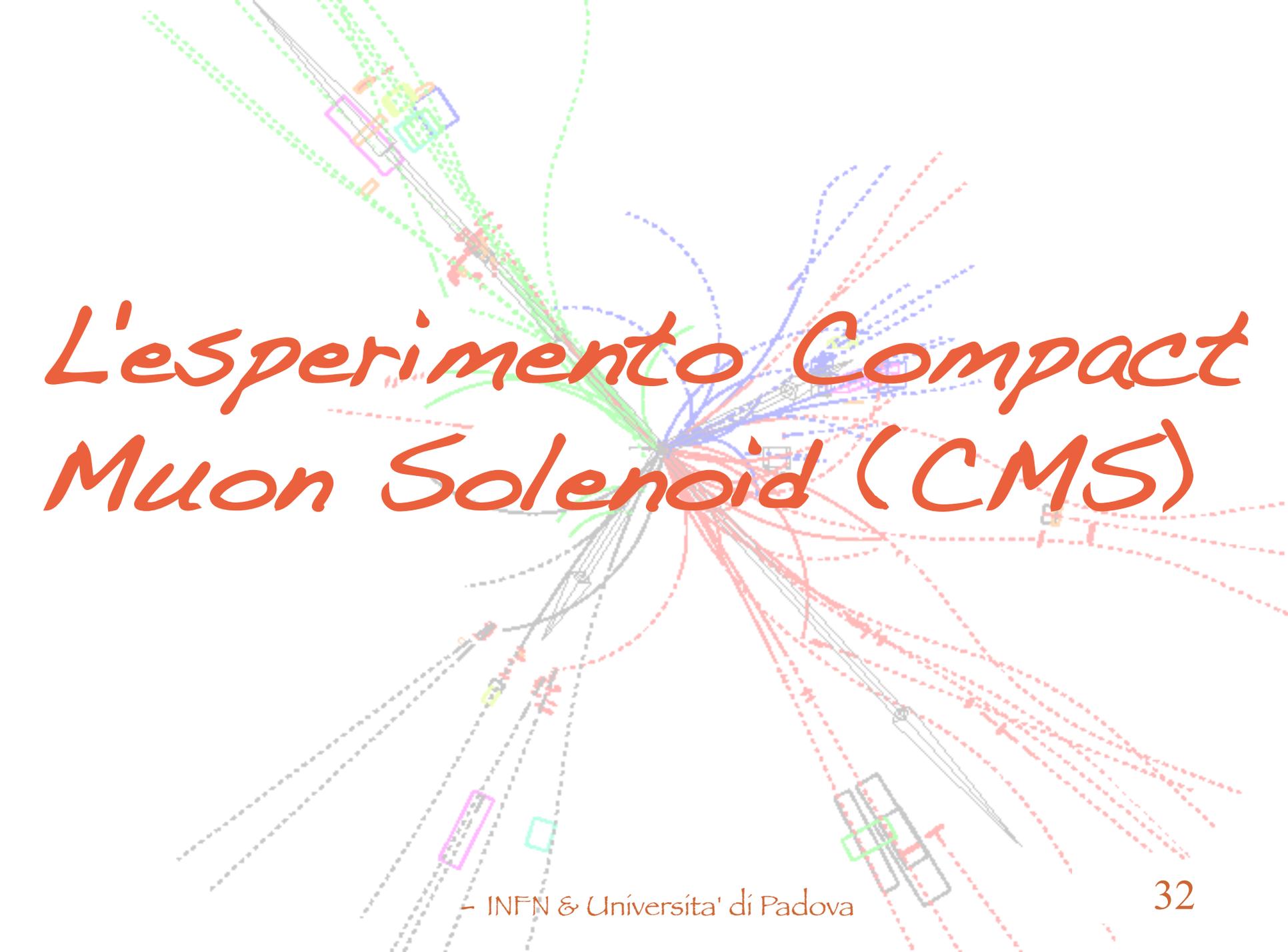
[~ 1TGV (400 tons) a 150km/h...]

Higgs



SUSY.....

Selection of 1 in 10,000,000,000,000



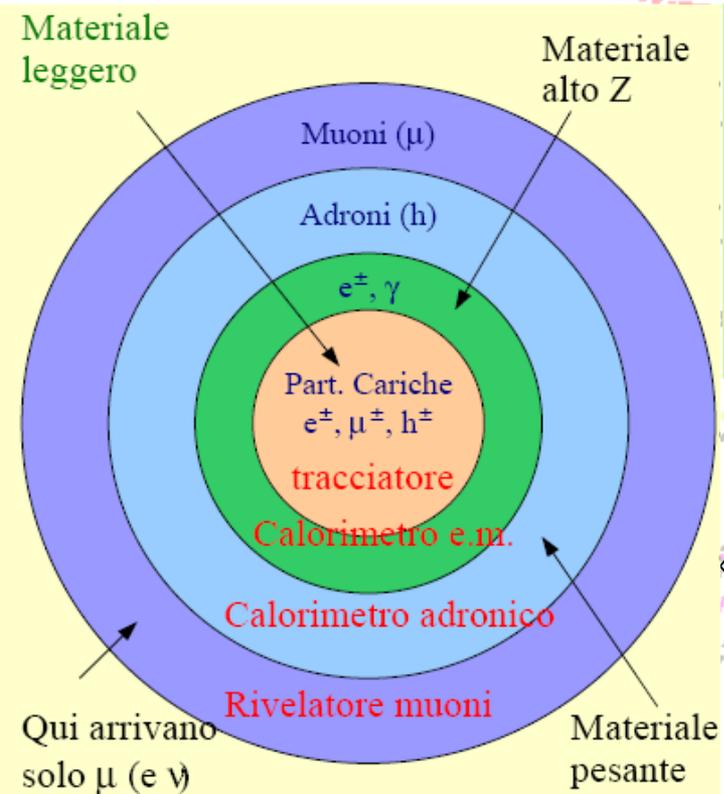
L'esperimento Compact Muon Solenoid (CMS)

I rivelatori a LHC: un difficile compito

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

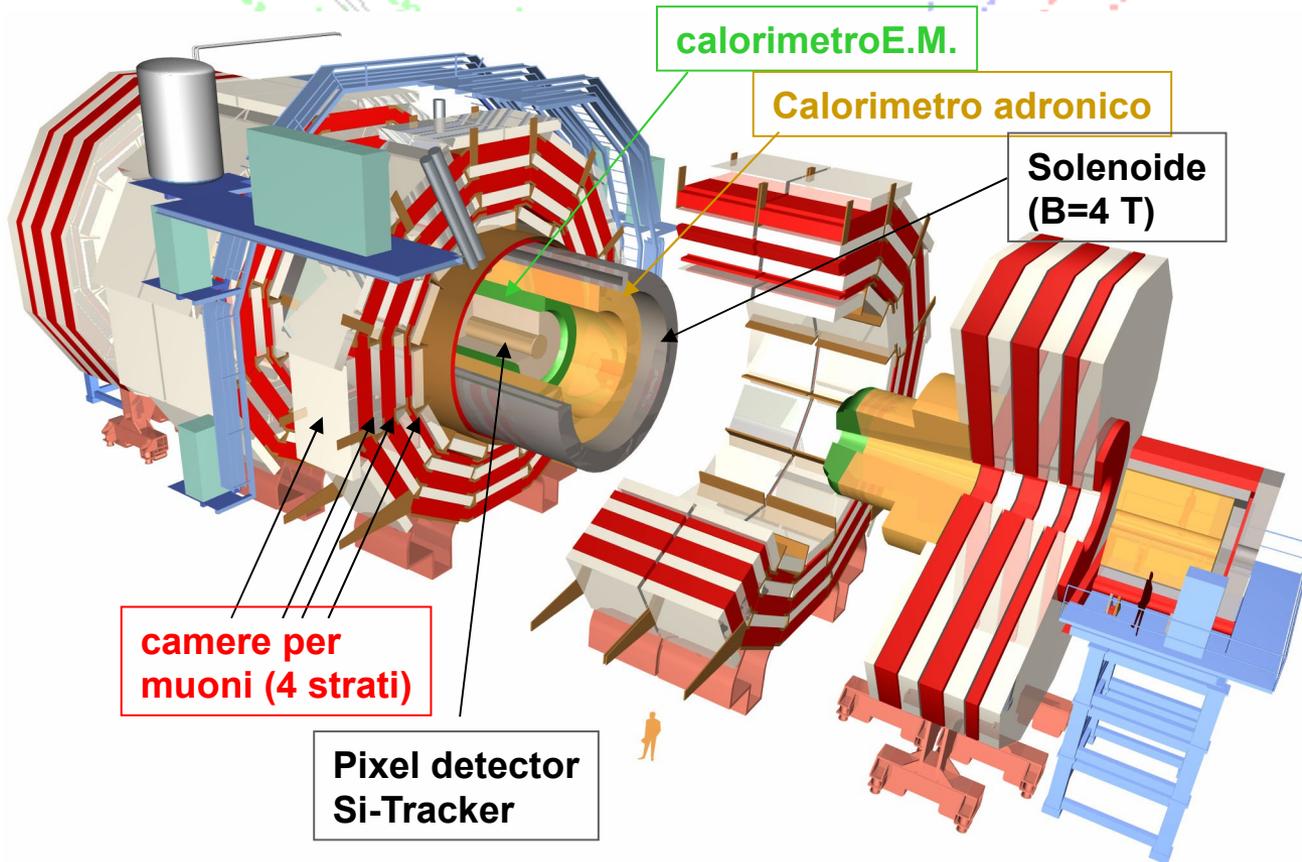
- estremamente grandi, granulari, veloci e ermetici (privi di buchi)

- specializzati per l'identificazione di particelle diverse (e / fotoni / muoni / adroni)

