

I grandi esperimenti di Fisica delle Alte Energie



Livio Fano'

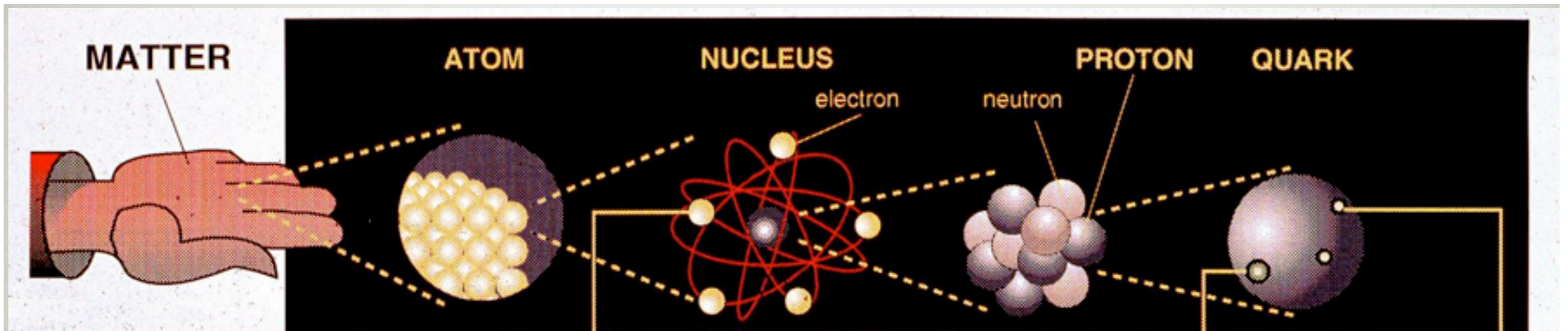
Dipartimento di Fisica
INFN e Università' degli Studi di Perugia

la materia e' costituita da blocchi fondamentali

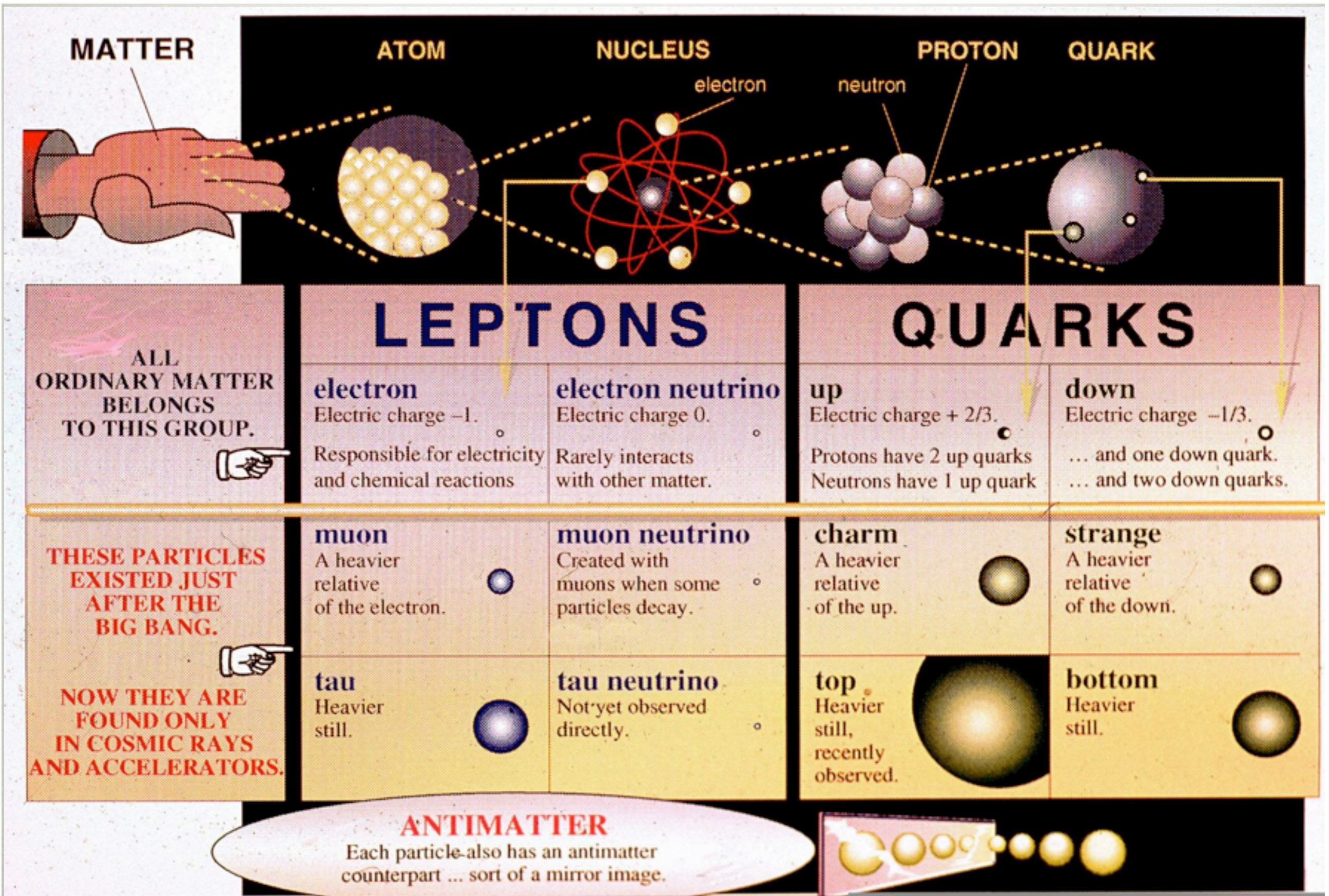
se si', cosa sono ? come interagiscono ?

come determinano le proprietà dell'Universo ?

oggi sappiamo che...

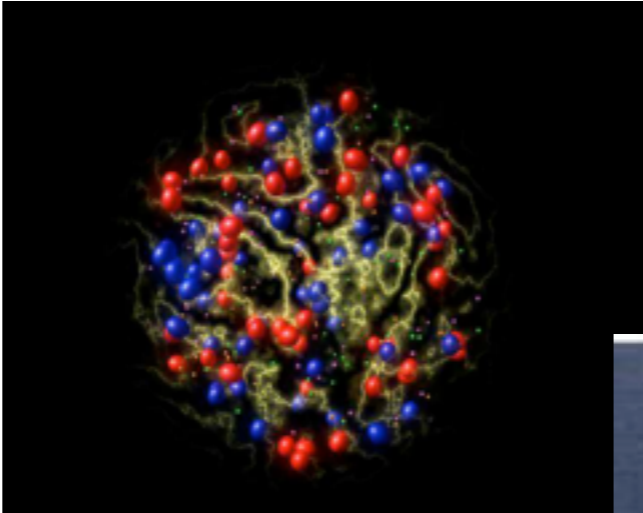


oggi sappiamo che...



e che le forze in gioco (le interazioni) tra i costituenti fondamentali sono 4:

1) Forte



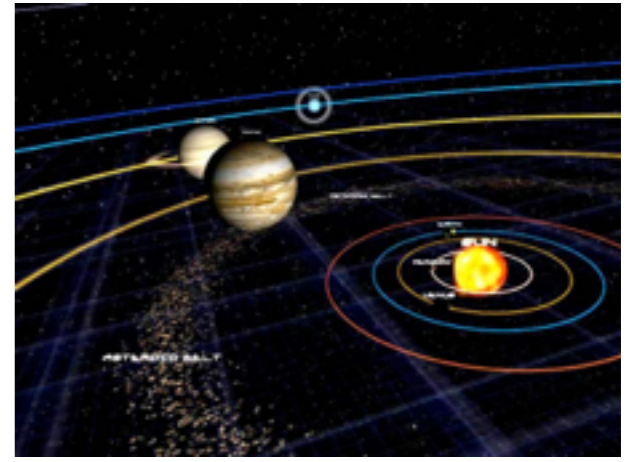
2) Elettromagnetica



3) Debole

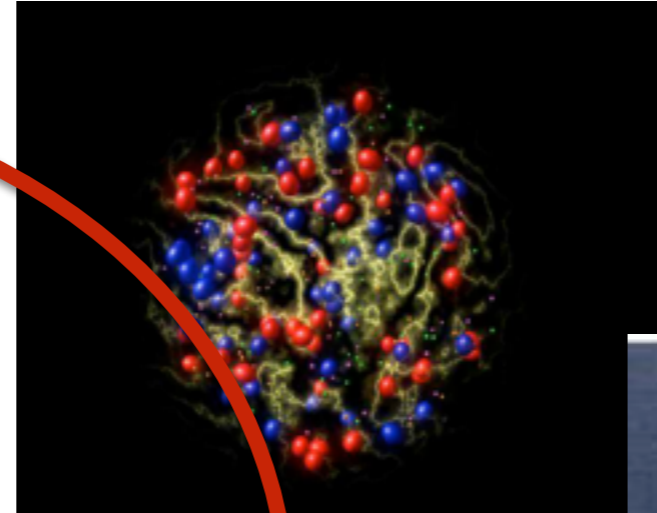


4) Gravitazionale



e che le forze in gioco (le interazioni) tra i costituenti fondamentali sono 4:

1) Forte



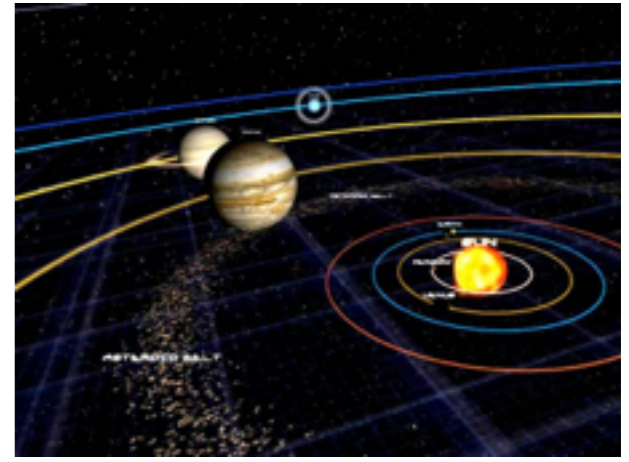
2) Elettromagnetica



3) Debole



4) Gravitazionale



La nostra conoscenza dei fenomeni fisici fondamentali è rappresentata dal **Modello Standard**, una teoria di campo quantistica e relativistica

dal punto di vista fenomenologico il modello è composto da 3 elementi:

- 1) 3 generazioni di **fermioni** (quark e leptoni)
tutta la materia dell'universo proviene dalla prima generazione (quark u, d e elettroni)
- 2) I **bosoni** vettori, responsabili delle interazioni (le forze)
- + 3) Il meccanismo di **Higgs** (**attribuzione della massa** alle particelle)

il modello descrive bene (molto bene) la maggior parte dei fenomeni conosciuti

Come codifichiamo tutto ?

Attraverso leggi di conservazione (e simmetrie)

$$E = K + V = \text{costante}$$

cioè nel tempo $\Delta E = 0$

K definisce la “dinamica”
V l’interazione

Si possono, semplificando, ricavare
le “leggi del moto”

simmetria:
una trasformazione continua delle coordinate (generalizzate)
che lascia invariato un sistema (lagrangiana)



Emma Noether

Cosa lega interazione e dinamica fondamentale nel MS ?

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{[Gauge interactions: } U_Y(1), SU_L(2), SU_C(3)\text{]} \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R\sigma^\mu iD_\mu \nu_R + (\text{h.c.}) && \text{[Lepton dynamics]} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R\bar{M}^e\bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R\bar{M}^\nu\phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] && \text{[Lepton masses]} \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R\sigma^\mu iD_\mu d_R + (\text{h.c.}) && \text{[Quark dynamics]} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R\bar{M}^d\bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R\bar{M}^u\phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] && \text{[Quark masses]} \\
 & +(\overline{D_\mu\phi})D^\mu\phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/2v^2. && \text{[Higgs dynamics \& mass]}
 \end{aligned}$$

- Gauge-fermion dynamics via covariant derivatives:

$$\begin{aligned}
 D_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} &= \left[\partial_\mu - \frac{ig_1}{2}B_\mu + \frac{ig_2}{2}\mathbf{W}_\mu \right] \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}, \quad D_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} = \left[\partial_\mu + \frac{ig_1}{6}B_\mu + \frac{ig_2}{2}\mathbf{W}_\mu + ig\mathbf{G}_\mu \right] \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, \\
 D_\mu \nu_R &= \partial_\mu \nu_R, \quad D_\mu e_R = [\partial_\mu - ig_1 B_\mu] e_R, \quad D_\mu u_R = \left[\partial_\mu + \frac{i2g_1}{3}B_\mu + ig\mathbf{G}_\mu \right] u_R, \quad D_\mu d_R = \left[\partial_\mu - \frac{ig_1}{3}B_\mu + ig\mathbf{G}_\mu \right] d_R, \\
 D_\mu \phi &= \left[\partial_\mu + \frac{ig_1}{2}B_\mu + \frac{ig_2}{2}\mathbf{W}_\mu \right] \phi.
 \end{aligned}$$

- Gauge-boson field strength tensors:

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu, \quad \mathbf{W}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathbf{W}_\nu - \partial_\nu \mathbf{W}_\mu + ig_2(\mathbf{W}_\mu \mathbf{W}_\nu - \mathbf{W}_\nu \mathbf{W}_\mu)/2, \quad \mathbf{G}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathbf{G}_\nu - \partial_\nu \mathbf{G}_\mu + ig(\mathbf{G}_\mu \mathbf{G}_\nu - \mathbf{G}_\nu \mathbf{G}_\mu).$$

19 parameters: gauge couplings, H mass&vev, H-f Yukawa coupl., CKM mixings, CP phases

Ma...

1) Sperimentalmente:

- + la massa (Higgs)
- + i neutrini (perché i neutrini hanno massa ? perchè così piccola?)
- + la materia oscura (massa)
- + l'asimmetria barionica dell'universo (perchè un universo di materia e non di anti-materia?)

2) Teoricamente:

- + la gravita' resta fuori dal quadro formale - (e quindi la massa)
- + Il problema della gerarchia ($m^2 \propto \lambda^2$) - sempre la massa...

...il modello standard non sembra completo
sono necessarie strutture aggiuntive ?



Come investigare ?

