

La Física a LHC

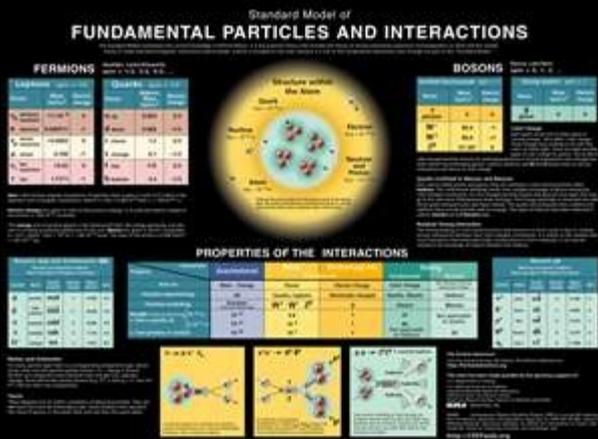
- Motivazioni
- Gli strumenti :
 - Introduzione / Riepilogo
 - LHC
 - CMS
- Le misure:
 - Riscoperta del Modello Standard
 - Ricerca del Bosone di Higgs
 - Ricerca di Materia Oscura
 - Esotismo

Motivazioni

Vedi Seminario di Passera

Gli Strumenti: introduzione

- Conosciamo centinaia, se non migliaia di particelle subnucleari
- Tuttavia solo poche possono rilasciare un segnale rivelabile :
 - Quali e perche' ?
 - Come facciamo a conoscere tutte le altre ?



QUARKS	DQUARKS	MIXY PARTICLES	LIGHT I = 1 MESONS	LIGHT I = 0 MESONS
d	(dd) 1303	d _s 100001	π ⁰	η
u	(uu) 2301	u _s 100002	η(900) ⁰	η(500)
s	(ss) 2303	s _s 100003	η(900) ⁰	η(500)
c	(cc) 2305	c _s 100004	η(1300) ⁰	η(1300)
b	(bb) 3301	b _s 100005	η(1300) ⁰	η(1300)
t	(tt) 3303	t _s 100006	η(1450) ⁰	η(1450)
g	(gg) 3305	g _s 100007	η(1450) ⁰	η(1450)
τ	(ττ) 4301	τ _s 100008	η(1700) ⁰	η(1700)
μ	(μμ) 4303	μ _s 100009	η(1700) ⁰	η(1700)
e	(ee) 4305	e _s 100010	η(1700) ⁰	η(1700)
ν _e	(ν _e ν _e) 4307	ν _e s 100011	η(1700) ⁰	η(1700)
ν _μ	(ν _μ ν _μ) 4309	ν _μ s 100012	η(1700) ⁰	η(1700)
ν _τ	(ν _τ ν _τ) 4311	ν _τ s 100013	η(1700) ⁰	η(1700)
π ⁺	(u _s d)	π ⁺ 100014	π ⁺ 100014	π ⁺ 100014
π ⁰	(u _s u + d _s d)	π ⁰ 100015	π ⁰ 100015	π ⁰ 100015
π ⁻	(d _s u)	π ⁻ 100016	π ⁻ 100016	π ⁻ 100016
ρ ⁺	(u _s u)	ρ ⁺ 100017	ρ ⁺ 100017	ρ ⁺ 100017
ρ ⁰	(u _s u + d _s d)	ρ ⁰ 100018	ρ ⁰ 100018	ρ ⁰ 100018
ρ ⁻	(d _s d)	ρ ⁻ 100019	ρ ⁻ 100019	ρ ⁻ 100019
ω	(u _s u + d _s d)	ω 100020	ω 100020	ω 100020
φ	(s _s s)	φ 100021	φ 100021	φ 100021
η	(u _s u + d _s d + s _s s)	η 100022	η 100022	η 100022
η'	(u _s u + d _s d + s _s s)	η' 100023	η' 100023	η' 100023
η(1300)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(1300) 100024	η(1300) 100024	η(1300) 100024
η(1450)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(1450) 100025	η(1450) 100025	η(1450) 100025
η(1700)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(1700) 100026	η(1700) 100026	η(1700) 100026
η(2200)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(2200) 100027	η(2200) 100027	η(2200) 100027
η(2760)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(2760) 100028	η(2760) 100028	η(2760) 100028
η(3090)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(3090) 100029	η(3090) 100029	η(3090) 100029
η(3510)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(3510) 100030	η(3510) 100030	η(3510) 100030
η(4040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(4040) 100031	η(4040) 100031	η(4040) 100031
η(4440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(4440) 100032	η(4440) 100032	η(4440) 100032
η(4840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(4840) 100033	η(4840) 100033	η(4840) 100033
η(5240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(5240) 100034	η(5240) 100034	η(5240) 100034
η(5640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(5640) 100035	η(5640) 100035	η(5640) 100035
η(6040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(6040) 100036	η(6040) 100036	η(6040) 100036
η(6440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(6440) 100037	η(6440) 100037	η(6440) 100037
η(6840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(6840) 100038	η(6840) 100038	η(6840) 100038
η(7240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(7240) 100039	η(7240) 100039	η(7240) 100039
η(7640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(7640) 100040	η(7640) 100040	η(7640) 100040
η(8040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(8040) 100041	η(8040) 100041	η(8040) 100041
η(8440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(8440) 100042	η(8440) 100042	η(8440) 100042
η(8840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(8840) 100043	η(8840) 100043	η(8840) 100043
η(9240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(9240) 100044	η(9240) 100044	η(9240) 100044
η(9640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(9640) 100045	η(9640) 100045	η(9640) 100045
η(10040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(10040) 100046	η(10040) 100046	η(10040) 100046
η(10440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(10440) 100047	η(10440) 100047	η(10440) 100047
η(10840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(10840) 100048	η(10840) 100048	η(10840) 100048
η(11240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(11240) 100049	η(11240) 100049	η(11240) 100049
η(11640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(11640) 100050	η(11640) 100050	η(11640) 100050
η(12040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(12040) 100051	η(12040) 100051	η(12040) 100051
η(12440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(12440) 100052	η(12440) 100052	η(12440) 100052
η(12840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(12840) 100053	η(12840) 100053	η(12840) 100053
η(13240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(13240) 100054	η(13240) 100054	η(13240) 100054
η(13640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(13640) 100055	η(13640) 100055	η(13640) 100055
η(14040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(14040) 100056	η(14040) 100056	η(14040) 100056
η(14440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(14440) 100057	η(14440) 100057	η(14440) 100057
η(14840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(14840) 100058	η(14840) 100058	η(14840) 100058
η(15240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(15240) 100059	η(15240) 100059	η(15240) 100059
η(15640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(15640) 100060	η(15640) 100060	η(15640) 100060
η(16040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(16040) 100061	η(16040) 100061	η(16040) 100061
η(16440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(16440) 100062	η(16440) 100062	η(16440) 100062
η(16840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(16840) 100063	η(16840) 100063	η(16840) 100063
η(17240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(17240) 100064	η(17240) 100064	η(17240) 100064
η(17640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(17640) 100065	η(17640) 100065	η(17640) 100065
η(18040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(18040) 100066	η(18040) 100066	η(18040) 100066
η(18440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(18440) 100067	η(18440) 100067	η(18440) 100067
η(18840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(18840) 100068	η(18840) 100068	η(18840) 100068
η(19240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(19240) 100069	η(19240) 100069	η(19240) 100069
η(19640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(19640) 100070	η(19640) 100070	η(19640) 100070
η(20040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(20040) 100071	η(20040) 100071	η(20040) 100071
η(20440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(20440) 100072	η(20440) 100072	η(20440) 100072
η(20840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(20840) 100073	η(20840) 100073	η(20840) 100073
η(21240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(21240) 100074	η(21240) 100074	η(21240) 100074
η(21640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(21640) 100075	η(21640) 100075	η(21640) 100075
η(22040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(22040) 100076	η(22040) 100076	η(22040) 100076
η(22440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(22440) 100077	η(22440) 100077	η(22440) 100077
η(22840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(22840) 100078	η(22840) 100078	η(22840) 100078
η(23240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(23240) 100079	η(23240) 100079	η(23240) 100079
η(23640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(23640) 100080	η(23640) 100080	η(23640) 100080
η(24040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(24040) 100081	η(24040) 100081	η(24040) 100081
η(24440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(24440) 100082	η(24440) 100082	η(24440) 100082
η(24840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(24840) 100083	η(24840) 100083	η(24840) 100083
η(25240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(25240) 100084	η(25240) 100084	η(25240) 100084
η(25640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(25640) 100085	η(25640) 100085	η(25640) 100085
η(26040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(26040) 100086	η(26040) 100086	η(26040) 100086
η(26440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(26440) 100087	η(26440) 100087	η(26440) 100087
η(26840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(26840) 100088	η(26840) 100088	η(26840) 100088
η(27240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(27240) 100089	η(27240) 100089	η(27240) 100089
η(27640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(27640) 100090	η(27640) 100090	η(27640) 100090
η(28040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(28040) 100091	η(28040) 100091	η(28040) 100091
η(28440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(28440) 100092	η(28440) 100092	η(28440) 100092
η(28840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(28840) 100093	η(28840) 100093	η(28840) 100093
η(29240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(29240) 100094	η(29240) 100094	η(29240) 100094
η(29640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(29640) 100095	η(29640) 100095	η(29640) 100095
η(30040)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(30040) 100096	η(30040) 100096	η(30040) 100096
η(30440)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(30440) 100097	η(30440) 100097	η(30440) 100097
η(30840)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(30840) 100098	η(30840) 100098	η(30840) 100098
η(31240)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(31240) 100099	η(31240) 100099	η(31240) 100099
η(31640)	(u _s u + d _s d + s _s s)	η(31640) 100100	η(31640) 100100	η(31640) 100100

Le Particelle Osservabili

- La maggior parte delle particelle “elementari” e' instabile, cioe' decade in un tempo piu' o meno breve $\mathcal{N}(t) = \mathcal{N}_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$
- Possiamo osservare solo quelle che vivono abbastanza a lungo da coprire un tratto finito entro i nostri rivelatori
- Criterio (approssimativo) :

$$L = c\tau \geq o(10 \text{ cm})$$

$$\tau \geq o(1 \text{ nsec})$$

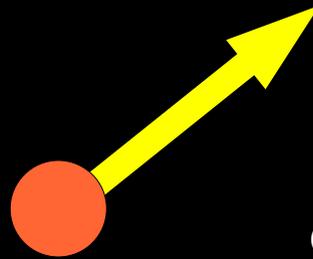
Le Particelle "Stabili"

Particella	τ	$L = c\tau$
e	∞	∞
p	∞	∞
μ	2 μ s	600 cm
π	26 ns	78 cm
K	12 ns	36 cm
γ	∞	∞
n	15'	$2.7 \cdot 10^{10}$ m
K_L	51 ns	150 cm

... e il resto ?

... e il resto ?

- Si osserva analizzando i processi di decadimento
- Decadimento : conversione di massa (la particella madre) in energia (le figlie in moto)



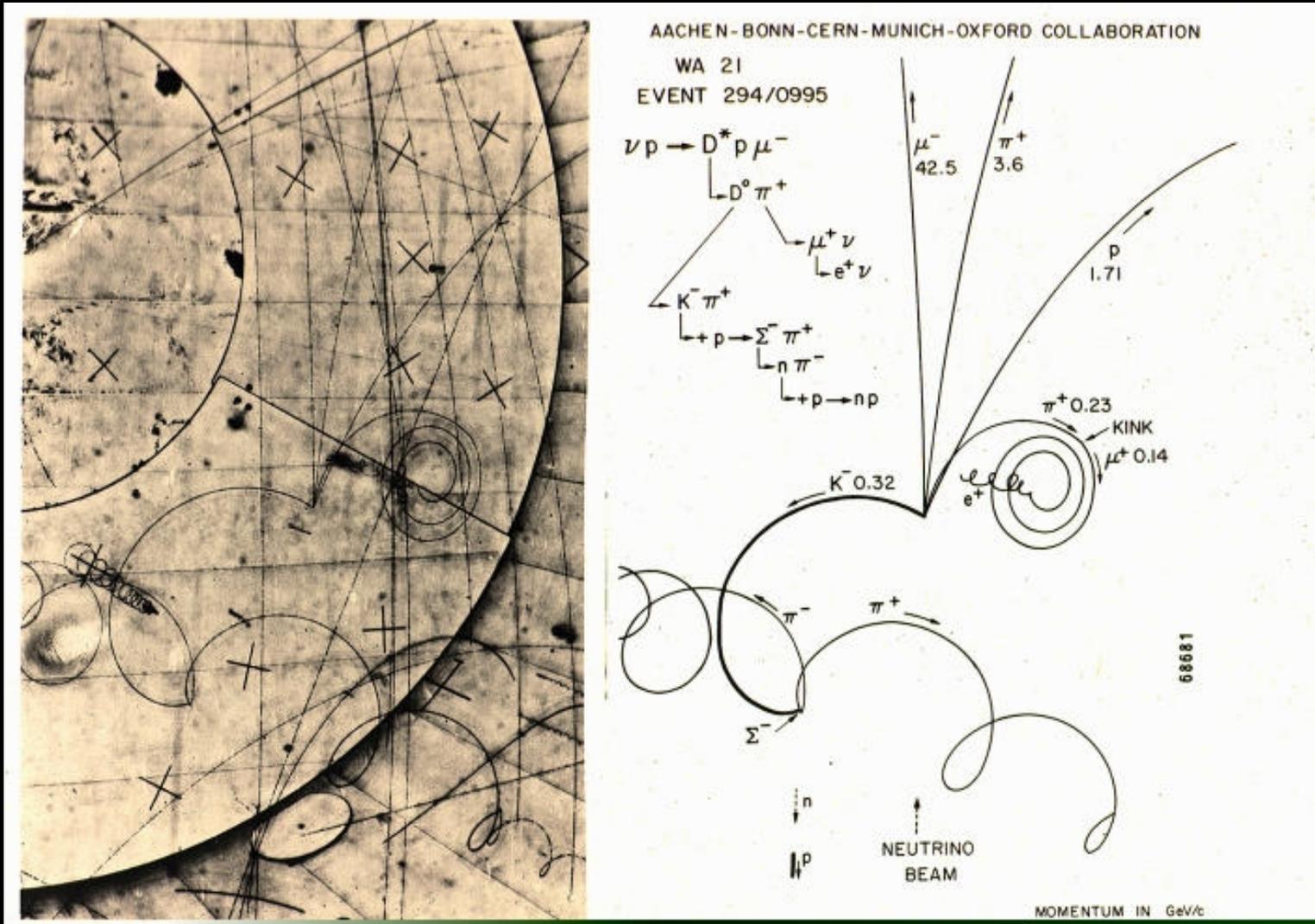
Conservazione della quantità di moto :

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = 0$$

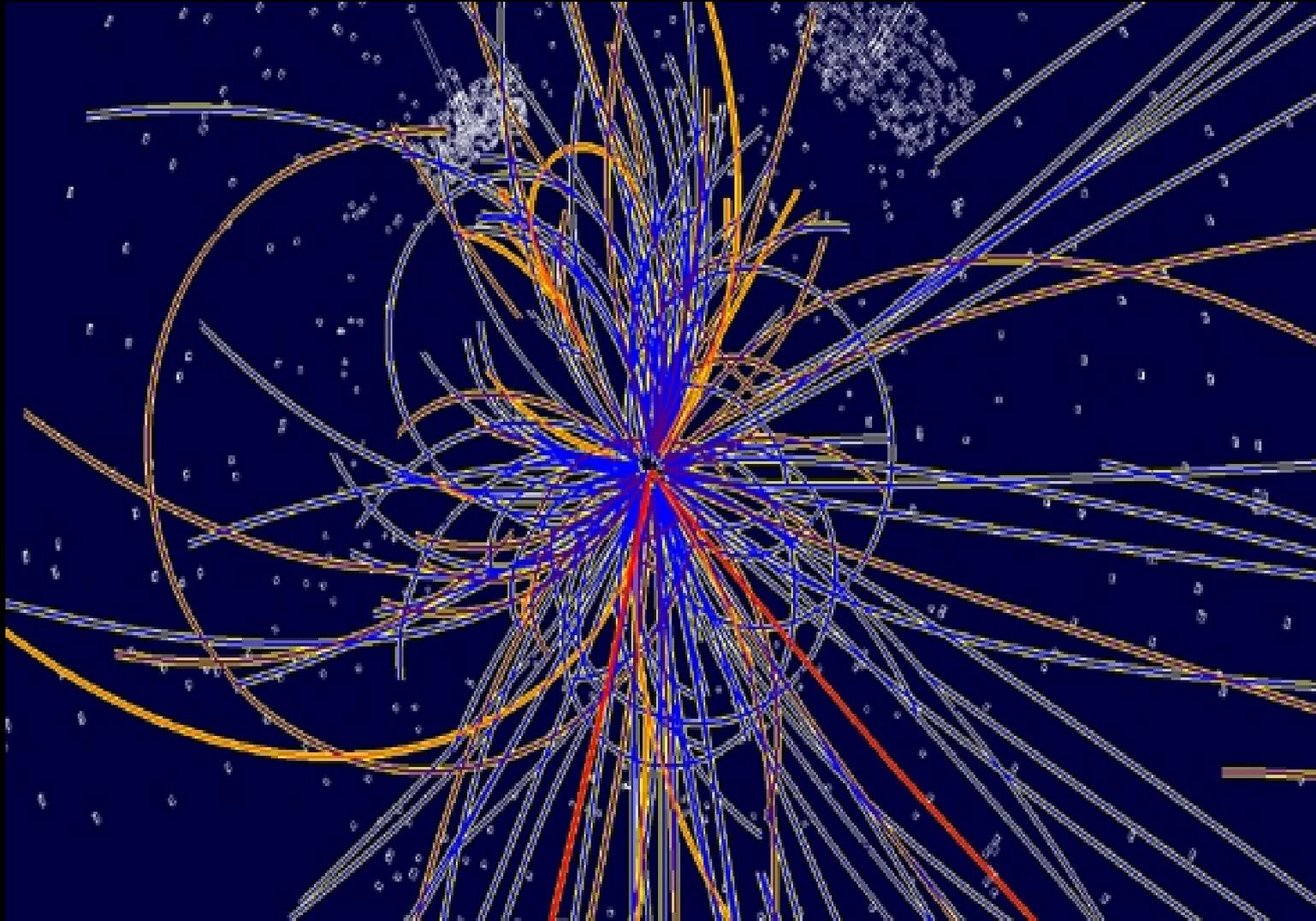
Conservazione dell'energia, equivalenza massa-energia :

$$Mc^2 = \sqrt{m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4 + 2 E_1 E_2 - 2 c^2 \vec{P}_1 \cdot \vec{P}_2}$$

La vita puo' essere assai piu' complicata...



La vita puo' essere infinitamente piu'
complicata...



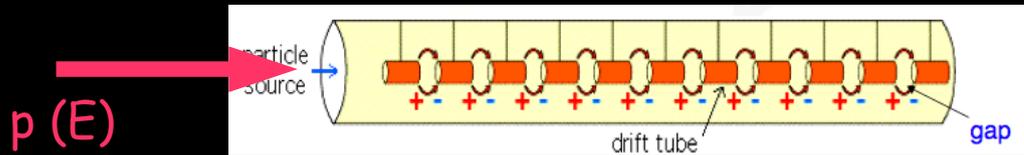
Simulazione di un evento Higgs a LHC

La misura degli eventi a LHC

- Per osservare il bosone di Higgs e la Nuova Fisica serve un acceleratore che massimizzi
 - l'energia delle collisioni
 - la frequenza delle collisioni (luminosità)
- Date le energie altissime, e l'enorme molteplicità servono rivelatori:
 - estremamente grandi
 - estremamente granulari
 - estremamente veloci
 - il più possibile ermetici

Alta Energia ...

- Cavita' acceleratrici fornisco circa 20 MeV di energia per metro di lunghezza



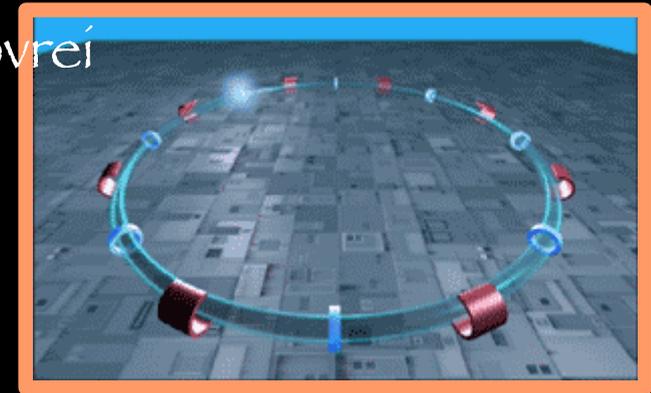
$p(E' = E + 20 \text{ MeV})$

- Per raggiungere 7 TeV, ovvero 7 milioni di MeV, dovrei usare oltre 300.000 cavita' !

- costi proibitivi

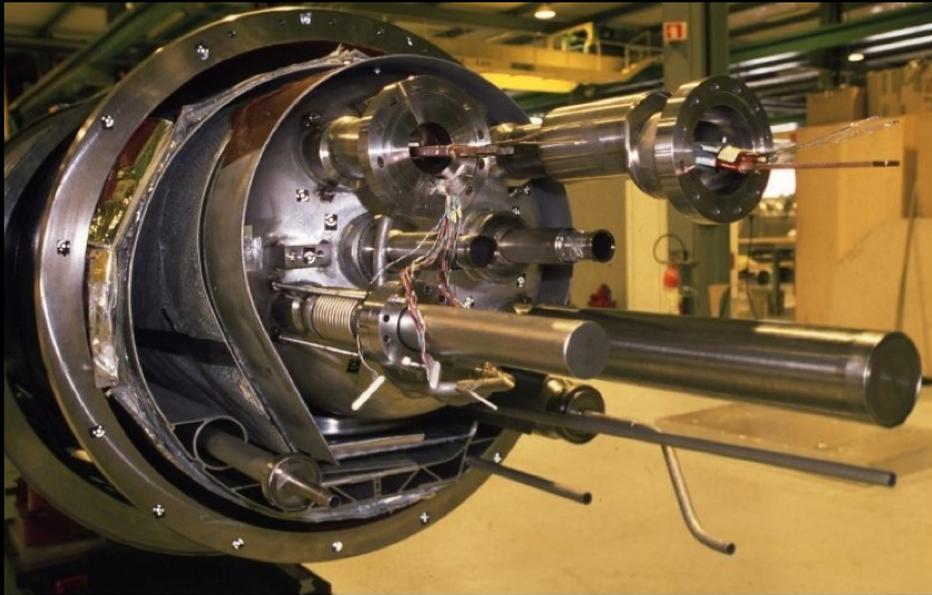
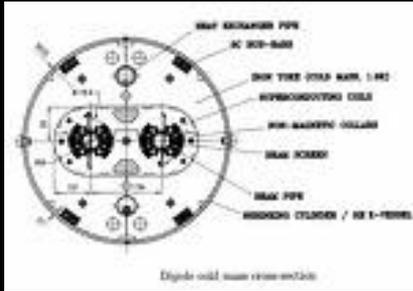
- ingombri impensabili

- Accellero i protoni su traiettorie circolari, così' uso la stessa cavita' piu' volte (una per giro)



I Magneti di LHC

- Servono comunque 1232 potentissimi magneti dipolari (9 Tesla) di grandi dimensioni ($L \sim 15$ m)



- Per limitare l'assorbimento di potenza : magneti superconduttori,

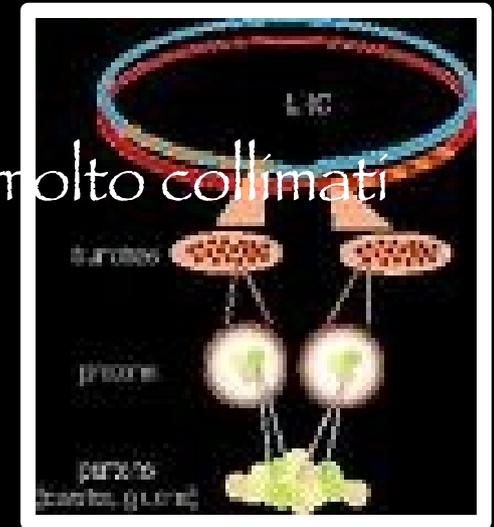
$$T = 1.9 \text{ }^\circ\text{K} (= -271.1 \text{ }^\circ\text{C}),$$

$$\langle T_{\text{Universo}} \rangle \approx 2.3 \text{ }^\circ\text{K}$$



Luminosità

- I protoni vengono accelerati in due tubi a vuoto per circolare su traiettorie opposte
- In poche zone opportune le traiettorie si intersecano e hanno luogo le collisioni
- I protoni sono raggruppati in pacchetti (bunches) molto collimati (sottili) mediante 392 magneti “focalizzatori”
- In condizioni di disegno (non ancora raggiunte) :
 - 115 miliardi di protoni / bunch
 - 2808 (x2) bunches simultaneamente presenti nei tubi

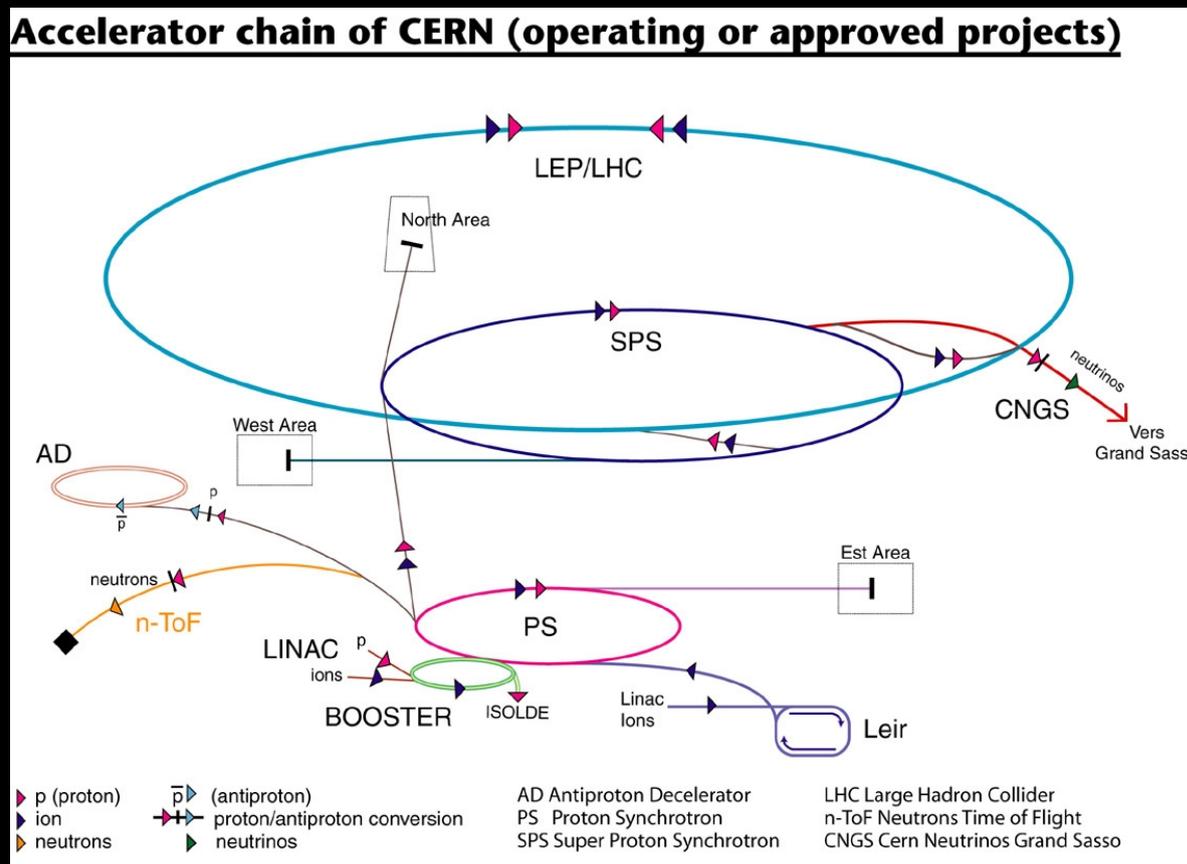


40 000 000 di collisioni al secondo

(ma ne registriamo ~ 300 / sec)