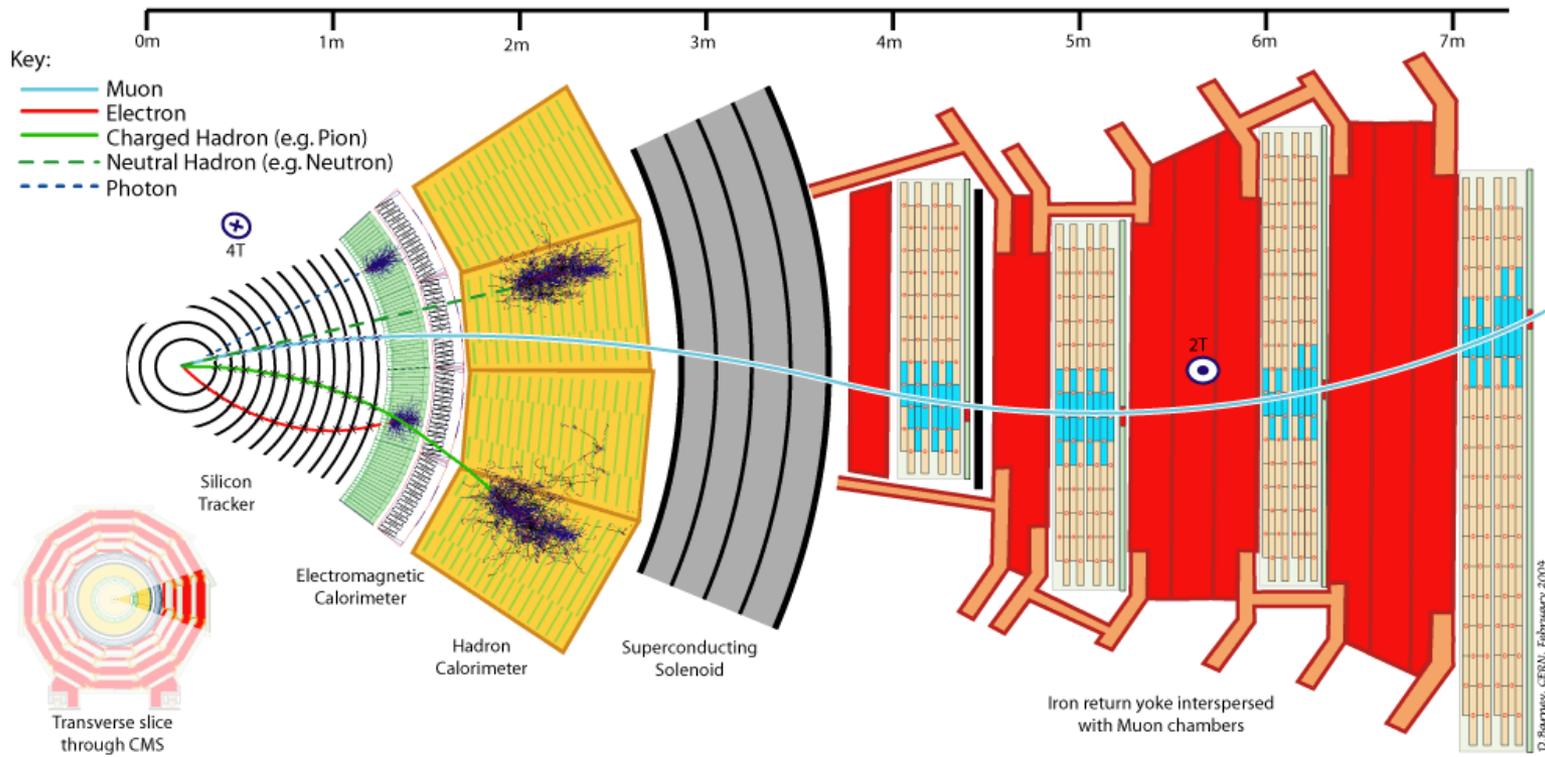


← tipica struttura "a cipolla" →

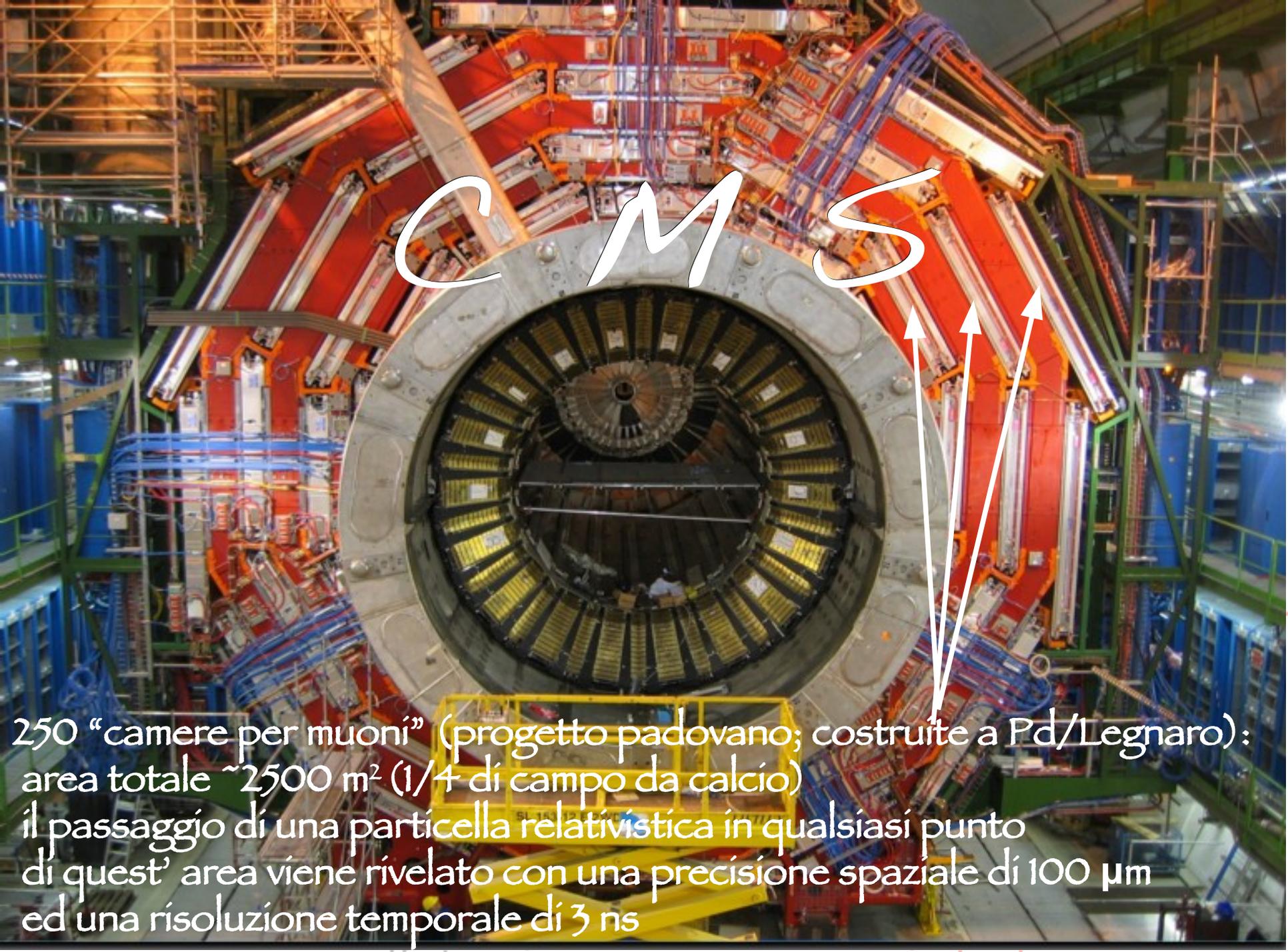
The Compact Muon Solenoid



CMS

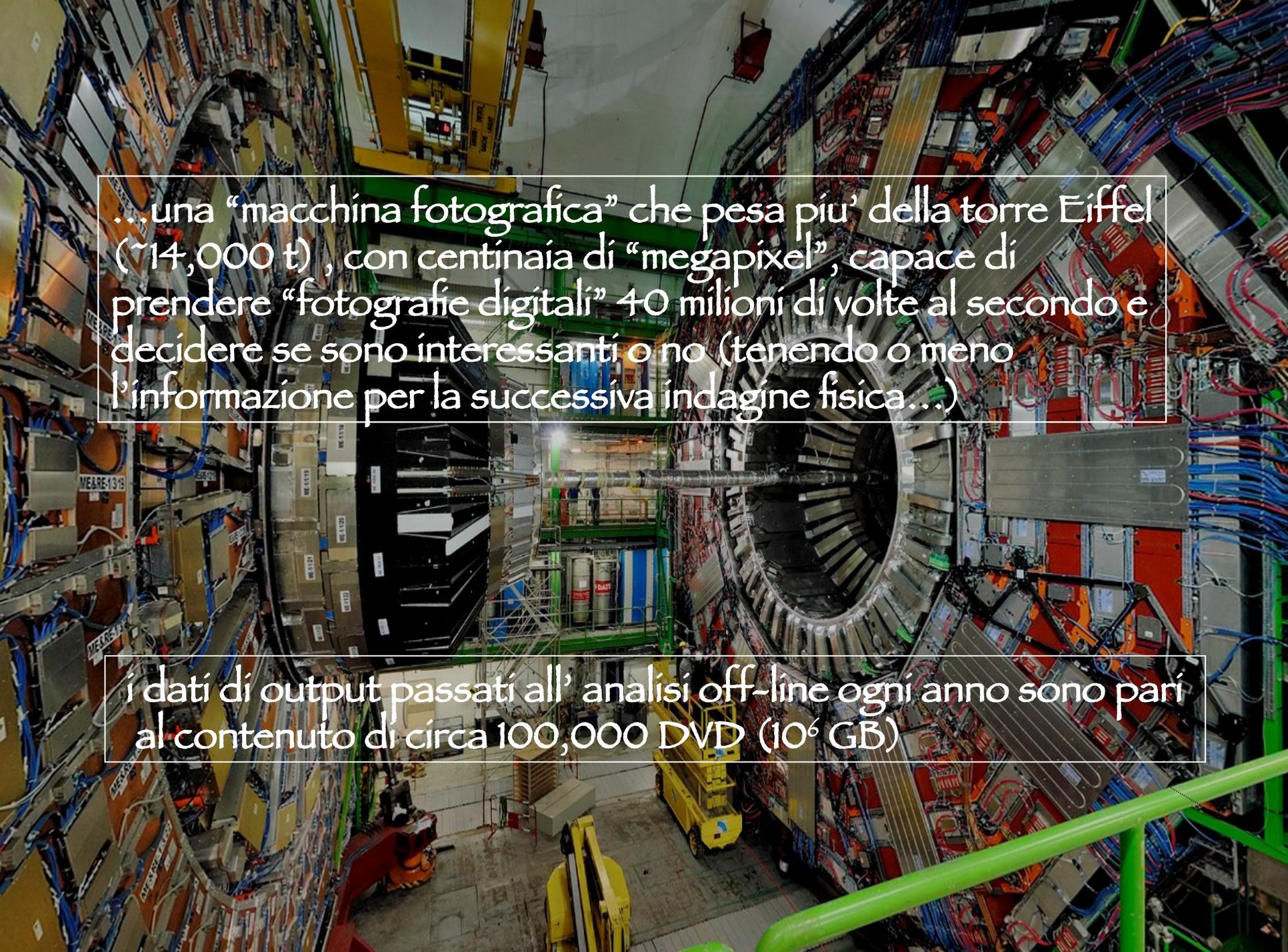


D. Barney, CERN, February 2014



CMS

250 "camere per muoni" (progetto padovano; costruite a Pd/Legnaro):
area totale $\sim 2500 \text{ m}^2$ (1/4 di campo da calcio)
il passaggio di una particella relativistica in qualsiasi punto
di quest' area viene rivelato con una precisione spaziale di $100 \mu\text{m}$
ed una risoluzione temporale di 3 ns



...una “macchina fotografica” che pesa piu’ della torre Eiffel (~14,000 t), con centinaia di “megapixel”, capace di prendere “fotografie digitali” 40 milioni di volte al secondo e decidere se sono interessanti o no (tenendo o meno l’informazione per la successiva indagine fisica...)

i dati di output passati all’ analisi off-line ogni anno sono pari al contenuto di circa 100,000 DVD (10^6 GB)

CMS Detector

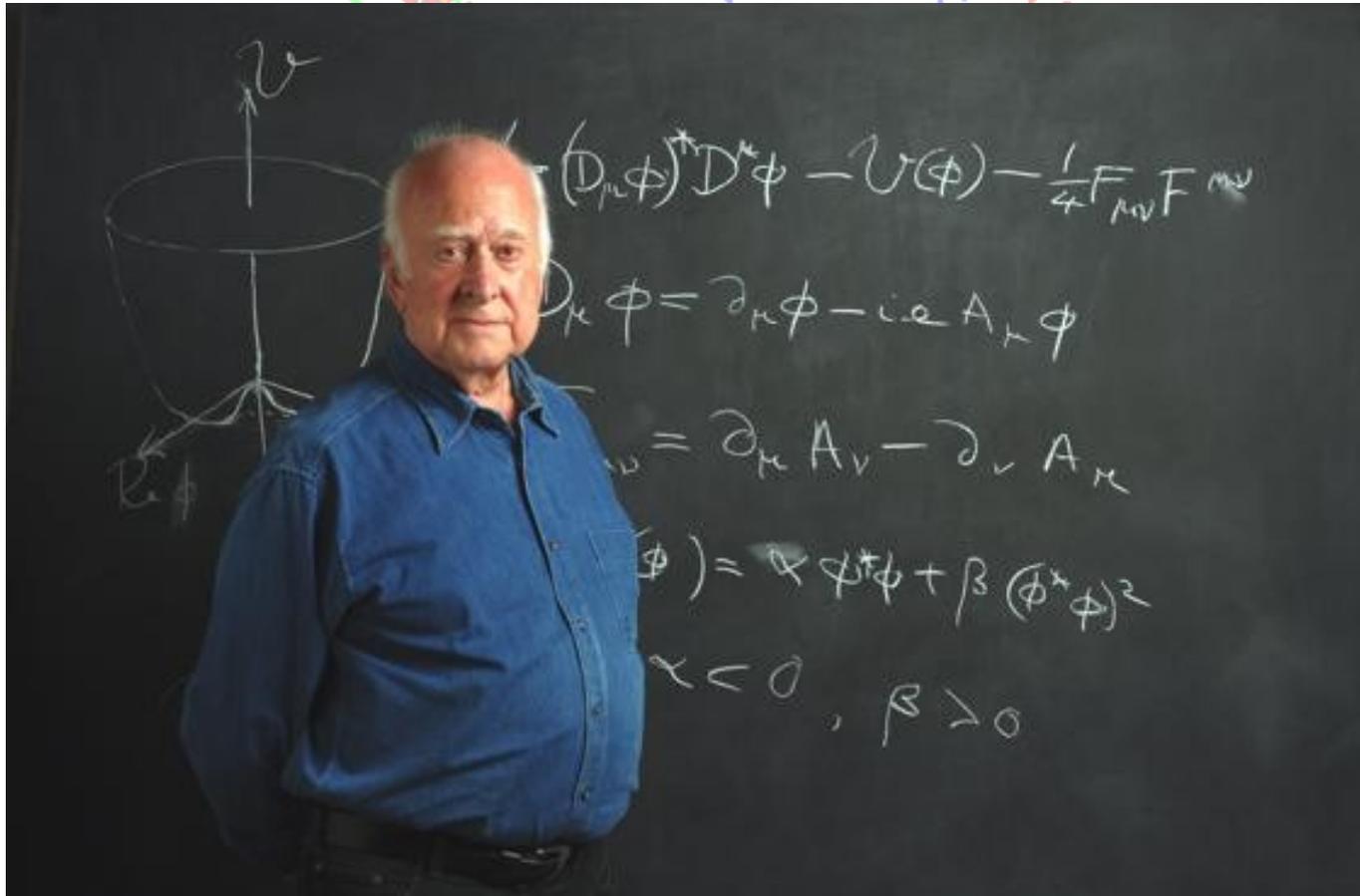
(Some of the) 3170 Scientists and Engineers (800 Graduate Students) from 182 Institutions in 39 countries



La partecipazione italiana a CMS

- Ricercatori italiani ricoprono ruoli di responsabilità all'interno della collaborazione, Guido Tonelli è stato spokesperson dell'esperimento nel biennio 2010-2011
- Università italiane sono coinvolte ad ogni livello della progettazione, sviluppo di rivelatori, operazioni di presa dati e analisi dei dati sperimentali: Bari, Bologna, Catania, Firenze, Frascati, Genova, Milano-Bicocca, Napoli, Padova, Pavia, Perugia, Pisa, Roma la Sapienza, Torino, Trieste, per un totale di 291 ricercatori, assieme alle croate Split e Zagreb.
- Padova ricopre un ruolo di punta nel settore dei rivelatori per i muoni e del tracciatore al silicio, oltre che nell'analisi dei dati orientata alla ricerca di Higgs supersimmetrico, particelle esotiche e fisica del quark b