La fenomenologia delle interazioni avviene in base alla scala energetica

Ad **energie diverse** le interazioni hanno **ruoli diversi** ed operano su **distanze diverse**:

$$E = h\nu$$

$$E = hc/\lambda$$

Energia maggiore ->
piccola lunghezza d'onda
(particolari più piccoli)

luce visibile $\lambda \sim 400-700$ nm che è -ad esempio- il limite di un microscopio ottico



ENERGIA - Unita' di misura

elettronvolt (eV)

l'energia che acquista un elettrone soggetto ad una differenza di potenziale di 1 V

e' un'energia molto piccola: $1 \text{ eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

un'auto che corre a 100 km/h ha un'energia cinetica di **$\sim 4 \cdot 10^{24} \text{ eV}$**

il piu' potente degli acceleratori e' in grado di impartire ad una particella un'energia di 14 TeV (tera-elettronvolt = 10^{12} eV) cioe' $\sim 10^{-7} \text{ J}$

una zanzara in volo ha un'energia cinetica 10 volte superiore

ENERGIA - Unita' di misura

elettronvolt (eV)

l'energia che acquista un elettrone soggetto ad una differenza di potenziale di 1 V

e' un'energia molto piccola: $1 \text{ eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

un'auto che corre a 100 km/h ha un'energia cinetica di **$\sim 4 \cdot 10^{12} \text{ TeV}$** !

il piu' potente degli esperimenti e' in grado di impartire ad una particella un'energia di **14 TeV** (tera-elettronvolt = 10^{12} eV) cioe' **$\sim 10^{-7} \text{ J}$**

una zanzara in volo ha un'energia cinetica 10 volte superiore

acceleratori - breve storia ed evoluzione

elettronvolt (eV)

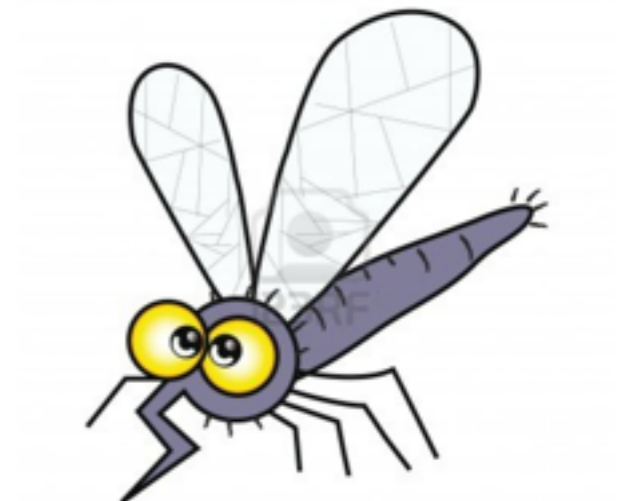
l'energia che acquista un elettrone soggetto ad una differenza di potenziale di 1 V

e' un'energia molto piccola: $1 \text{ eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

un'auto che corre a 100 km/h ha un'energia cinetica di $\sim 7 \cdot 10^5 \text{ J}$

il piu' potente degli acceleratori e' in grado di impartire ad una particella un'energia di **14 TeV** (tera-elettronvolt = 10^{12} eV) cioe' $\sim 10^{-7} \text{ J}$

una zanzara in volo ha un'energia cinetica 10 volte superiore



nel caso degli acceleratori la differenza e' nella **capacita' di concentrare l'energia** in una collisione tra particelle, cioe' in un'area molto piccola

appoggiare una mano sul tavolo oppure -con la stessa forza- su uno spillo:
l'energia in gioco e' la stessa ma gli effetti sono ben diversi

Acceleratori, Higgs e l'Universo

Sfruttando la carica elettrica gli acceleratori conferiscono alle particelle un'energia ΔE attraverso una differenza di potenziale ΔV :

$$\Delta E = q\Delta V$$

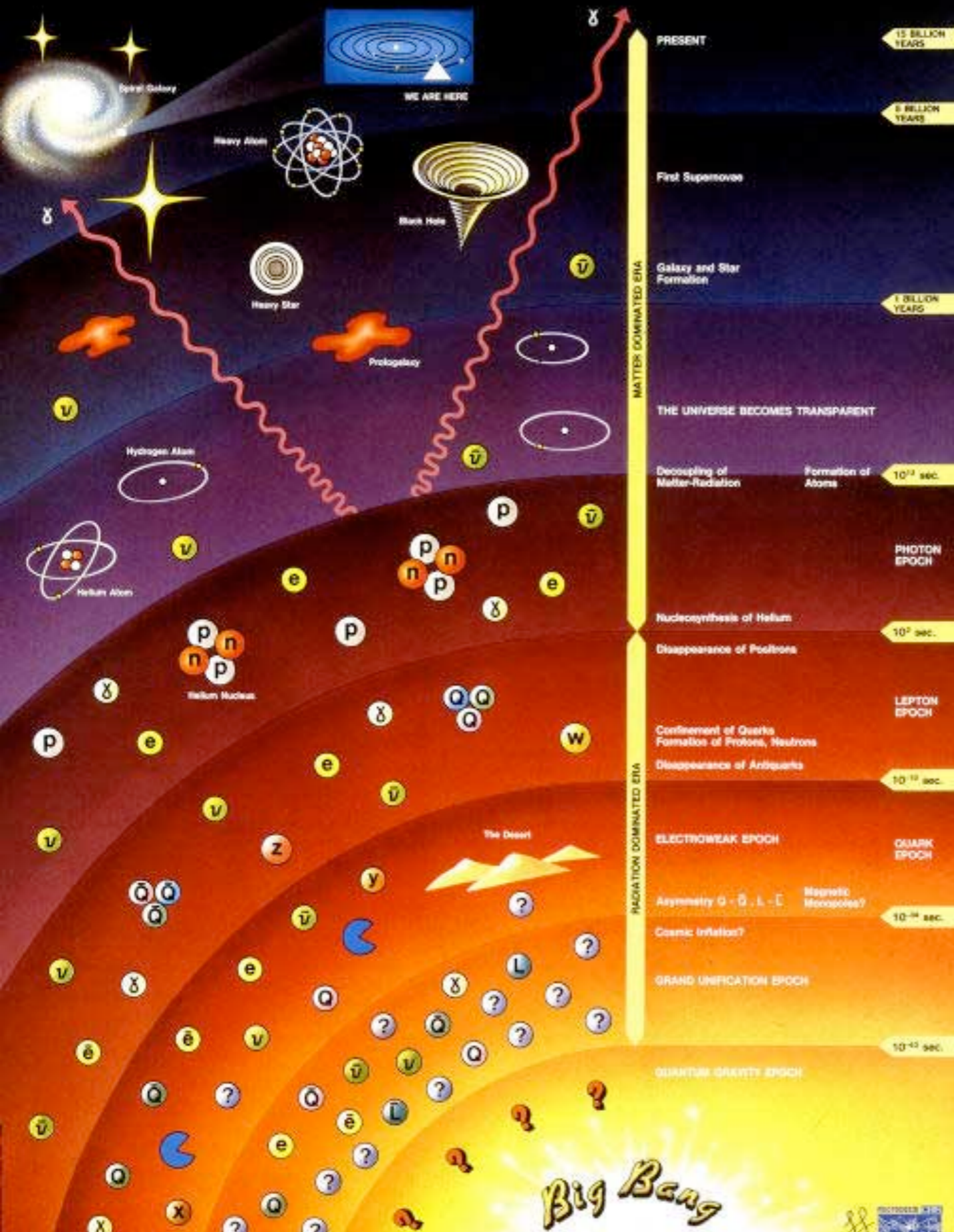
2 particelle possono interagire su scala energetica diversa, come 2 palle da biliardo possono scontrarsi con diverse velocità (con diversa energia cinetica) - possono rimbalzare o rompersi

le interazioni si manifestano diversamente a seconda della scala di energia

secondo il nostro modello dell'Universo, all'origine la densità di energia era molto elevata, capire le proprietà dei costituenti e delle interazioni a scale di energia via via più elevate significa quindi approssimare le condizioni presenti nell'universo ad istanti sempre più vicini al **Big-Bang**

vogliamo quindi un modello in grado di spiegare perché l'universo si è evoluto così come lo conosciamo

History of the Universe



Oggi: 15 miliardi di anni dal Big-Bang

1 miliardo di anni - si formarono le prime galassie.

300,000 anni - la luce prodotta cominciò a propagarsi senza assorbimento.

3 minuti - si formarono i nuclei leggeri (D, He, Li, B).

1 sec - i quarks formarono protoni e neutroni

10^{-10} sec - forze Elettromagnetiche e Deboli erano unificate

10^{-34} sec - tutte le forze unificate??

e “prima” ancora ?

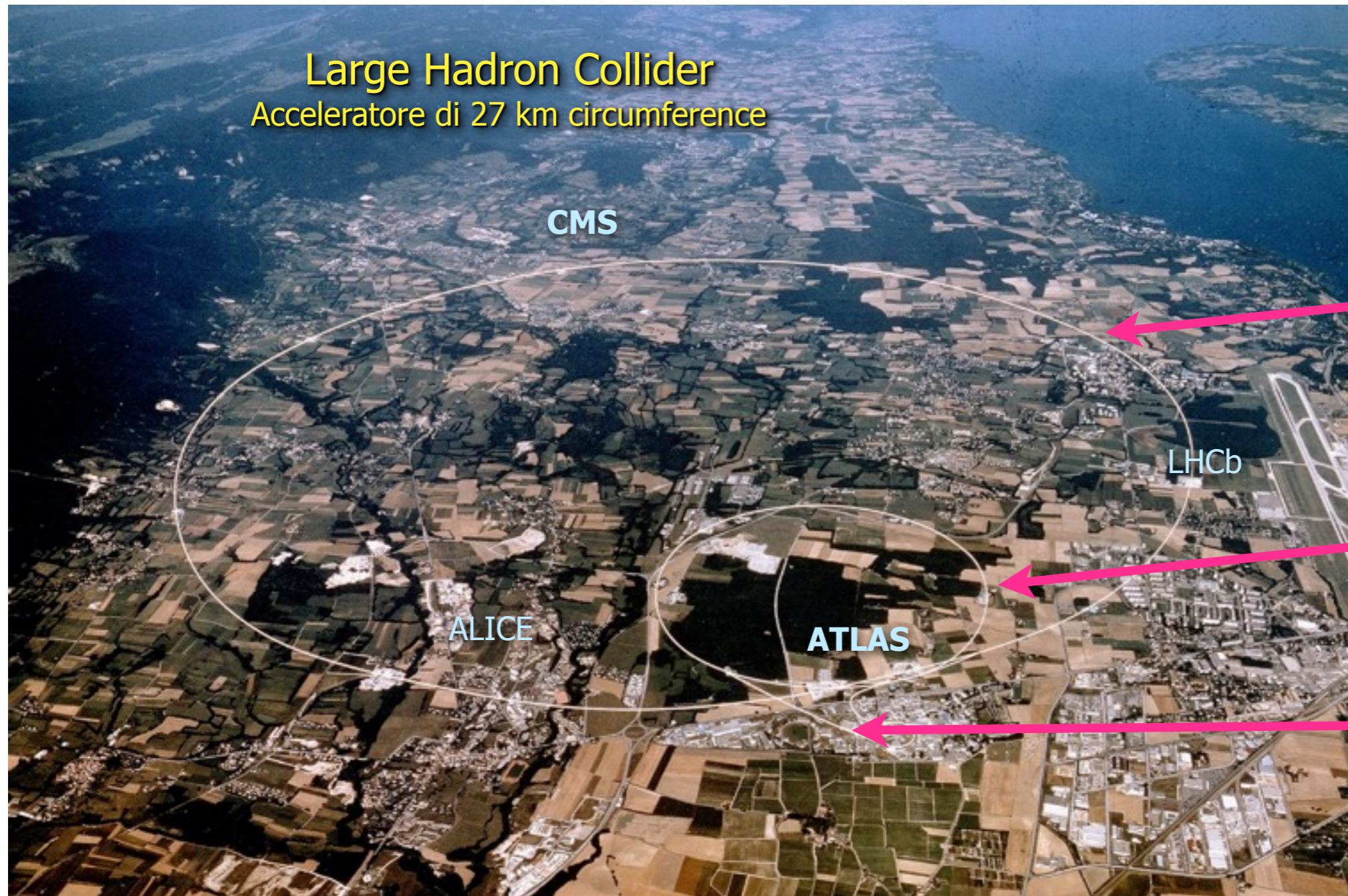
COME ?

Abbiamo bisogno quindi di far interagire le particelle con alta energia

Abbiamo bisogno di una frequenza di collisioni molto alta perche' i fenomeni che vogliamo osservare sono molto rari

Abbiamo un acceleratore per questo ?

acceleratori oggi - LHC al CERN



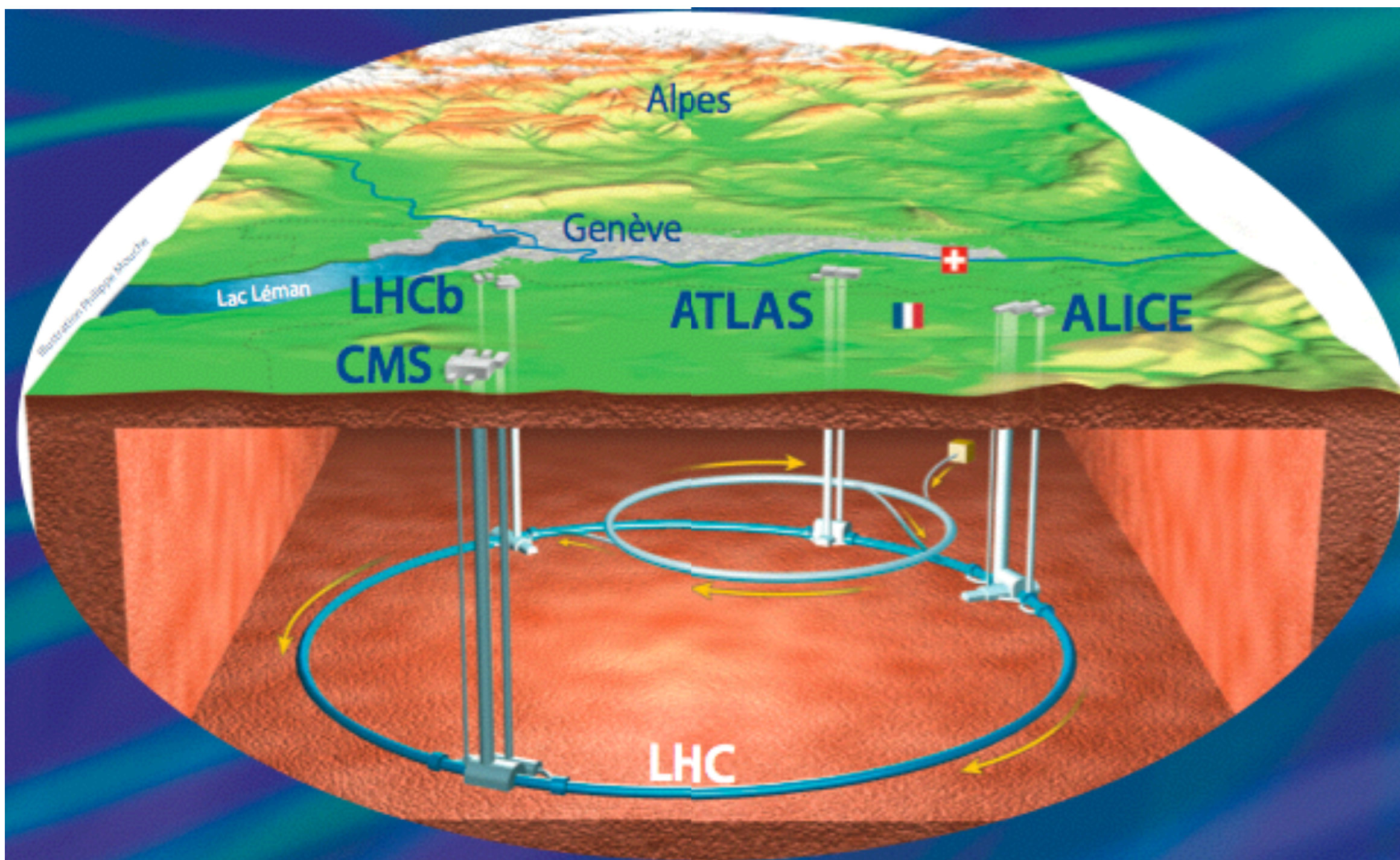
collider

**proto-
sincrotrone**

**acceleratore
lineare**

**L'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare (CERN) ha dato il via al più grande esperimento scientifico mai costruito dall'uomo:
il Large Hadron Collider - LHC**