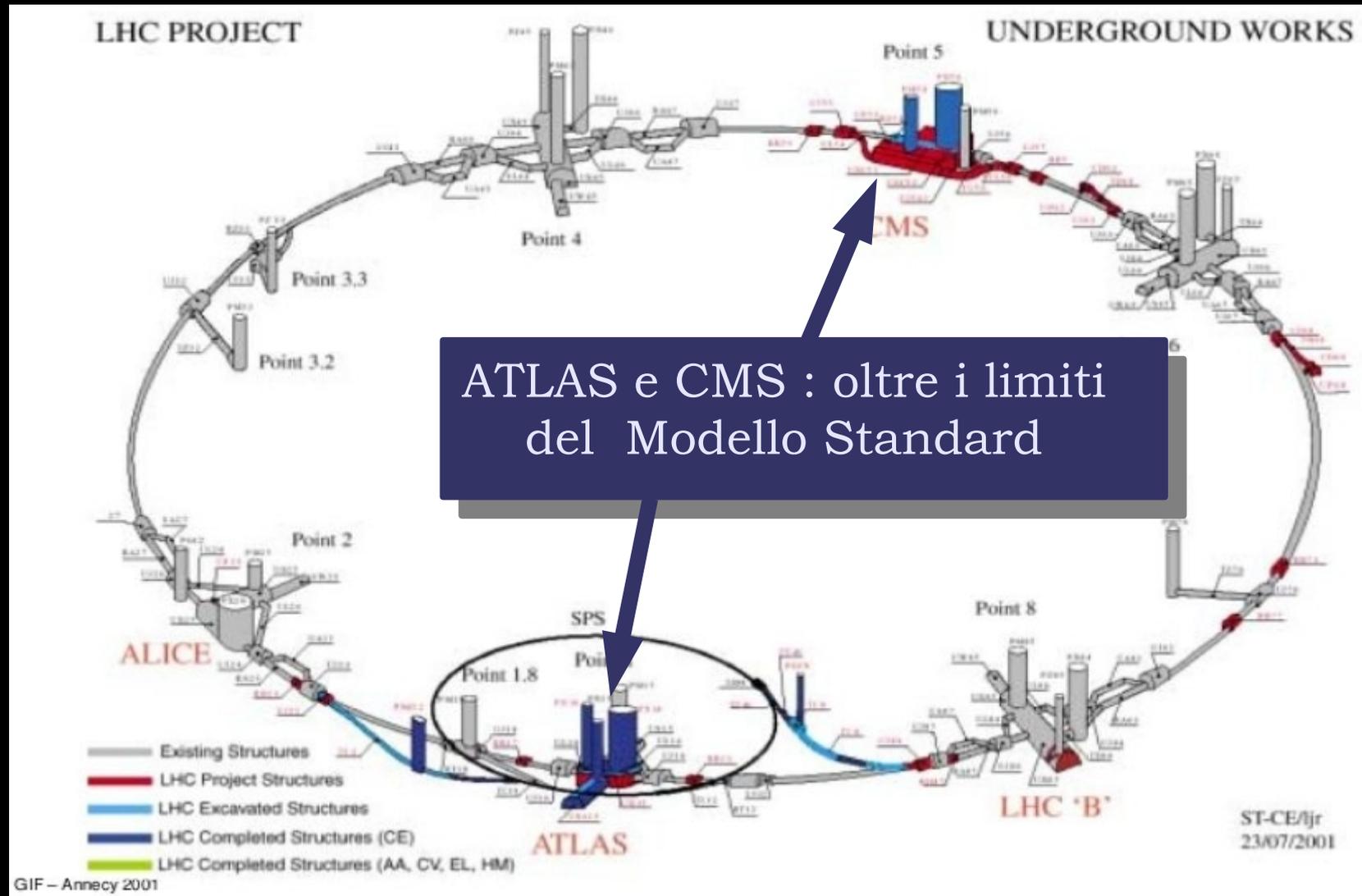
Il Large Hadron Collider

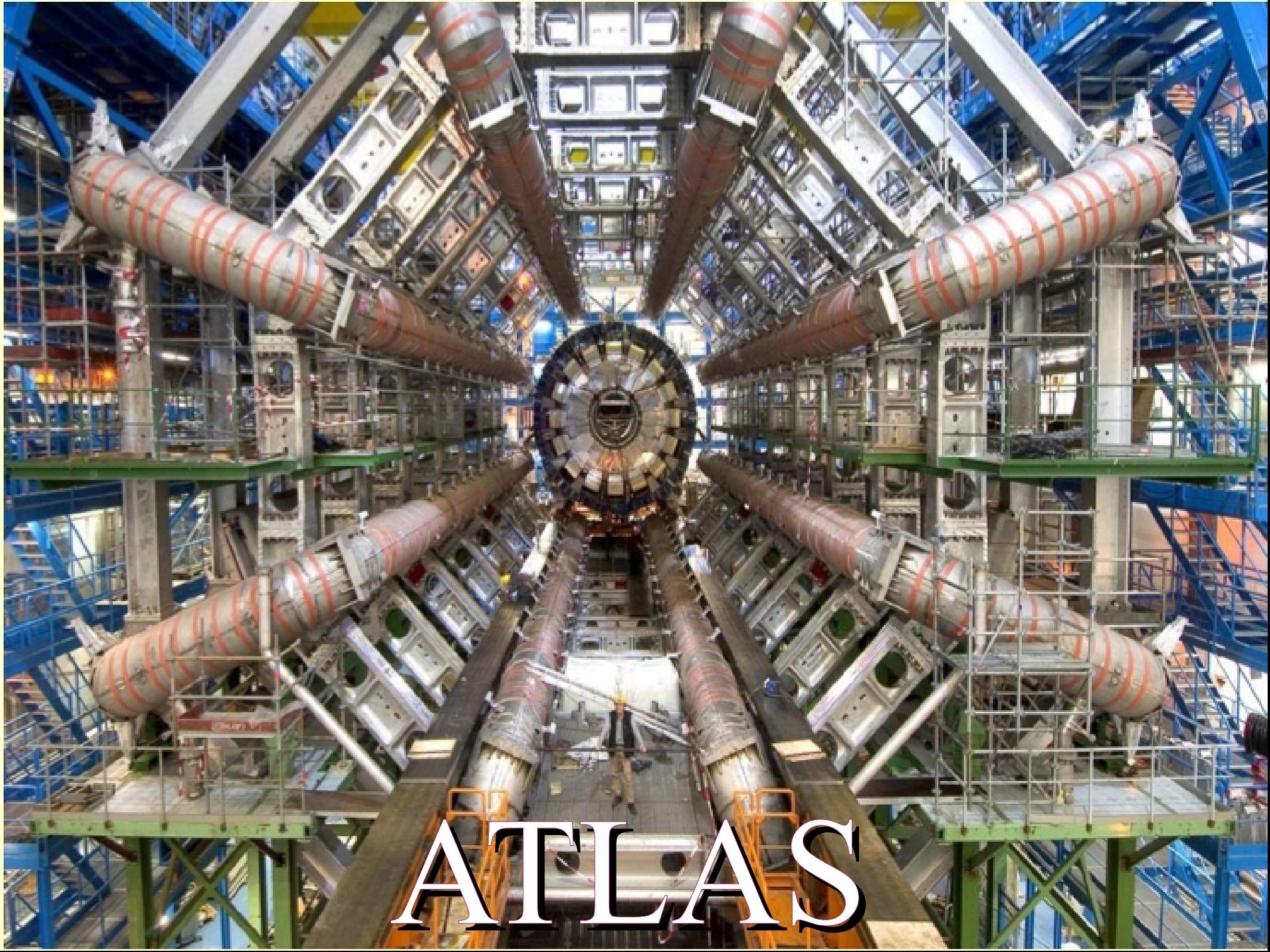
- LHC e' lo stadio finale di un complesso sistema che utilizza svariati acceleratori in cascata
- Il penultimo stadio (SPS) e' l'acceleratore progettato da Carlo Rubbia per osservare W e Z nei primi anni 80



Gli esperimenti

Le collisioni hanno luogo in quattro punti, dove sono alloggiati quattro rivelatori, disegnati con obiettivi diversi





ATLAS

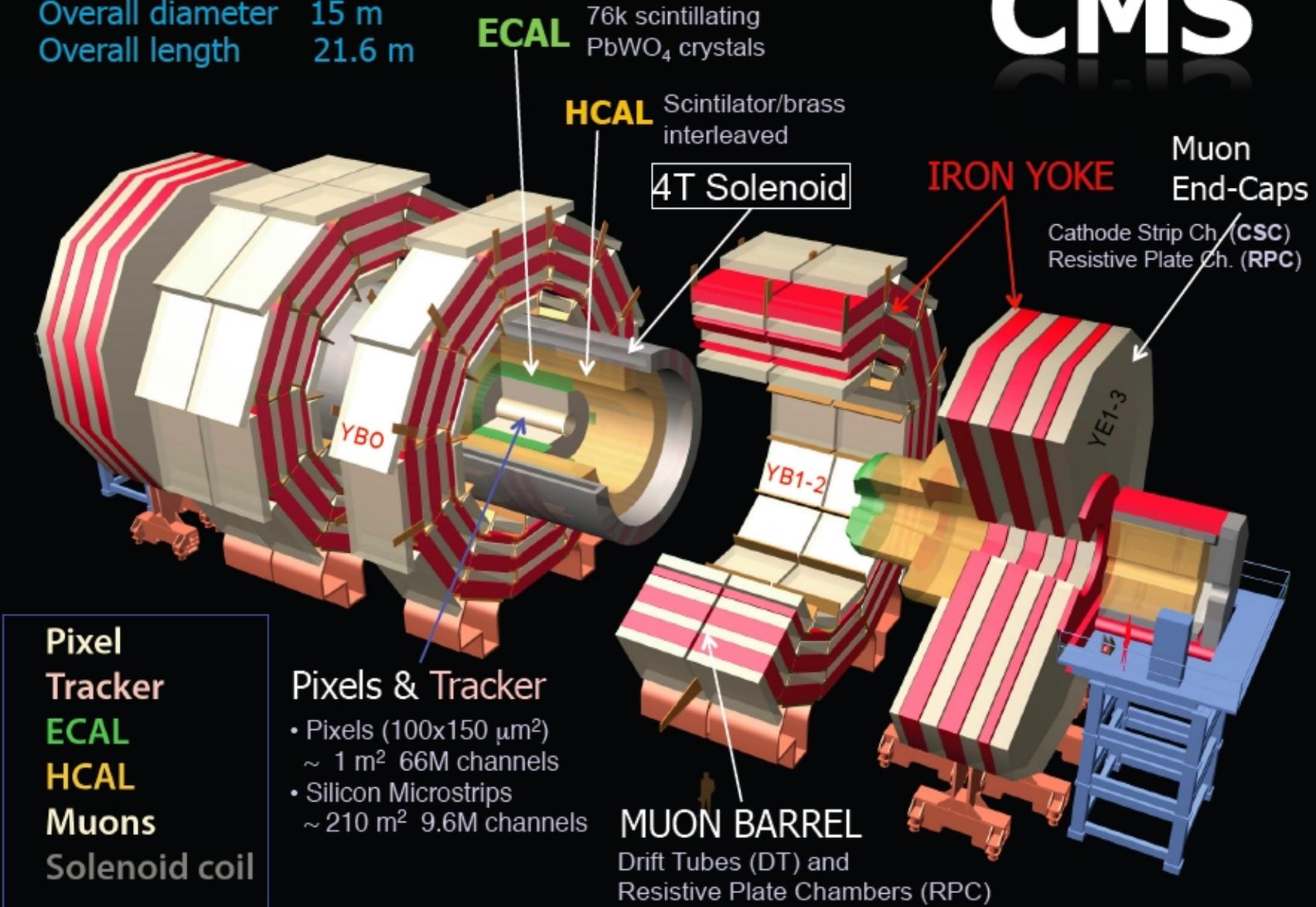


CMS

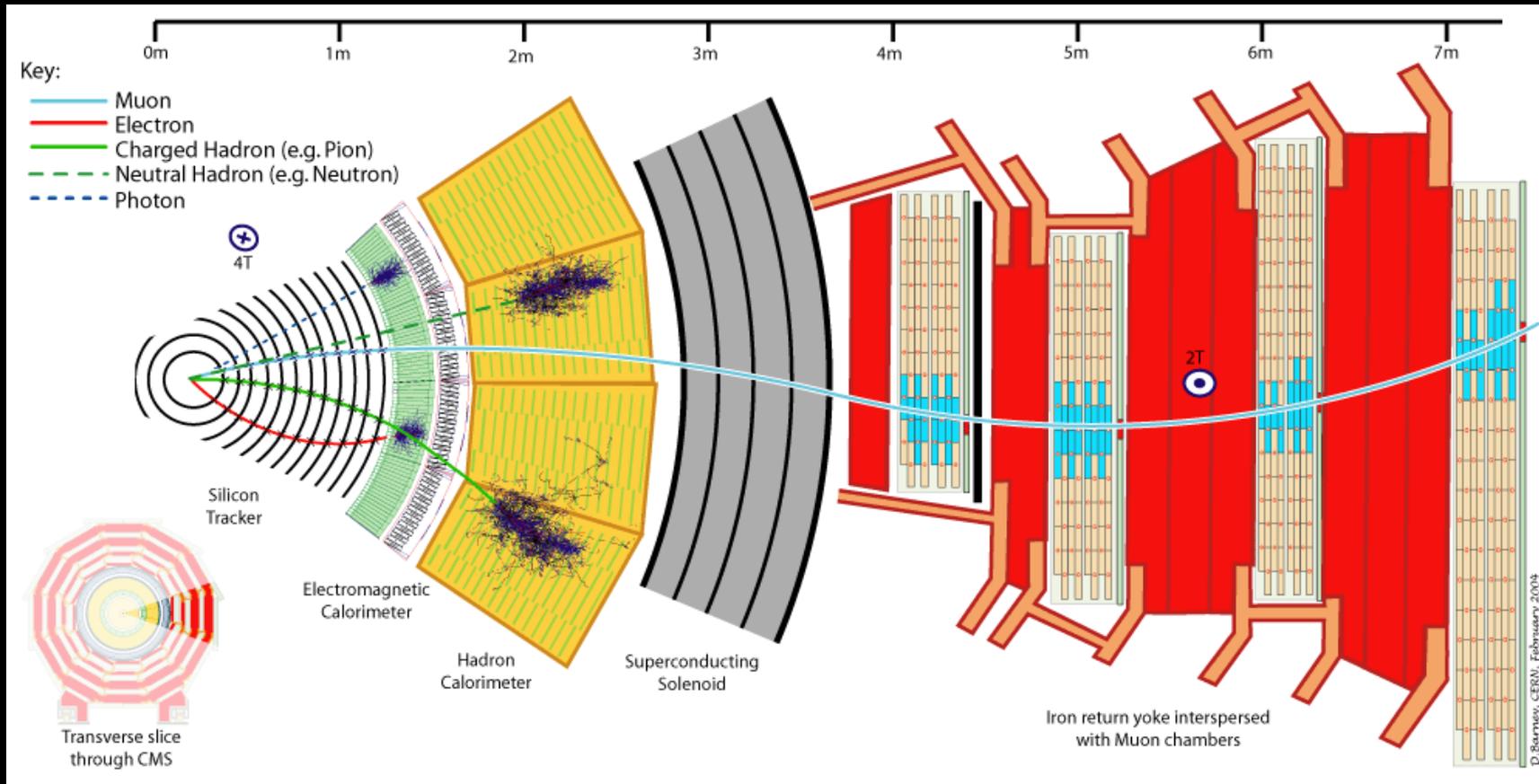
The Compact Muon Solenoid

CMS

Total weight 12500 t
 Overall diameter 15 m
 Overall length 21.6 m



CMS



Il Solenoide di CMS

- Il campo magnetico curva la traiettoria delle particelle cariche :

$$P = q \cdot B \cdot R$$

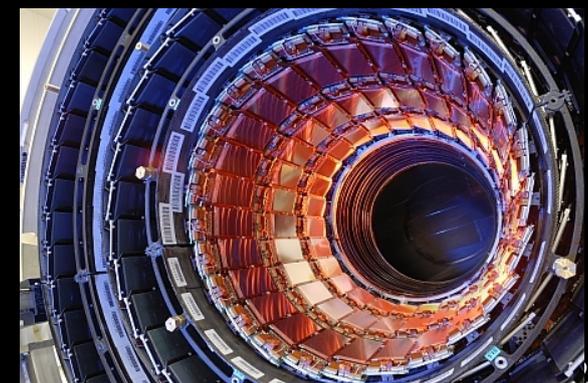
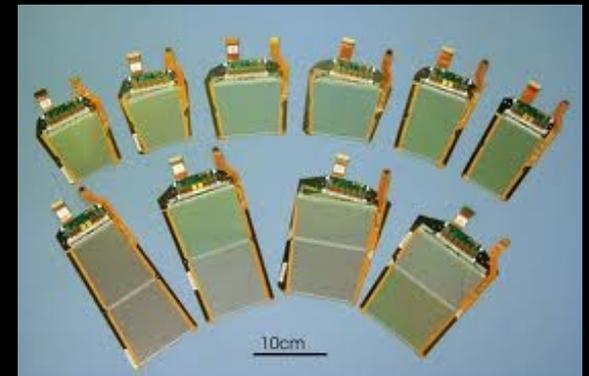
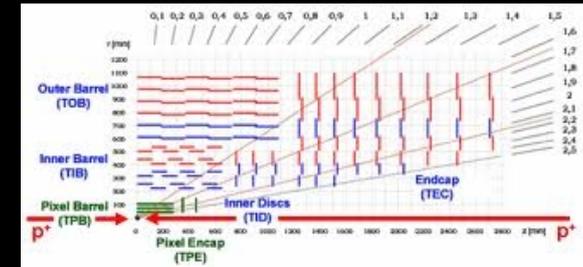
- Misurando il raggio di curvatura R ricavo la quantità' di moto P



- Grandi valori di $P \rightarrow B$ molto intenso
- CMS : solenoide da 3.8 T su un volume di 400 m³, ($E_{\text{magnetica}} \approx 2.5 \cdot 10^9 \text{ J} \sim \frac{1}{2} \text{ Ton TNT}$)

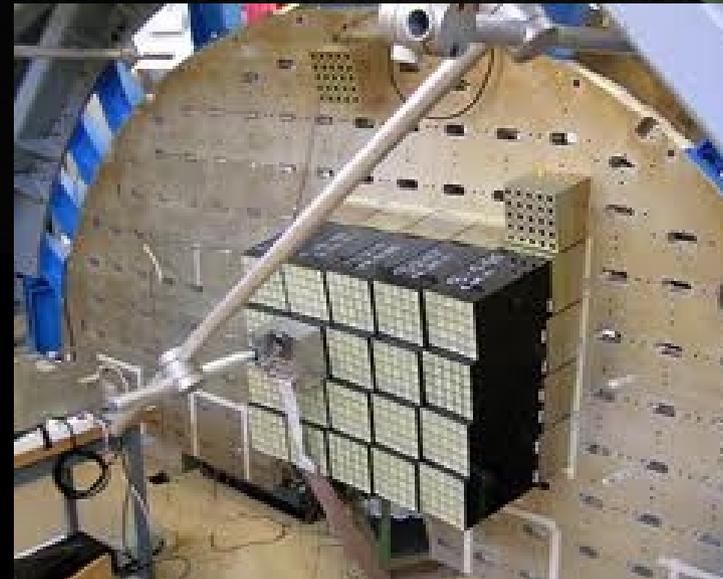
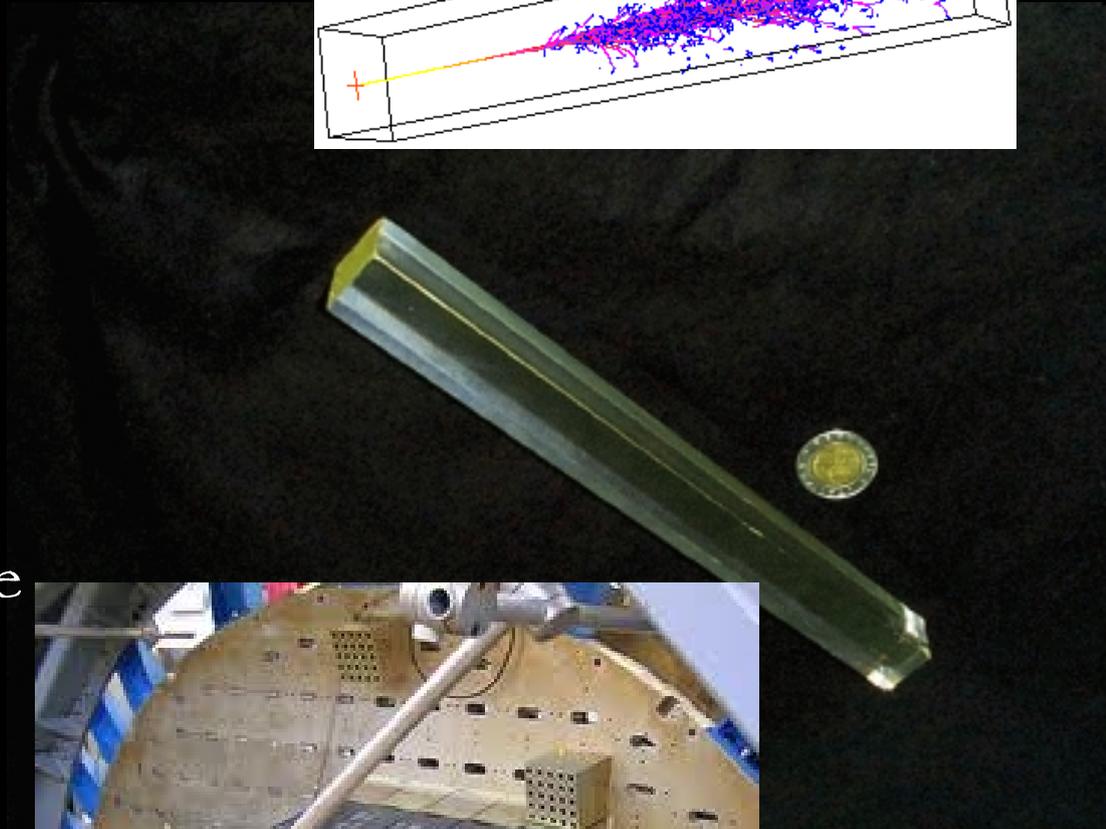
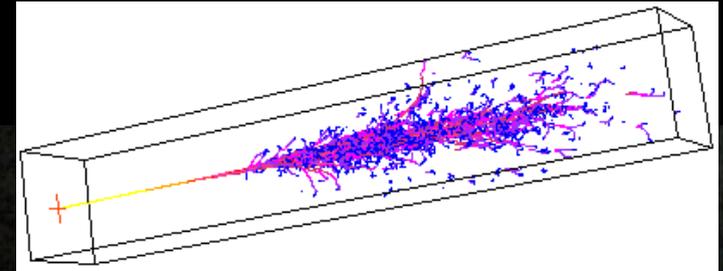
Il Tracciatore

- Strati di sottili tavolette ($s \sim 300 \mu\text{m}$) di silicio che rilasciano un segnale elettrico se attraversati da una particella carica, arrangiati in modo da garantire un'ampia copertura angolare
- La posizione dell'impatto e' misurata da ciascun rivelatore con una precisione di una decina di μm
- Otteniamo la traiettoria combinando i segnali (hits) nei singoli strati
- Complessivamente sono attivi circa 80 milioni di "canali"
- Il tutto deve operare ad una temperatura stabile di -10°C



IL Calorimetro Elettromagnetico

- Cristalli scintillanti
- Assorbono completamente fotoni ed elettroni, rilasciando un segnale luminoso, proporzionale all'energia assorbita
- Assorbono solo in parte le altre particelle (adroni carichi e neutri)



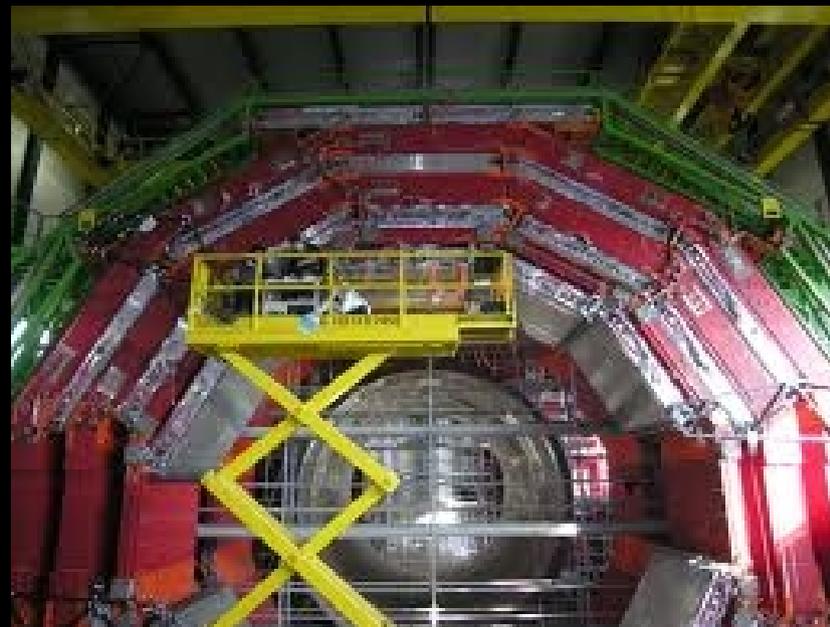
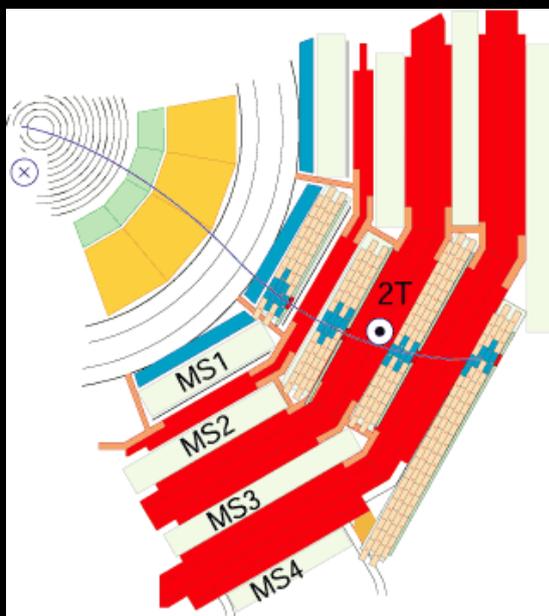
Il Calorimetro Adronico

- Assorbe tutte le particelle, tranne i muoni e i neutrini
- Produce un segnale elettrico proporzionale all'energia assorbita
- Ha una precisione più grossolana del calorimetro elettromagnetico