Il Bosone di Higgs... Teoria e Esperimenti



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:

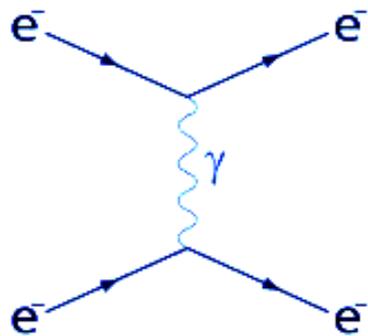


Grafico di Feynman della diffusione Moeller $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ mediata da scambio di fotone (γ)

Interazione Debole

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

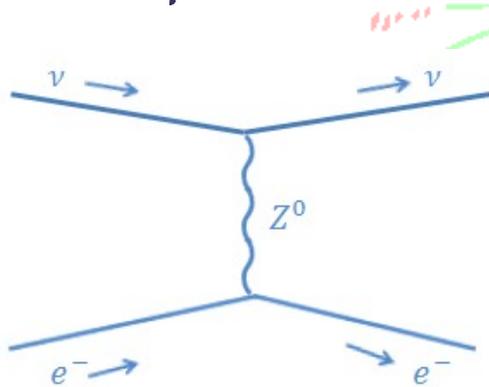
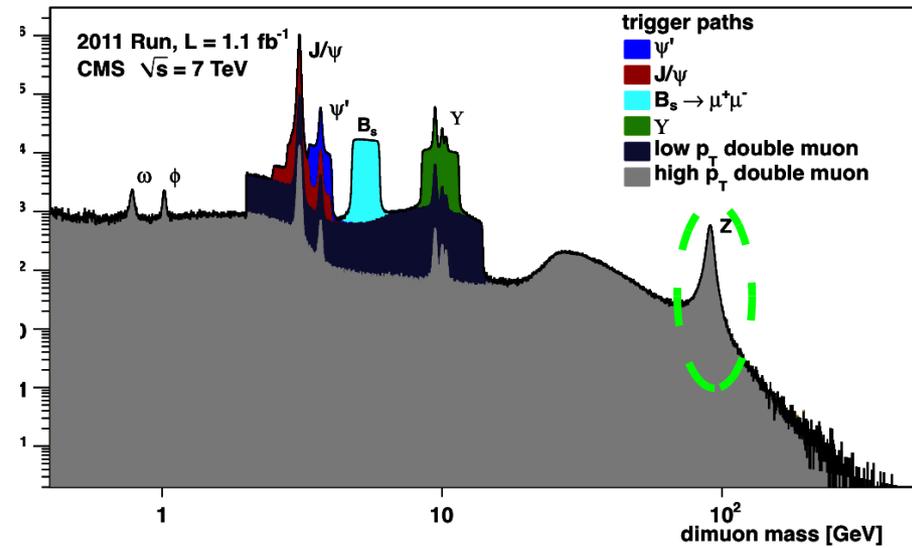
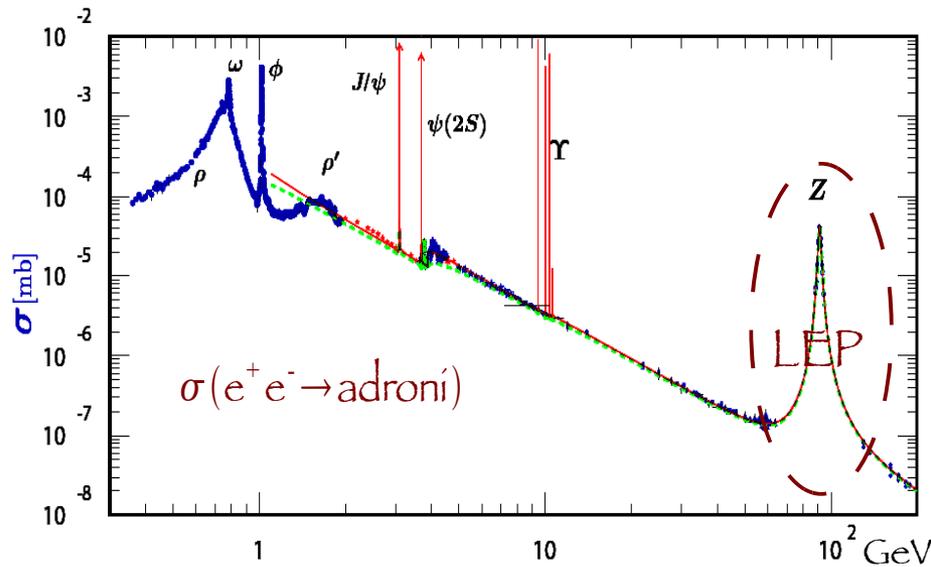


Grafico di Feynman della
diffusione $\nu e^- \rightarrow \nu e^-$
mediata da scambio del vettore neutro (Z^0)

- 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)

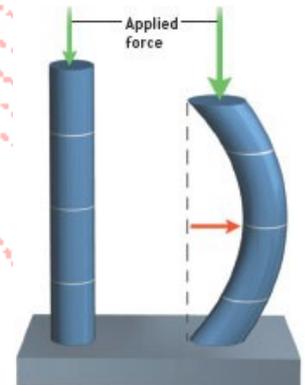


Secondo: Modificare le equazioni!!

- 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 piu` perche` molti calcoli mi danno come risultato ∞ !!
- Ho due possibilità:
 - 1) Cambio lavoro... ☹️
 - 2) Chiamo in aiuto il Prof. Higgs ☺️

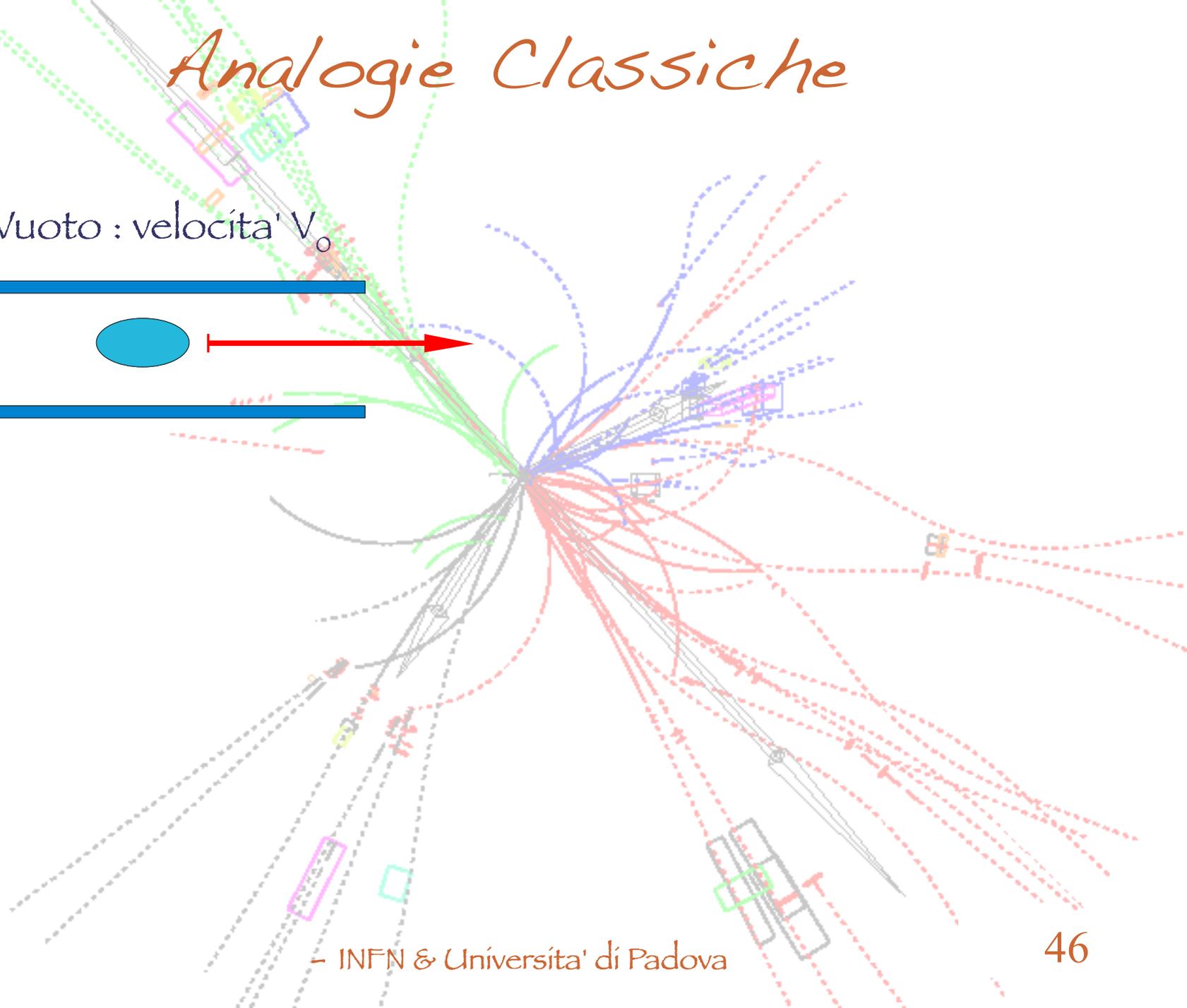
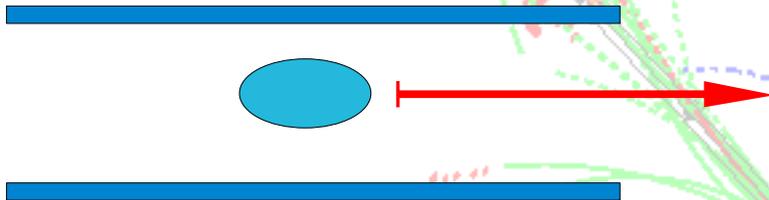
Meccanismo di Higgs

- Il “vuoto” è lo stato in cui l'energia è minima.
- Introduco un nuovo “campo” (=particella) che è 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 più calcoli che danno ∞ !
- Tra le infinite possibilità per la scelta del vuoto, la Natura ne sceglie una (si parla di simmetria spontaneamente rotta).