Il collisionatore ha 27 km di diametro ed e' situato ad una profondita' media di 80m
Le collisioni avvengono in 4 punti dove sono stati collocati 4 rivelatori
CMS,Atlas,Alice, LHCb con obiettivo di studiare fenomeni diversi



Il collisionatore - qualche numero

Acceleratore circolare, in particolare LHC:

Sono 2 fasci di protoni che roteano in direzione opposta lungo 2 anelli separati e si scontrano, frontalmente, in 4 punti

L'energia disponibile al centro di massa e' di 14 TeV (13 TeV ora)

$$\sqrt{s} = 2 \times E_{\text{beam}} \approx 2 \times p_{\text{beam}}$$

fixed-target:

$$\sqrt{s} = \sqrt{(2 \times m \times E_{\text{beam}})}$$

$m \approx 1 \text{ GeV}$ for proton target

Opera anche come collisionatore di ioni pesanti
(per esempio collisioni Pb-Pb)

Prima collisione 11/2009

Il collisionatore - qualche numero

Acceleratore circolare, in particolare LHC:

Sono 2 fasci di protoni che roteano in direzione opposta lungo 2 anelli separati e si scontrano, frontalmente, in 4 punti

L'energia disponibile al centro di massa e' di 14 TeV (13 TeV ora)

$$\sqrt{s} = 2 \times E_{\text{beam}} \approx 2 \times p_{\text{beam}}$$

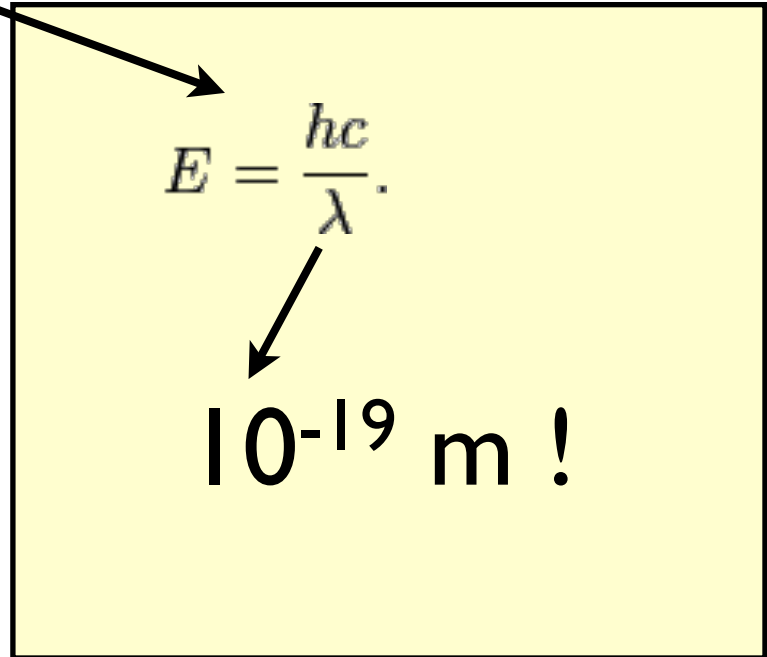
fixed-target:

$$\sqrt{s} = \sqrt{(2 \times m \times E_{\text{beam}})}$$

$m \approx 1 \text{ GeV}$ for proton target

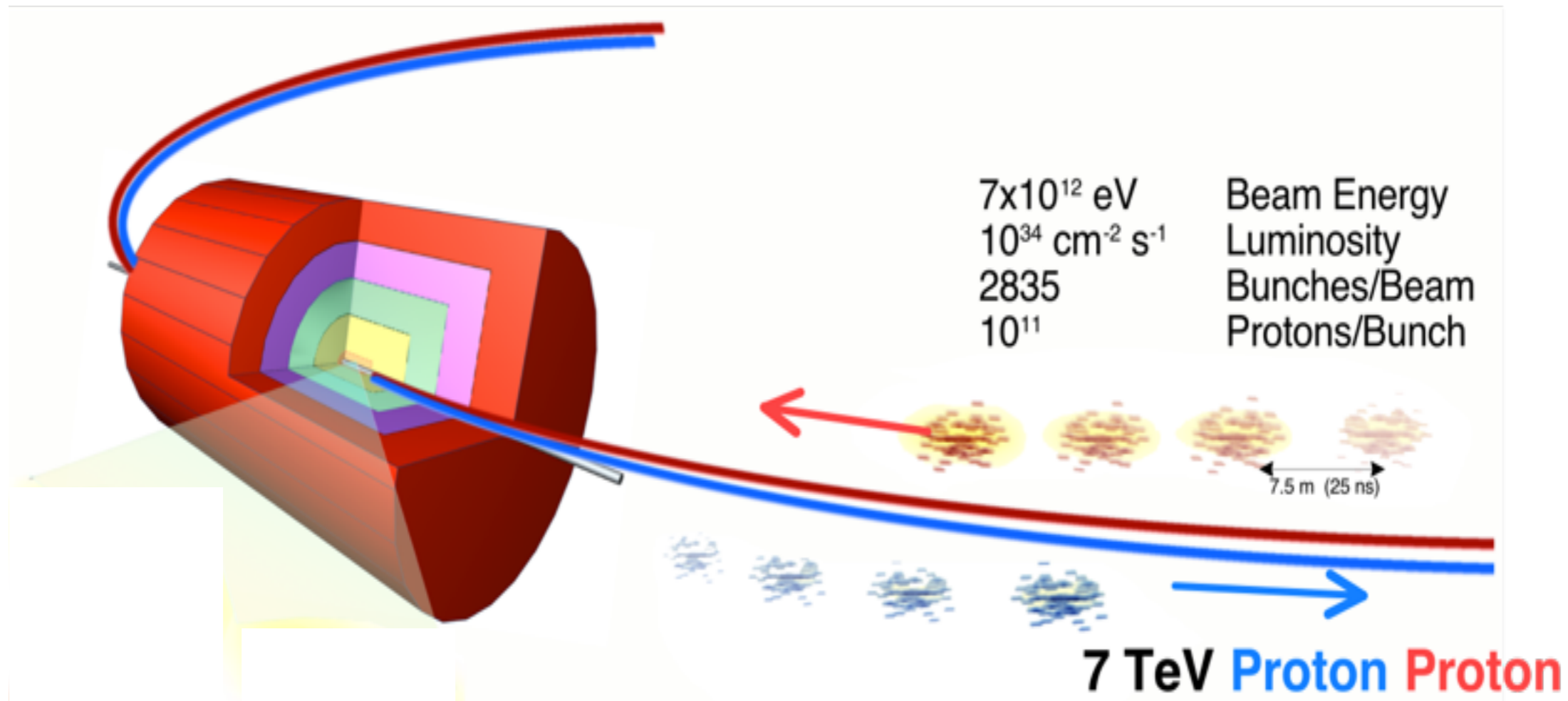
Opera anche come collisionatore di ioni pesanti
(per esempio collisioni Pb-Pb)

Prima collisione 11/2009


$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

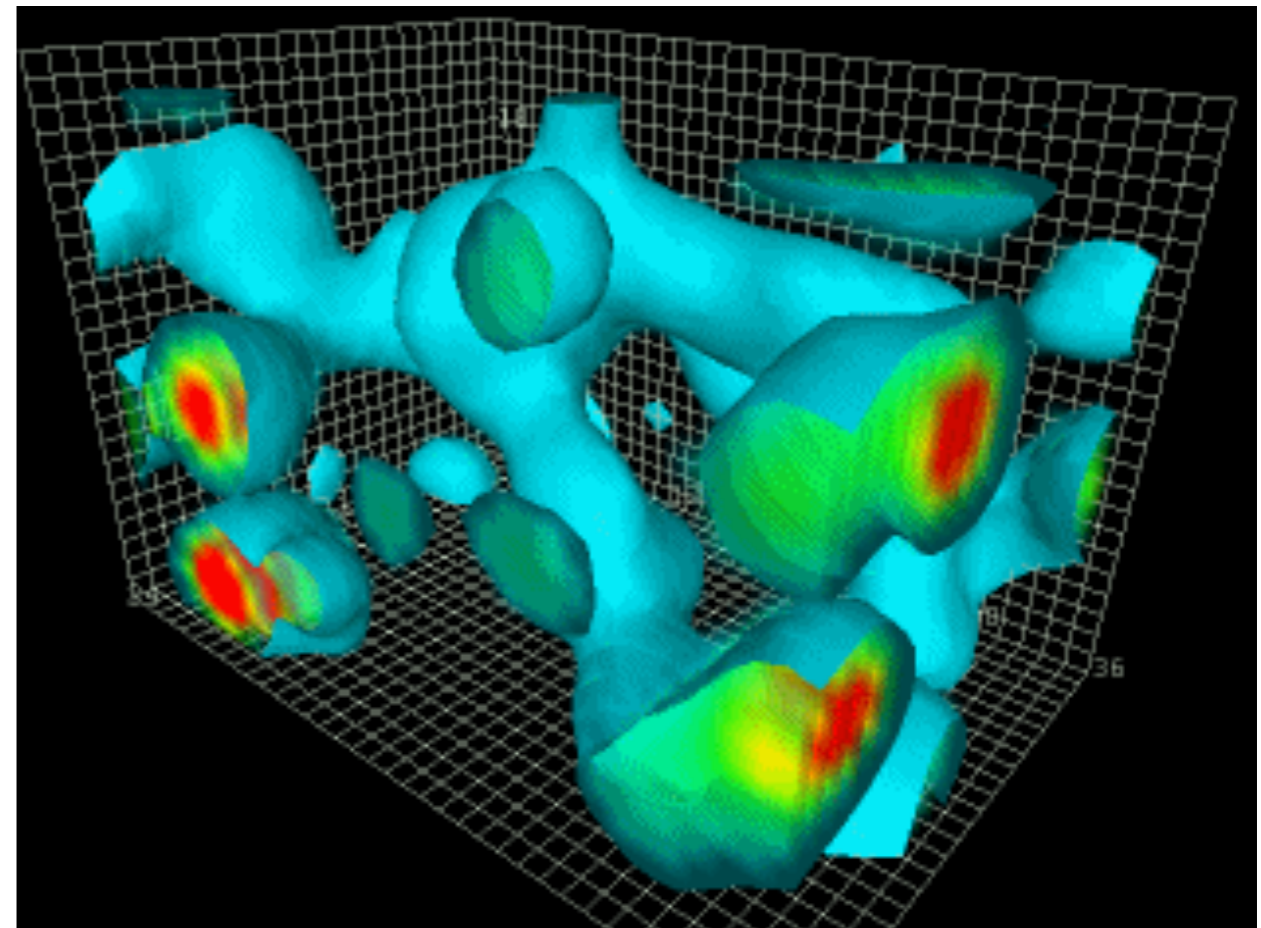
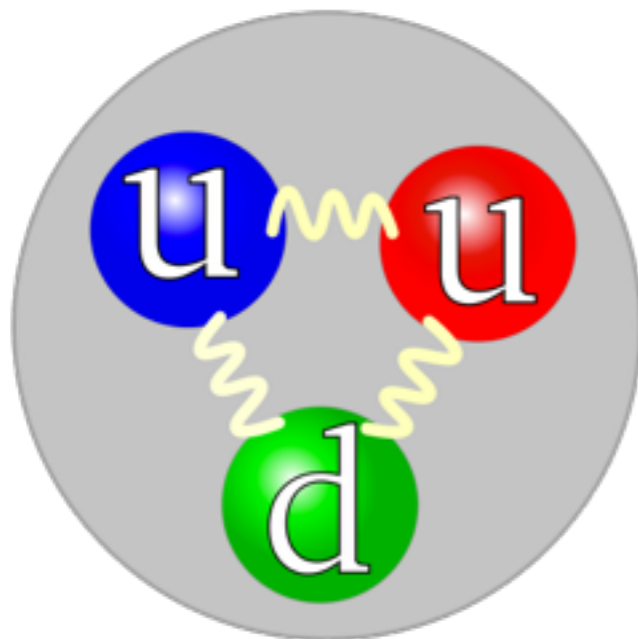
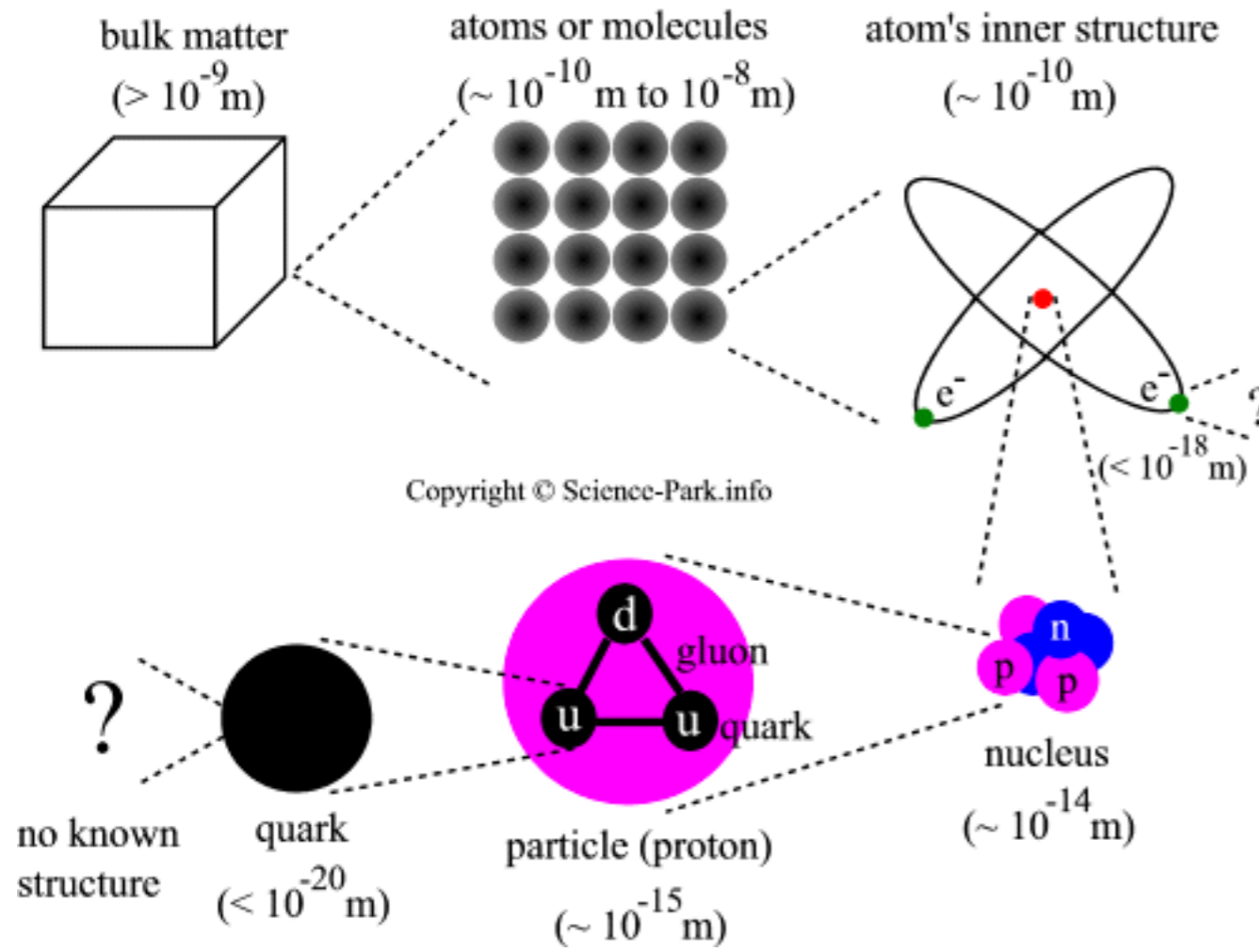
$10^{-19} \text{ m} !$