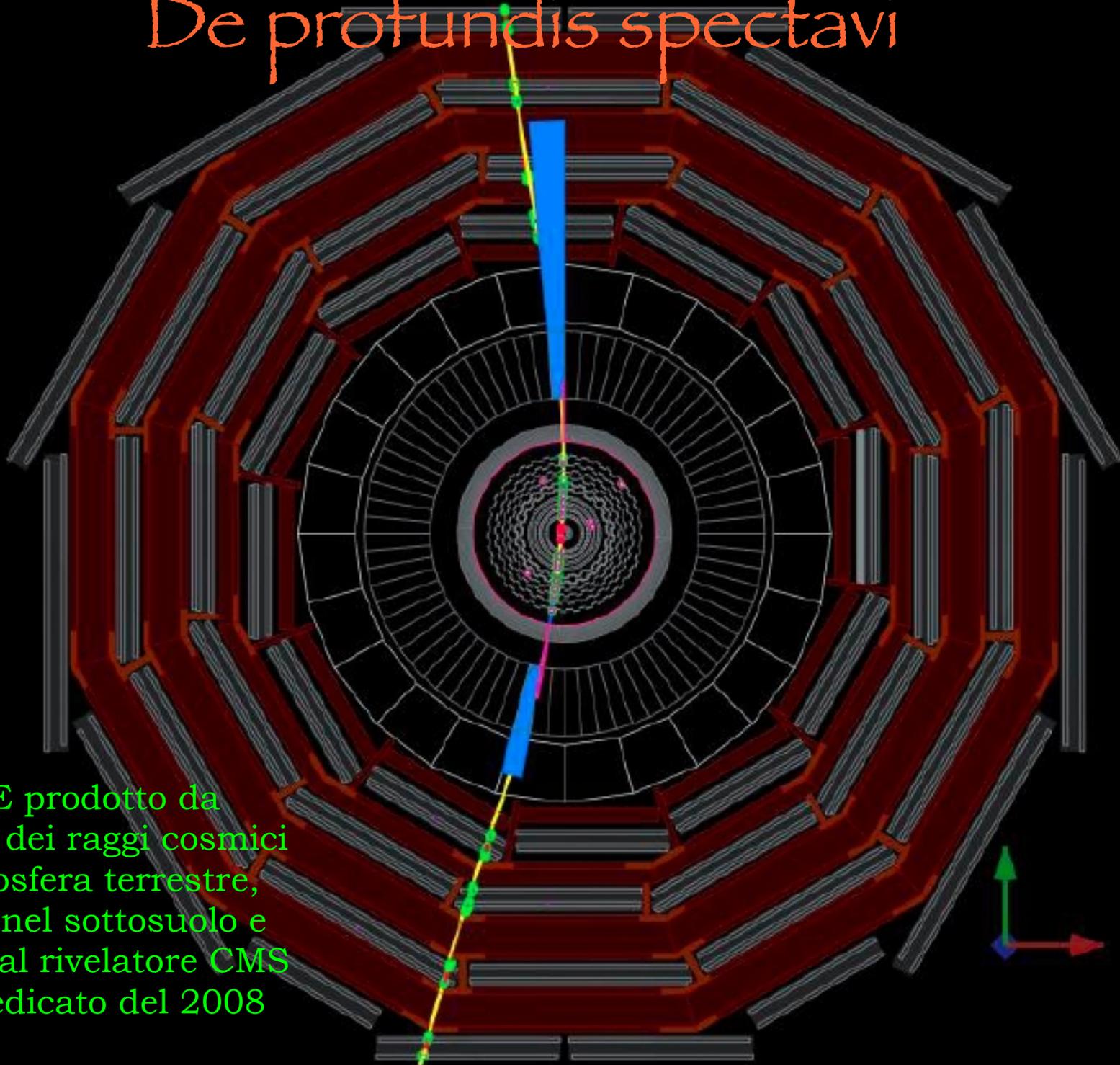


Le camere a mu

- Tracciano il passaggio dei muoni, le sole particelle rivelabili che possono attraversare l'intero rivelatore
- Sono inserite in una pesante struttura di Ferro magnetizzato che chiude le linee del Campo Magnetico



De profundis spectavi



MUONE prodotto da interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre, penetrato nel sottosuolo e osservato dal rivelatore CMS nel run dedicato del 2008

Le misure

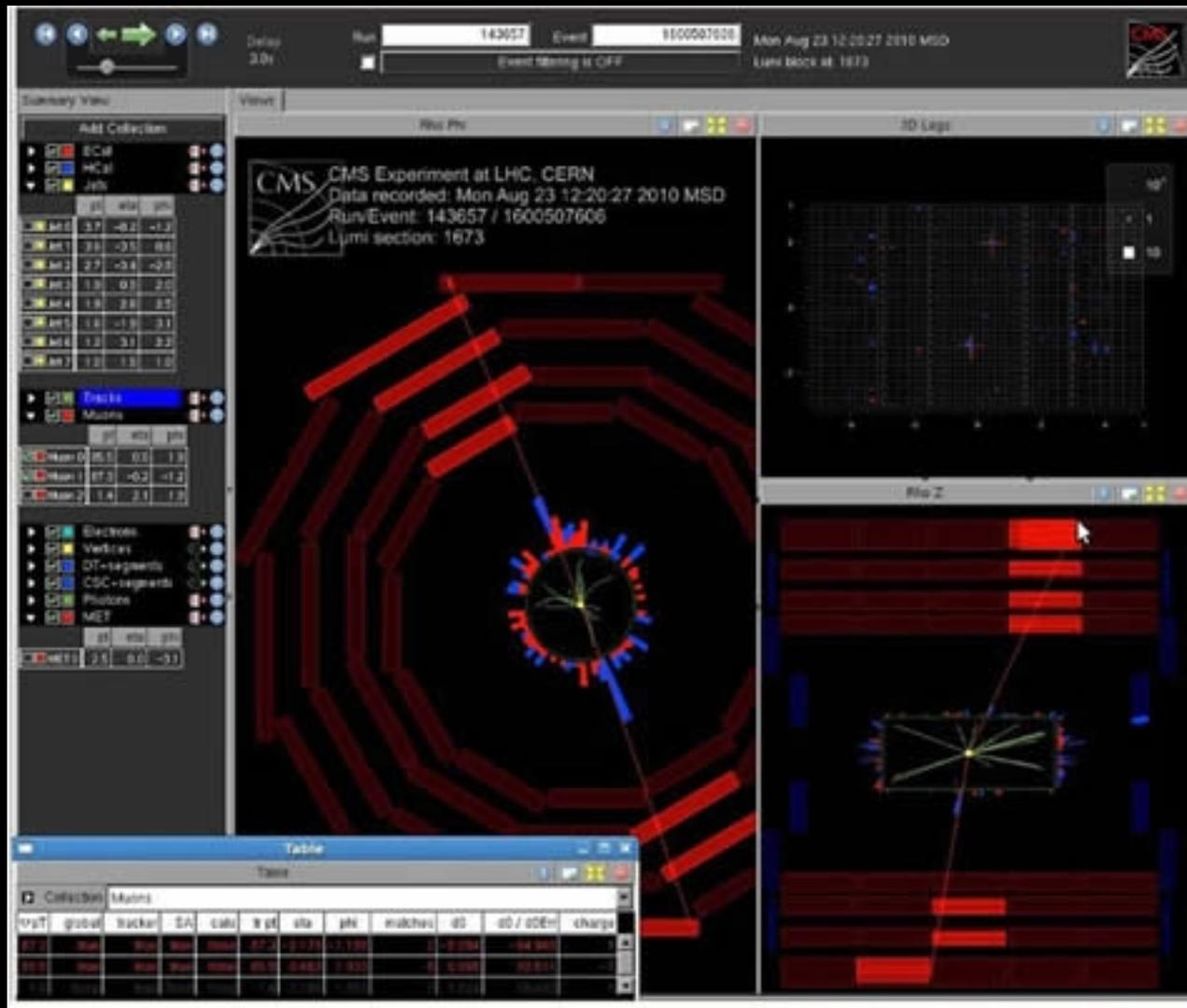
- “Riscoperta” del Modello Standard
- Caccia all'Higgs
- Buchi neri, LSP e altra fauna fantastica

“Riscoperta” del Modello Standard

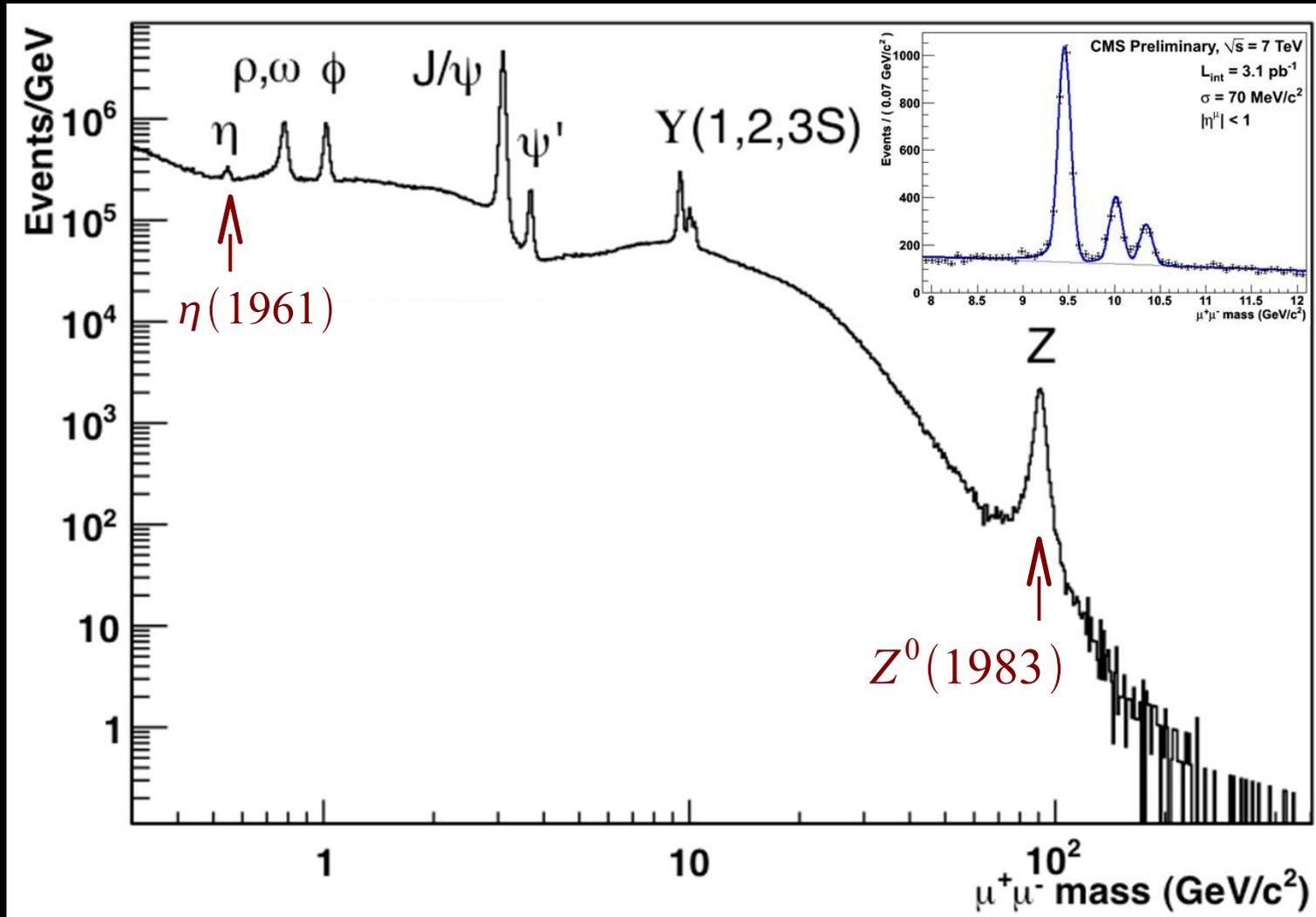
Studio ad alta energia dei processi già osservati ad energie più basse:

- validazione delle prestazioni dei rivelatori
- verifica delle predizioni del MS ad energie non ancora esplorate (e ricerca di anomalie)

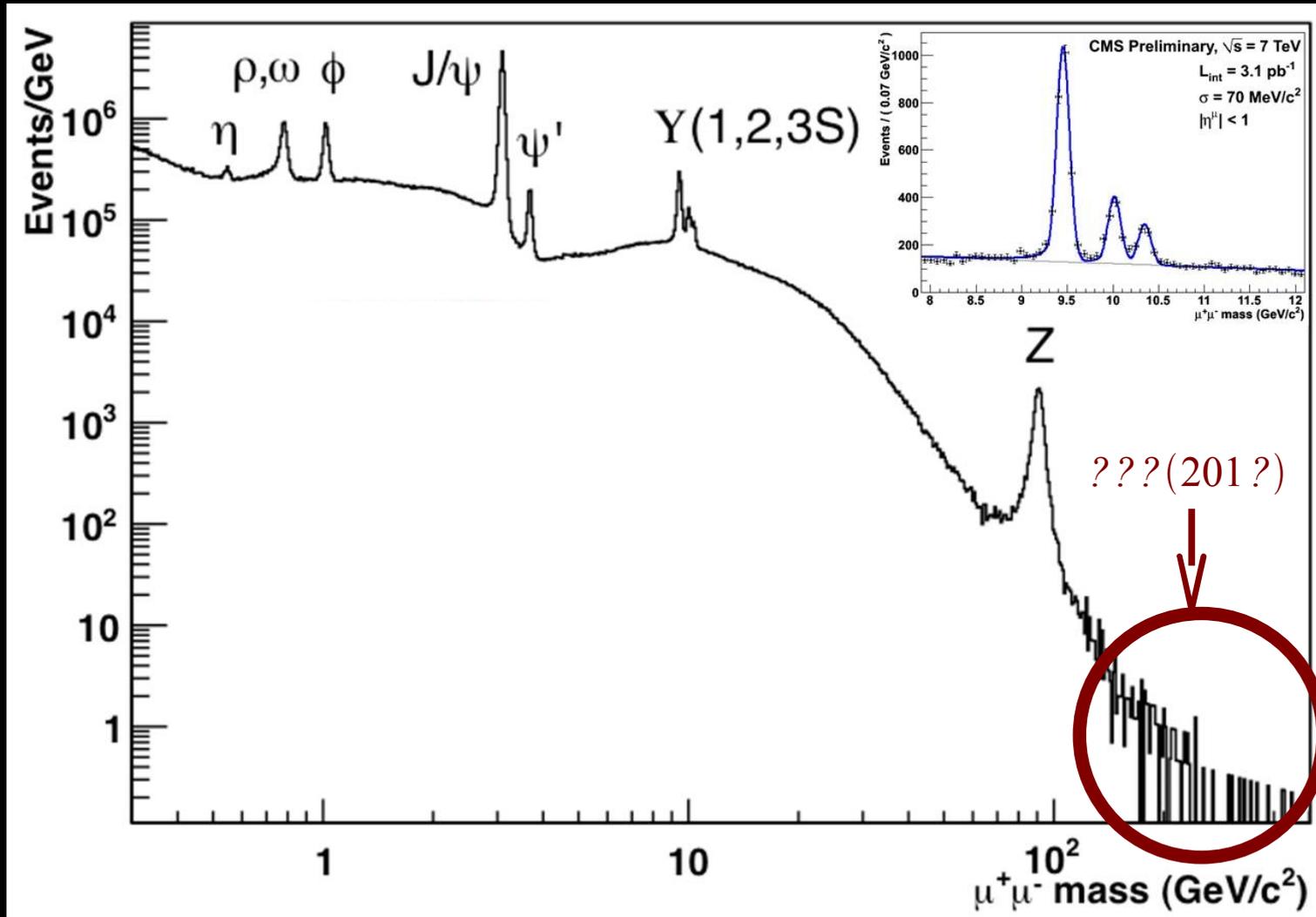
Esempio: stati finali $\mu^+\mu^-$



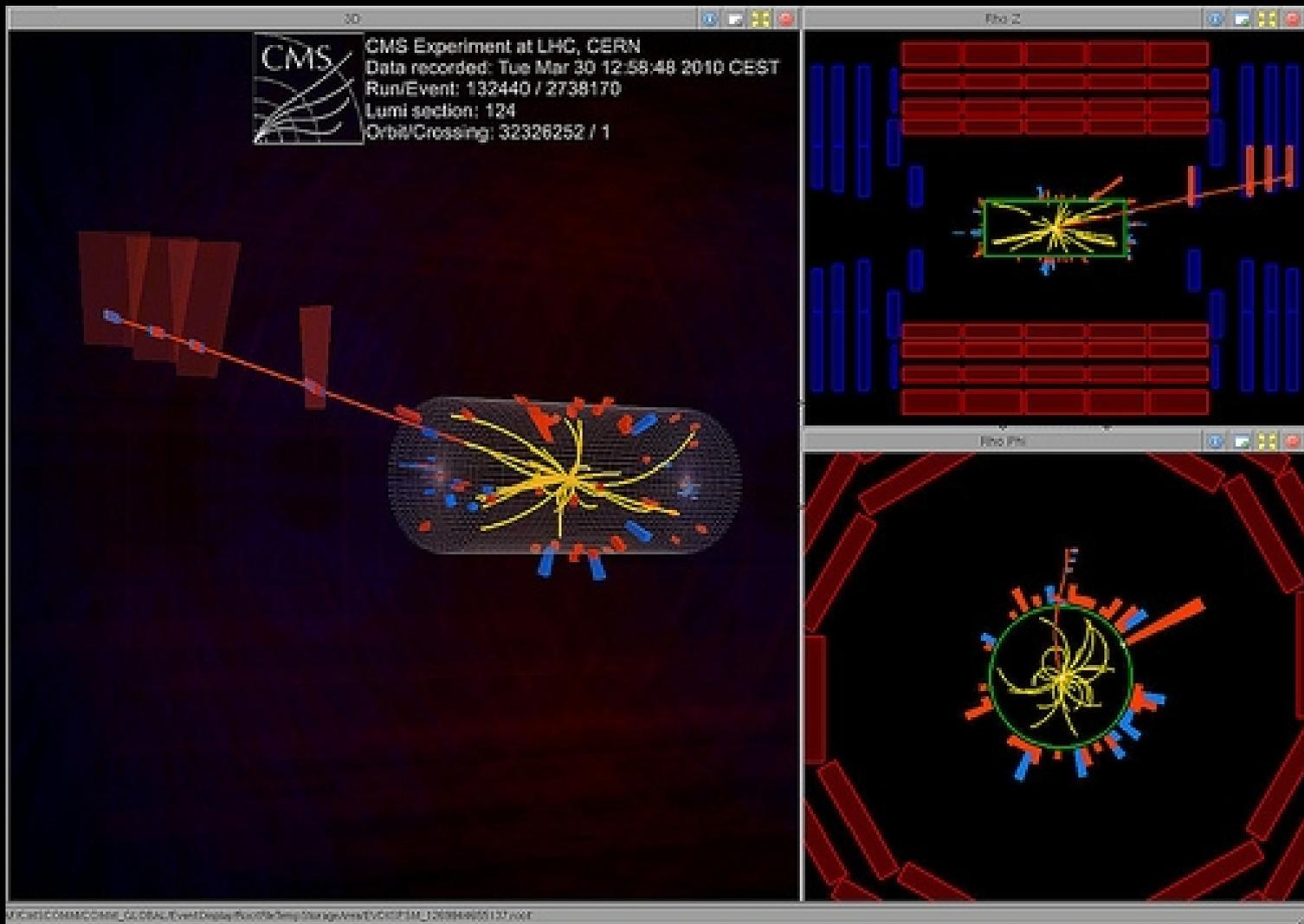
Spettro di Massa Invariante $M(\mu^+\mu^-)$, ovvero 50 anni di storia in pochi mesi



Spettro di Massa Invariante $M(\mu^+\mu^-)$, ovvero 50 anni di storia in pochi mesi

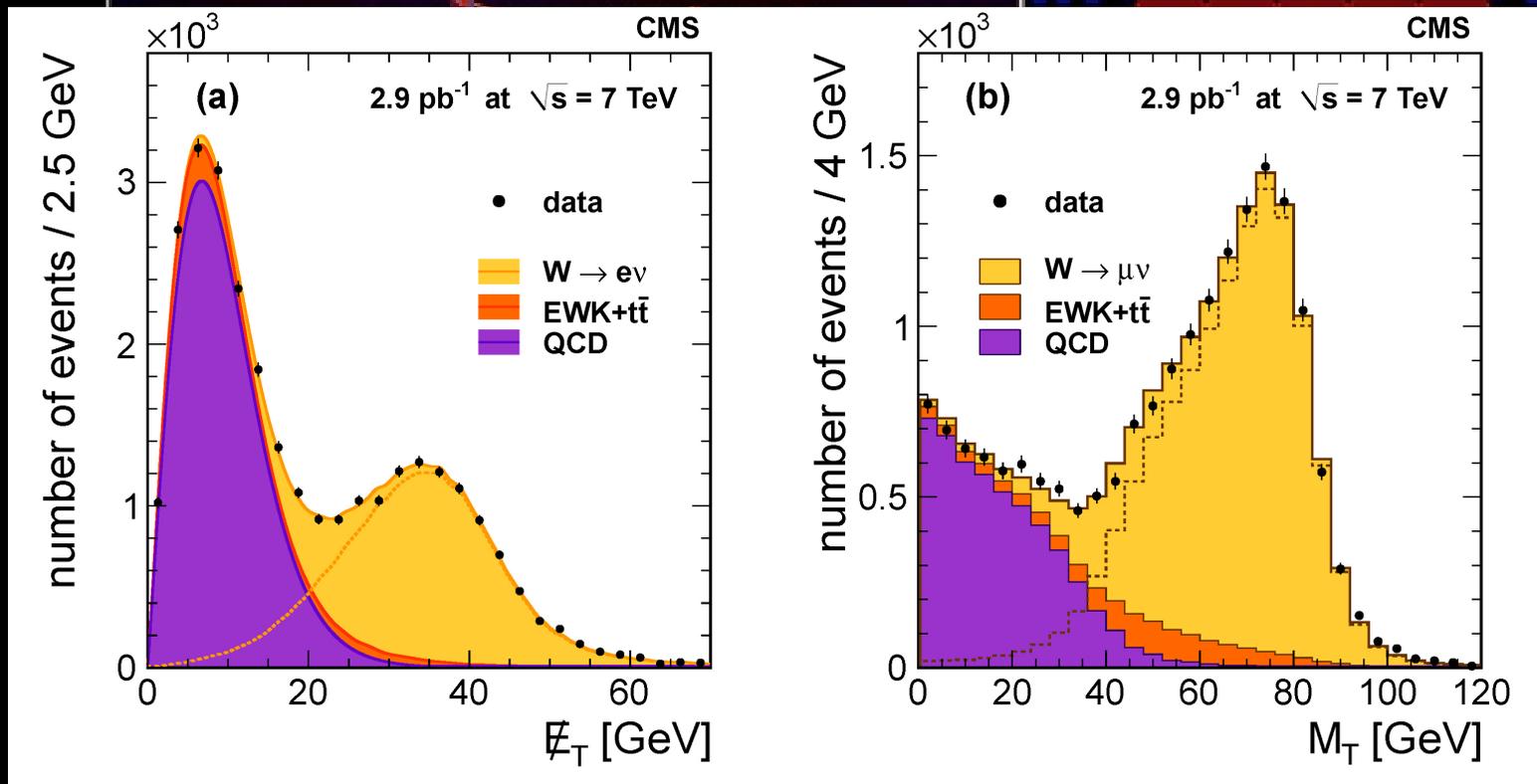
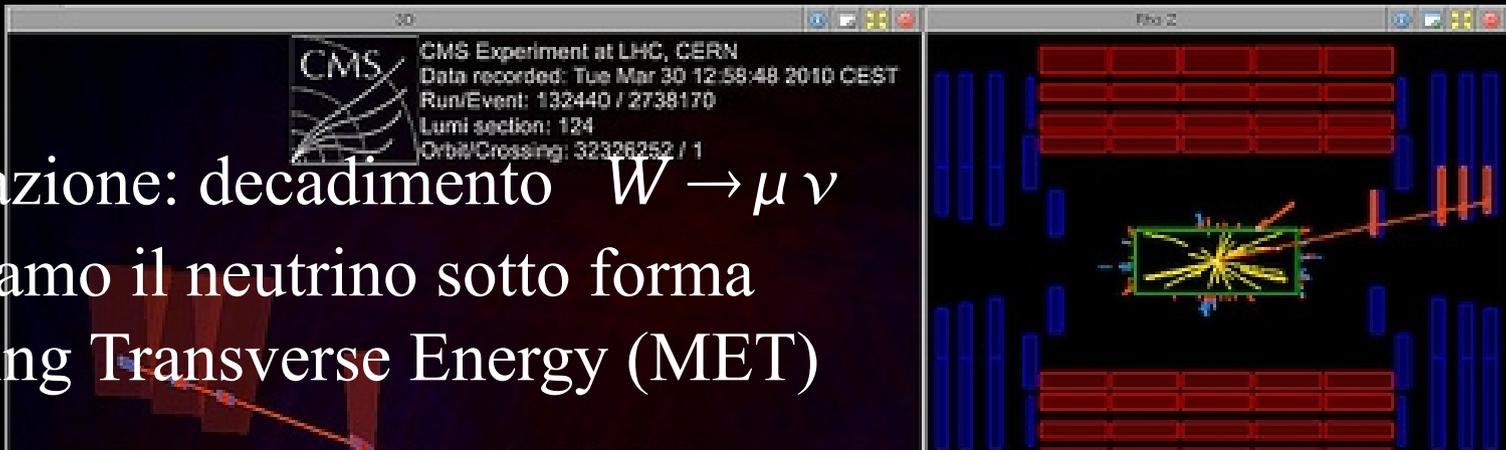


Spettri di Muone isolato

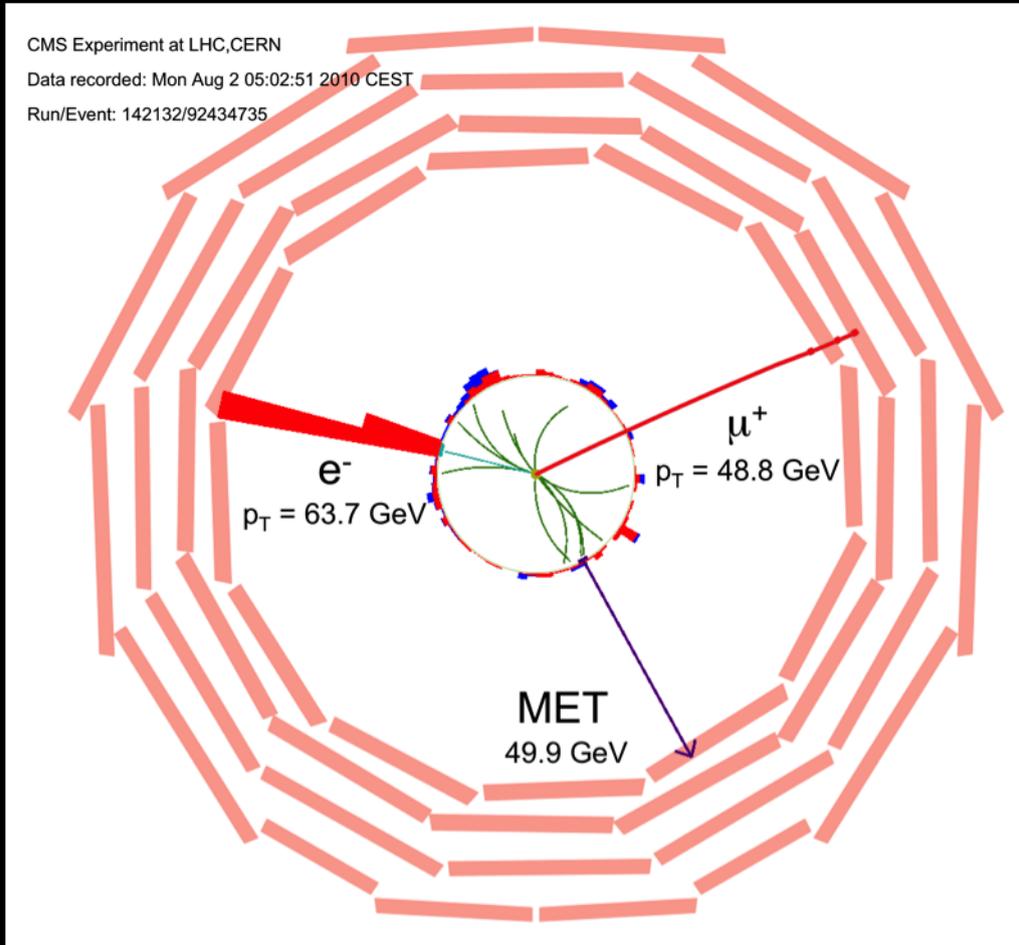


Spettri di Leptone isolato

Interpretazione: decadimento $W \rightarrow \mu \nu$
Riveliamo il neutrino sotto forma
di Missing Transverse Energy (MET)