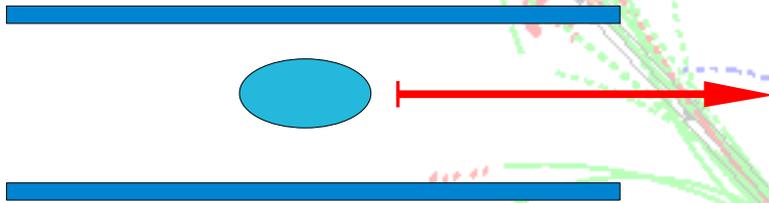
Analogie Classiche

Vuoto : velocità V_0

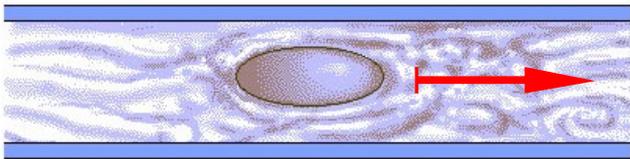


Analogie Classiche

Vuoto : velocità V_0

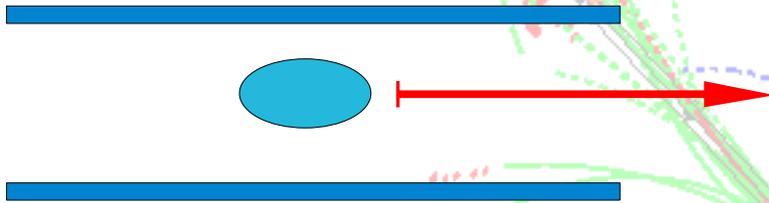


Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$, $a = -kv$



Analogie Classiche

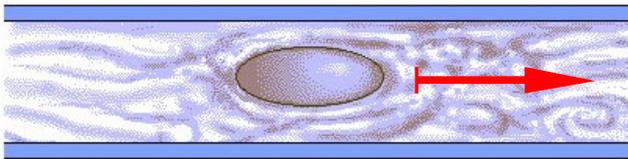
Vuoto : velocità V_0



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

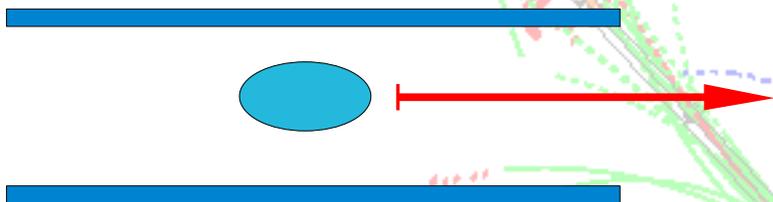


Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$, $a = -kv$



Analogie Classiche

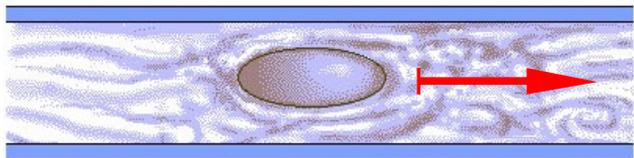
Vuoto : velocità V_0



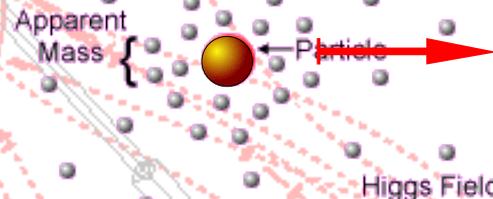
Vuoto classico : $M=0, v=c$



Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$



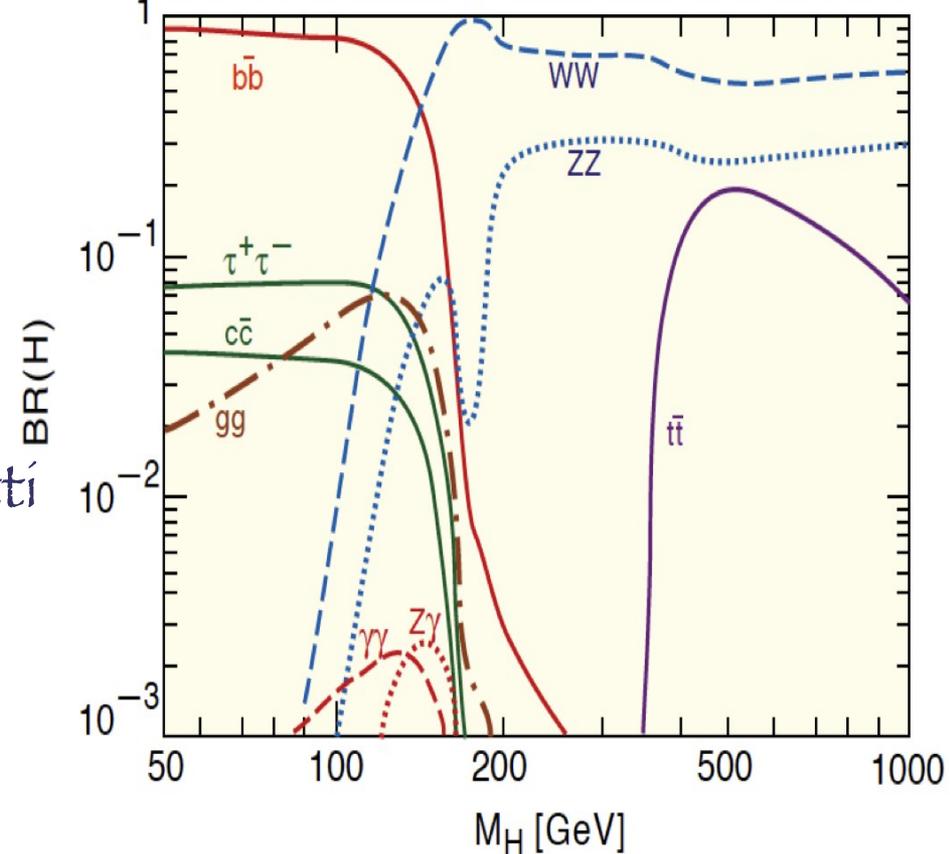
Vuoto di Higgs : $M = \frac{1}{2} g v$ $v < c$



Higgs: Come lo cerco?

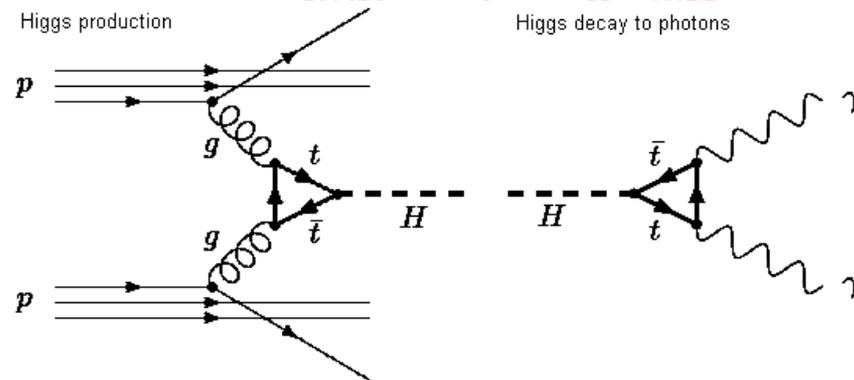
- Il Bosone di Higgs puo' essere ricercato in svariati modi legati ai diversi possibili decadimenti
- L'efficacia della ricerca dipende:
 - dall'accoppiamento dell'Higgs con i suoi prodotti di decadimento
 - dall'entita' dei processi parassiti simili al segnale ricercato

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



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



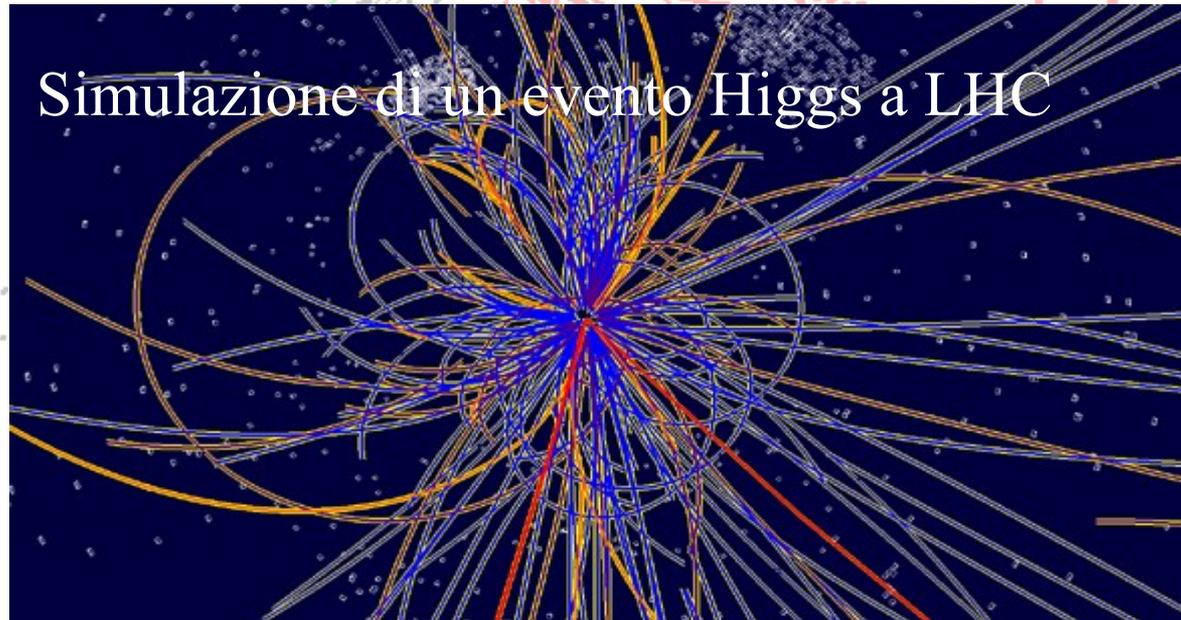
Ricerca del Bosone di Higgs @ LHC

Complicazioni

- i protoni sono particelle composite, le topologie sono assai complesse
- I processi parassiti sono molto più frequenti

$$\frac{\text{segnale}}{\text{rumore}} < 10^{-10}$$

Simulazione di un evento Higgs a LHC



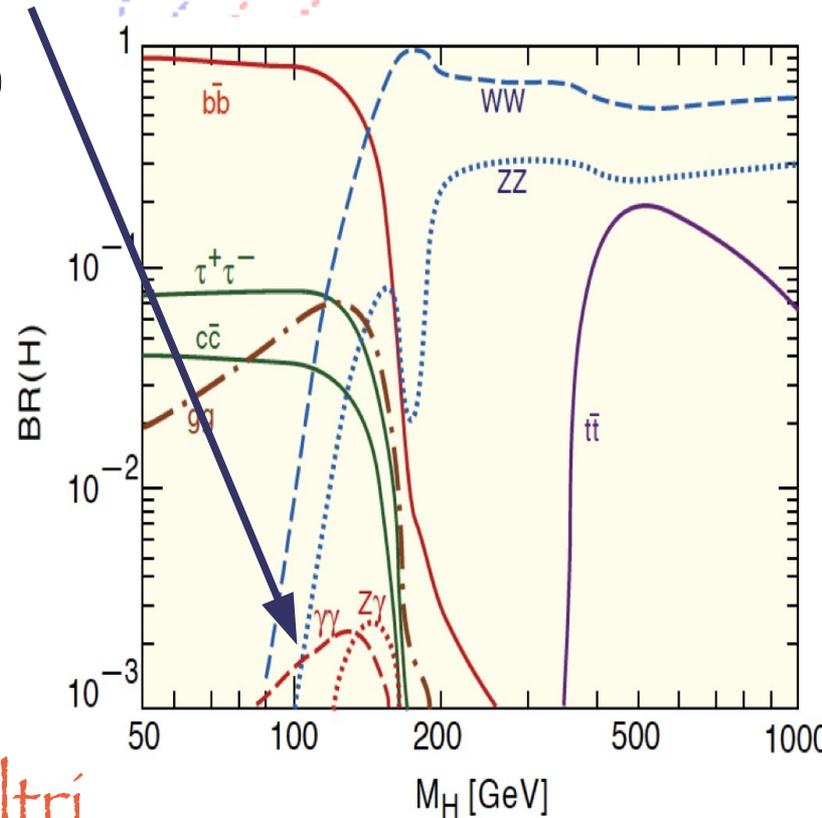
Un esempio: $H \rightarrow \gamma\gamma$

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 😊

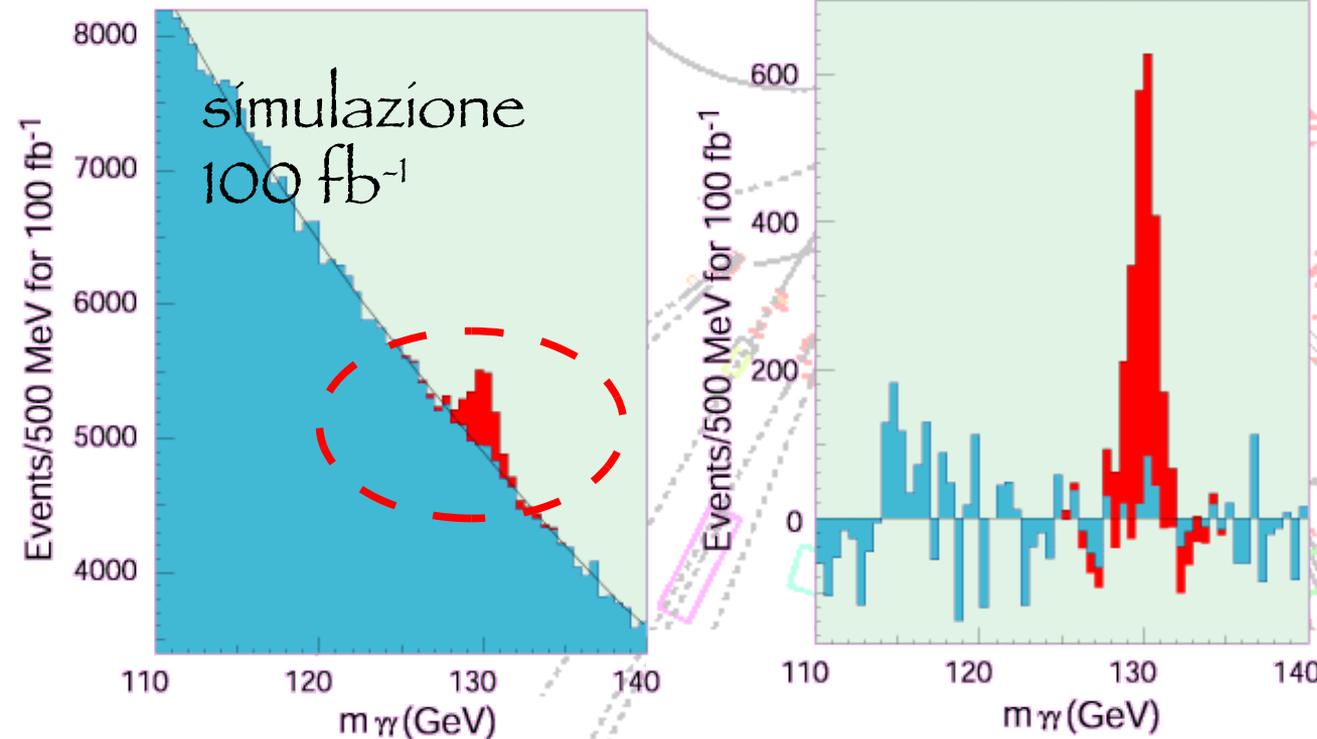


Perche` vi mostro questo e non altri canali piu` promettenti?
La risposta alle pagine seguenti...