Come “vediamo” le interazioni ?

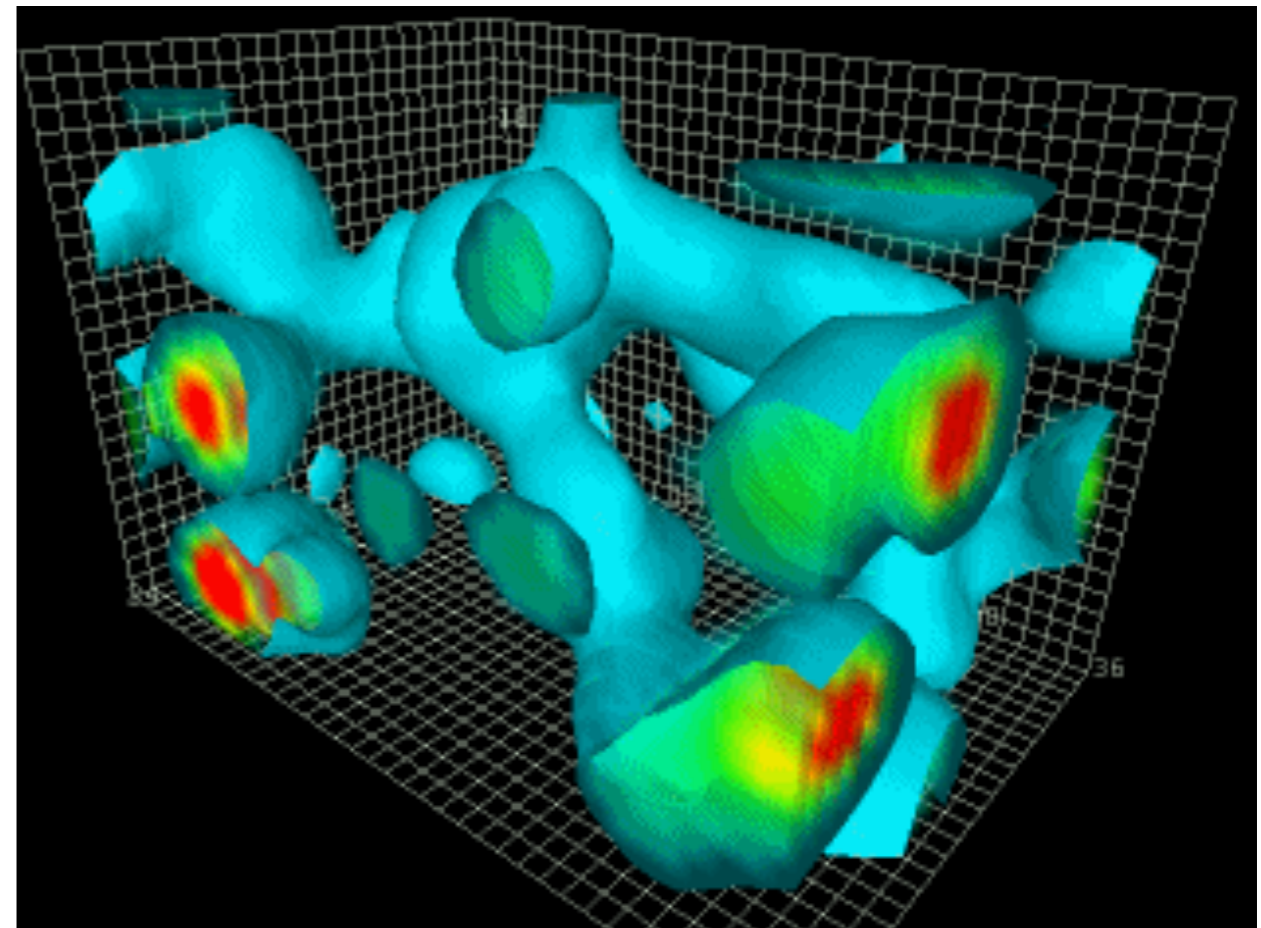
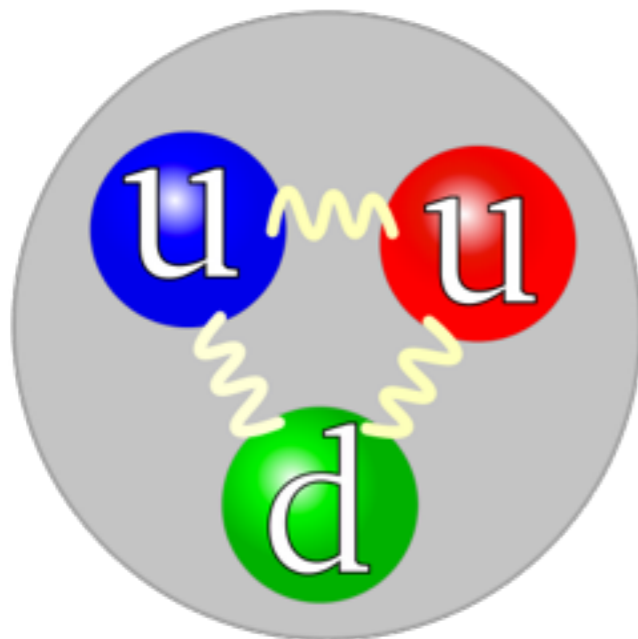
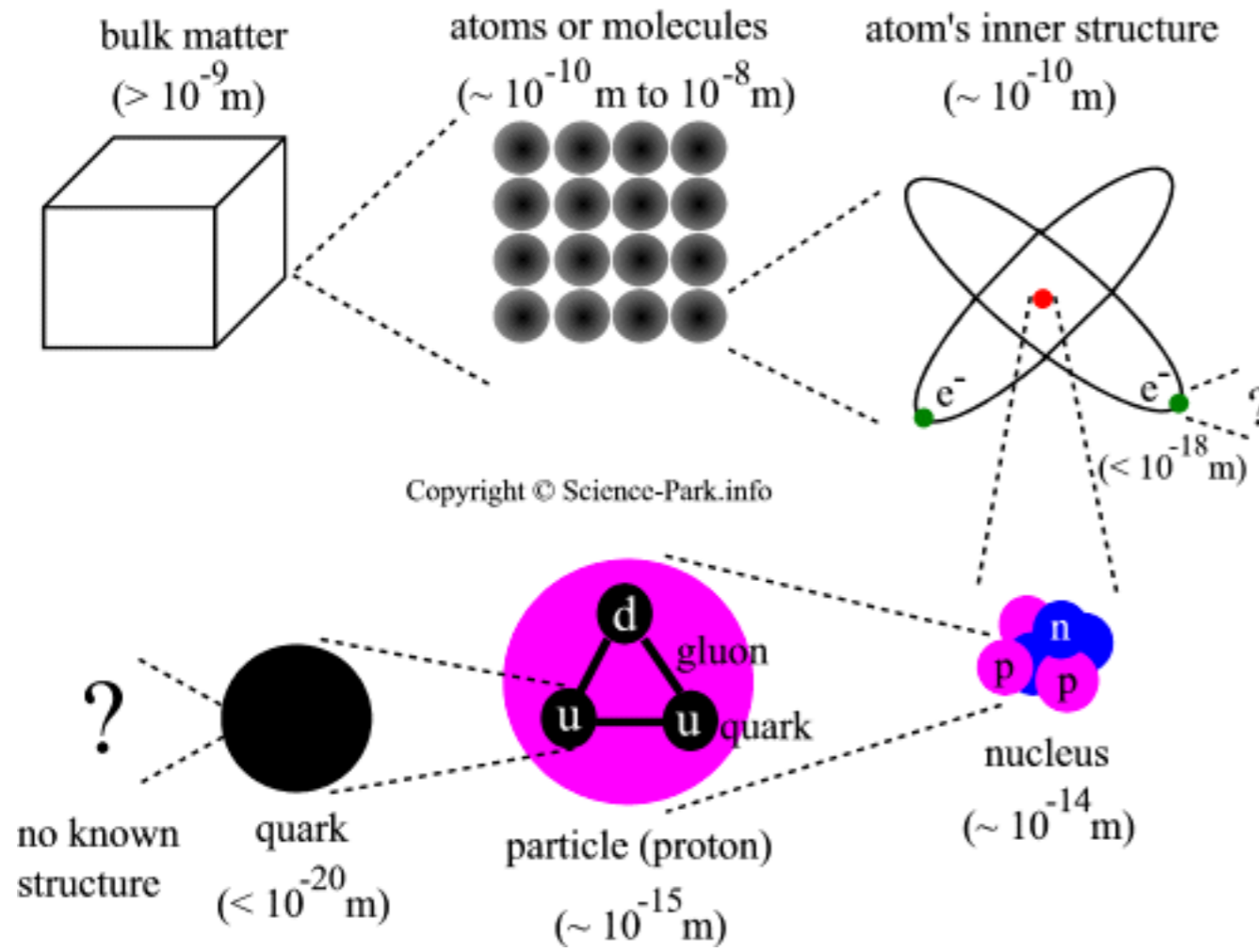


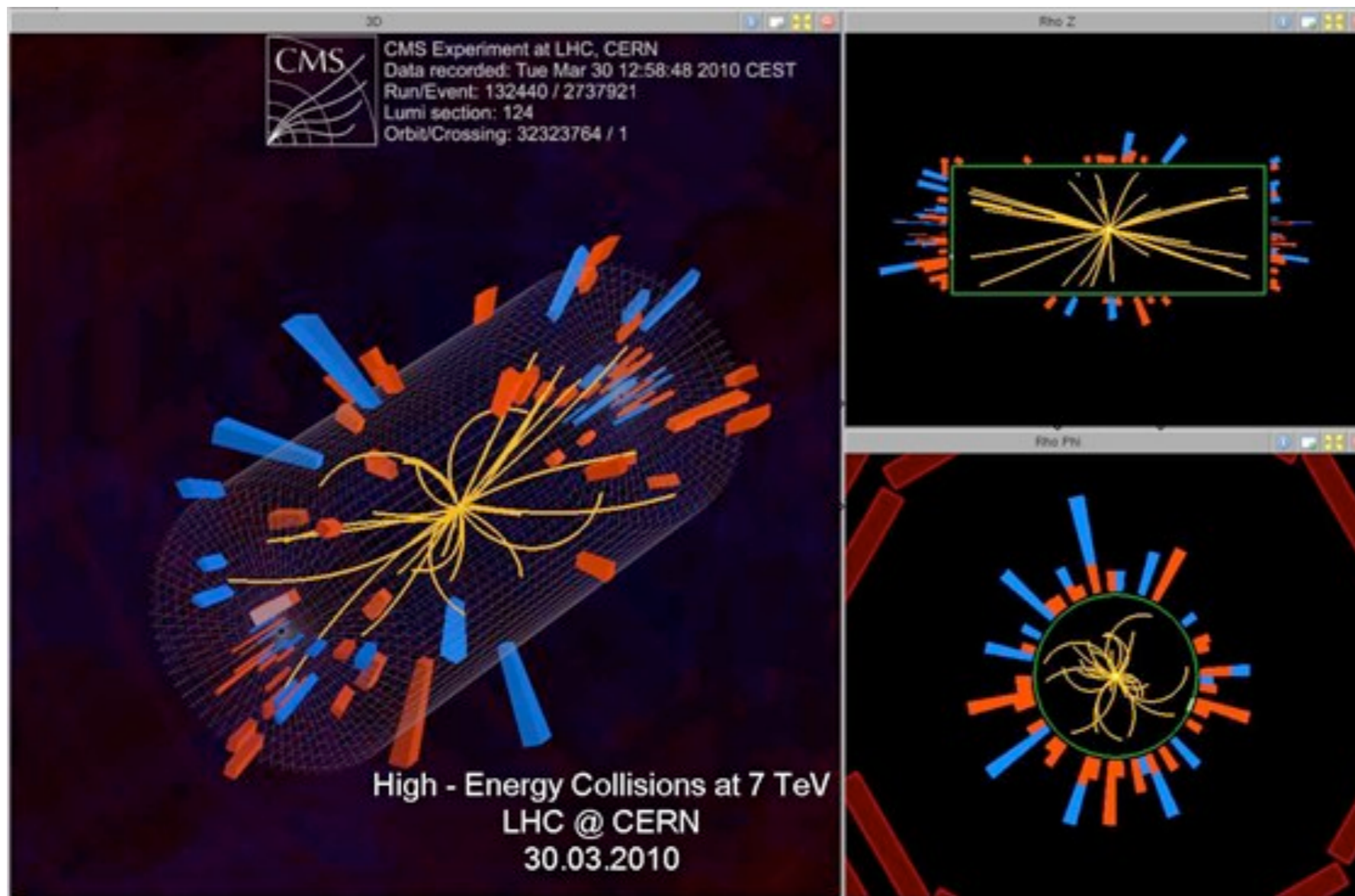
Intorno al punto di interazione viene collocato il rivelatore, cioè la parte dell'esperimento in grado di “vedere” i prodotti dello scontro tra protoni