Due Leptoni e il Nulla



- Due leptoni ($e\mu, \mu\mu, ee$) energetici e grande energia mancante
- Interpretazione: produzione associata di due bosoni W, che decadono come:

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

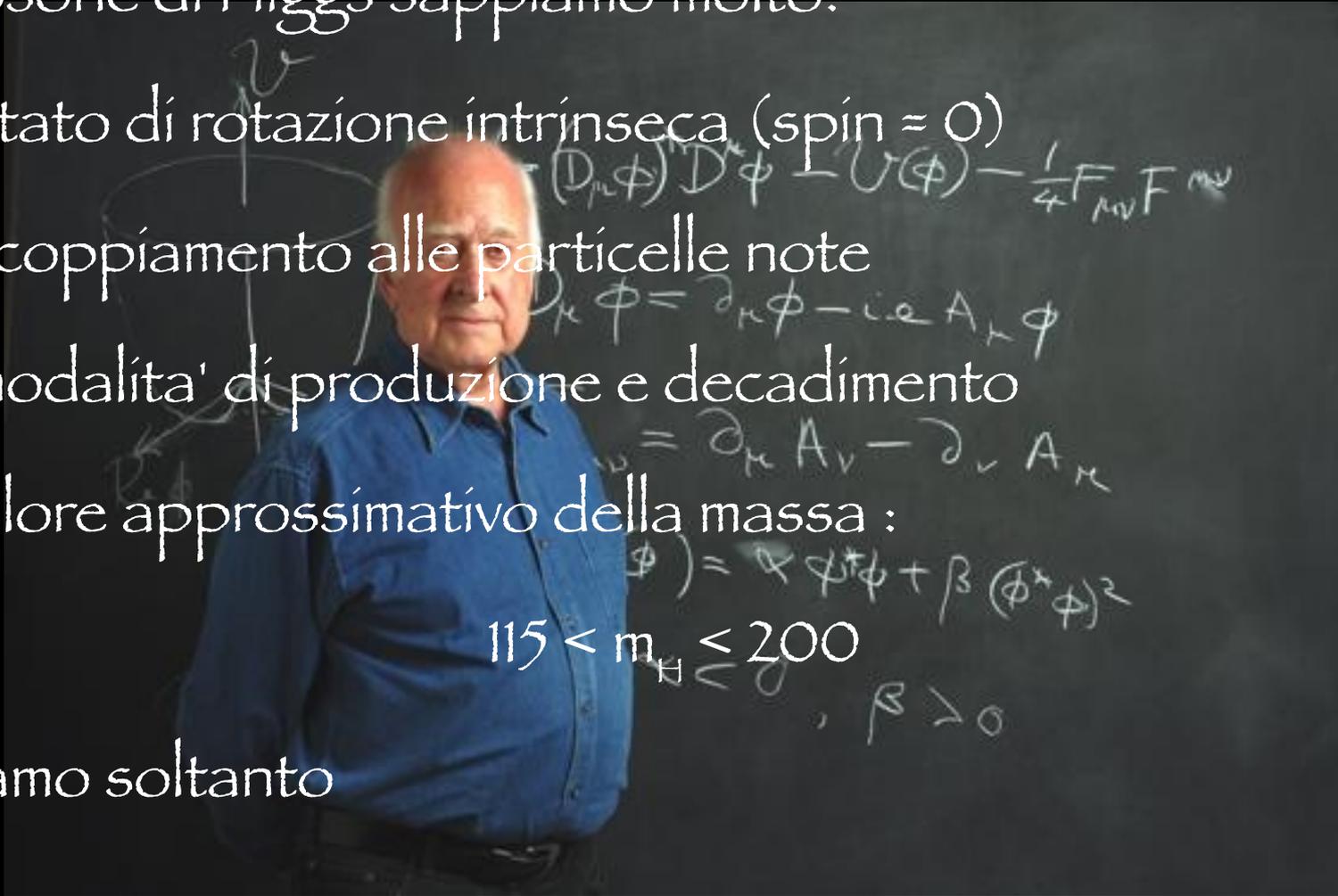
Caccia all' Higgs

Del bosone di Higgs sappiamo molto:

- lo stato di rotazione intrinseca (spin = 0)
- l'accoppiamento alle particelle note
- le modalità di produzione e decadimento
- il valore approssimativo della massa :

$$115 < m_H < 200$$

Ignoriamo soltanto



Caccia all' Higgs

Del bosone di Higgs sappiamo molto:

- lo stato di rotazione intrinseca (spin)
- l'accoppiamento alle particelle note
- le modalità di produzione e decadimento
- il valore approssimativo della massa :

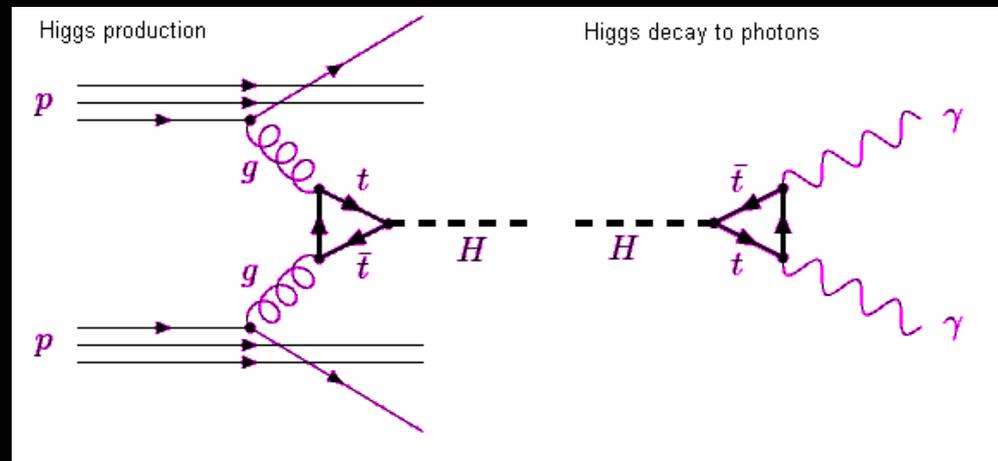
$$115 < m_H < 200$$

Ignoriamo soltanto

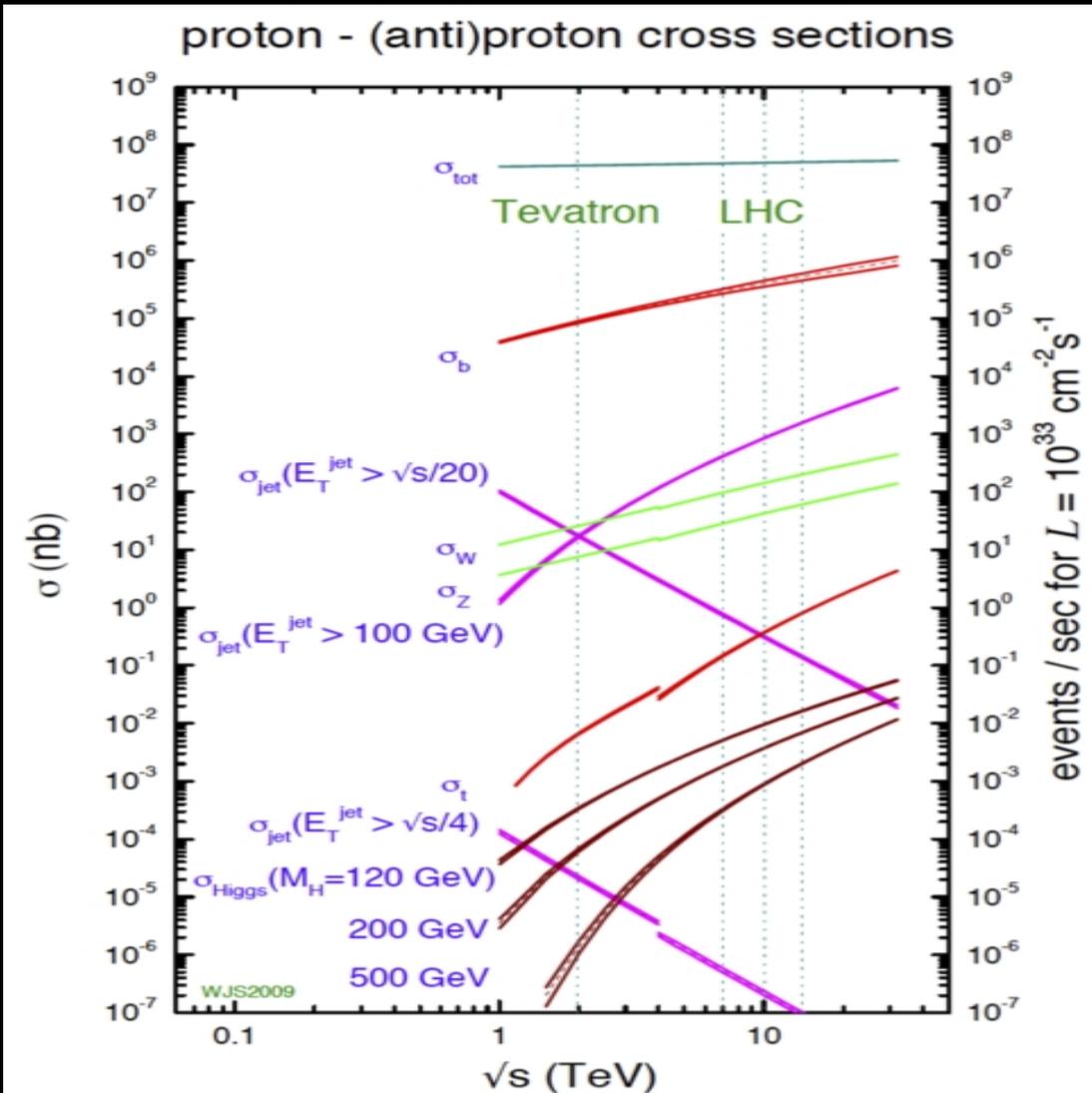
- se esiste
- il valore preciso della massa

Caccia al 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



Produzione dell'Higgs



- La produzione del Bosone di Higgs e' un fenomeno raro
- Avviene con frequenza minore di una volta per miliardo di eventi standard
- Dovremo selezionare con cura gli eventi interessanti da un fondo banale soverchiante

Caccia all'Higgs

SCORE: 1426



249



117

Game2q.co.kr



A FOUR-LEAF CLOVER

VERSION 0.07

Caccia all'Higgs

- Higgs pesante ($m_H > 140$ GeV)

$$H \rightarrow W W \rightarrow \ell_1^+ \ell_2^- \nu \bar{\nu}$$

$$H \rightarrow Z Z \rightarrow \ell_1^+ \ell_1^- \ell_2^+ \ell_2^-$$

- Higgs leggero ($m_H < 140$ GeV)

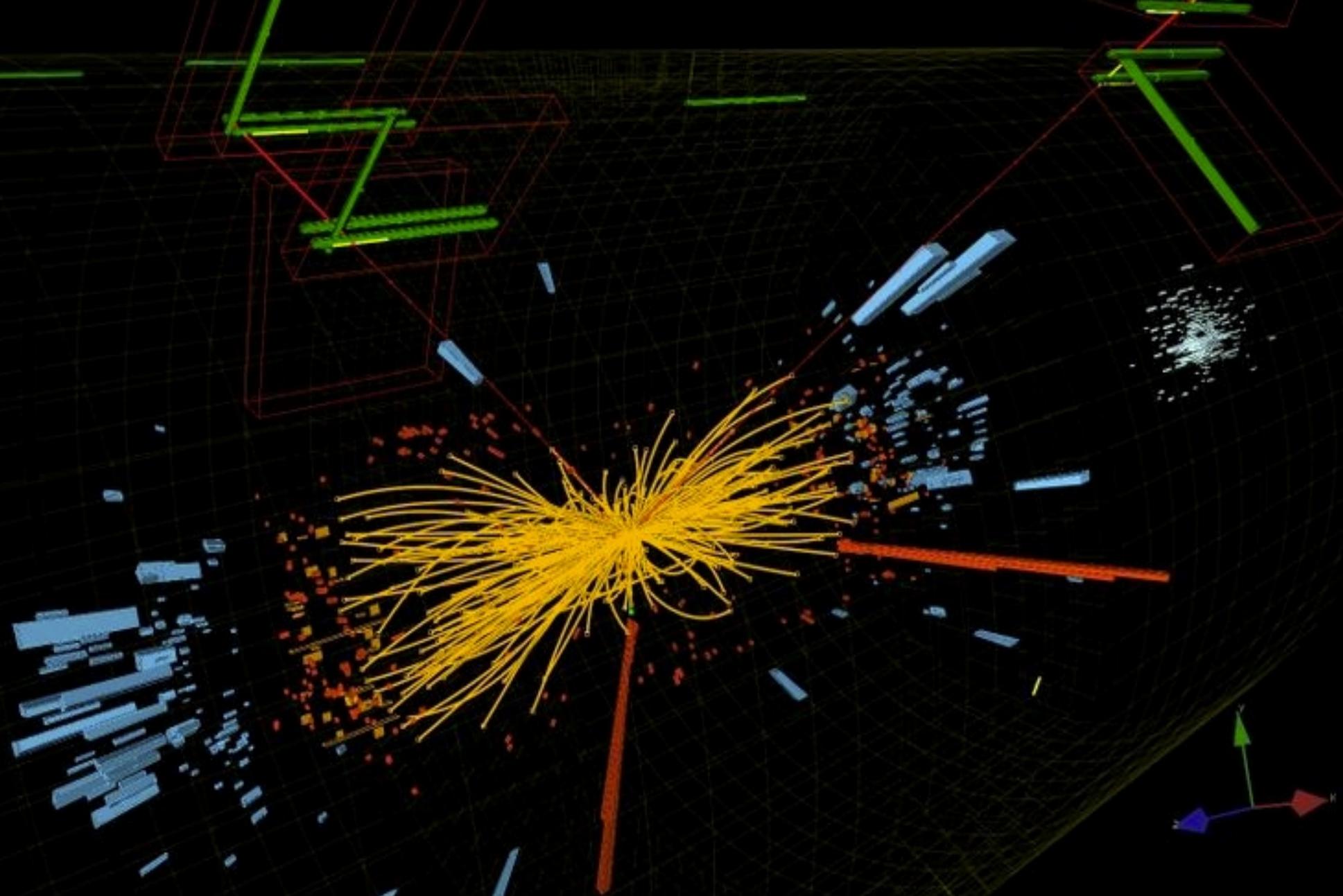
$$H \rightarrow \gamma \gamma$$

$$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$$



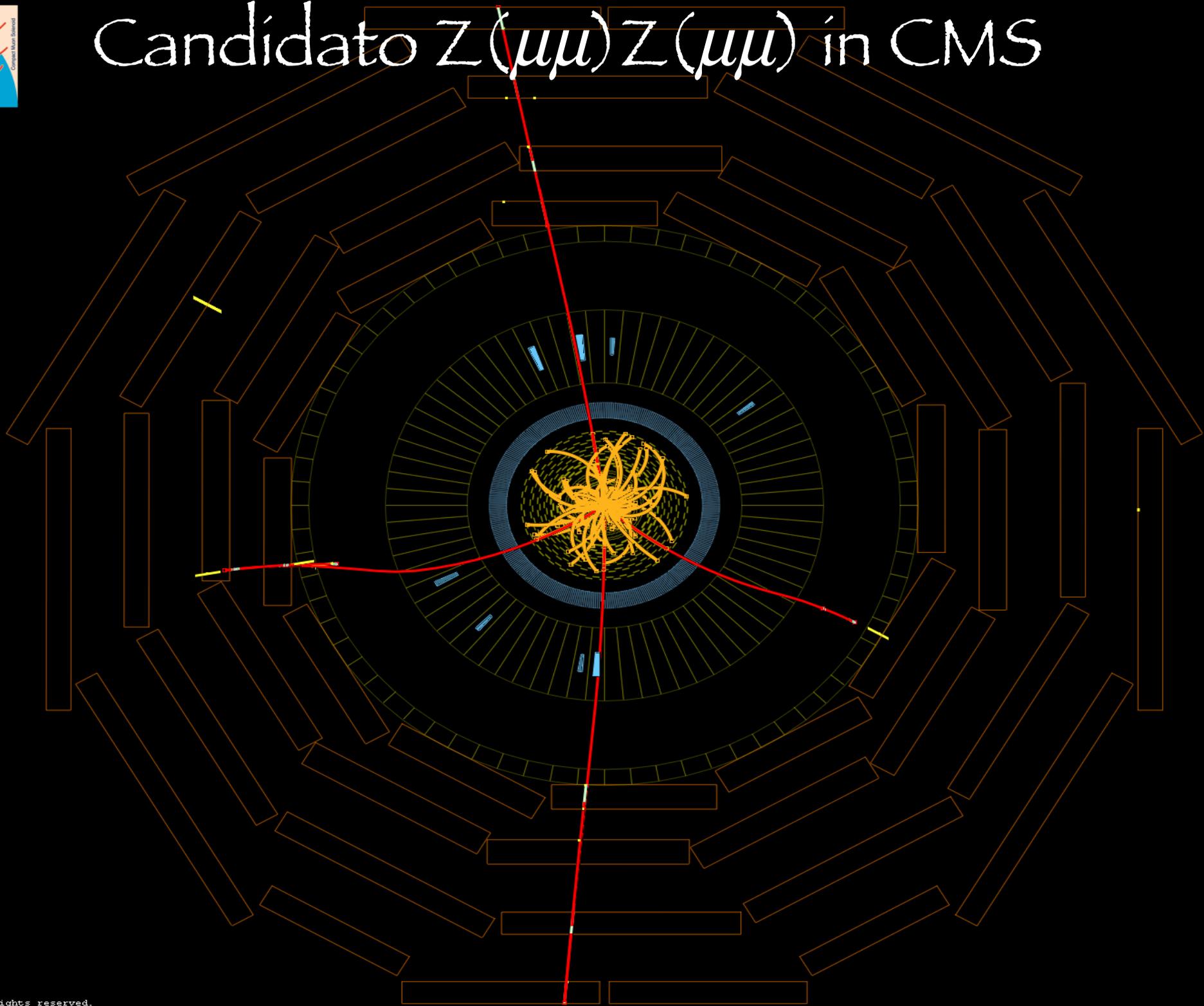
Candidate $Z(ee)Z(\mu\mu)$ in CMS

DATA recorded: 2011-May-25 08:00:19.229673 GMT (10:00:19 CEST)
Run / Event: 165633 / 394010457

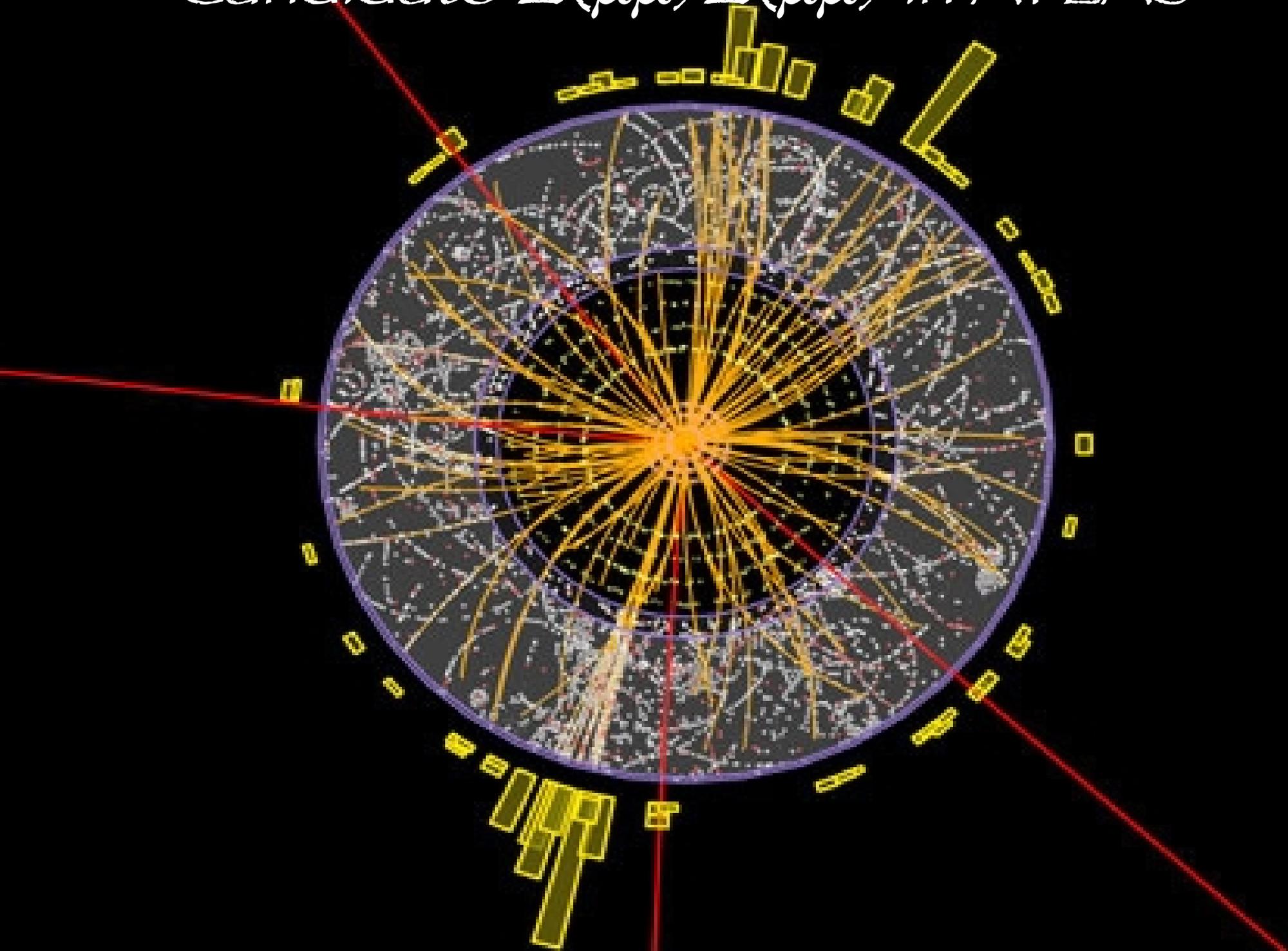




Candidate $Z(\mu\mu)Z(\mu\mu)$ in CMS



Candidate $Z(\mu\mu)Z(\mu\mu)$ in ATLAS

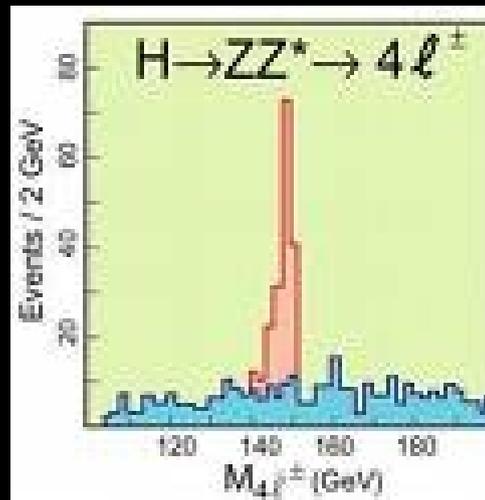


H → ZZ Risultati

$$M_H = \sqrt{(E_{\ell,1} + E_{\ell,2} + E_{\ell,3} + E_{\ell,4})^2 - (\vec{p}_{\ell,1} + \vec{p}_{\ell,2} + \vec{p}_{\ell,3} + \vec{p}_{\ell,4})^2}$$

\vec{p}_{ℓ} = quantità di moto misurata

$$E_{\ell} = \sqrt{M_{\ell}^2 + \vec{p}_{\ell} \cdot \vec{p}_{\ell}}$$



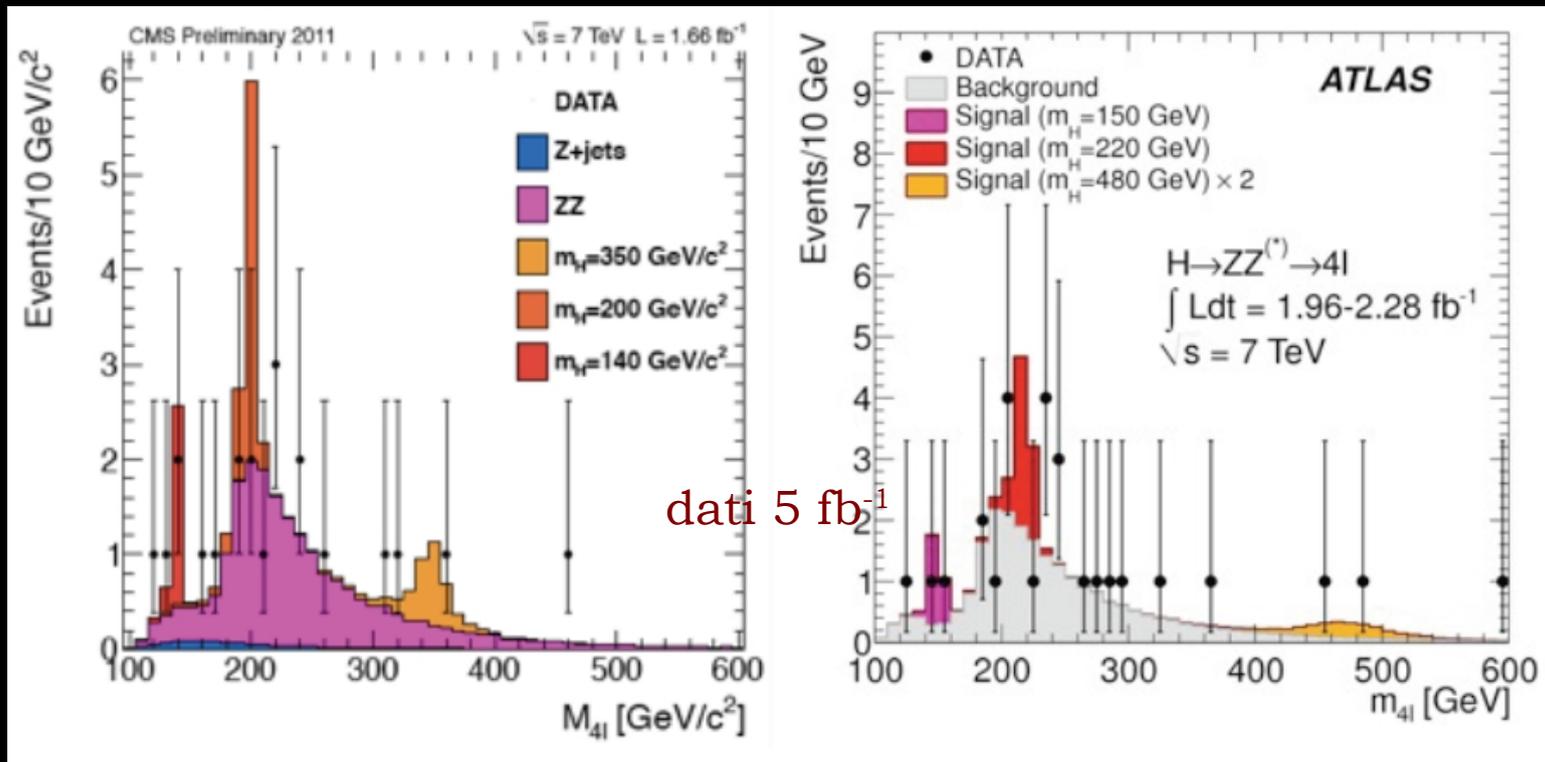
simulazione CMS 30 fb⁻¹

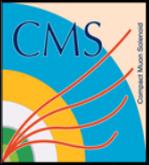
H → ZZ Risultati

$$M_H = \sqrt{(E_{\ell,1} + E_{\ell,2} + E_{\ell,3} + E_{\ell,4})^2 - (\vec{p}_{\ell,1} + \vec{p}_{\ell,2} + \vec{p}_{\ell,3} + \vec{p}_{\ell,4})^2}$$