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

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



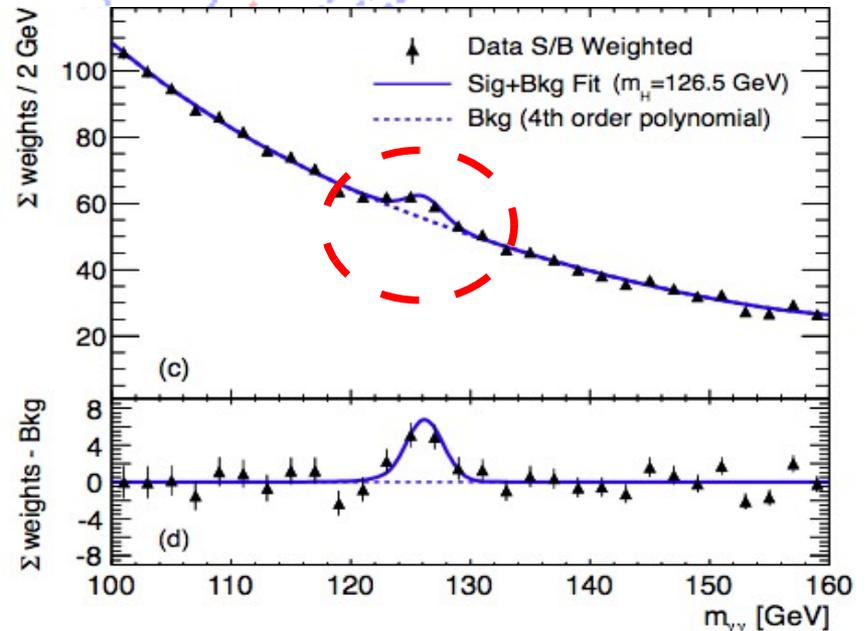
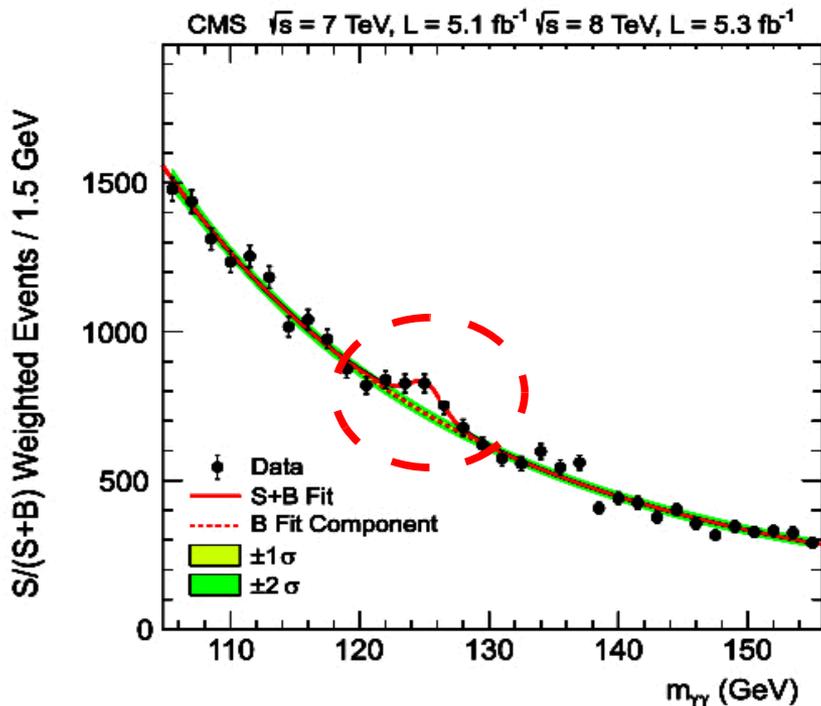
Attenzione: questa è la simulazione. Se l'avessi trovato, dovrei vedere qualcosa di simile all'istogramma rosso alla pagina seguente...

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

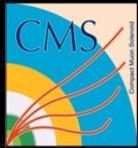
- C'e' un eccesso per $m_H \sim 125$ GeV: L'ho trovato!!

CMS

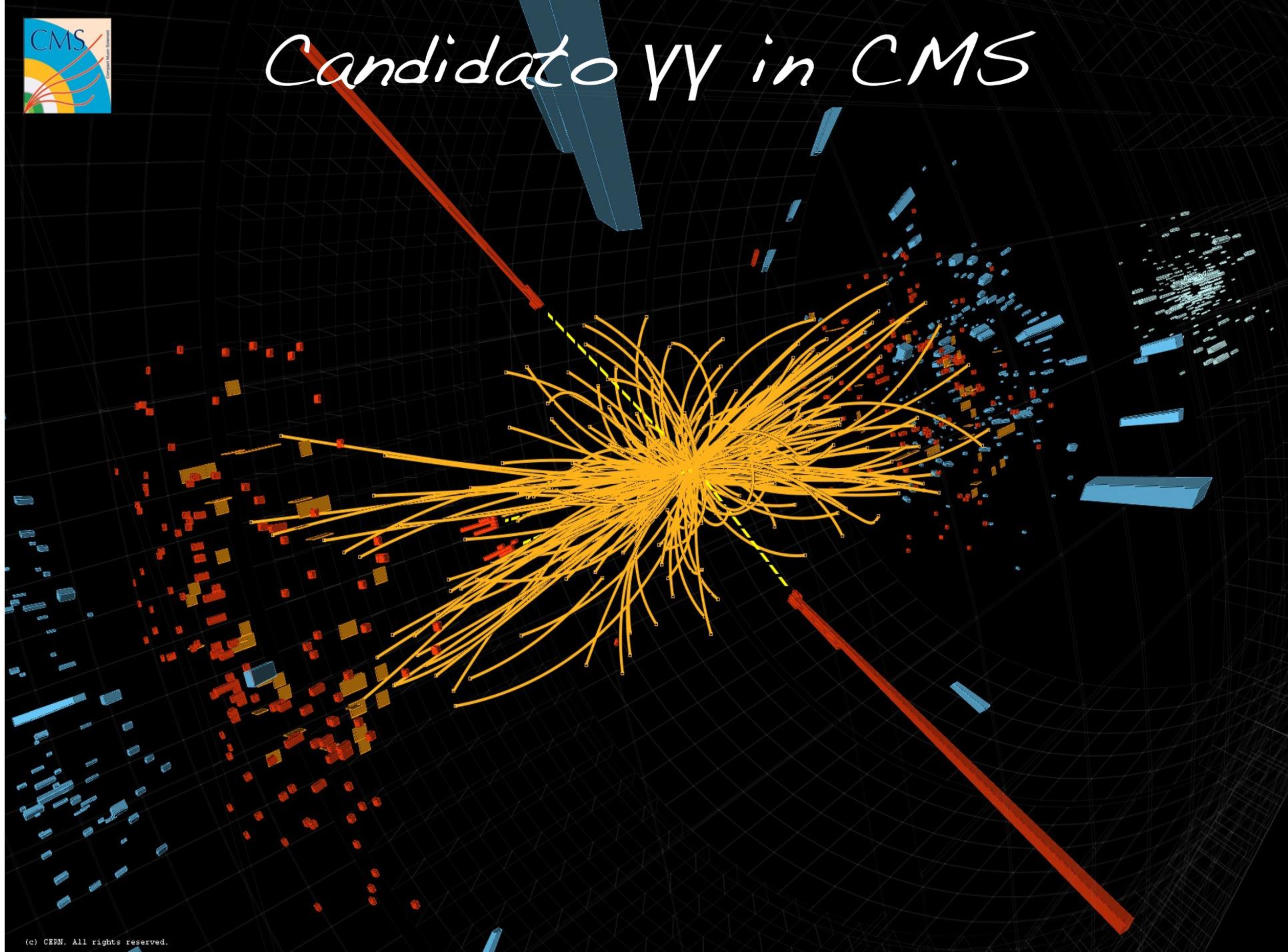
ATLAS



- Pur essendo un "canale di decadimento" con bassa probabilita', il segnale e' molto pulito e la "risoluzione" in massa e' elevata

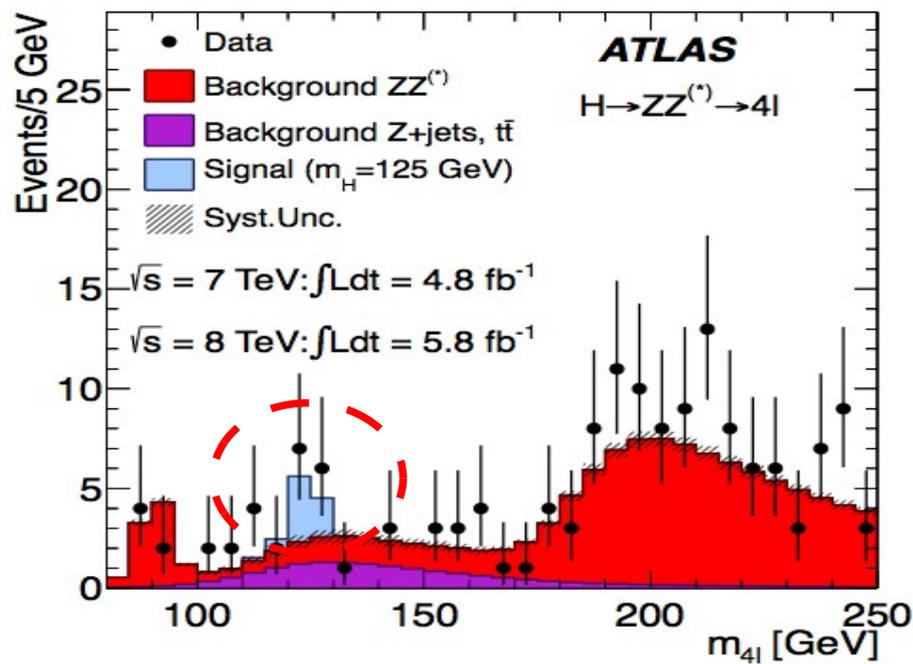
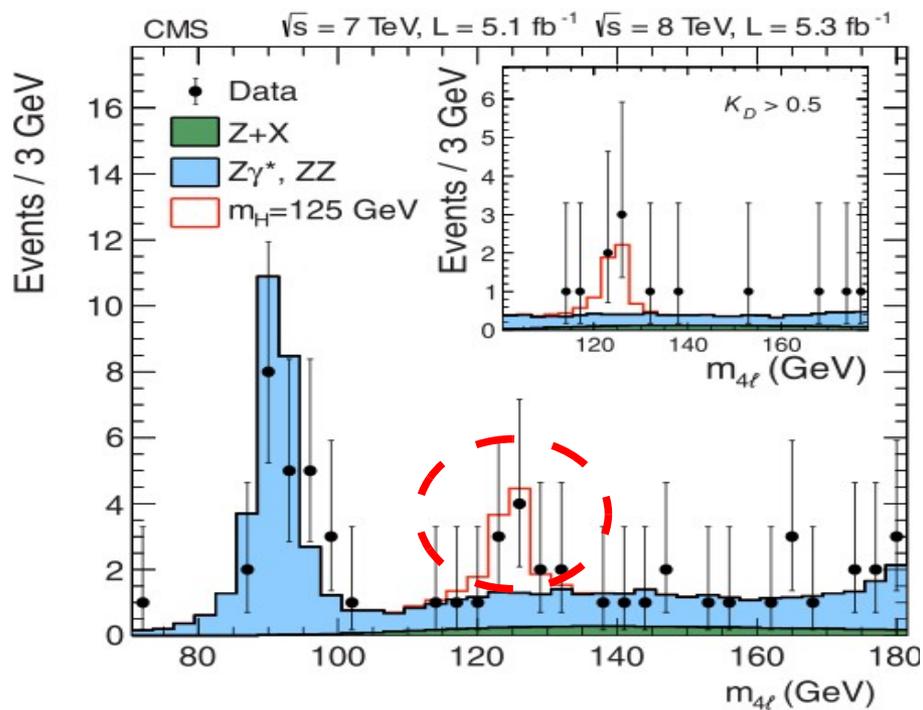


Candidate $\Upsilon\Upsilon$ in CMS



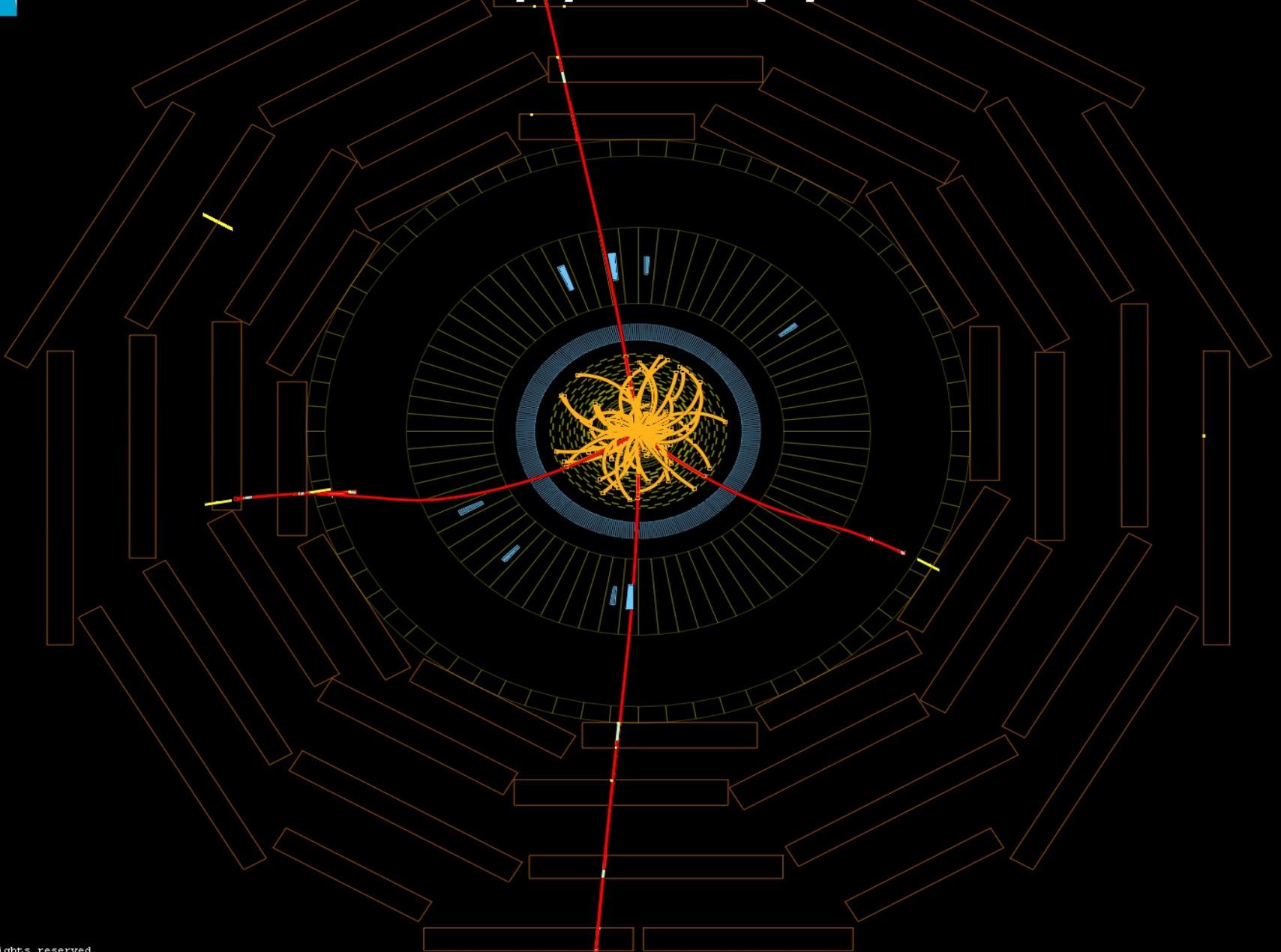
Un altro esempio: $H \rightarrow ZZ$

- I due bosoni Z vengono ricostruiti nel decadimento in una coppia di elettroni o muoni (buon rapporto tra segnale e fondo e buona risoluzione in massa)
- C'è anche qui un eccesso allo stesso valore di massa!!
Conferma la scoperta in un modo indipendente