protoni



protoni





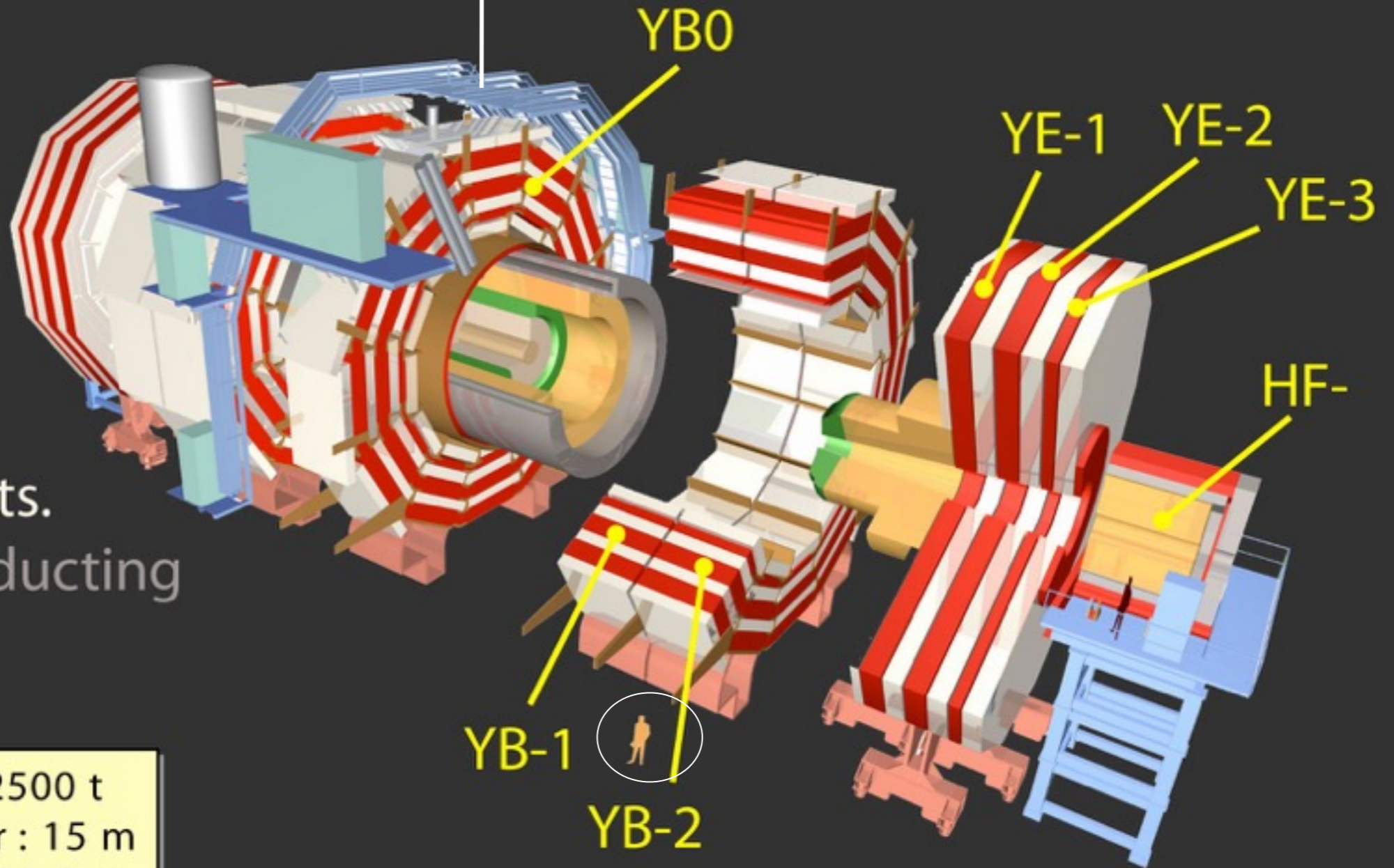
Se 2 protoni interagiscono e si rompono, frammentano in centinaia di particelle instabili che si riassemblano in una miriade di particelle a vita breve

La difficoltà sta nel ricostruire a posteriori le traiettorie (in modo da determinarne l'energia) e da queste ricostruire la cinematica dell'interazione base che è avvenuta tra i protoni che hanno dato inizio al tutto

La frequenza di collisioni è $R \sim 10^9$ Hz

Uno degli occhi: CMS

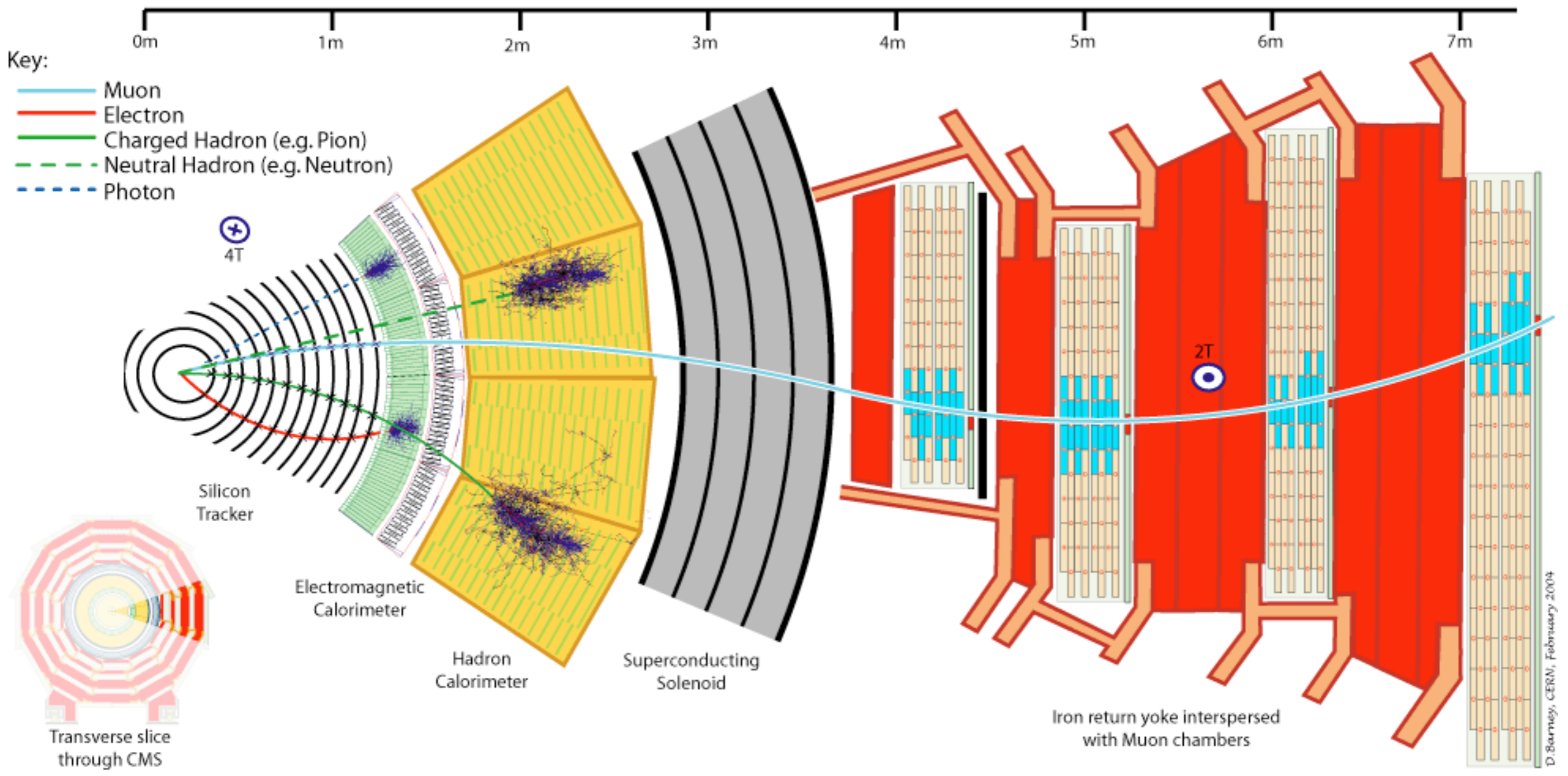
- Pixels
- Tracker
- ECAL
- HCAL
- MUON Dets.
- Superconducting Solenoid



Total weight : 12500 t
Overall diameter : 15 m
Overall length : 21.6 m
Magnetic field : 4 Tesla

<http://cms.cern.ch>

I principi di rivelazione di particelle di CMS



CMS - Lo strumento scientifico più grande e complesso mai costruito dall'uomo



CMS - Lo strumento scientifico più grande e complesso mai costruito dall'uomo



1700 physicists, 700 students, 950 engineers/technicians, 180 institutions from 43 countries



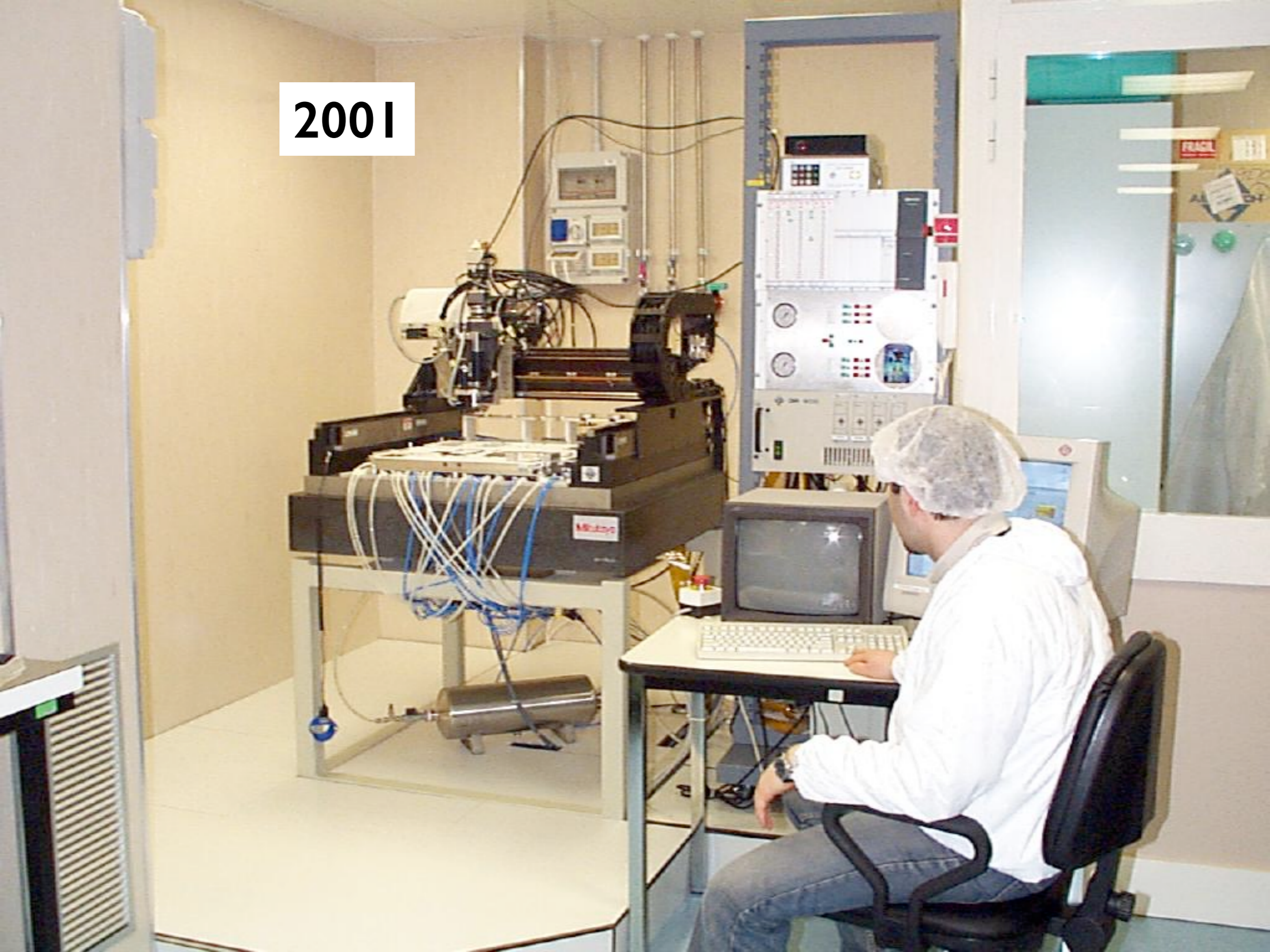
Campanilismo :-)