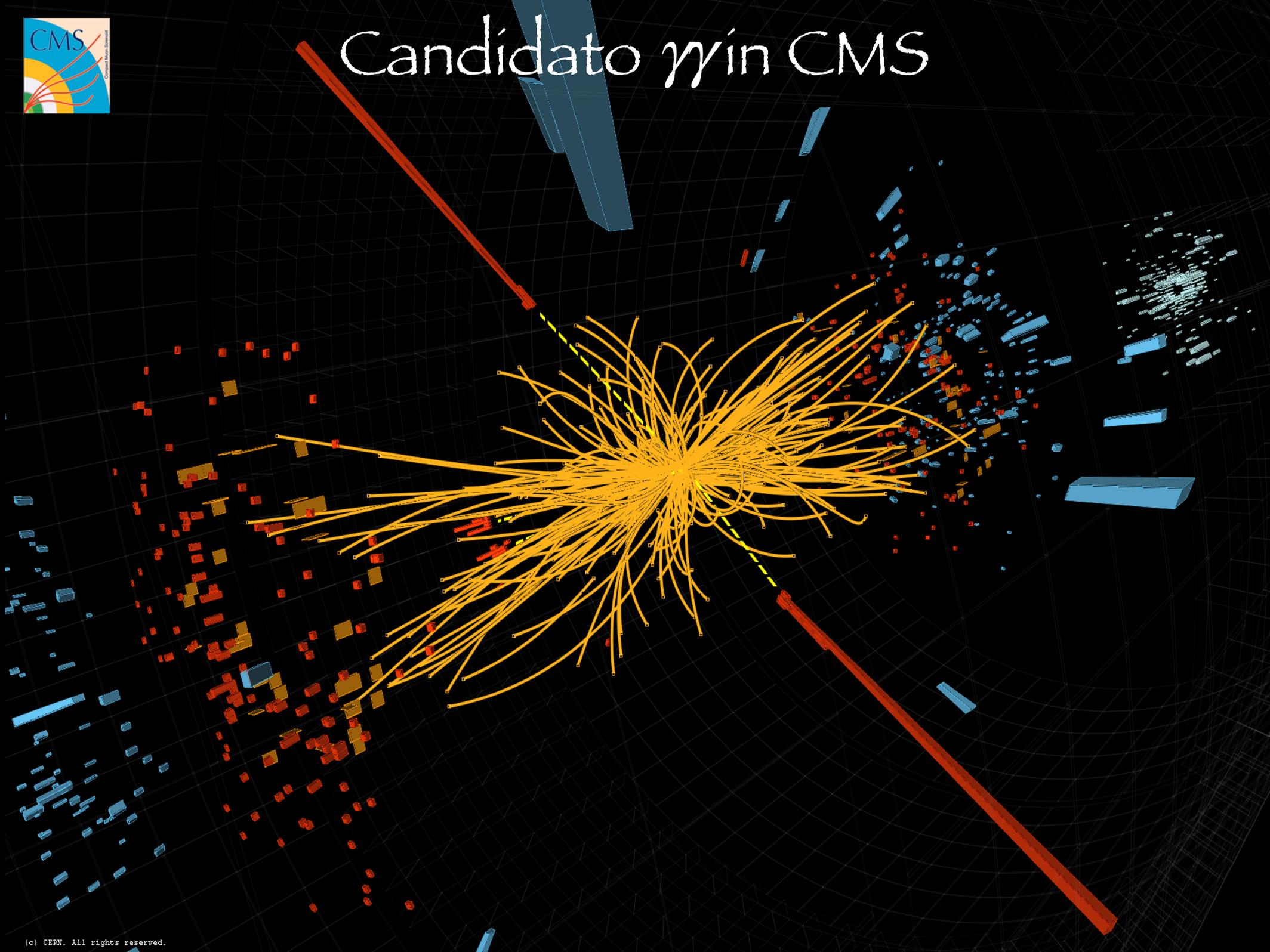
\vec{p}_ℓ = quantità di moto misurata

$$E_\ell = \sqrt{M_\ell^2 + \vec{p}_\ell \cdot \vec{p}_\ell}$$





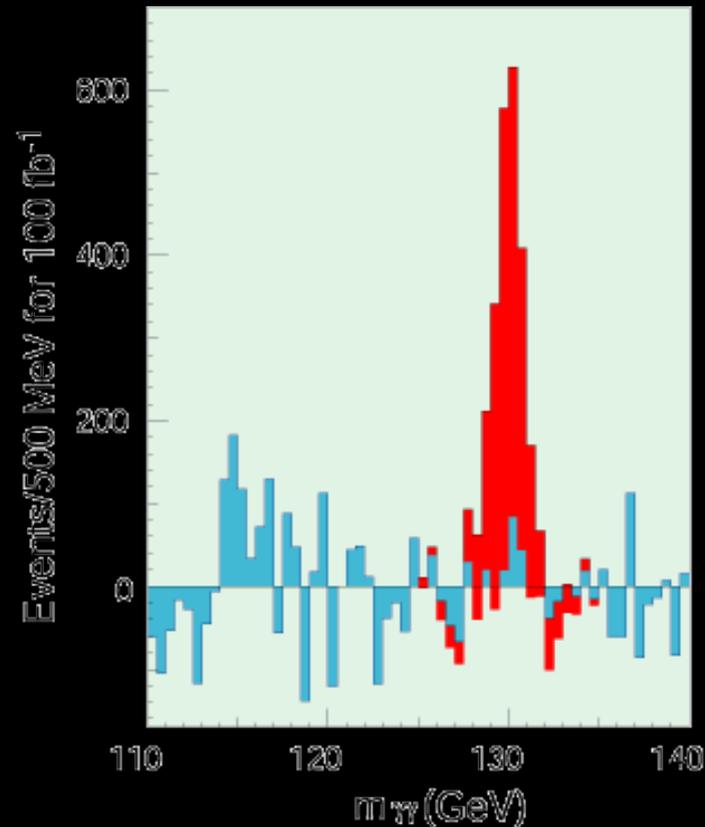
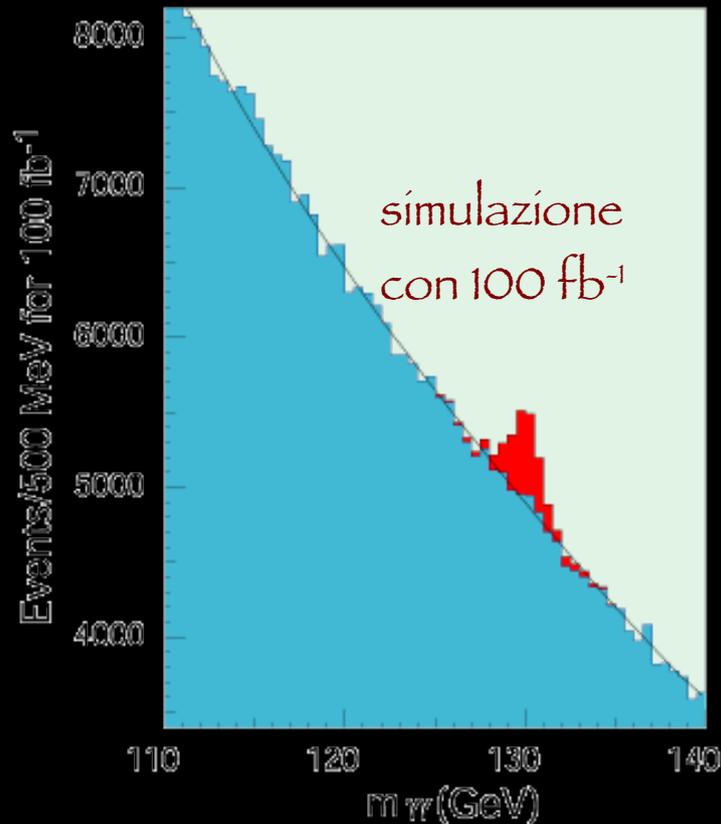
Candidato $\gamma\gamma$ in CMS



H \rightarrow $\gamma\gamma$: modalita'

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

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



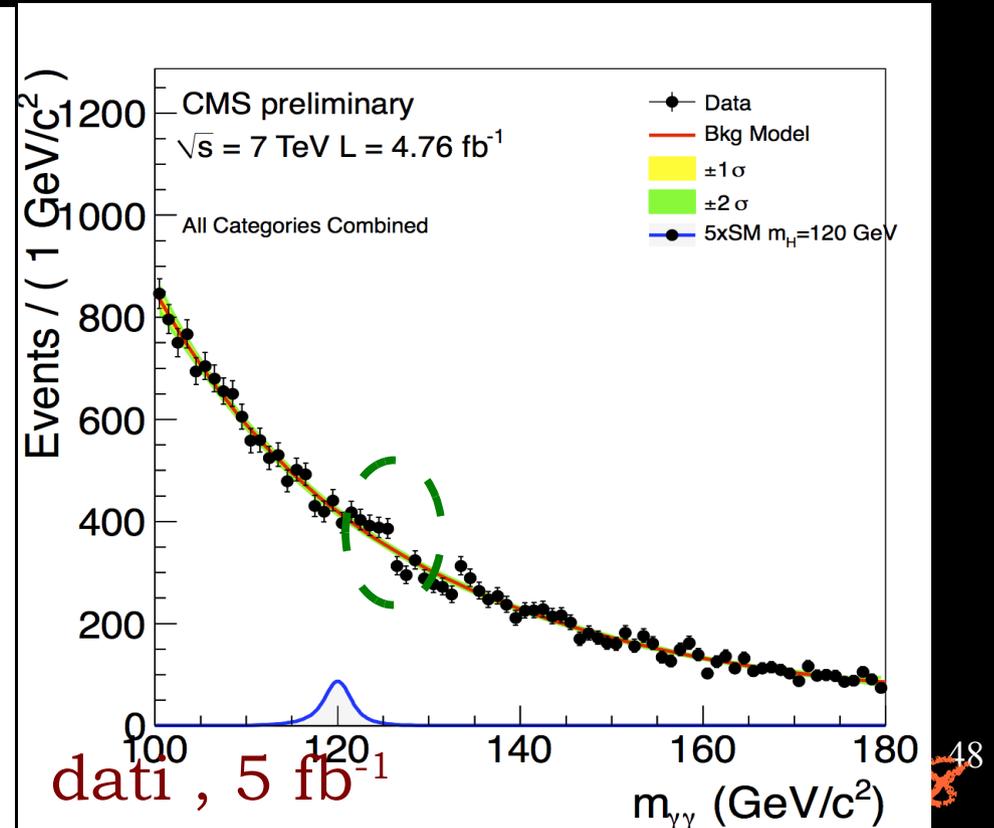
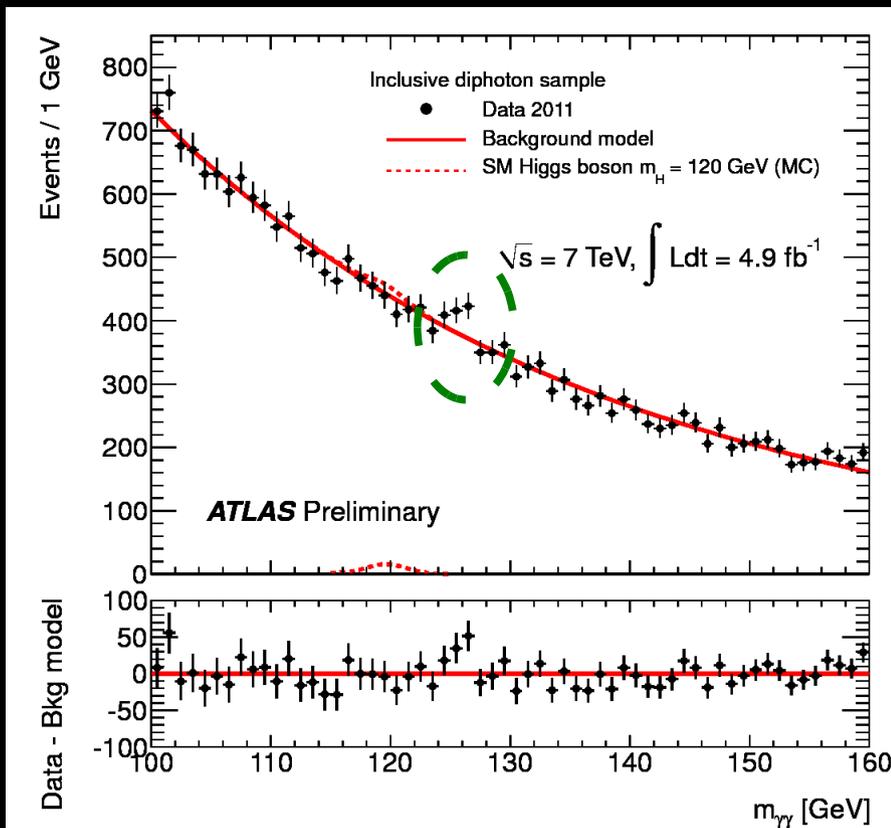
H \rightarrow $\gamma\gamma$: risultati

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

$$E_H = E_1 + E_2$$

$$\vec{p}_H = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

$$M_H^2 = E_H^2 - \vec{p}_H \cdot \vec{p}_H$$

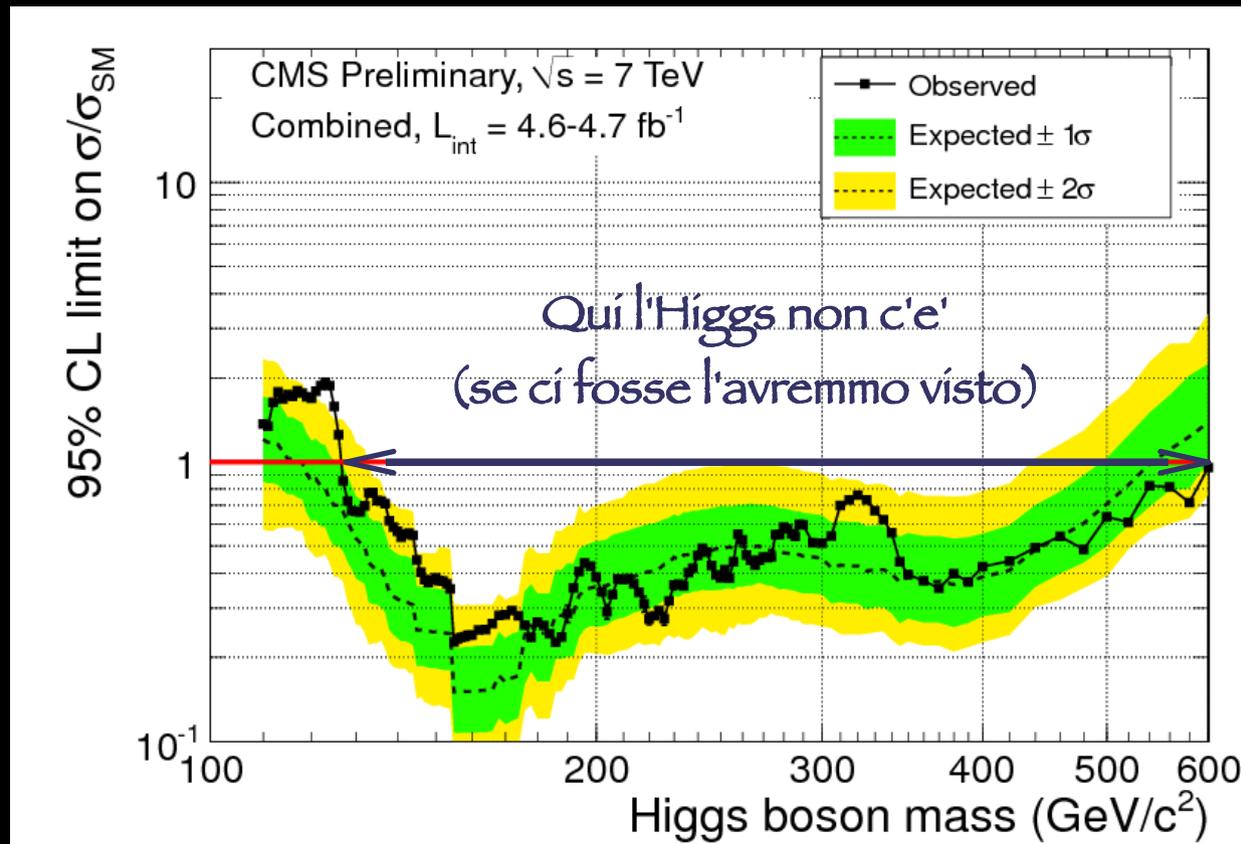


Combinazioni

- In pratica si esplorano tutte le strade, anche le più disperate
- Si combinano i risultati in maniera “ottimale”
- A massa alta, sono decisivi gli studi in ZZ e WW
- A massa bassa, quelli in ZZ e $\gamma\gamma$

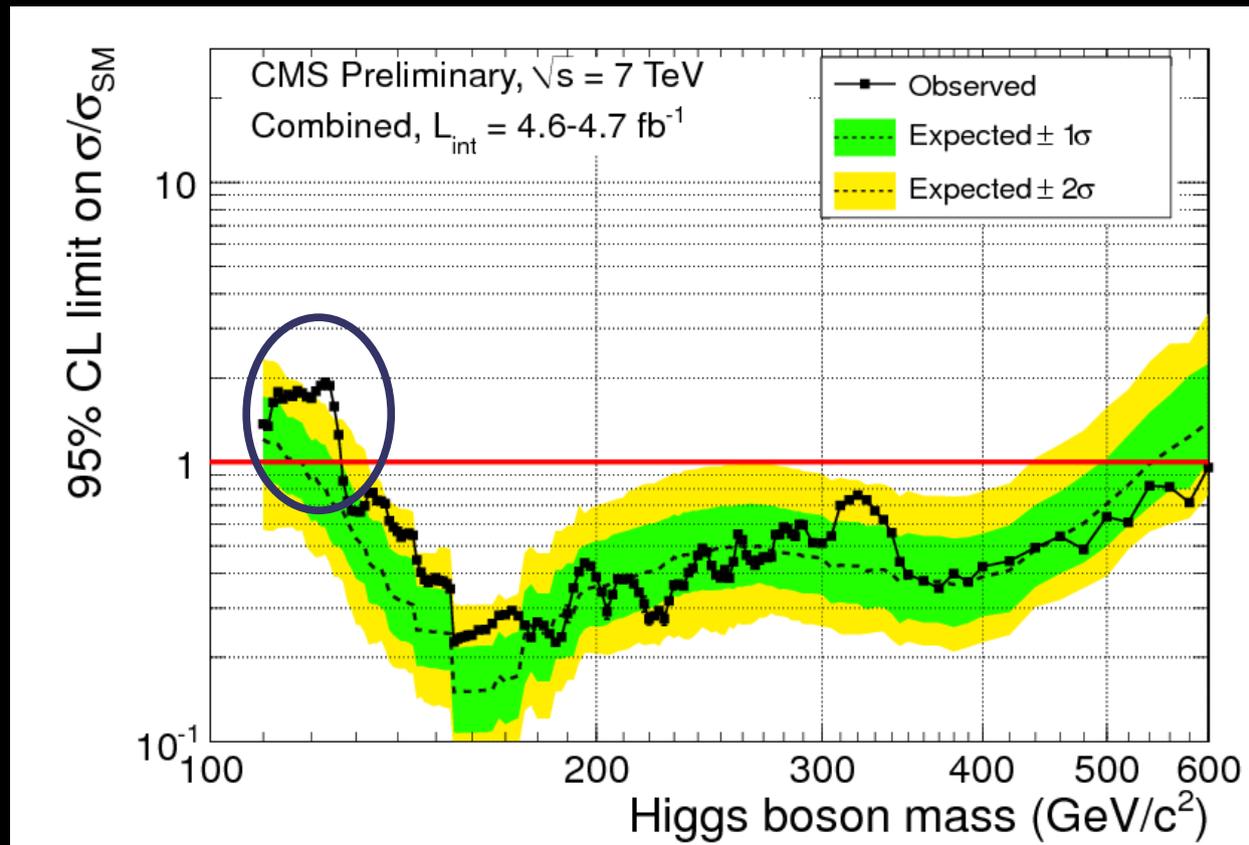
Atlas e CMS concordano:

- L'Higgs NON È ancora stato scoperto, ma è stato grandemente limitato il suo “campo di esistenza”

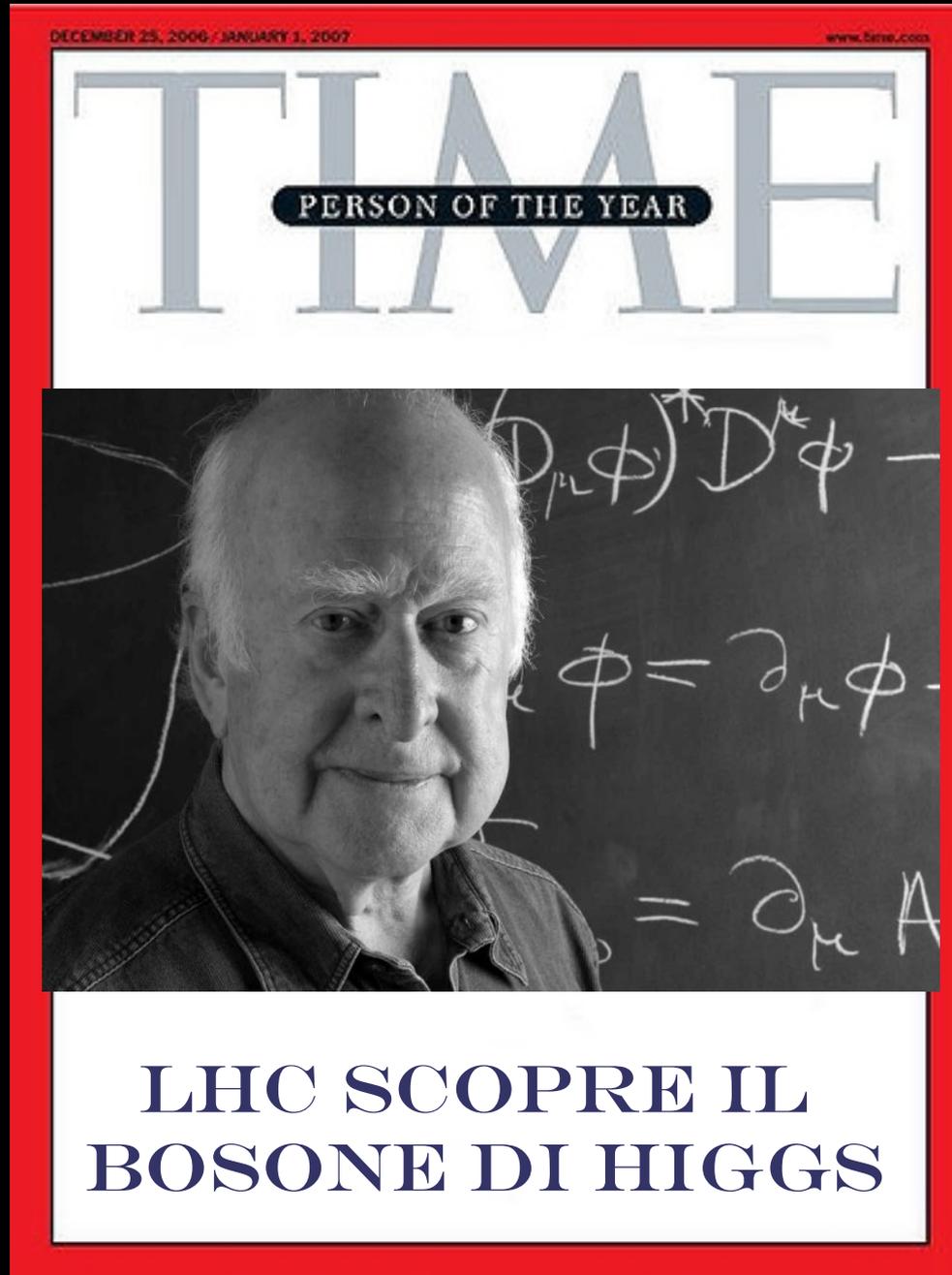


Atlas e CMS concordano:

- L'Higgs NON È ancora stato scoperto, ma è stato grandemente limitato il suo “campo di esistenza”
- c'è però una regione interessante



Scenari 2012



Scenari 2012



Scenari 2012



Caccia all' Higgs : conclusioni

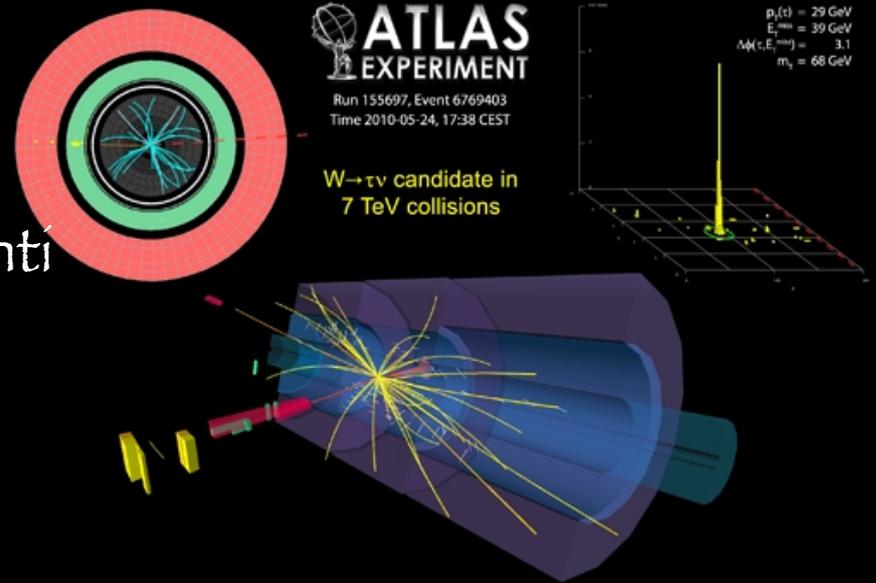
- La ricerca e' cominciata, ma non abbiamo ancora la sensibilità (Luminosità) necessaria
- Se vedessimo qualcosa ora NON SAREBBE L'HIGGS
- Alla fine dell'anno in corso (~ 10 x statistica attuale) le prime conclusioni
- Alla fine del 2012 la risposta definitiva ?