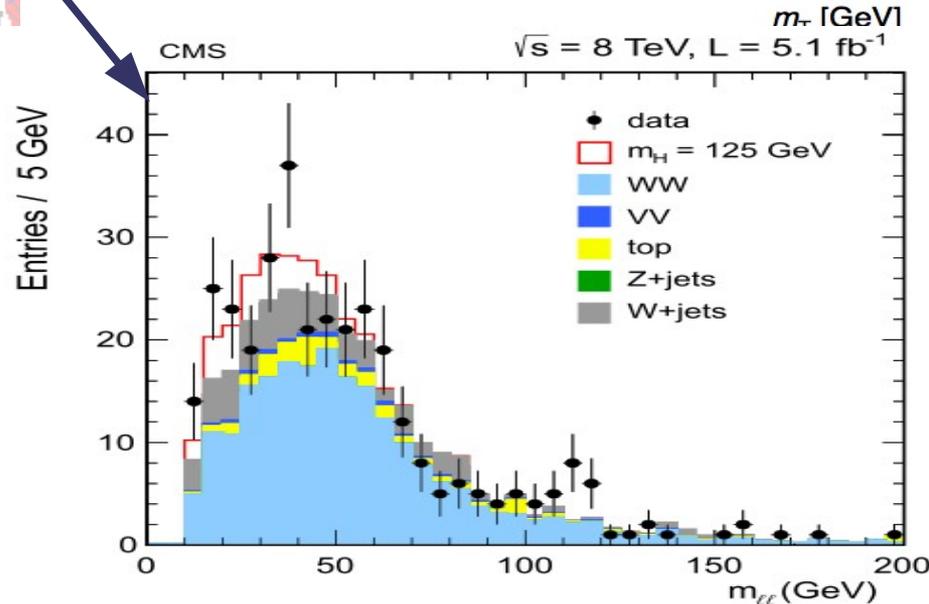
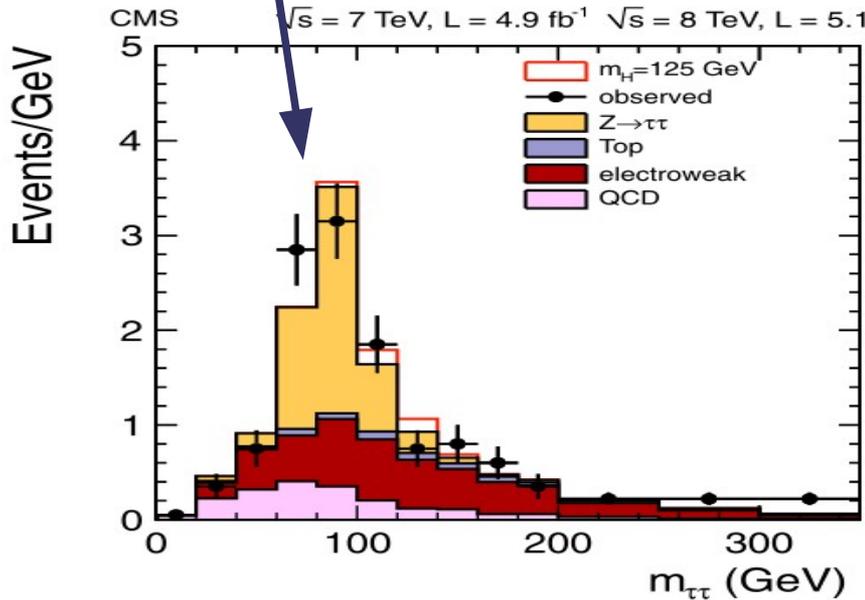
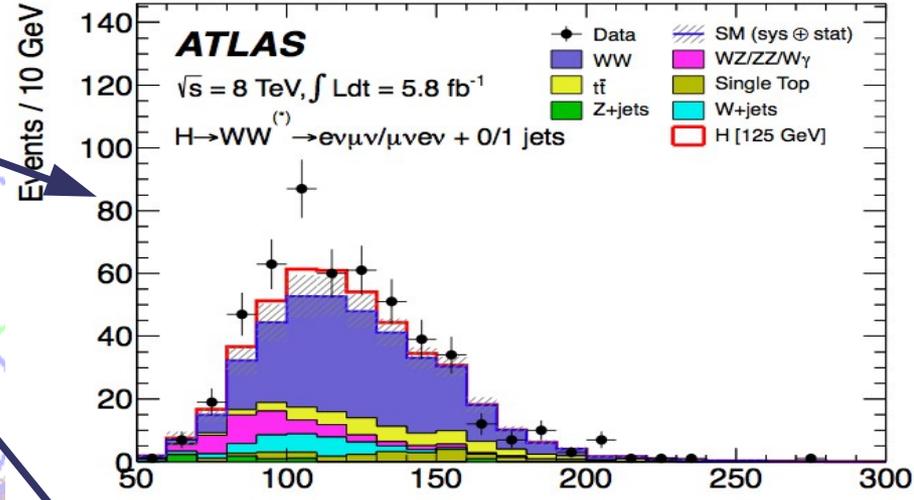
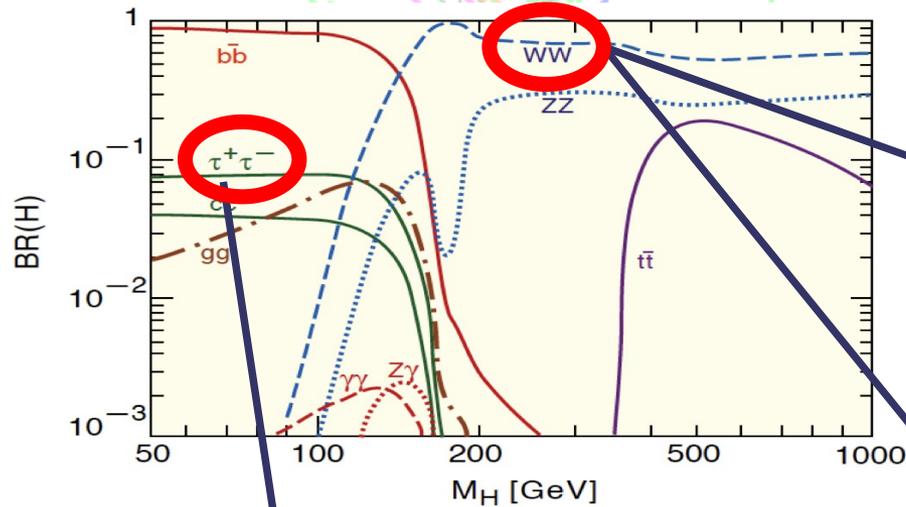




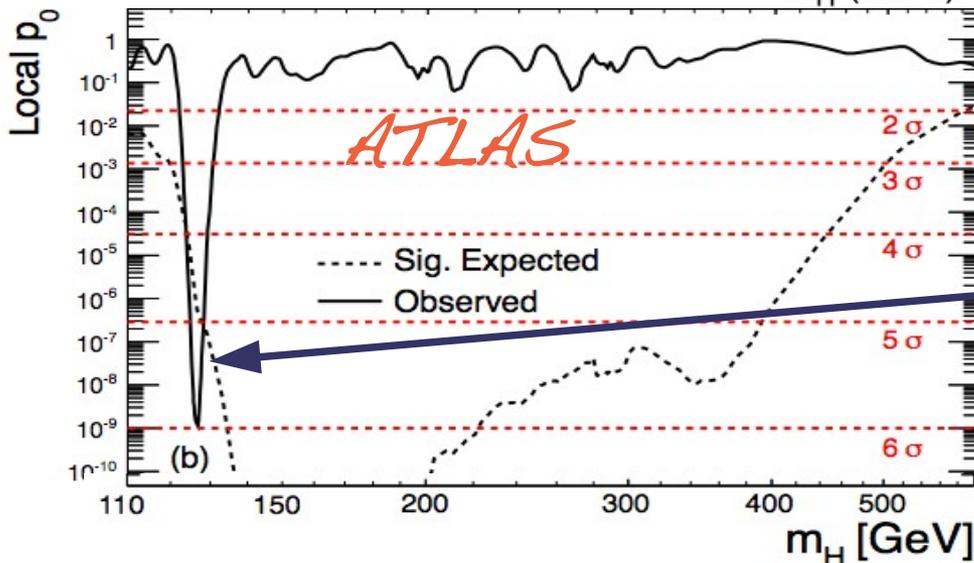
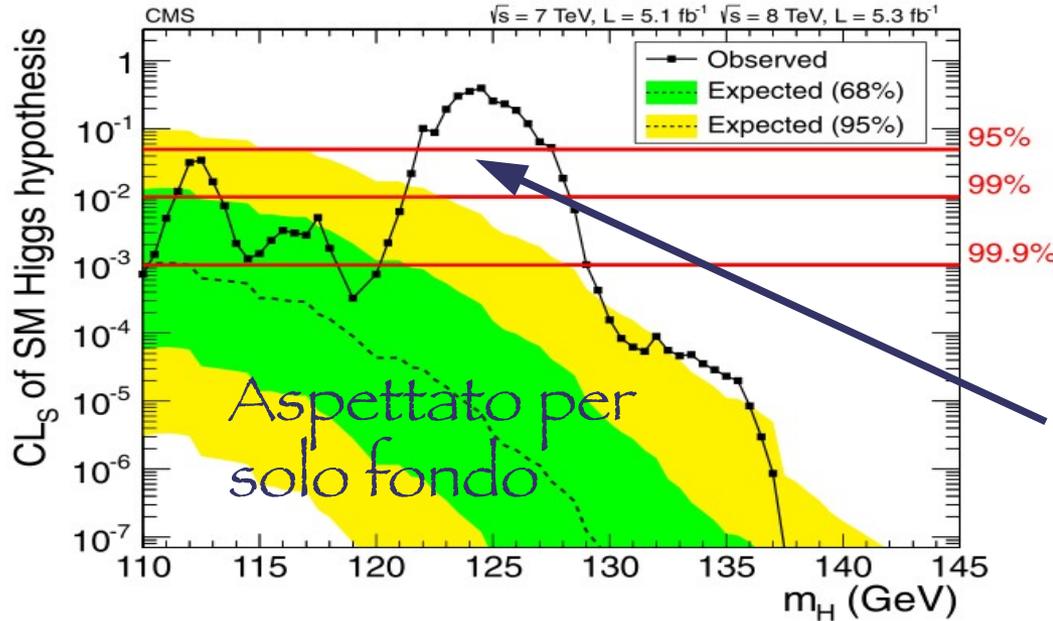
Candidato $Z(\mu\mu)Z(\mu\mu)$ in CMS



Ricerca in altri canali...