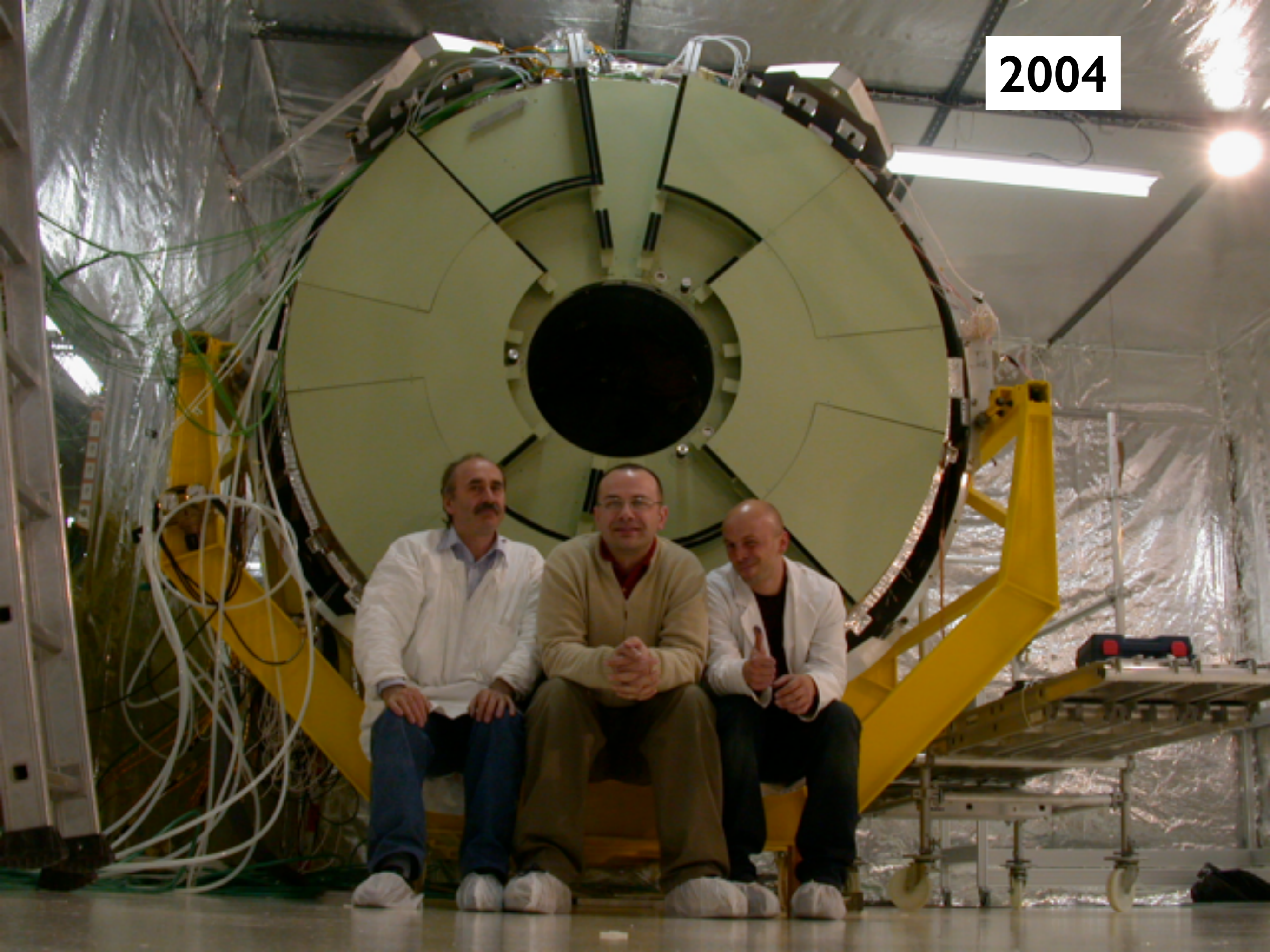
1999



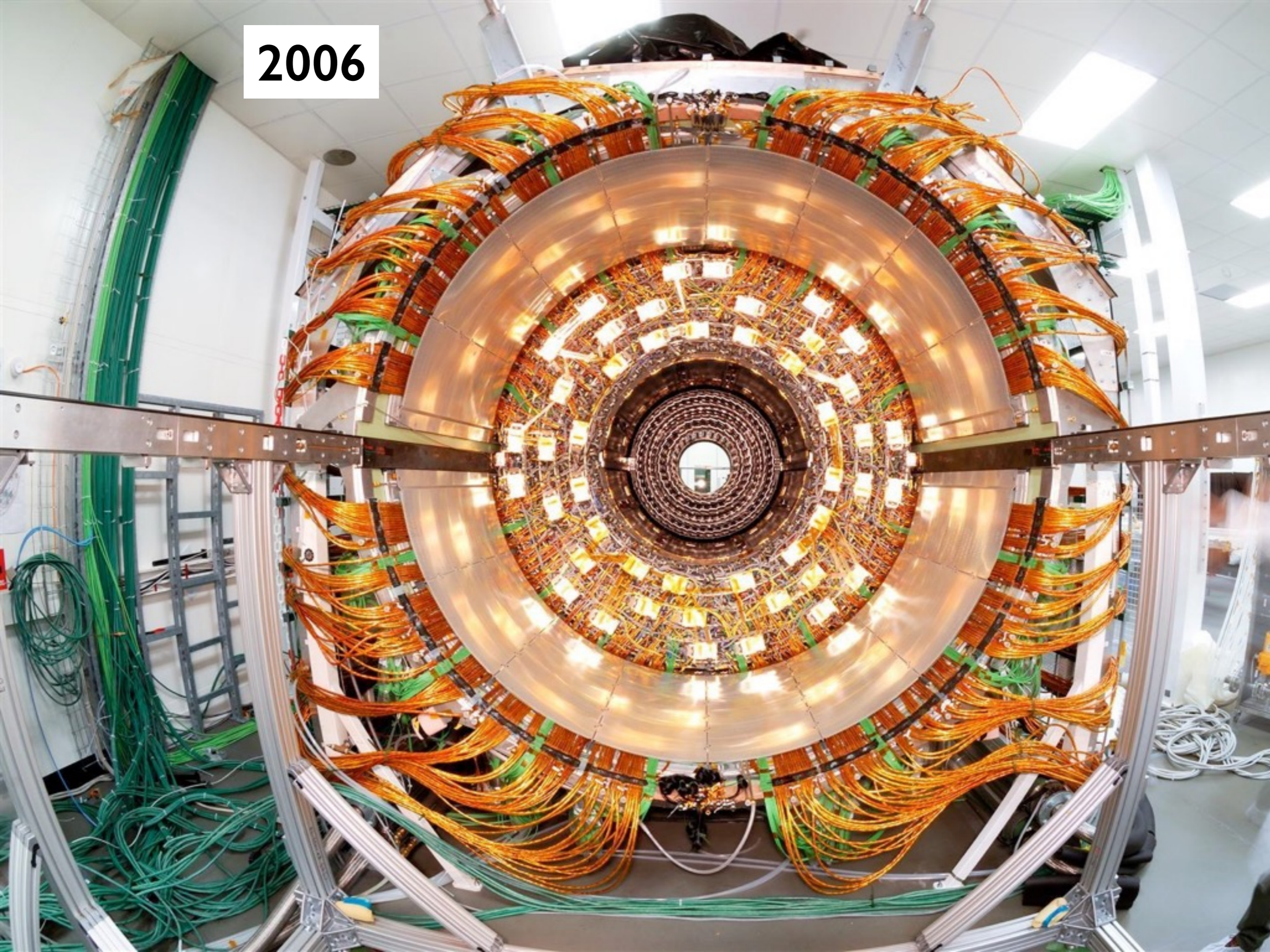
2001



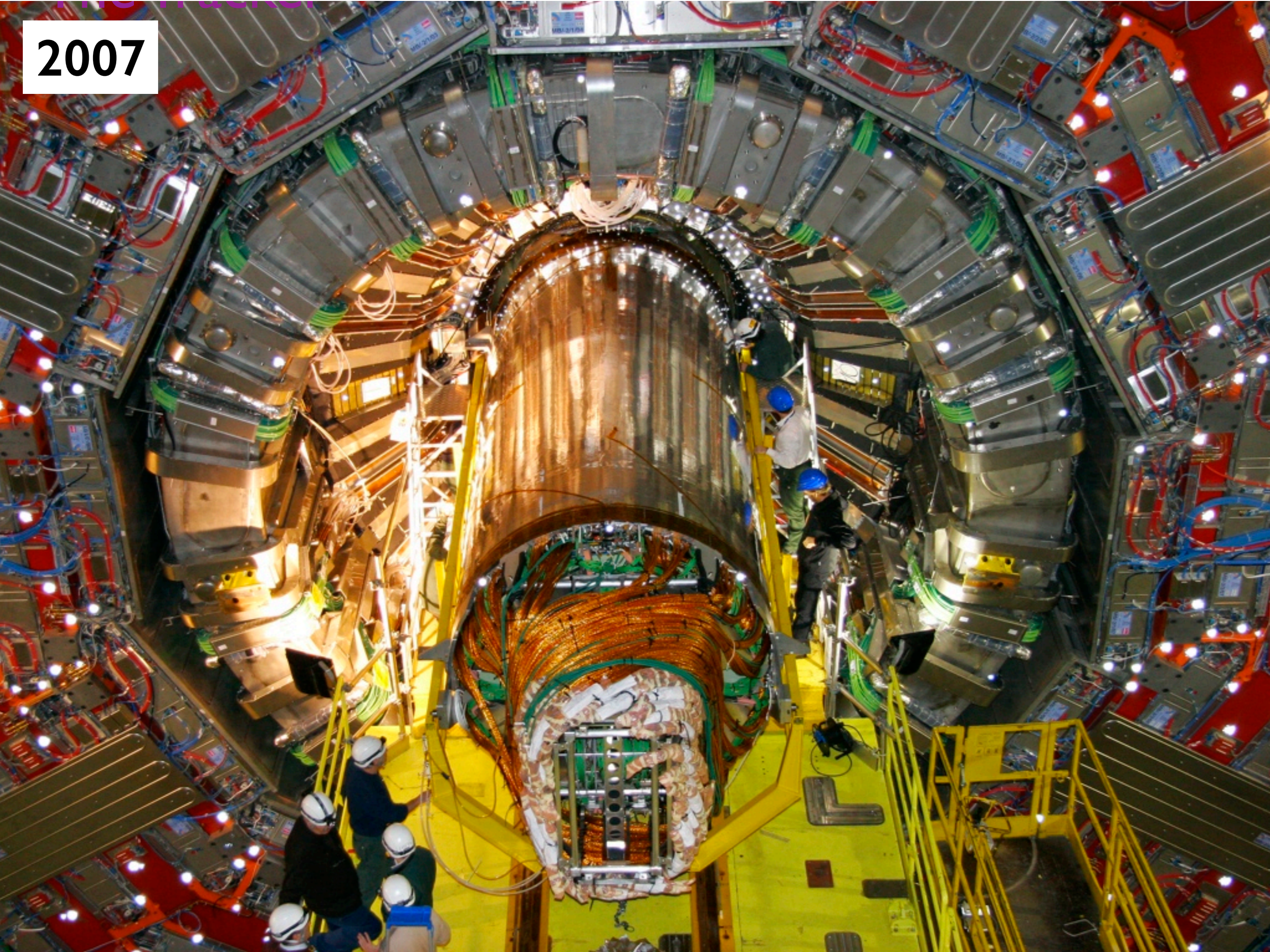
2004



2006



2007



2007



ME-11101
ME-11102
ME-11103
ME-11104
ME-11105
ME-11106
HE-RBX 01
HE-RBX 02
HE-RBX 03

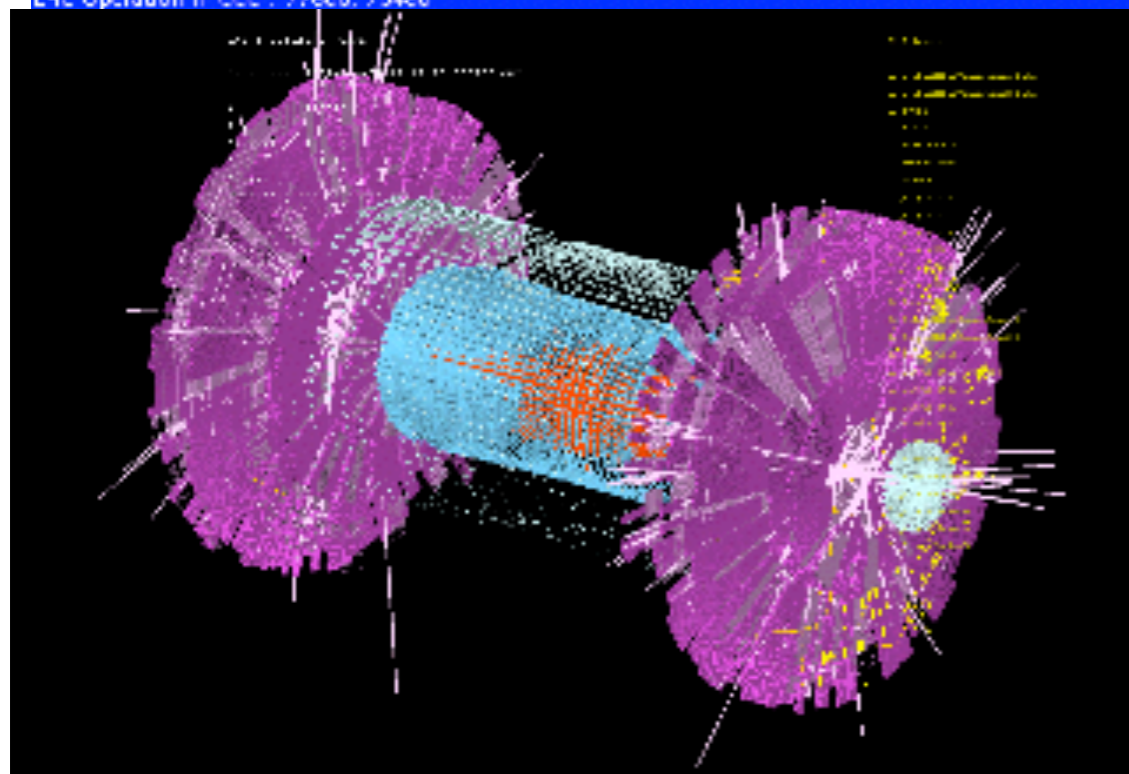
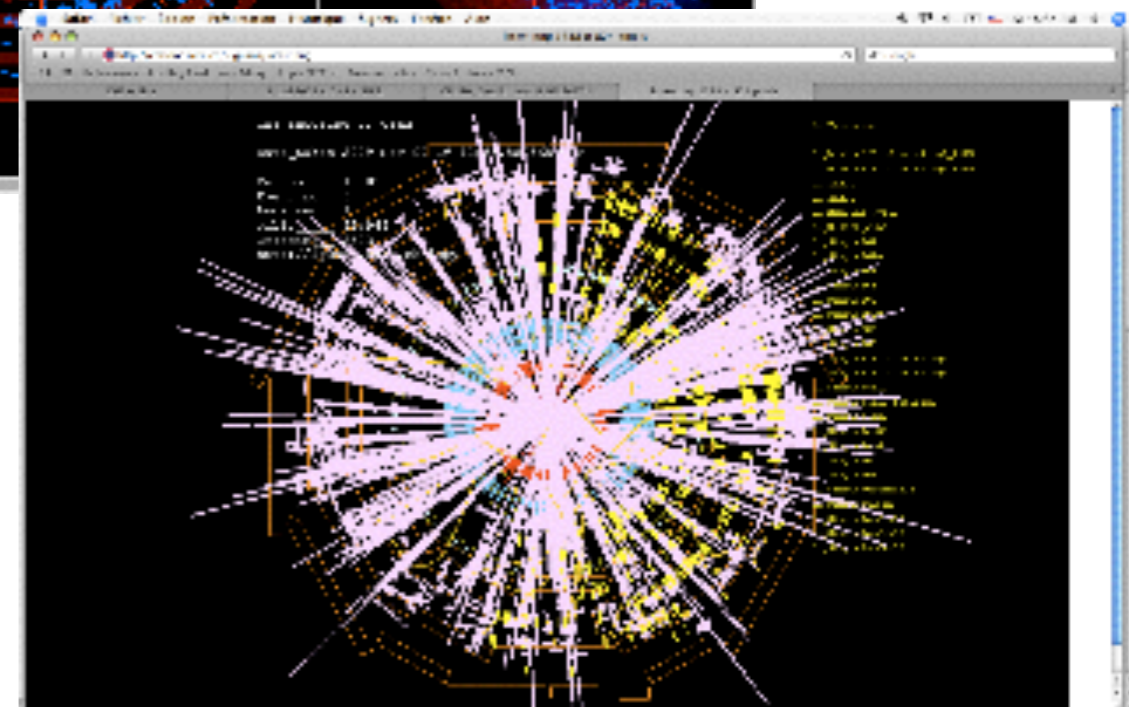
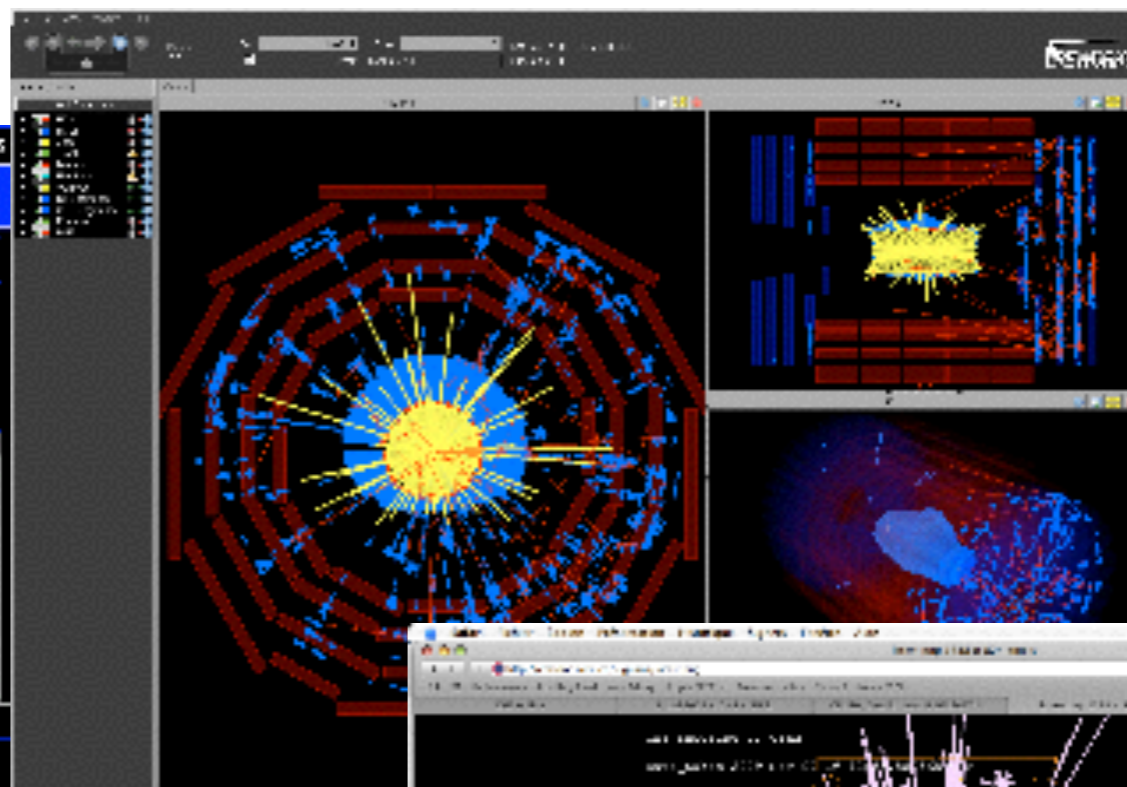
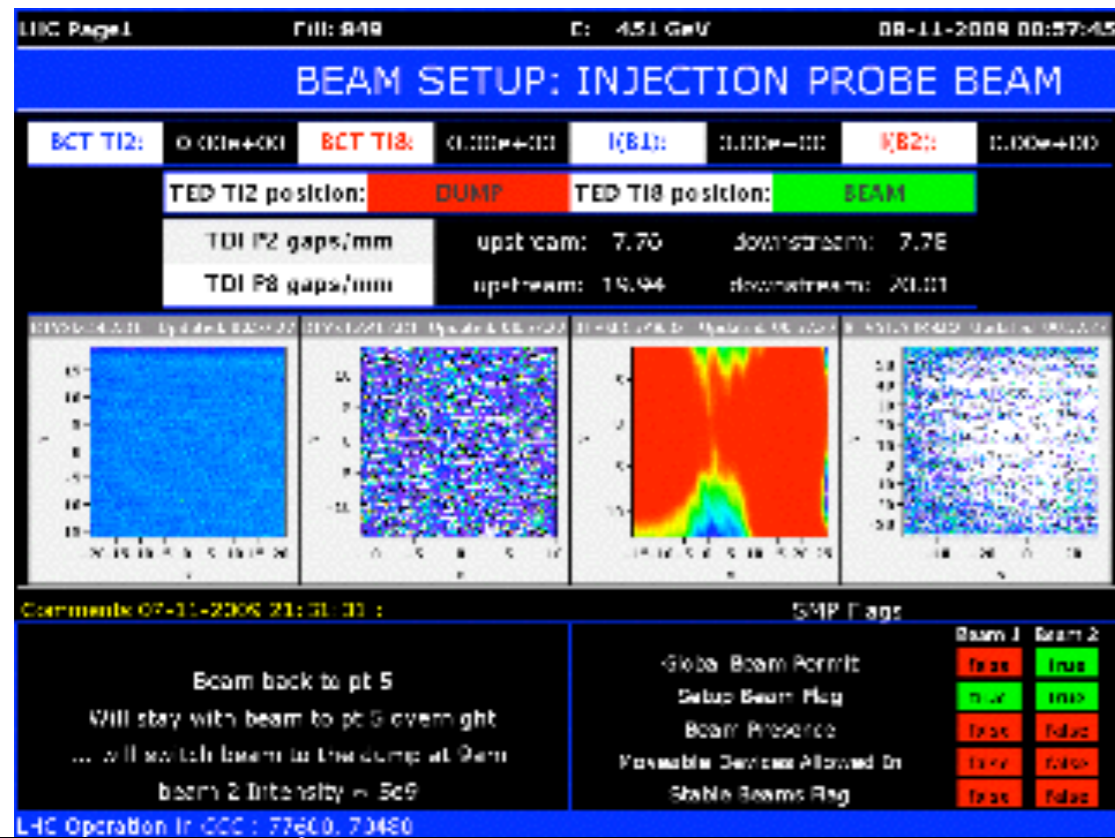


2009

Finalmente in funzione!