Materia Oscura

- Sappiamo che esiste ...
- ... ma che non si lascia osservare facilmente
- Segnale : eventi in cui “manca qualcosa”

- Caveat :

- sottrarre con cura gli eventi “standard” (ν)
- precisa comprensione inefficienze del rivelatore





Materia Oscura
(Dark Matter)

Dark Matter : prime evidenze

- Vera Rubin (1975) : anomalie nel moto delle stelle periferiche delle galassie a spirale (conferma tesi di Oort 1932, Zwicky 1933)

- Predizione :

$$v(r) \propto \sqrt{\frac{M(r)}{r}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (r \rightarrow \infty)$$

Dark Matter : prime evidenze

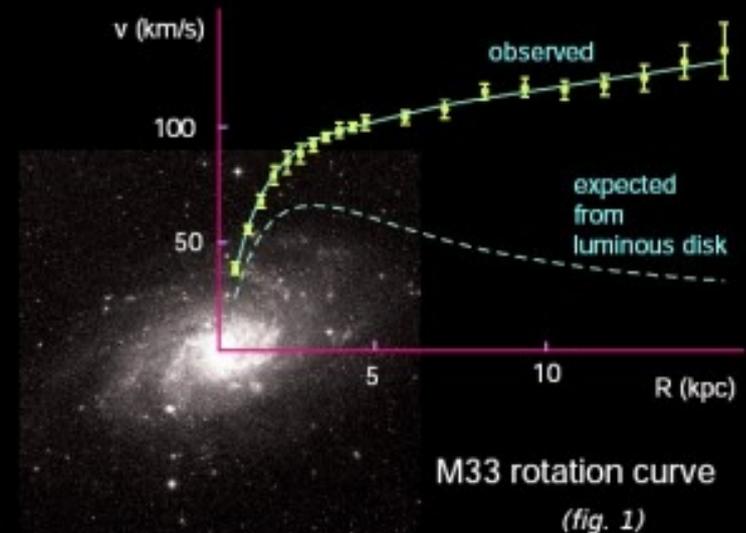
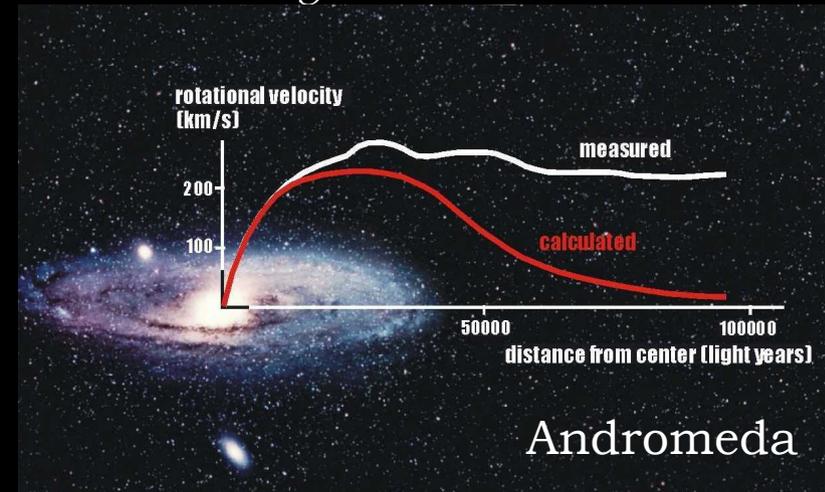
- Vera Rubin (1975) : anomalie nel moto delle stelle periferiche delle galassie a spirale (conferma tesi di Oort 1932, Zwicky 1933)

- Predizione :

$$v(r) \propto \sqrt{\frac{M(r)}{r}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (r \rightarrow \infty)$$

- Osservazione :

$$v(r) \rightarrow \text{cost}$$



Dark Matter : prime evidenze

- Vera Rubin (1975) : anomalie nel moto delle stelle periferiche delle galassie a spirale (conferma tesi di Oort 1932, Zwicky 1933)

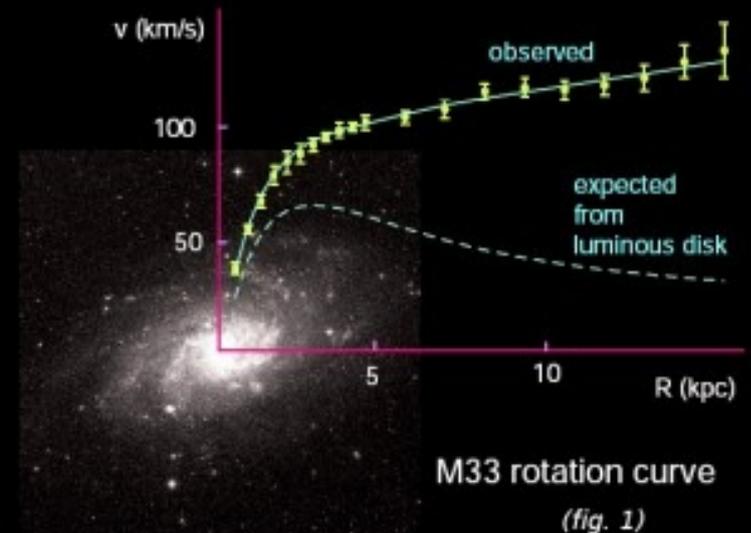
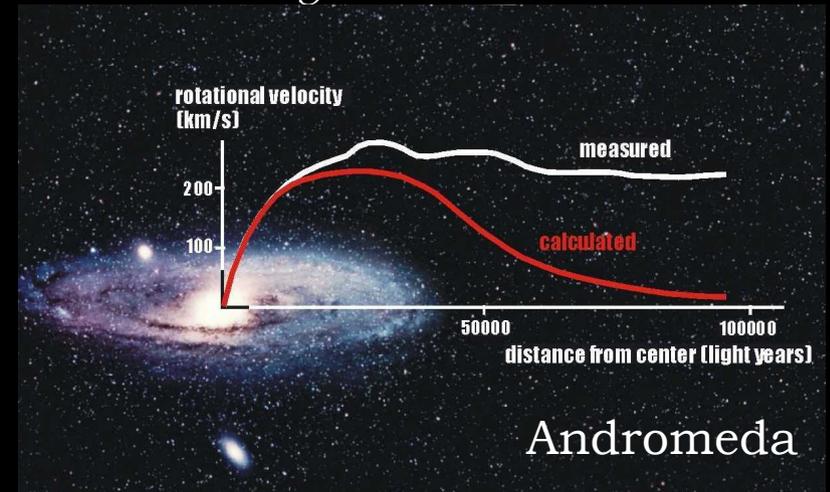
- Predizione :

$$v(r) \propto \sqrt{\frac{M(r)}{r}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (r \rightarrow \infty)$$

- Osservazione :

$$v(r) \rightarrow \text{cost}$$

- Anomalie poi riscontrate anche nel moto all'interno dei cluster di galassie



Dark Matter ?

Interpretazioni :

- bisogna modificare la legge di gravitazione, almeno su grande scala

Dark Matter ?

Interpretazioni :

- bisogna modificare la legge di gravitazione, almeno su grande scala
- la legge di gravitazione e' giusta, ma c'e' piu' materia di quella che osserviamo

*(Materia Osservabile : emette o
assorbe radiazione elettromagnetica)*

Dark Matter ?

Interpretazioni :

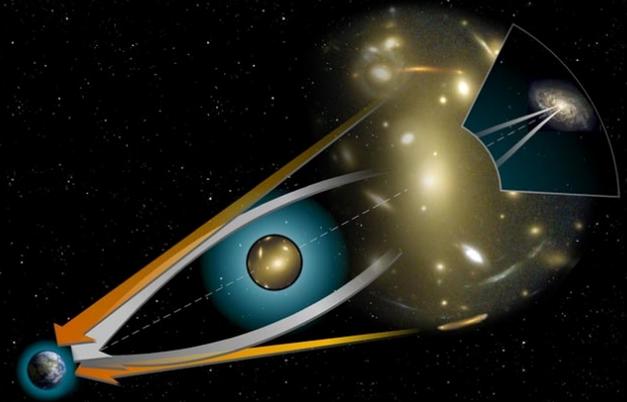
- bisogna modificare la legge di gravitazione, almeno su grande scala
- la legge di gravitazione e' giusta, ma c'e' piu' materia di quella che osserviamo

*(Materia Osservabile : emette o
assorbe radiazione elettromagnetica)*

- Servono altre indicazioni !

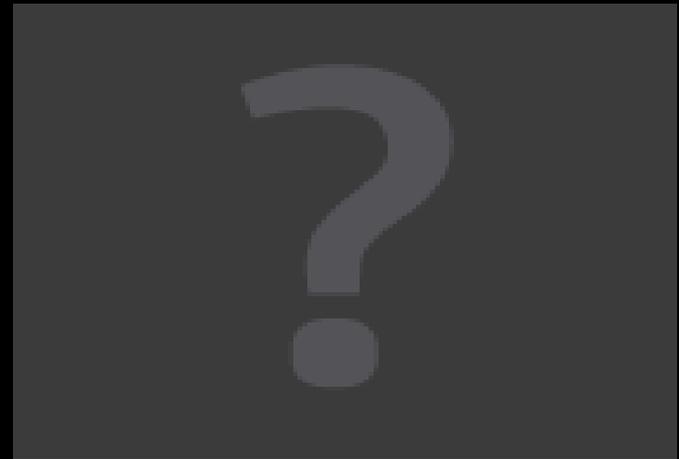
Le Lenti Galattiche

- La Gravita' modifica lo spaziotempo e devia i raggi luminosi
- L'immagine di una sorgente viene distorta da oggetti massicci interposti nel cammino



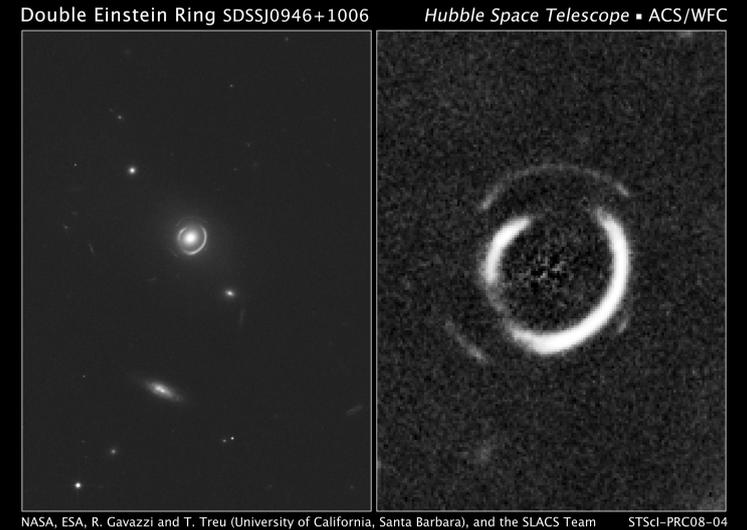
Le Lenti Galattiche

- La Gravita' modifica lo spaziotempo e devia i raggi luminosi
- L'immagine di una sorgente viene distorta da oggetti massicci interposti nel cammino
- ... secondo forme che riflettono la struttura della lente



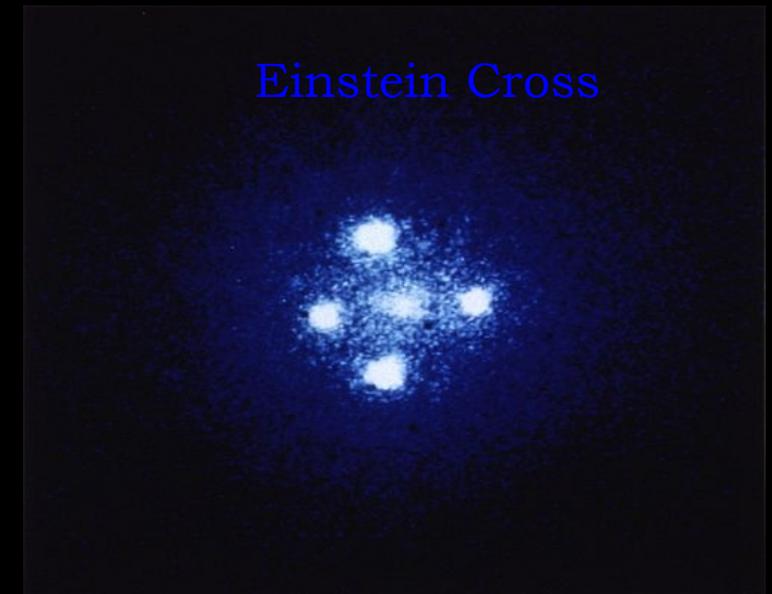
Le Lenti Galattiche

- La Gravita' modifica lo spaziotempo e devia i raggi luminosi
- L'immagine di una sorgente viene distorta da oggetti massicci interposti nel cammino
- La sorgente apparirà come un anello ...



Le Lenti Galattiche

- La Gravita' modifica lo spaziotempo e devia i raggi luminosi
- L'immagine di una sorgente viene distorta da oggetti massicci interposti nel cammino
- La sorgente apparirà come un anello ...
- ... una "croce"



Le Lenti Galattiche

- La Gravita' modifica lo spaziotempo e devia i raggi luminosi
- L'immagine di una sorgente viene distorta da oggetti massicci interposti nel cammino
- La sorgente apparirà come un anello ...
- ... una "croce" ...
- ... o in forme più complesse

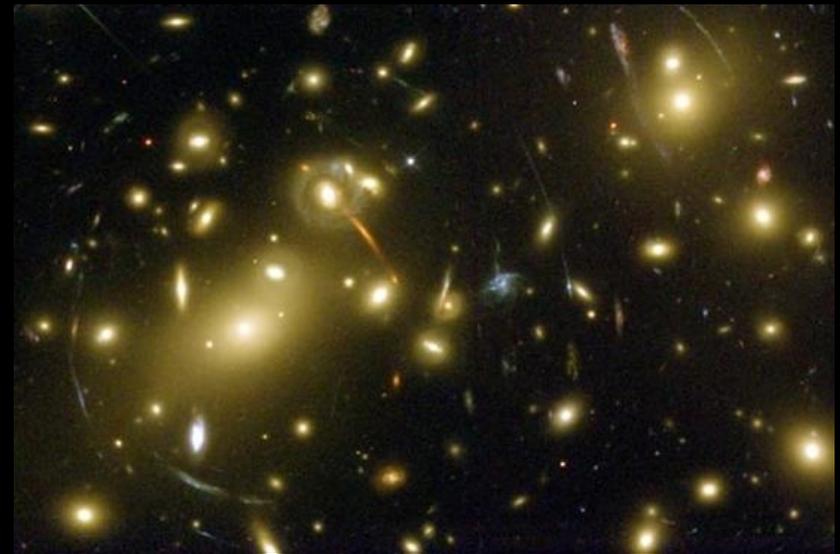


Le Lenti Galattiche

Galaxy cluster Abell 2218 has enough mass that multiple distant objects appear as arcs in the image.

The visible mass alone cannot create such distortions in space-time.

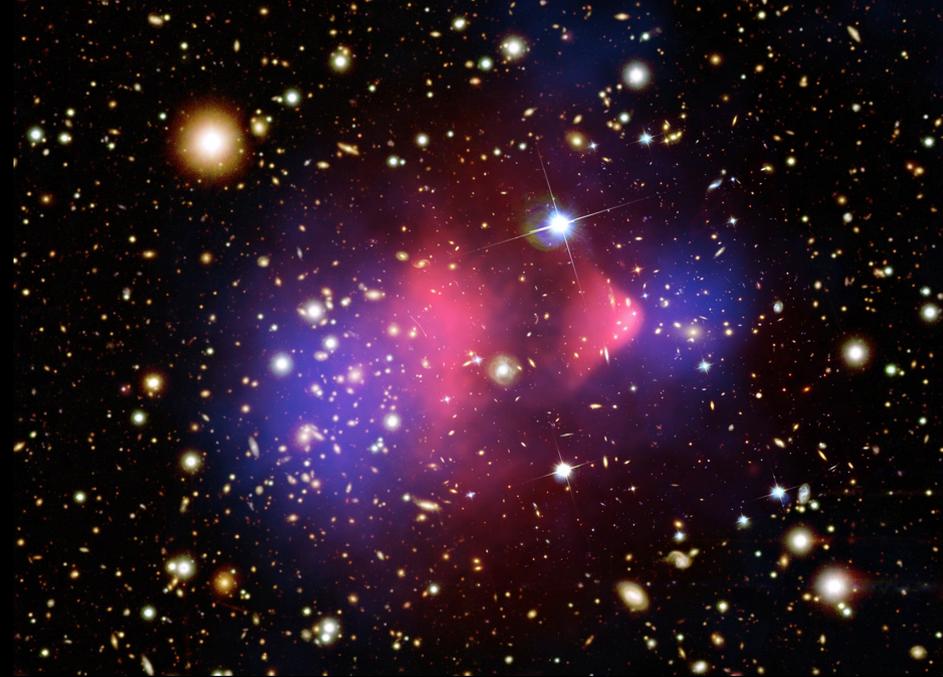
The only solution is the introduction of dark matter.



<http://astronomyonline.org/Cosmology/DarkMatterProject.asp>

A Smoking Gun : the Bullet Cluster

- Due cluster in collisione
- Osservazione ai raggi x: il gas (rosso) e' concentrato al centro
- Lensing : la massa si addensa ai bordi (rappresentata in blu)
- Interpretazione:



La materia ordinaria, interagendo per via elettromagnetica, e' rallentata rispetto a quella oscura, che interagisce solo per via della gravitazione

Dark Numbers

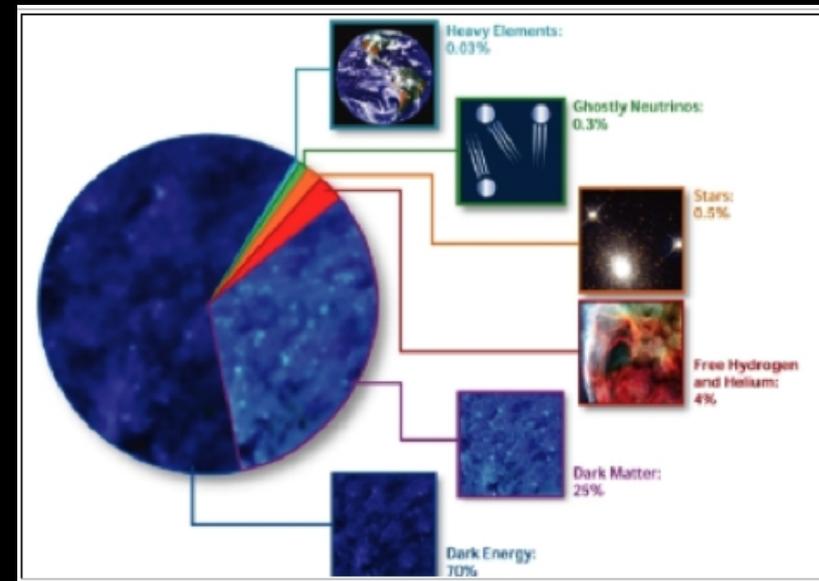
L'Universo dunque consiste di:

- 0.5 % Stelle
 - 0.5 % neutrini
 - 3 % Gas caldo
 - 23 % Dark Matter
- } materia ordinaria

Dark Numbers

L'Universo dunque consiste di:

- 0.5 % Stelle
- 0.5 % neutrini
- 3 % Gas caldo
- 23 % Dark Matter
 - *73% Dark Energy*



Dark Questions

- A che serve ?
- Qual e' la sua Temperatura ?
- Di che consiste ?

Dark Questions

- A che serve ?
 - E' indispensabile per la formazione delle strutture (galassie, clusters)
- Qual e' la sua Temperatura ?
- Di che consiste ?

Dark Questions

- A che serve ?
 - E' indispensabile per la formazione delle strutture (galassie, clusters)
- Qual e' la sua Temperatura ?
 - Fredda (Cold Dark Matter)
- Di che consiste ?

Dark Questions

- A che serve ?
 - E' indispensabile per la formazione delle strutture (galassie, clusters)
- Qual e' la sua Temperatura ?
 - Fredda (Cold Dark Matter)
- Di che consiste ?
 - Particelle lente ($v \ll c$, ~~$v \gg c$~~ , probabilmente "pesanti", elettricamente neutre, debolmente interagenti)

Dark Particles

- Il Modello Standard non contiene particelle siffatte
- Dunque la DM deve consistere di nuove particelle, descritte da nuove teorie (che estendono il M.S.) :
 - assioni
 - Weakly Interacting Massive Particles
 - ...

Dark Particles

- Il Modello Standard non contiene particelle siffatte
- Dunque la DM deve consistere di nuove particelle, descritte da nuove teorie (che estendono il M.S.) :

- assioni

- **Weakly Interacting Massive Particles:**

particelle di Massa $\sim 10-100 M_{\text{protone}}$ che interagiscono molto debolmente con la materia ordinaria

Scoprire le WIMPS

Strategie per la scoperta :

Scoprire le WIMPS

Strategie per la scoperta :

- Ricerare WIMPS esistenti



Scoprire le WIMPS

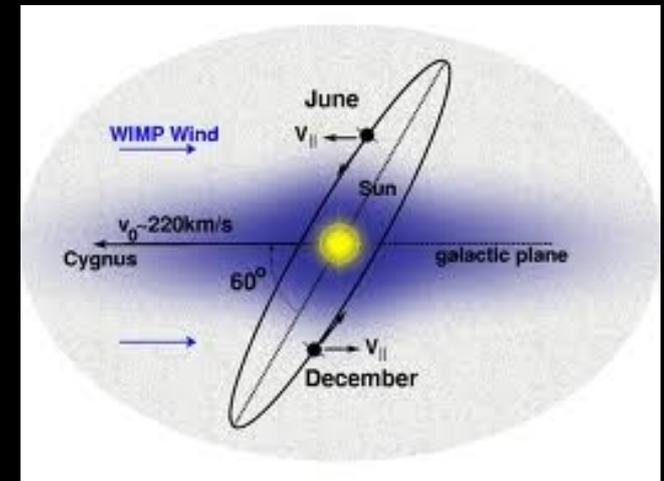
Strategie per la scoperta :

- Ricerare WIMPS esistenti
- Fabbricarle in laboratorio



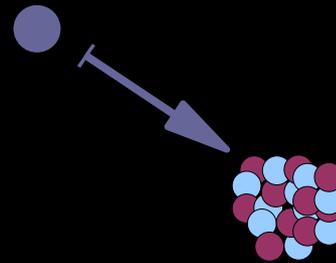
A Caccia di WIMPS

- Le WIMP permeano la galassia ($3000 /\text{m}^3$ se $M_{\text{WIMP}} \sim 100 M_{\text{P}}$)
- Moto del sole (220 Km/s) : “vento” di WIMP, modulato dal moto di rivoluzione della Terra (30 Km/s):
 - Giugno : 250 Km/s
 - Dicembre : 190 Km/s
- Flusso medio $\sim 10^4 \text{ WIMP/cm}^2/\text{s}$



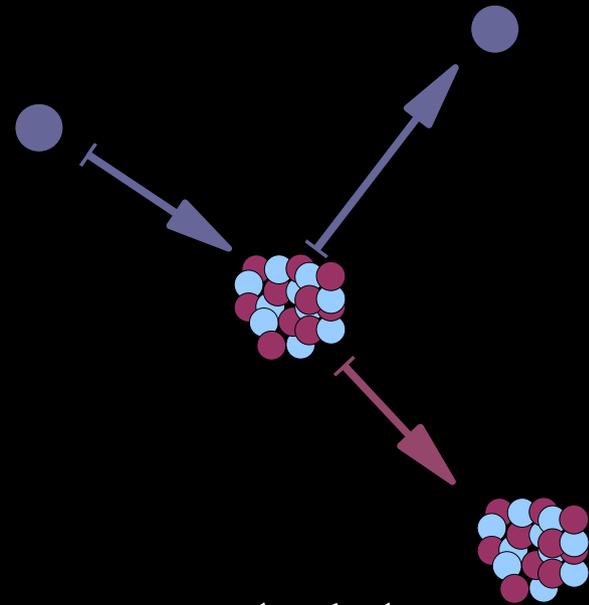
A Caccia di WIMPS

- WIMP urta un nucleo, trasferendo circa 1 KeV/nucleone



A Caccia di WIMPS

- WIMP urta un nucleo, trasferendo circa 1 KeV/nucleone
- Il nucleo rincula con $v \sim 10^{-3} c \dots$
- ... e deposita energia nel materiale circostante, che può essere rivelata come:
 - luce di ionizzazione
 - impulso elettrico
 - aumento di temperatura
- si possono inoltre cercare modulazioni annuali del segnale



Le WIMPS nel Sottosuolo

- Segnali molti tenui
- Grosso rumore di fondo da raggi cosmici

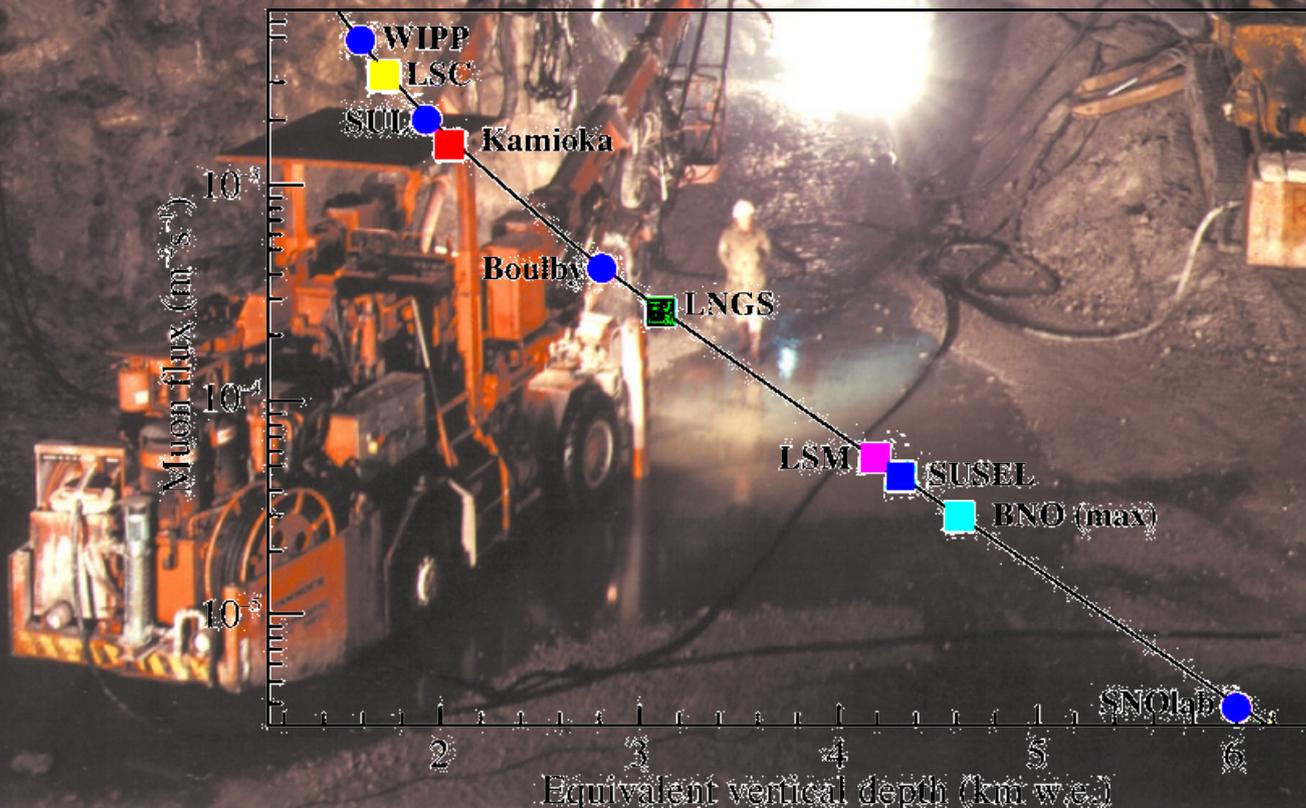
ESPERIMENTI SOTTERRANEI

It is a delicious irony that these detectors, which are so perfectly adapted for peering to the edge of the universe that we take all the way to Chile for better skies, are now buried in underground caverns to look for invisible particles"