Combinazione delle varie misure



- Intensita' del segnale in funzione di M_H
- L'Higgs e' escluso al di sotto delle linee rosse con la probabilita' indicata
- Evidenza in prossimita' di $M_H \sim 125 \text{ GeV}$
- Probabilita' che l'eccesso sia dovuto a una fluttuazione del fondo
- La scoperta si ha convenzionalmente per una significativita' superiore a 5σ

Caratterizzazione del Segnale

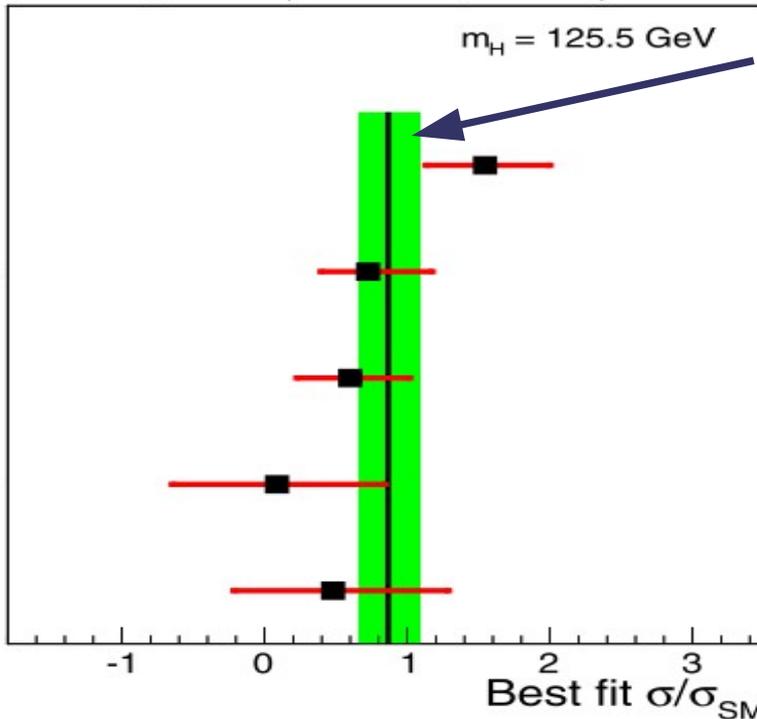
- Usando i decadimenti nei canali ZZ e $\gamma\gamma$ si trova:

$$M_H = 125.3 \pm 0.6 \text{ GeV (CMS)}$$

$$M_H = 126.0 \pm 0.6 \text{ GeV (ATLAS)}$$

- Ma abbiamo scoperto veramente il bosone di Higgs?

CMS $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, L = 5.1 \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, L = 5.3 \text{ fb}^{-1}$



- Intensità del segnale nei vari canali rispetto alle previsioni del Modello Standard:

Ottimo accordo!!

- Altri studi sono necessari per definire se le caratteristiche della nuova particella sono quelle aspettate...

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 meno di tre anni di piena attività, gli esperimenti ATLAS e CMS a LHC scoprono il bosone di Higgs con massa $M_H \approx 125 \text{ GeV}$

Conclusioni

- Il Modello Standard ha avuto un grandissimo numero di conferme ottenute con due metodologie complementari:
 - Ricerca diretta di nuove particelle con esperimenti a alta energia (l'Higgs è l'ultimo esempio eclatante)
 - Ricerca indiretta a energia più bassa utilizzando misure di alta precisione per evidenziare eventuali discrepanze dalle aspettative (non trattata in questa presentazione)
- Tuttavia sappiamo che la nostra descrizione della natura è ancora molto parziale e il Modello Standard è incompleto, molto resta ancora da indagare!

Fisica delle alte energie: Non solo ricerca di base!

CERN Intranet (user page) - Microsoft Internet Explorer provided by CERN

File Edit View Favorites Tools Help

Address <http://user.web.cern.ch/user/cern.html>

European Organization for Nuclear Research

CERN European Organization for Nuclear Research

News | Practical Info | Services | Index | Search | Help

Visit our pages for the [General Public](#)
Visitez nos pages pour le [Grand Public](#)
[CERN Welcome Page](#)

[LHC Cost Review to Completion](#)

[Suggestion for change at CERN](#)

[Signatures of the Invisible](#)

[Sci-Tech Web Site](#)

SUCCESS IS NO ACCIDENT

[CERN and the environment](#)

FEU - FIRE ACCIDENT 74444
[Safety at CERN](#)

[Physics: Experiments and Research](#) • [Library & Archives](#) • [Conferences and HEP Community](#)

[Organization](#) • [Administration](#) • [Jobs](#) • [Training and Development](#) • [Coming to CERN, Integration](#)

[Accelerators, Machines and Technical Facilities](#) • [LHC Project](#) • [Engineering](#) • [Computing](#)

[Media & Public Corner](#) • [Relations with Industry](#) • [On Site Services](#) • [Social Life, Activities](#)

Special Announcements

[2002 CERN School of Computing](#). 15-28 September 2002. Vico Equense, Italy. Deadline for applications: 30 May 2002.

[Academic Training Questionnaire](#) available on line. Please fill in before 26th April 2002.

What's on today (2002-04-17)

09:00 Presentation Technique: [Manomètres, Thermomètres, Capteurs de pression 'Ashcroft', Valves 'Manifold', Séparateurs](#)
Société Tri-matic, [73-2-027](#)

14:00 Theoretical Seminar: [Towards three-loop deep-inelastic structure functions](#)
Jos Vermaseren, [TH Auditorium](#)

17:00 Particle Physics Seminar: [CDF-II Startup](#), Dr. Xin Wu([misc material](#))

Done Internet

Start

World Wide Web

<http://public.web.cern.ch/public/>

*Fisica delle alte energie: Non solo
ricerca di base!*

**Cura dei tumori con gli acceleratori
(adro-terapia)**



www.tera.it/

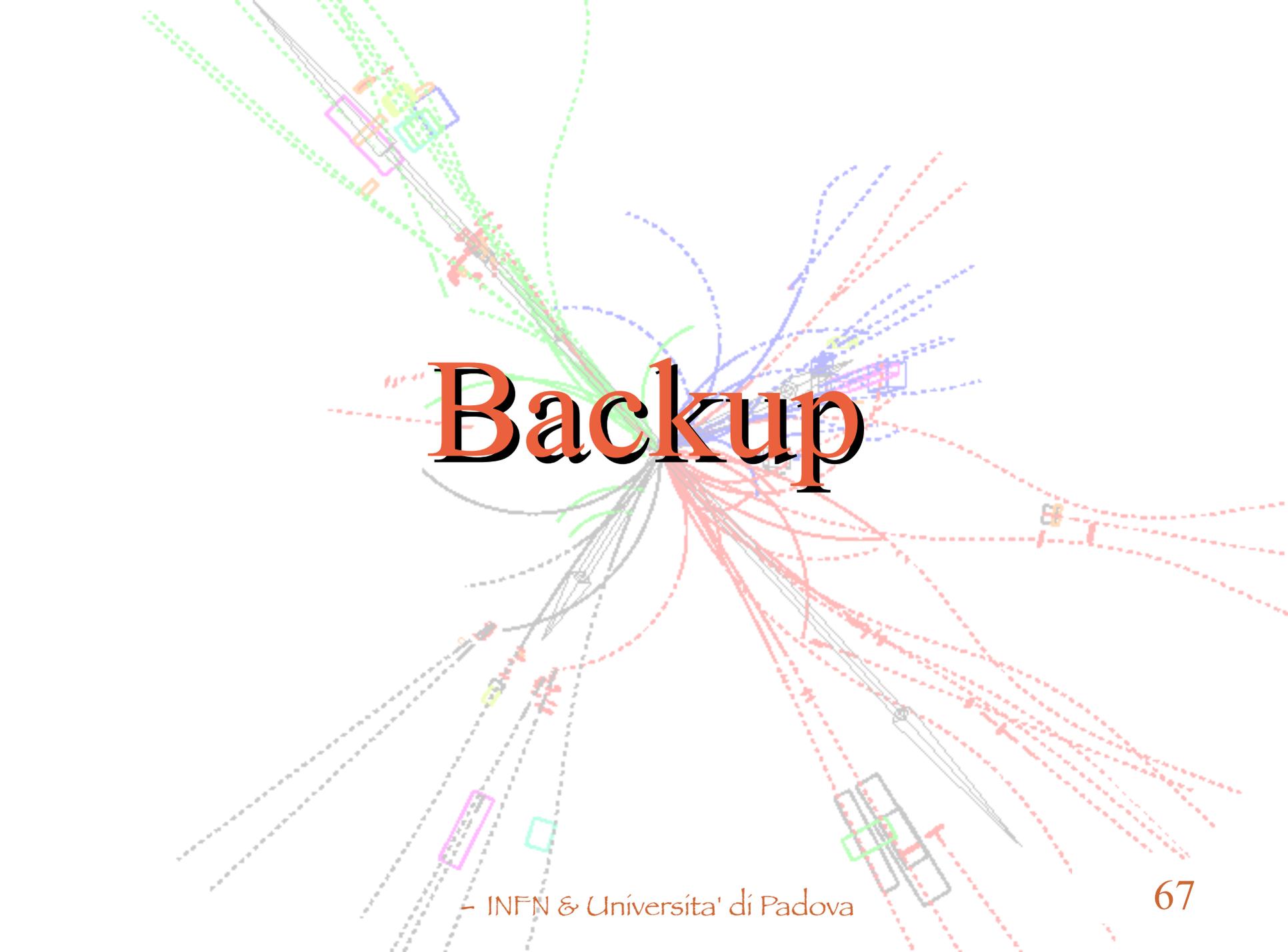
- INFN & Università di Padova

...E il futuro?

- Dovremo analizzare i dati sperimentali con entusiasmo e mente aperta...
- Guardando dentro il piú grande microscopio del mondo...



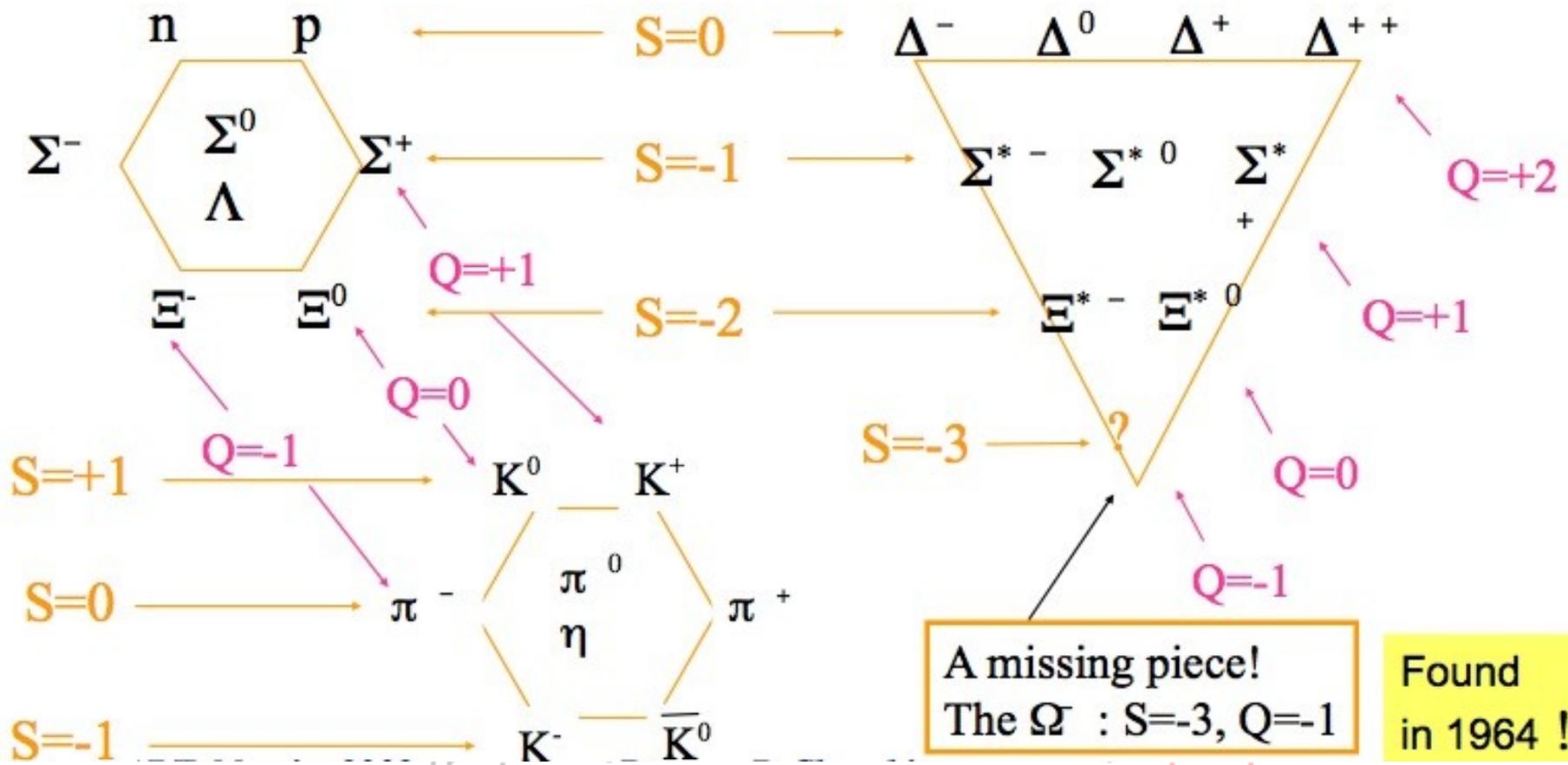
Potremmo vedere l'Universo!!