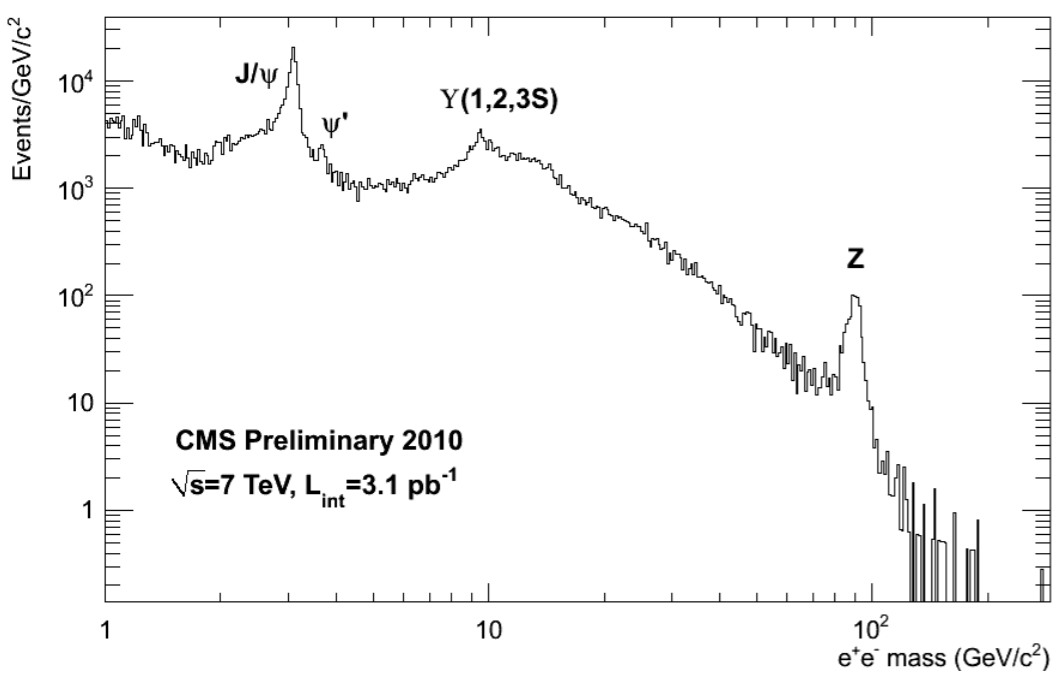


La prima risposta di CMS

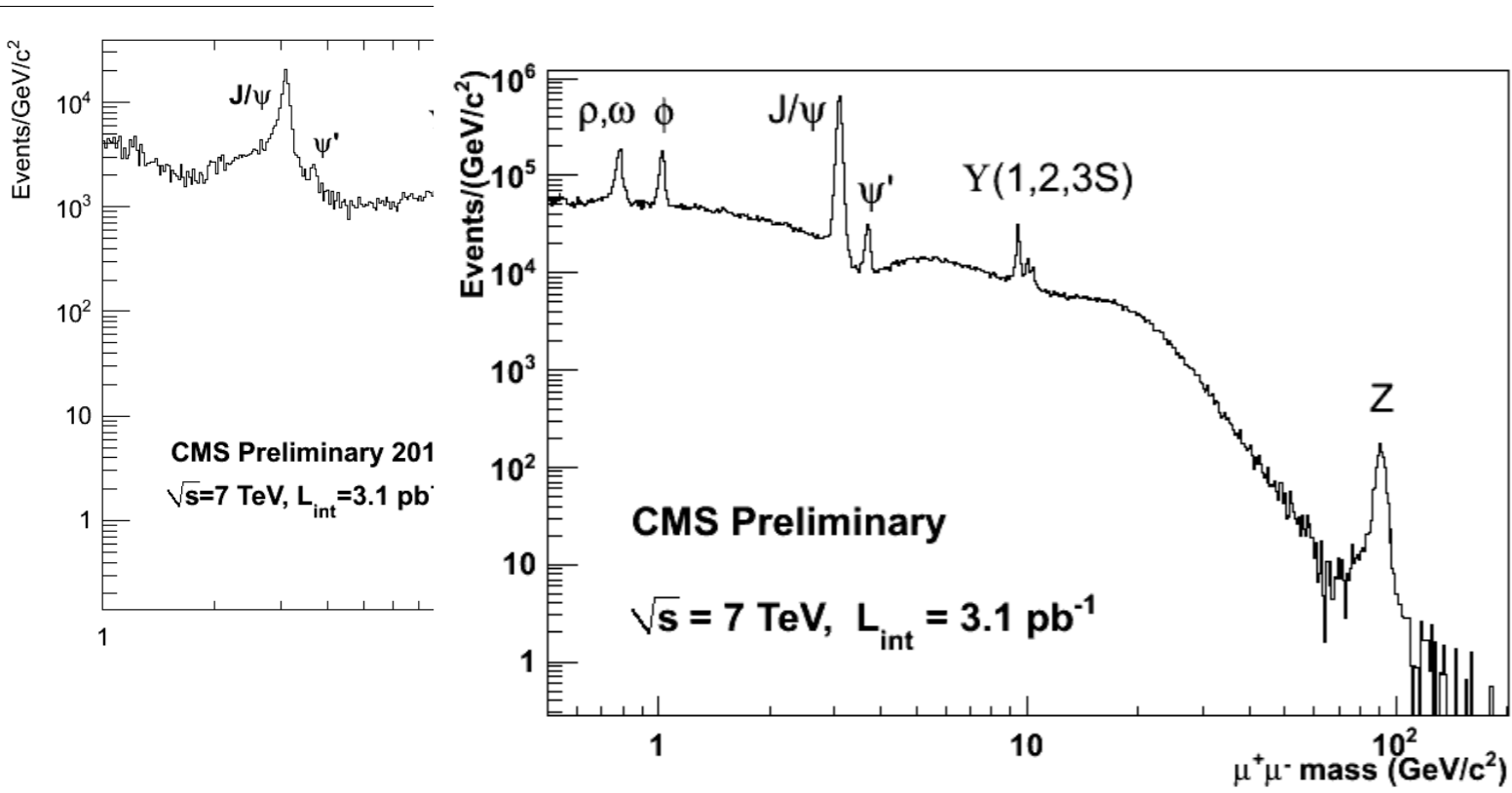


2010 - le “vecchie” misure

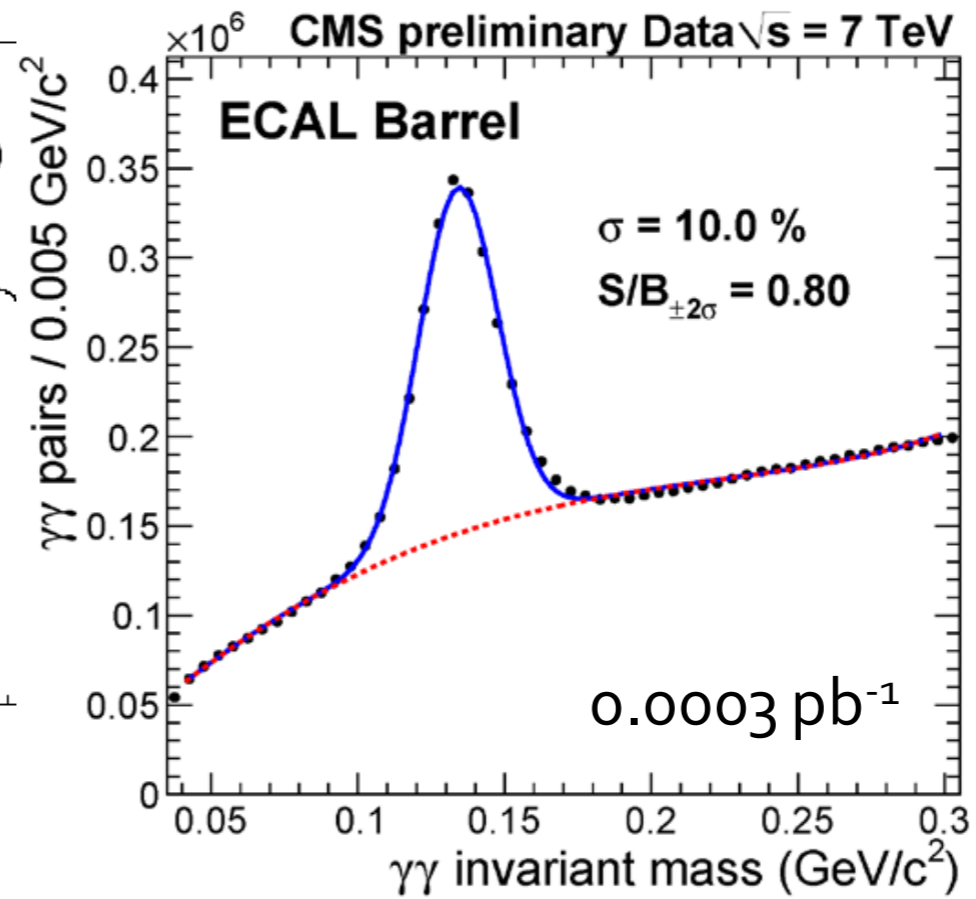
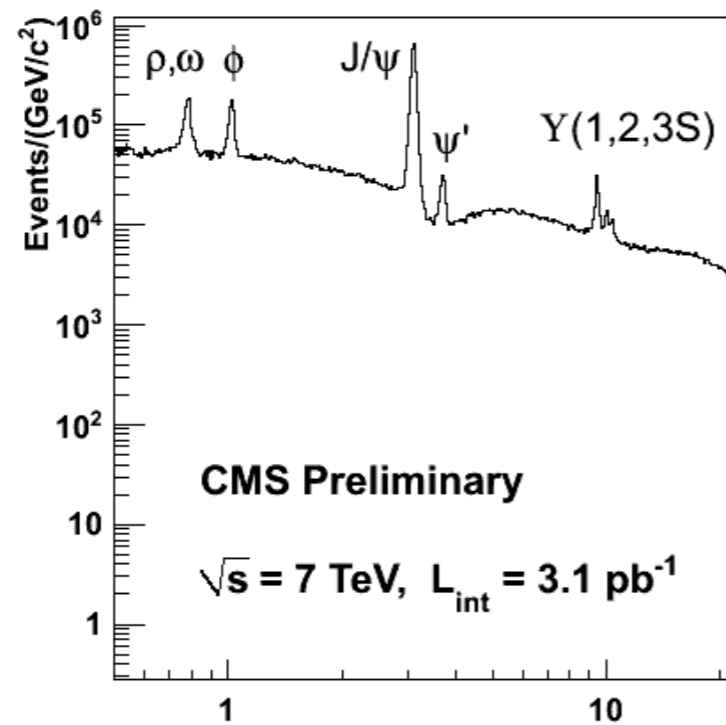
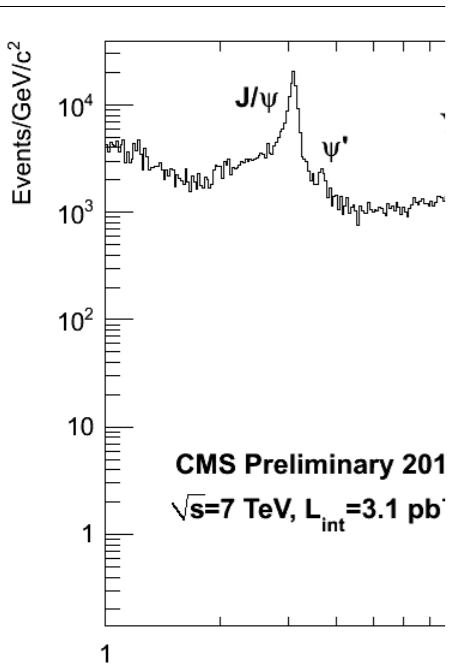