Le WIMPS nel Sottosuolo

- Segnali molti tenui
- Grosso rumore di fondo da raggi cosmici

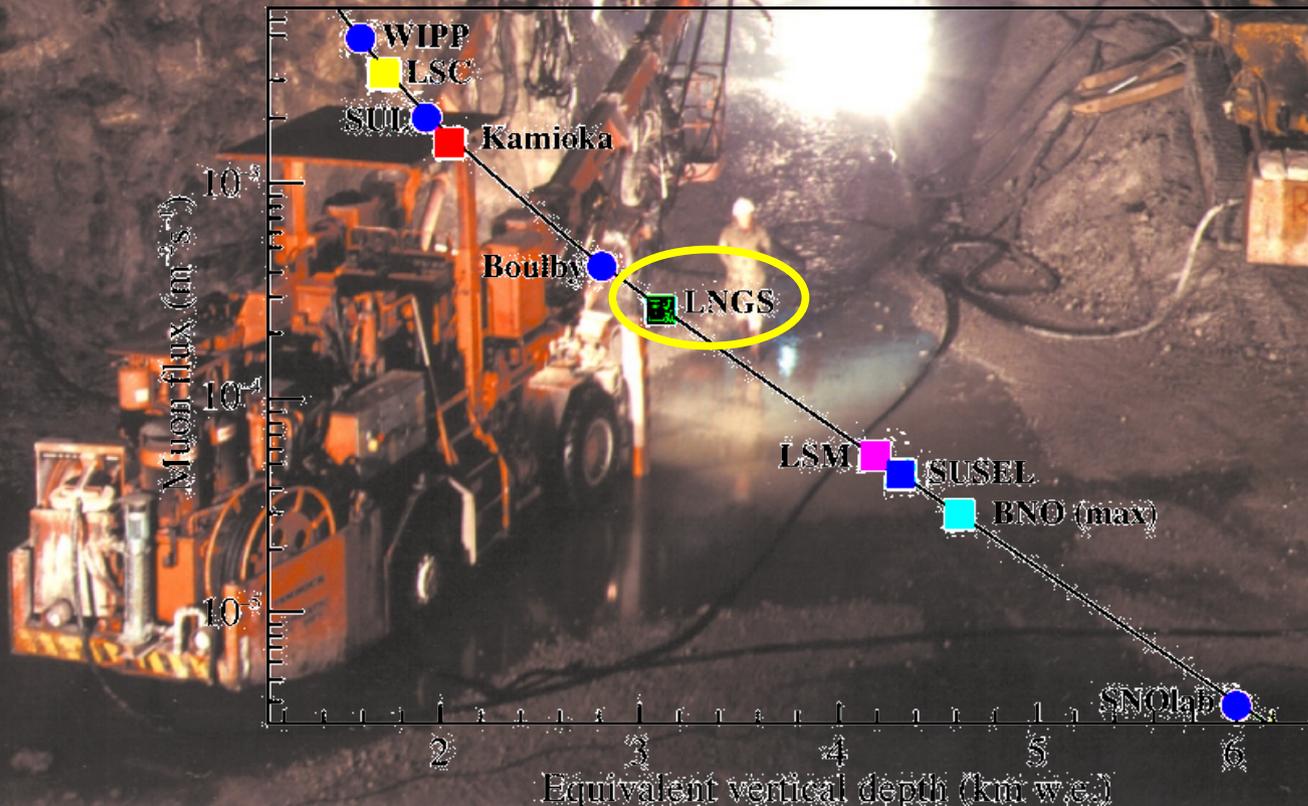
ESPERIMENTI SOTTERRANEI



Le WIMPS nel Sottosuolo

- Segnali molti tenui
- Grosso rumore di fondo da raggi cosmici

ESPERIMENTI SOTTERRANEI

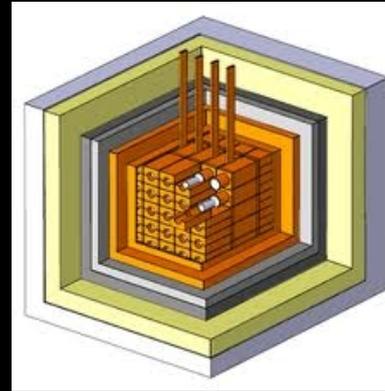


Le WIMPS nel Sottosuolo

- Segnali molti tenui
- Grosso rumore di fondo da raggi cosmici
- + fondi da radiattività naturale
- + rumore sperimentale (elettronica)
- +...

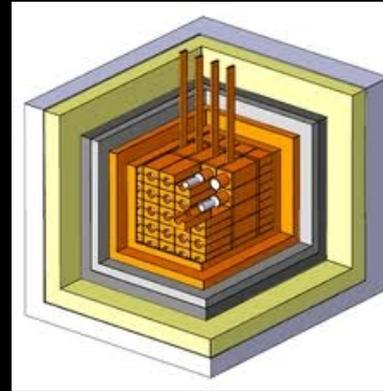
DAMA-LIBRA : la scoperta ?

- Esperimento al Gran Sasso operativo da oltre 10 anni
- 250 Kg di cristallo scintillatore NaI(Tl) molto puro

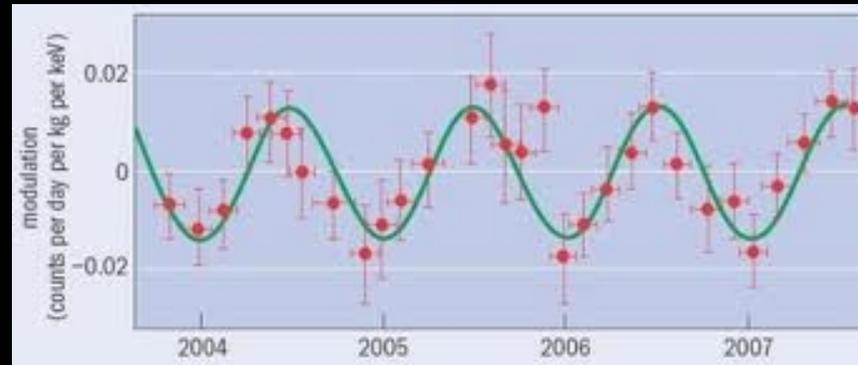


DAMA-LIBRA : la scoperta ?

- Esperimento al Gran Sasso operativo da oltre 10 anni
- 250 Kg di cristallo scintillatore NaI(Tl) molto puro

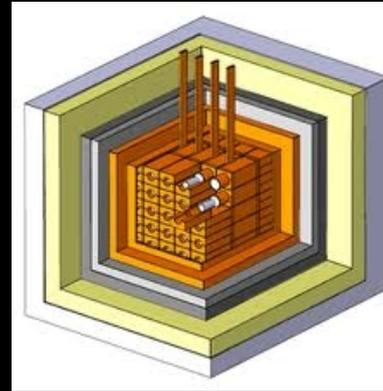


- Osserva un segnale con la giusta modulazione temporale

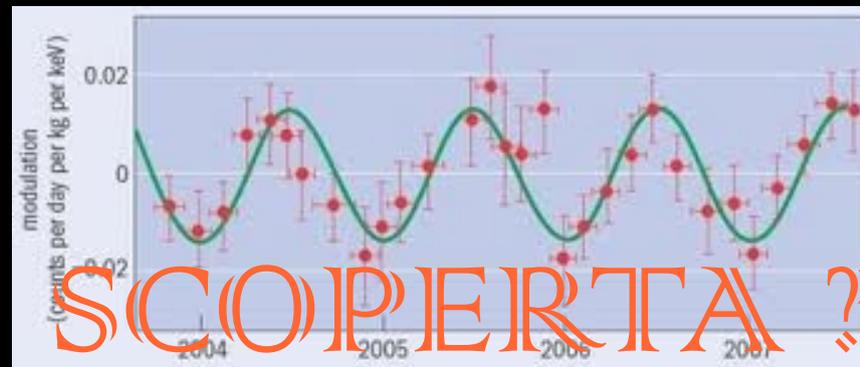


DAMA-LIBRA : la scoperta ?

- Esperimento al Gran Sasso operativo da oltre 10 anni
- 250 Kg di cristallo scintillatore NaI(Tl) molto puro

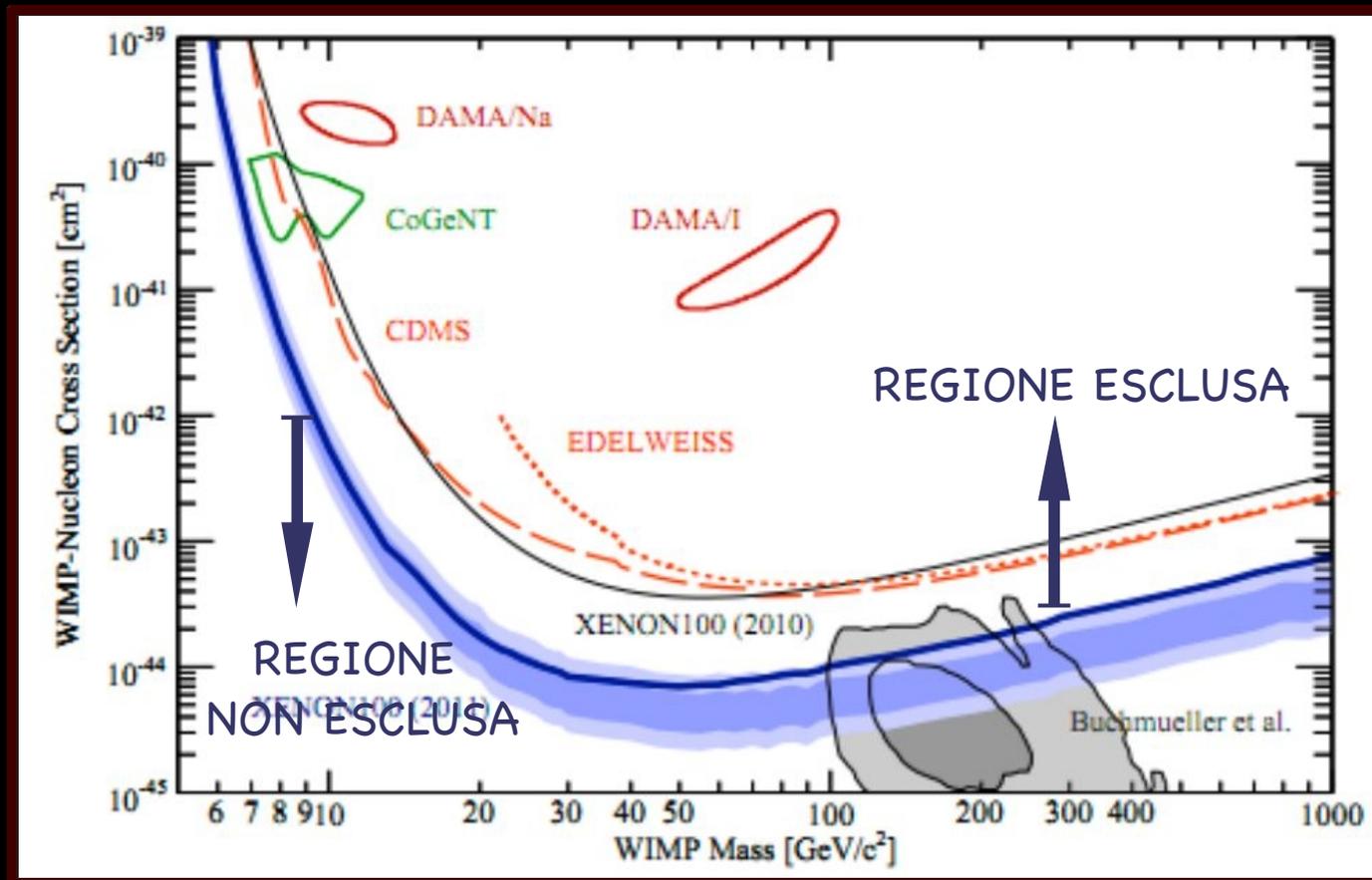


- Osserva un segnale con la giusta modulazione temporale



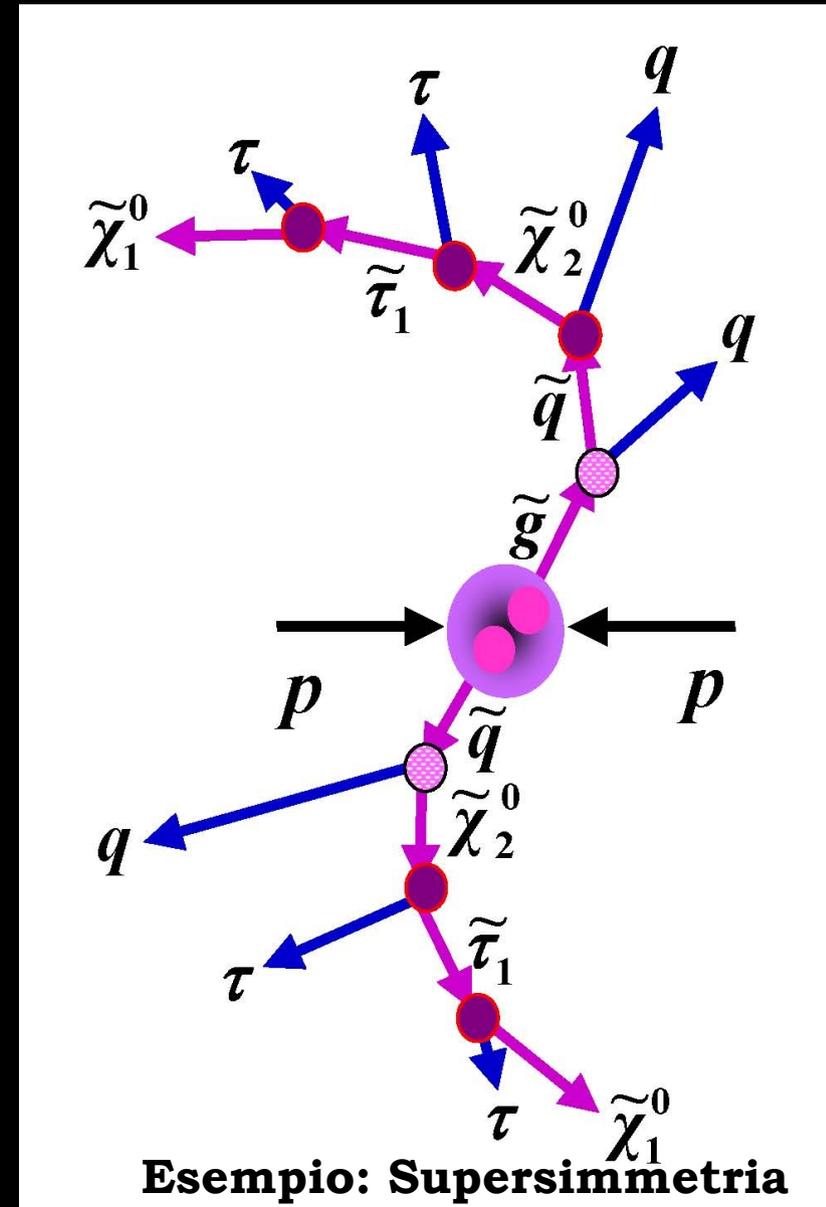
Scoperte le WIMP ?

- Il segnale di DAMA non e' confermato da altri esperimenti
- Tuttavia il confronto e' basato su alcune ipotesi teoriche
- Non possiamo trarre ancora delle conclusioni
- -> 2020 : nuova generazione di rivelatori $M \sim 1$ Ton



Fabbricare le WIMP ?

- Molte estensioni del MS prevedono nuove particelle
- Alcune di queste sono ottimi candidati WIMP (neutre, massicce, debolmente interagenti)
- Possono essere prodotte nelle collisioni tra protoni a LHC, tipicamente in processi complessi, in cui vengono prodotte anche molte particelle "standard" (già note)



WIMP @ LHC

- Massa elevata, interazione debole con la materia ordinaria:
 - bassissima probabilità di produzione
 - lunghissima vita media, attraversano tutto il rivelatore senza decadere
 - non rilasciano segnali nel rivelatore
- Come osservarle ?

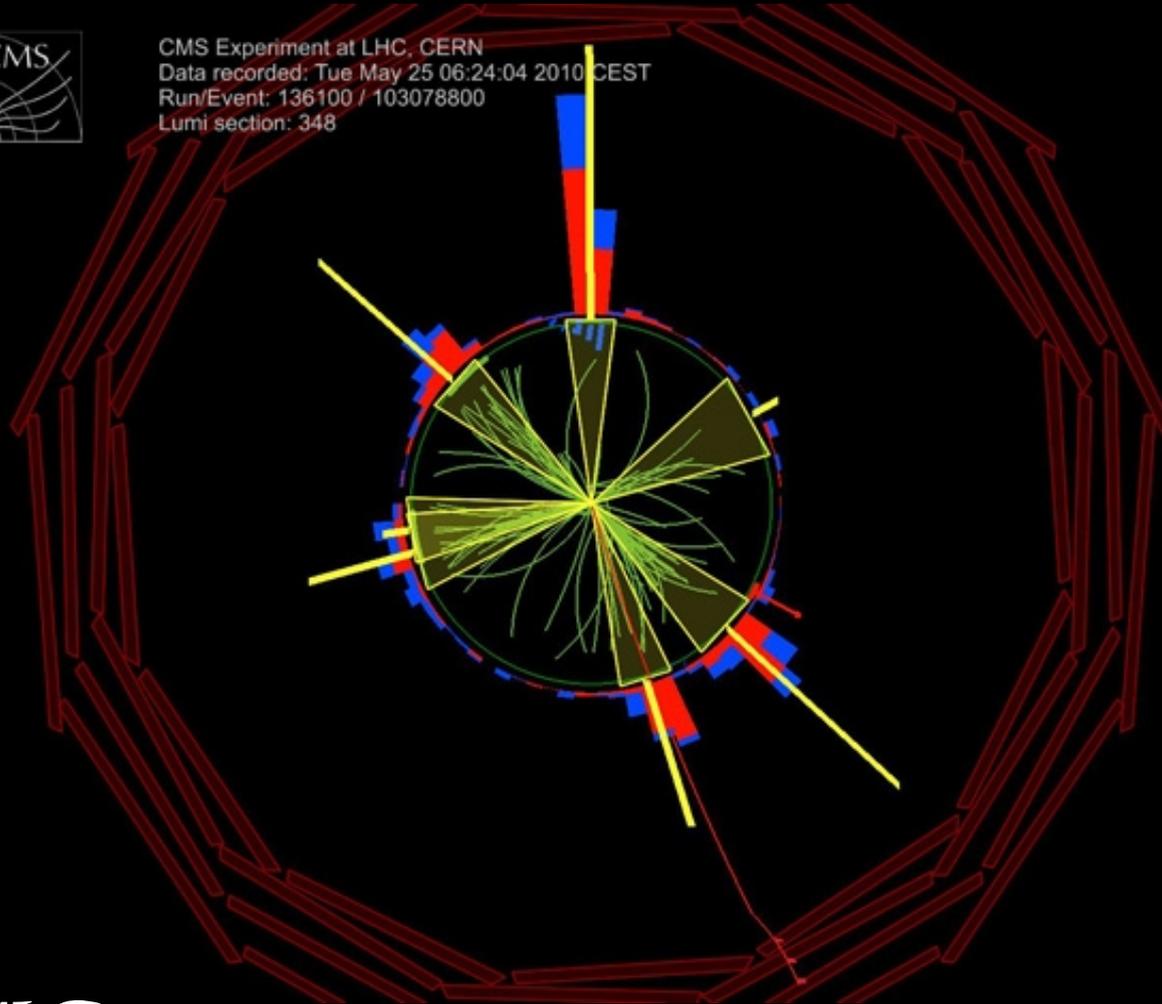
WIMP @ LHC

- Massa elevata, interazione debole con la materia ordinaria:
 - bassissima probabilità di produzione
 - lunghissima vita media, attraversano tutto il rivelatore senza decadere
 - non rilasciano segnali nel rivelatore
- Come osservarle ?
 - Conservazione Energia - Impulso

Processo standard multi-jet

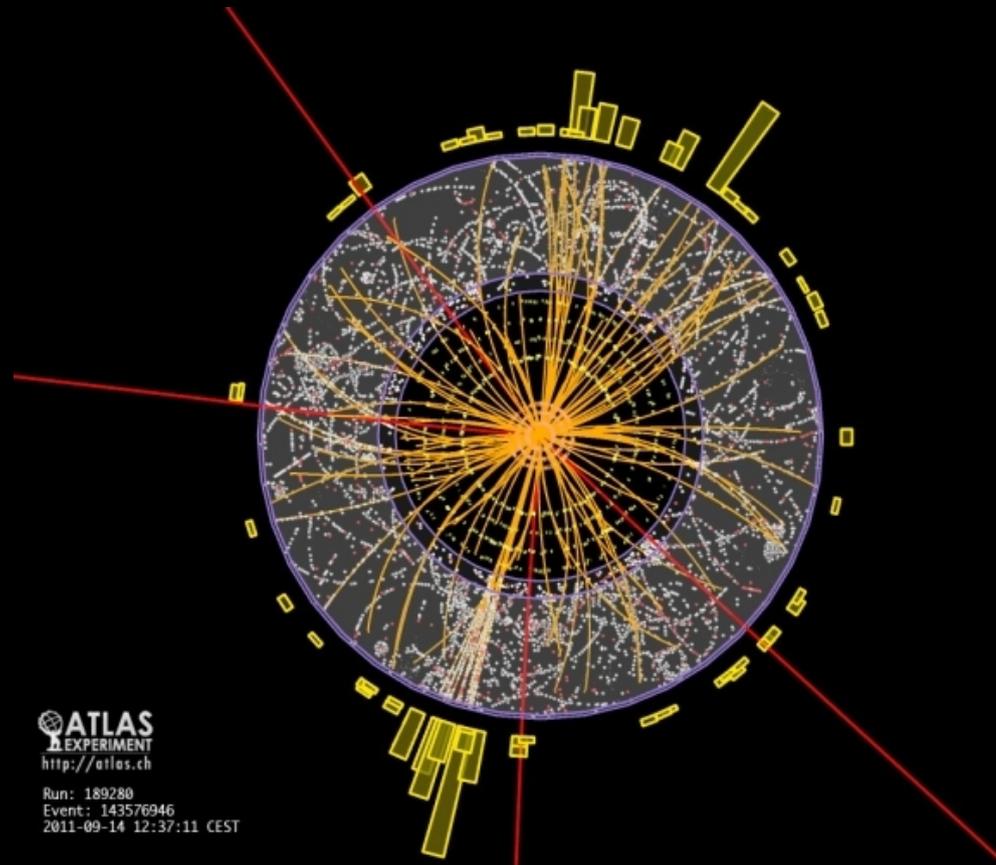


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue May 25 06:24:04 2010 CEST
Run/Event: 136100 / 103078800
Lumi section: 348