Backup

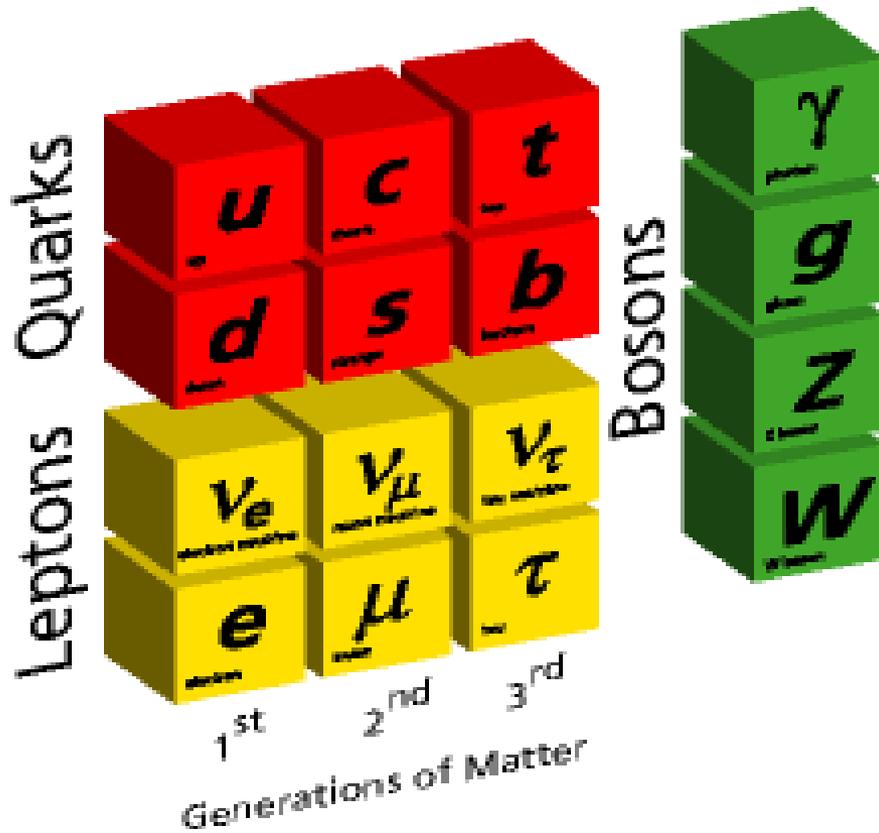
Il modello a Quark

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

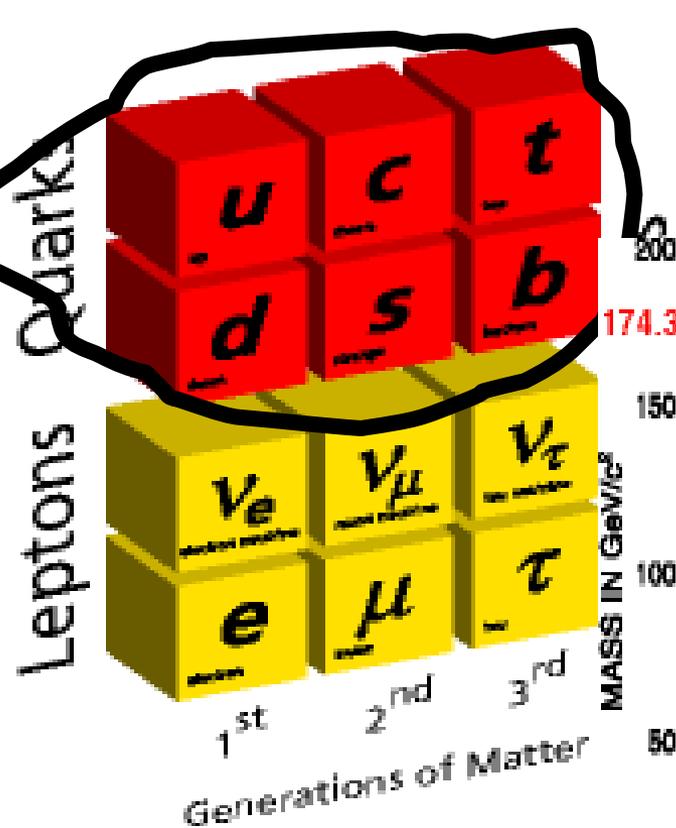


- I leptoni sono sei:
 - tre hanno carica elettrica (negativa)
 - tre non hanno carica elettrica
- Il leptone carico più conosciuto è l'elettrone (e). Gli altri due leptoni carichi sono il muone (μ) e il tau (τ)
 - Muone e tau sono repliche dell'elettrone con massa più grande
- I leptoni neutri si chiamano 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



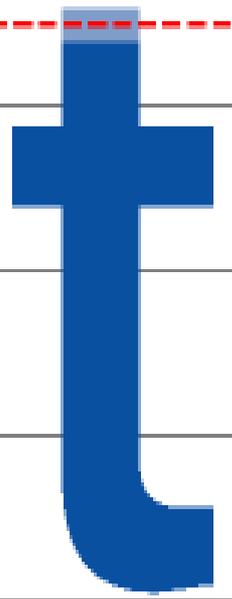
MASS IN GeV/c²

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

QUARKS

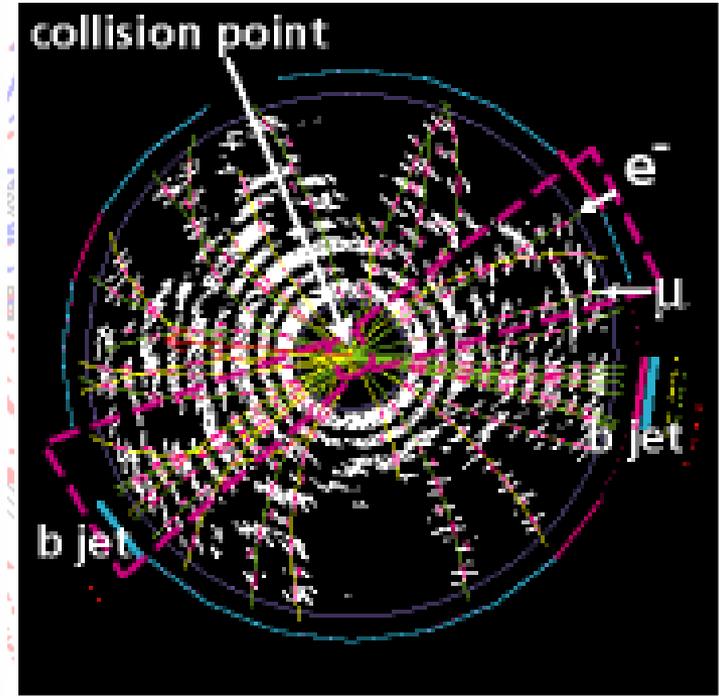
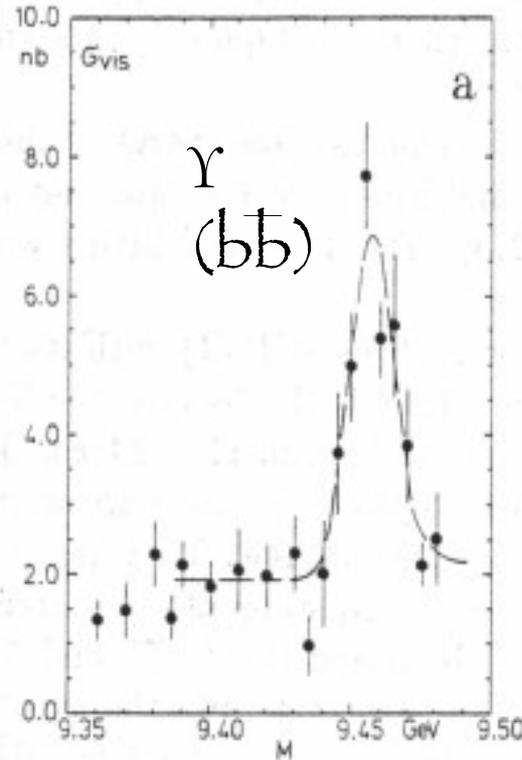
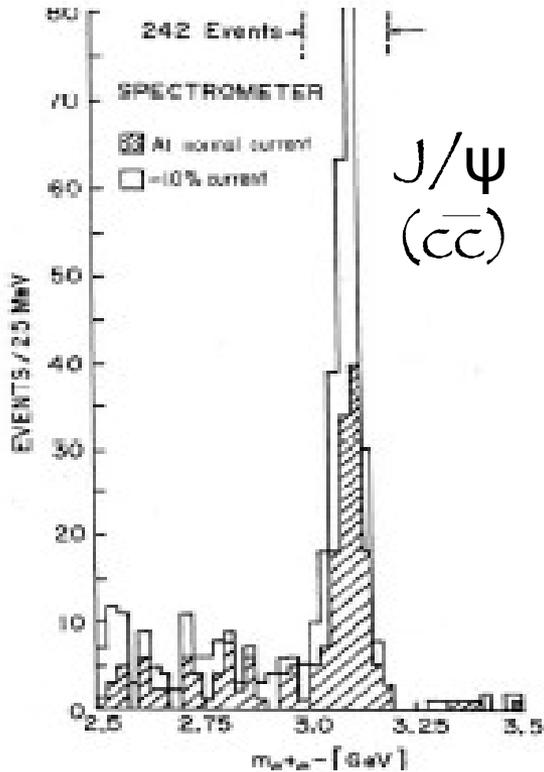


I quarks charm, top e bottom

1974: scoperta del c

1977: scoperta del b

1994: scoperta del t



Mesoni: particelle formate da una coppia quark-antiquark.

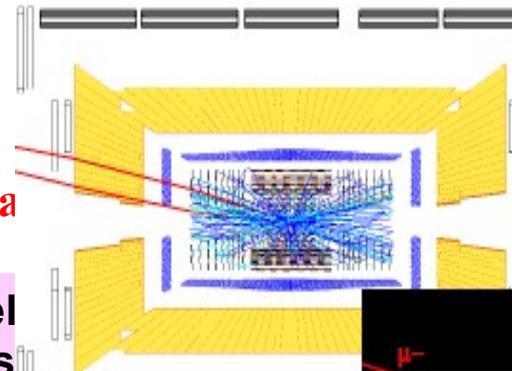
Il quark top vive 10^{-25} s, troppo poco per poter "adronizzare"...

Supersimmetria

- Nuova teoria che postula una simmetria tra bosoni e fermioni; (gli operatori del gruppo di simmetria trasformano stati fermionici in bosonici). Alcuni importanti 'problemi' del Modello Standard vengono "naturalmente" risolti in questa teoria (es.: stabilita' della massa del bosone di Higgs rispetto alle correzioni radiative)

- Prezzo da pagare: per ogni particella che conosciamo, esiste un partner supersimmetrico
 - Elettrone -> selettrone
 - Quark -> squark
 - Fotone -> fotino ...
- Abbiamo i nomi, ma non le abbiamo mai viste!
- Potremmo essere in grado di vederle a LHC
- La sparticella piu' leggera e' stabile e interagisce poco
- **Candidato Materia Oscura**

LHC: i processi



Frequenza (Hz)

[a una fissata luminosità del collisore]

eventi di collisione anel con basso impulso tras

$\approx 10^7/s$

eventi con quark pesanti ("beauty")

diversi processi fisici (sempre piu' rari e di crescente interesse...)

$\sim 1/10^{10}$

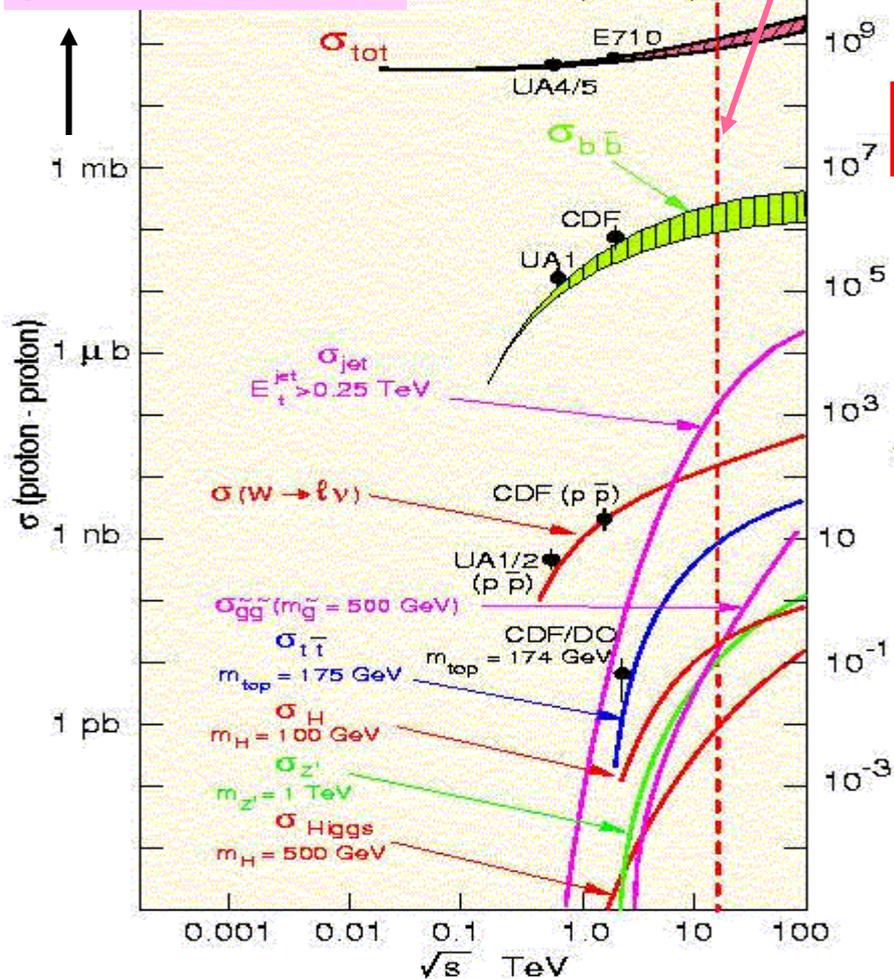
bosoni pesanti W/Z (mediatori forza E:W)

quark top, particelle supersimmetriche(?), Higgs, nuove risonanze (Z') ...

sezione d'urto dei processi fisici

Fermilab LHC
CERN

LHC



Events / s for $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Energia nel CM della collisione