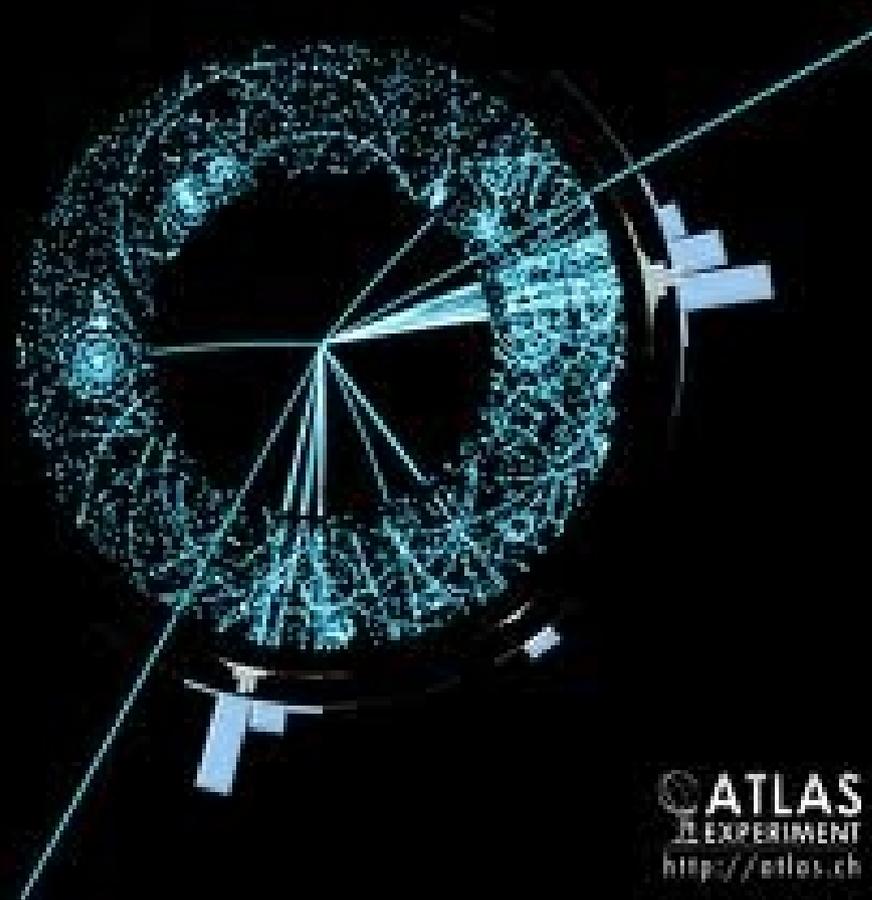
CMS

Processo standard multi-jet



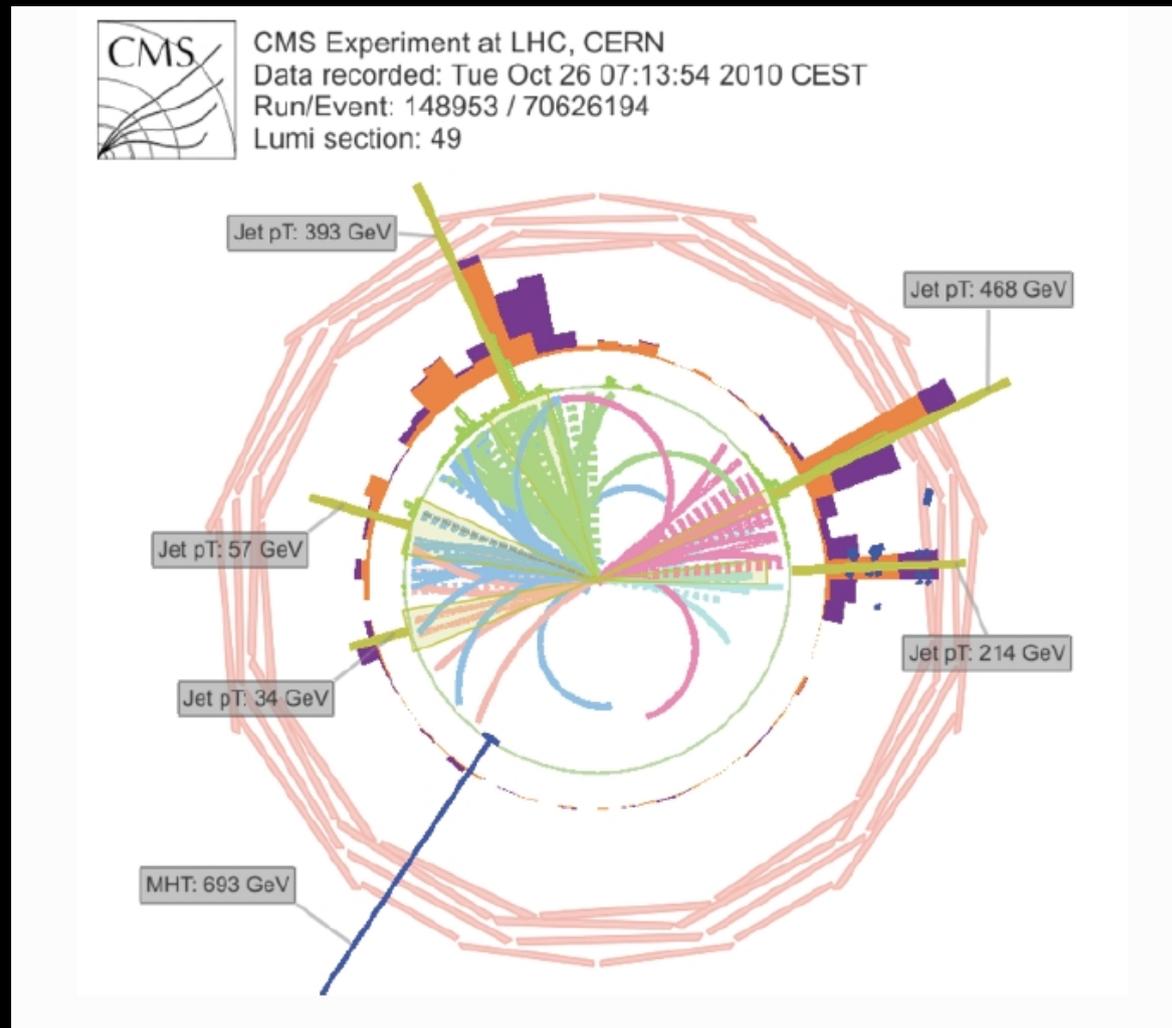
ATLAS

Impulso Mancante nel Piano Ortogonale ai Fasci

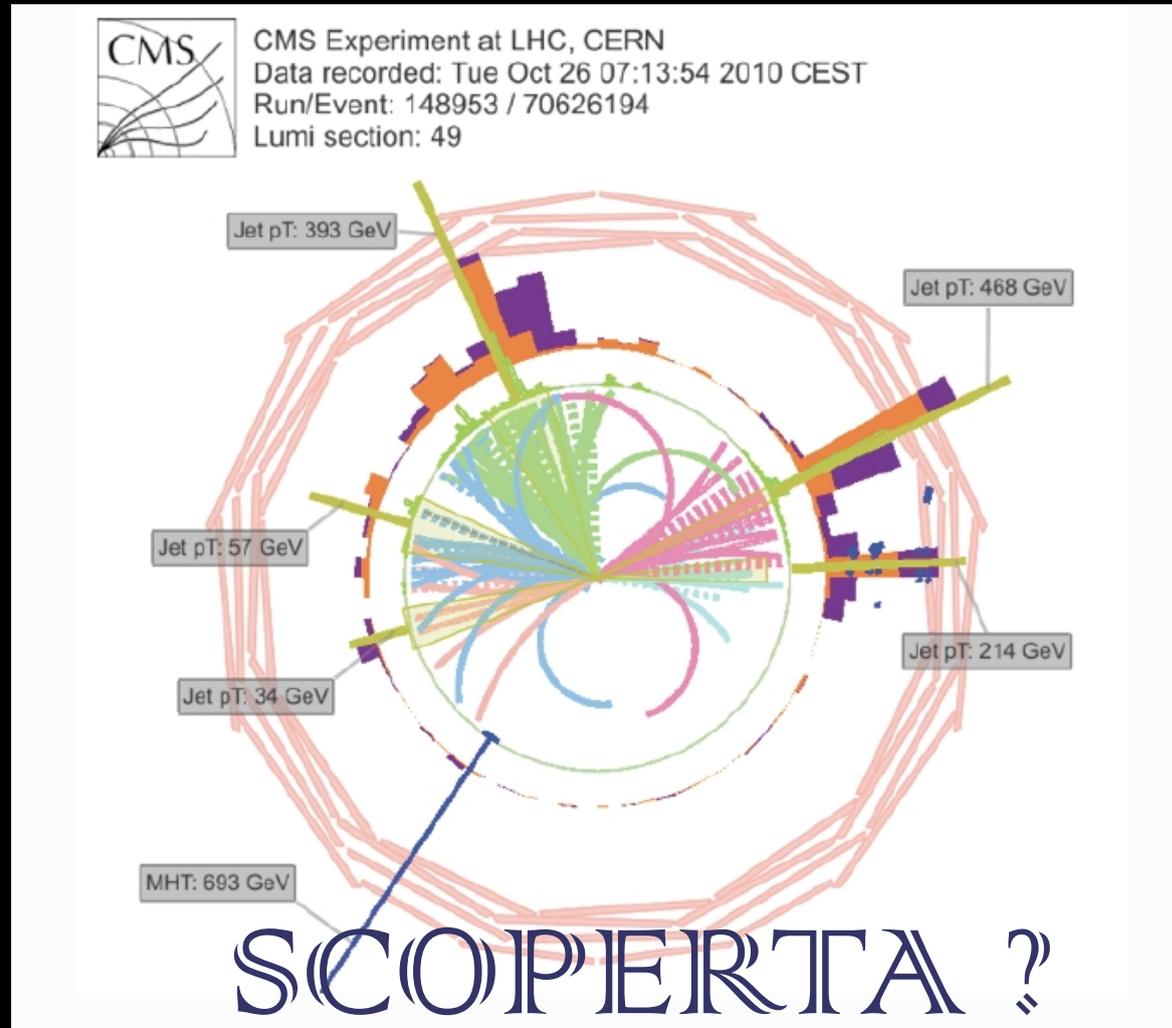


ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

Impulso Mancante nel Piano Ortogonale ai Fasci



Impulso Mancante nel Piano Ortogonale ai Fasci



Attenzione !

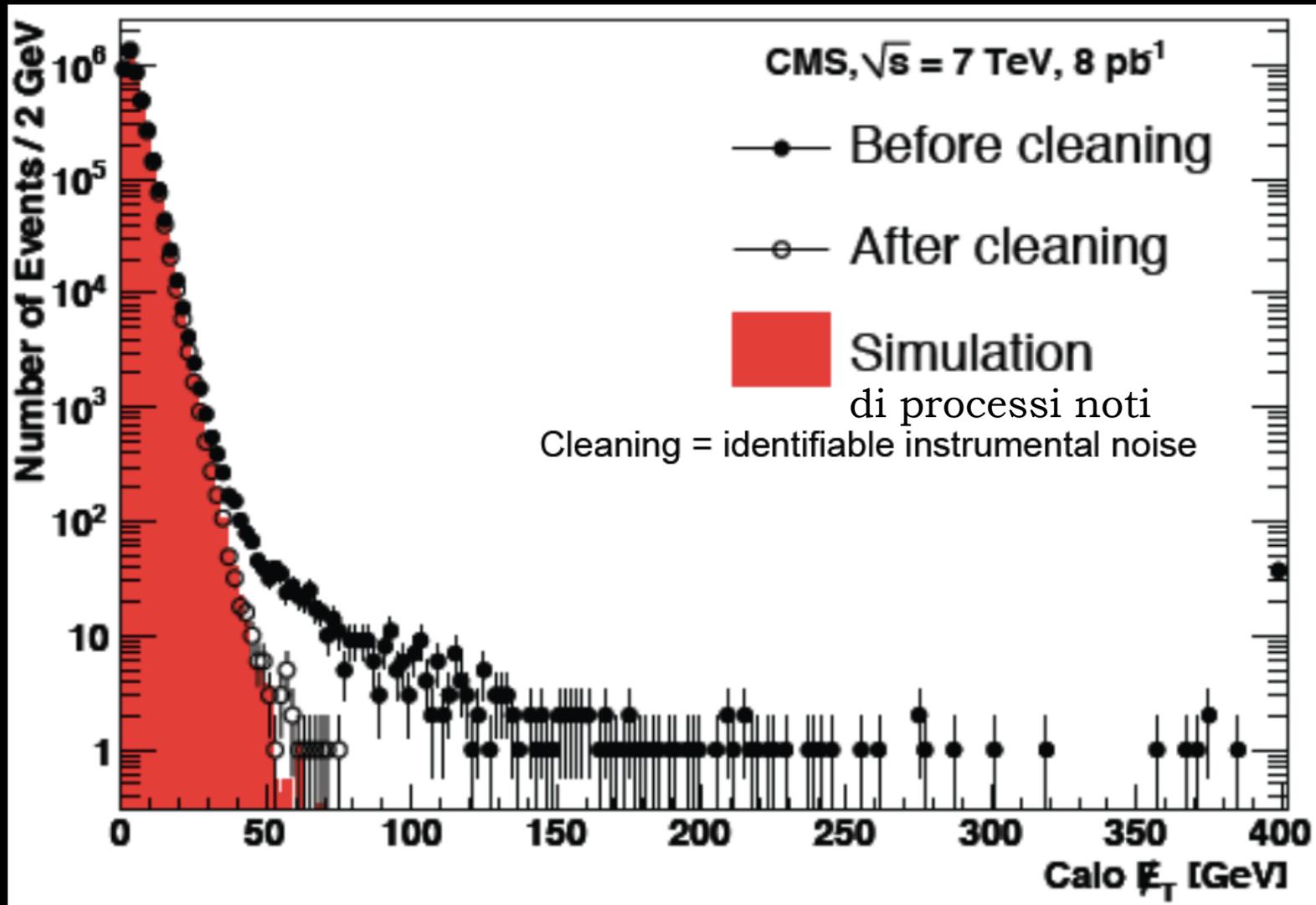
Sorgenti “standard” di MET, MPT :

- produzione di neutrini energetici
- rumore del rivelatore
- zone insensibili del rivelatore

Solo una analisi statistica , basata su molte osservazioni, puo' dare una risposta conclusiva !

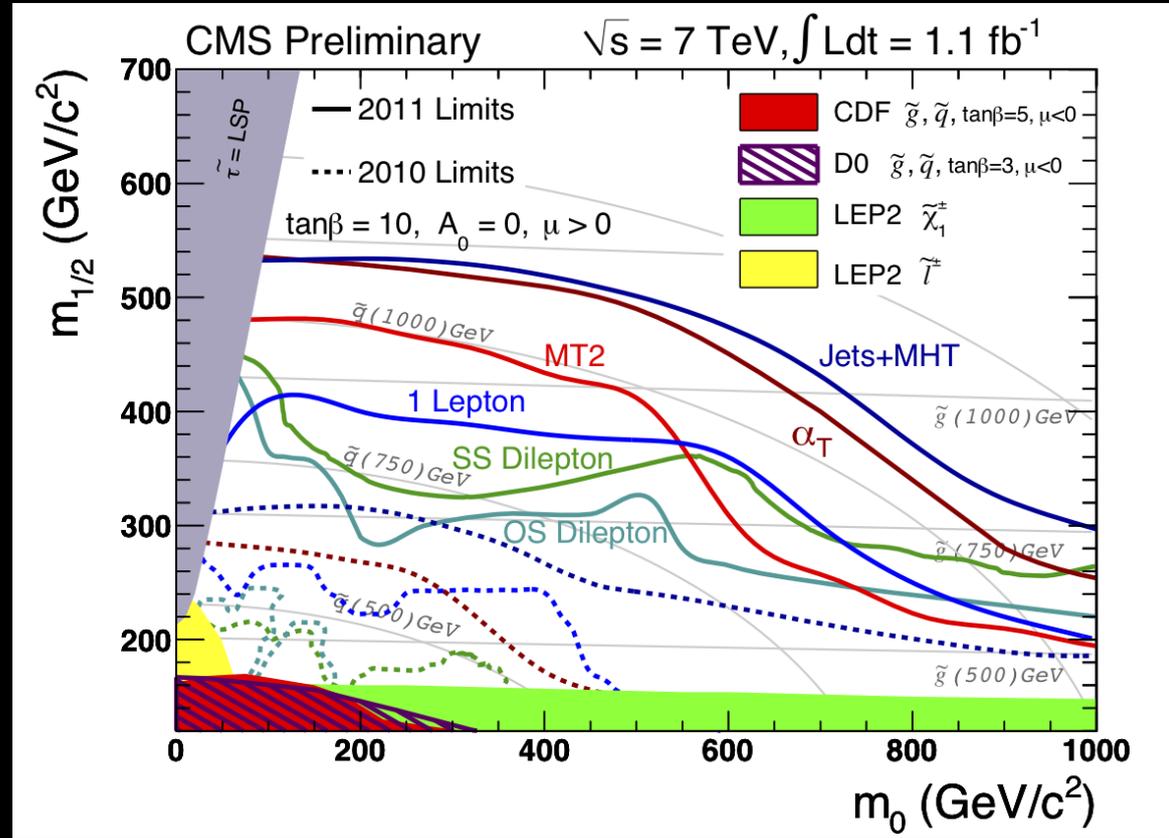
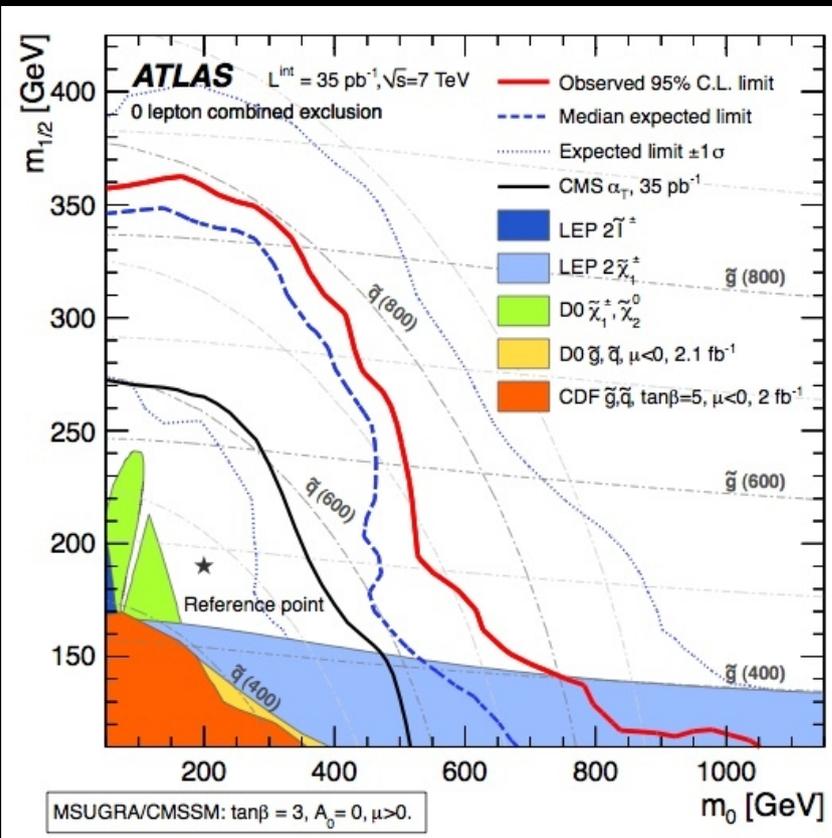


Handle With Care



Risultati

- Nessuna anomalia osservata finora
- Si calcola il potere di esclusione, ovvero i parametri delle nuove teorie che non sono compatibili con la (mancanza di) osservazione



Futuro

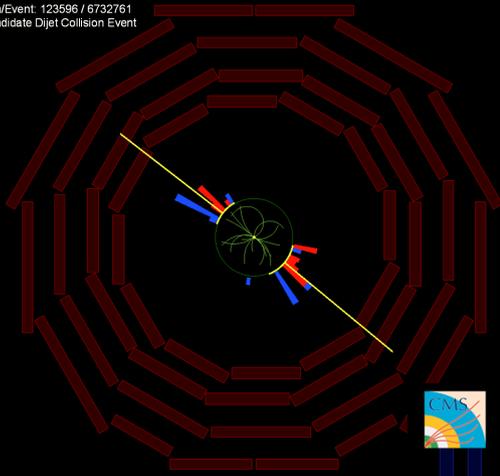
- Aumento di Luminosità' (x 4 nel 2012, x 100 nel 2020)
 - ricercare eventi sempre più rari, cioè con interazioni estremamente deboli
- Aumento di energia dei fasci (8 TeV 2012, 14 TeV 2015 , 100 TeV nel ?)
 - ricercare particelle di massa sempre più elevata

Altre Risonanze (inattese) ?

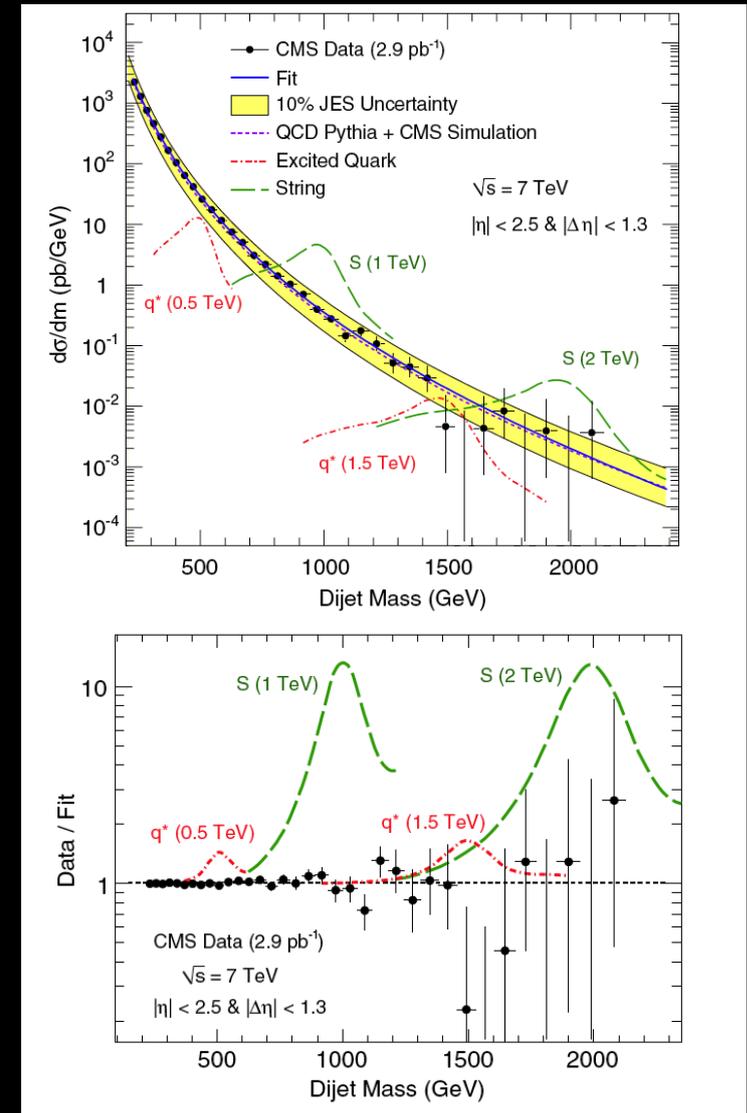
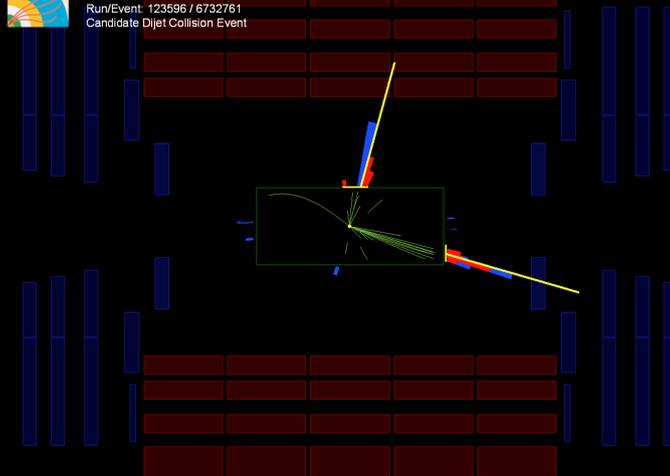
Es. : eventi a due getti , cioè fiotti di particelle spazialmente correlate)



CMS Experiment at the LHC, CERN
Date Recorded: 2009-12-06 07:18 GMT
Run/Event: 123596 / 6732761
Candidate Dijet Collision Event

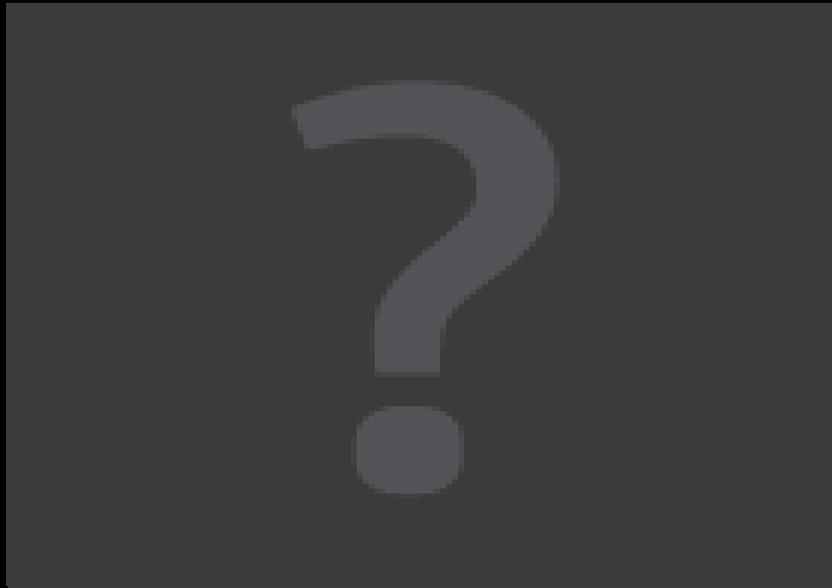


CMS Experiment at the LHC, CERN
Date Recorded: 2009-12-06 07:18 GMT
Run/Event: 123596 / 6732761
Candidate Dijet Collision Event



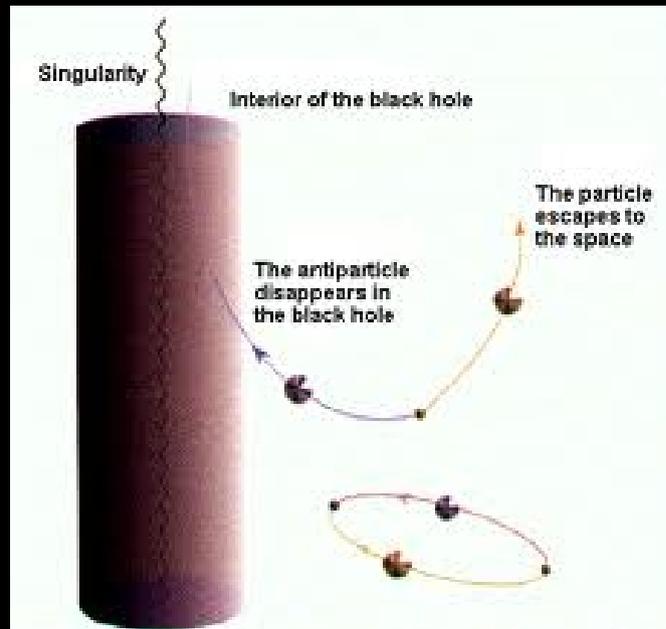
e ancora ...

- particelle pesanti stabili
- particelle a lunga vita media che si incagliano nel rivelatore
- Buchi neri
 - E come li vediamo ?
 - Di seguito tre possibilità'



Produzione e manifestazione di un buco nero

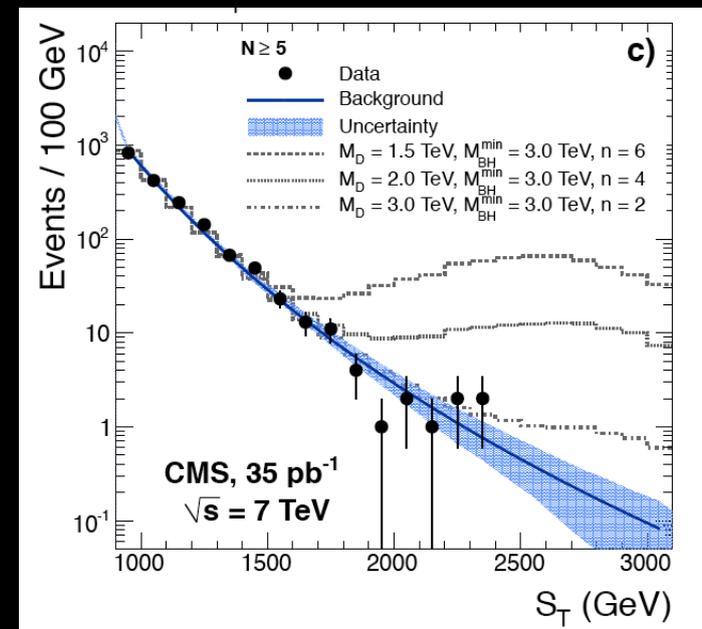
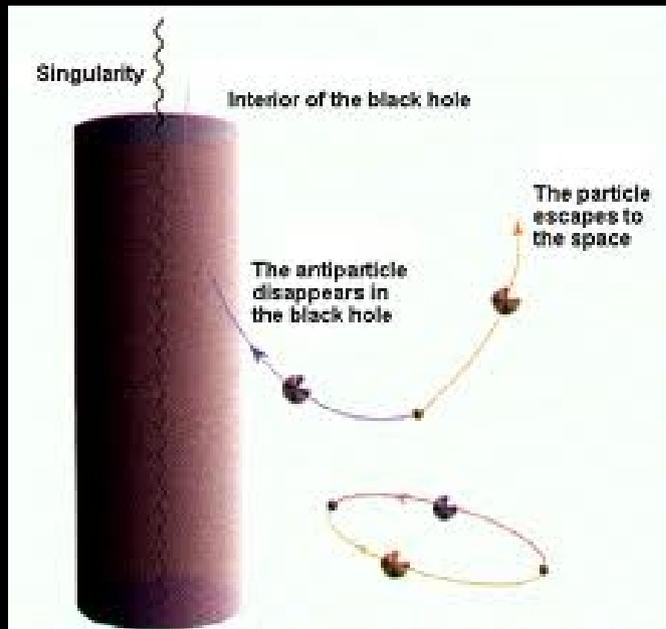
- Teorie con extra-dimensioni prevedono una produzione relativamente abbondante
- Il buco nero prodotto evapora (radiazione di Hawking) emettendo isotropicamente particelle



Produzione e manifestazione di un buco nero

nero

- Teorie con extra-dimensioni prevedono una produzione relativamente abbondante
- Il buco nero prodotto evapora (radiazione di Hawking) emettendo isotropicamente particelle
- Segnale : grandi emissioni di energia, distribuita democraticamente tra molte particelle



Conclusioni

- Dopo una lunga fatica, e' iniziata l'era di LHC
- La macchina e gli esperimenti funzionano alla grande
- Finora nessuna sorpresa ...

Conclusioni

- Dopo una lunga fatica, e' iniziata l'era di LHC
- La macchina e gli esperimenti funzionano alla grande
- Finora nessuna sorpresa ...
- ... ne' ce ne aspettavamo
- L'avventura incomincia ora, percio'