2010 - le “vecchie” misure



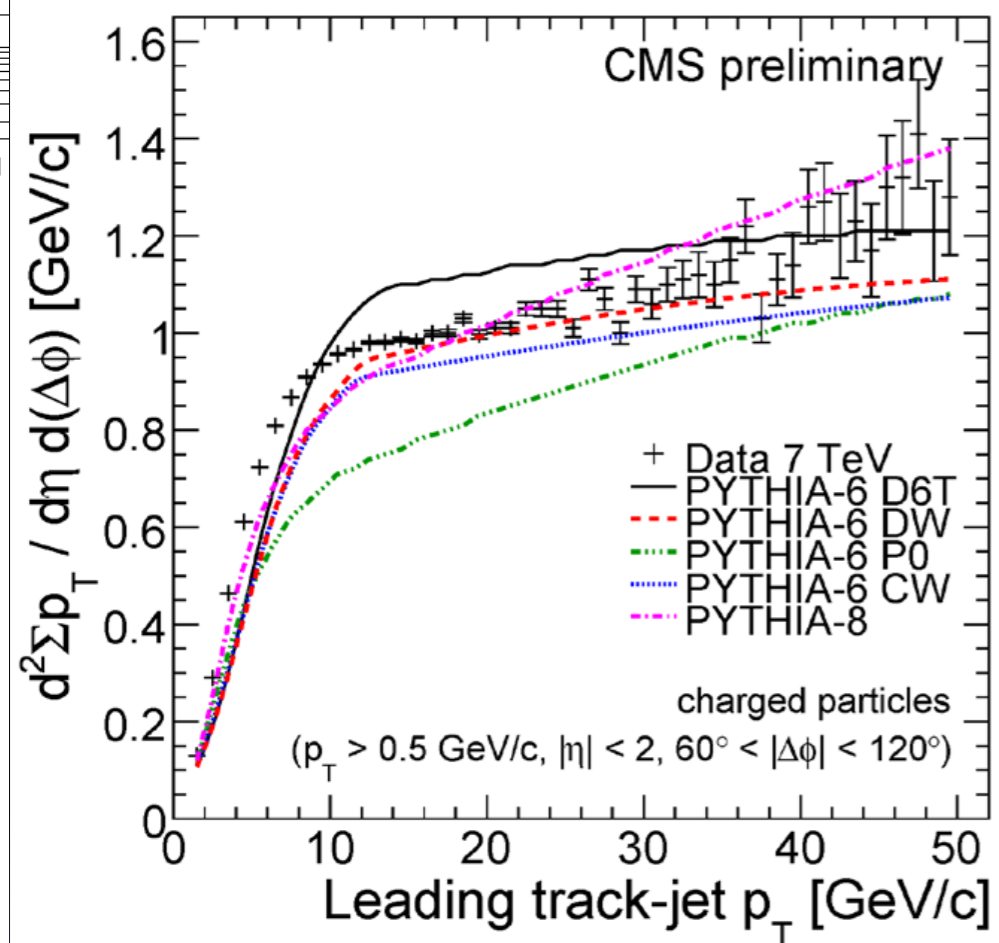
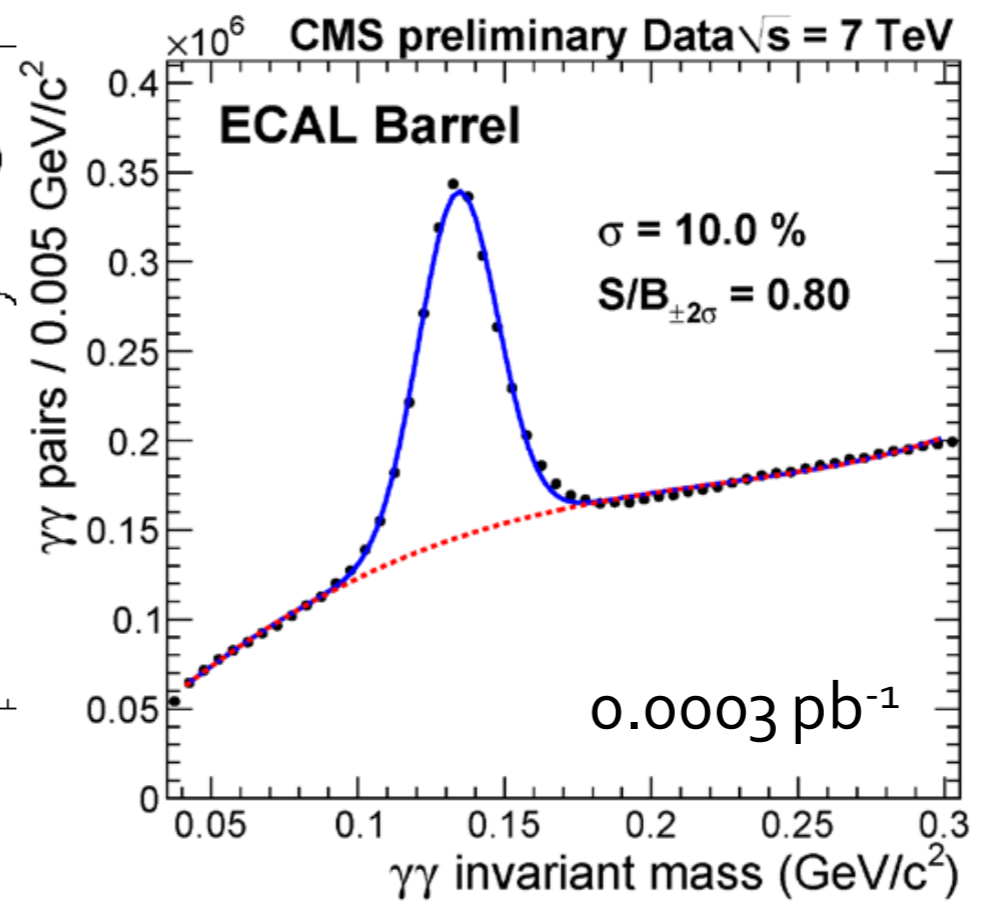
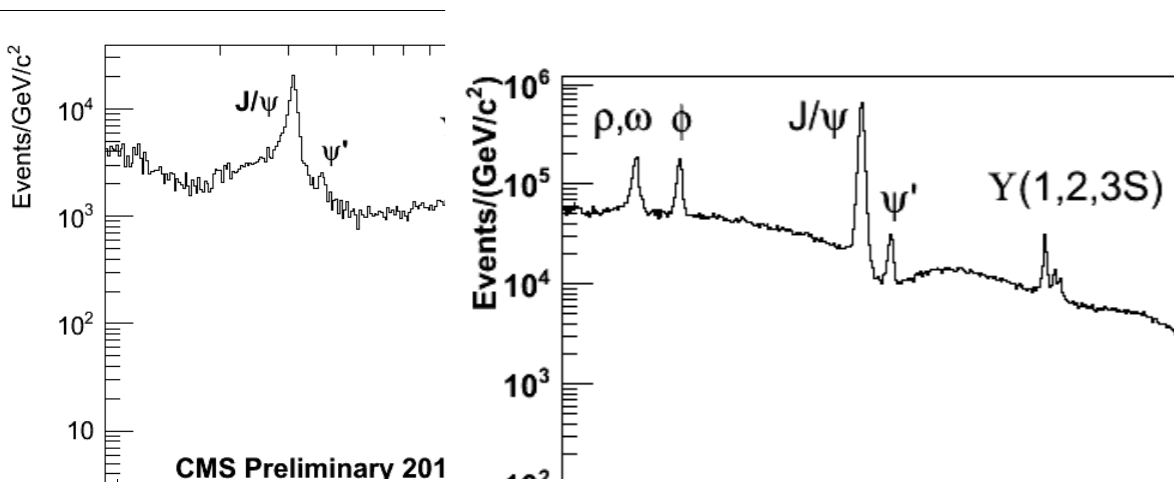
2010 - le "vecchie" misure



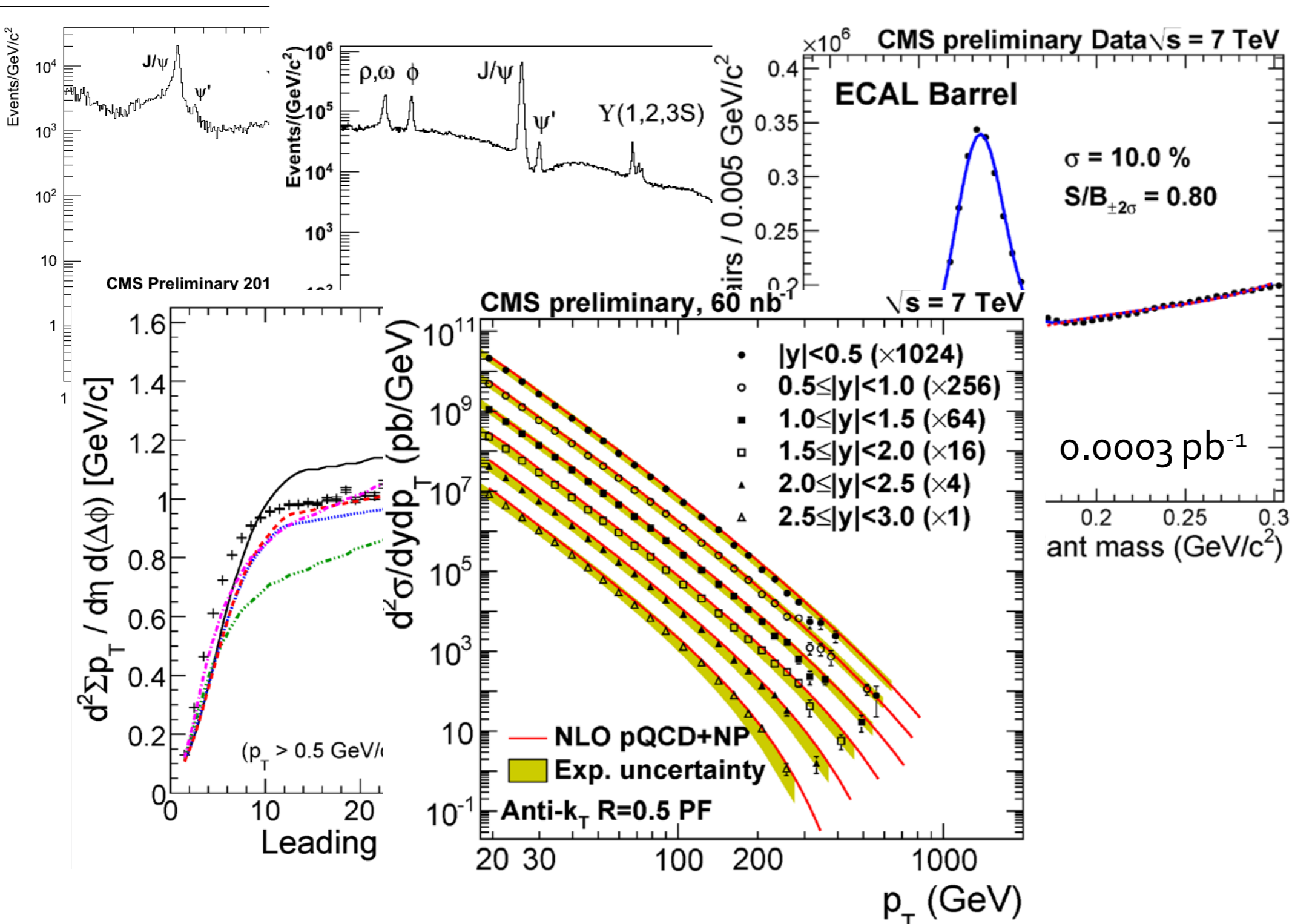
2010 - le "vecchie" misure



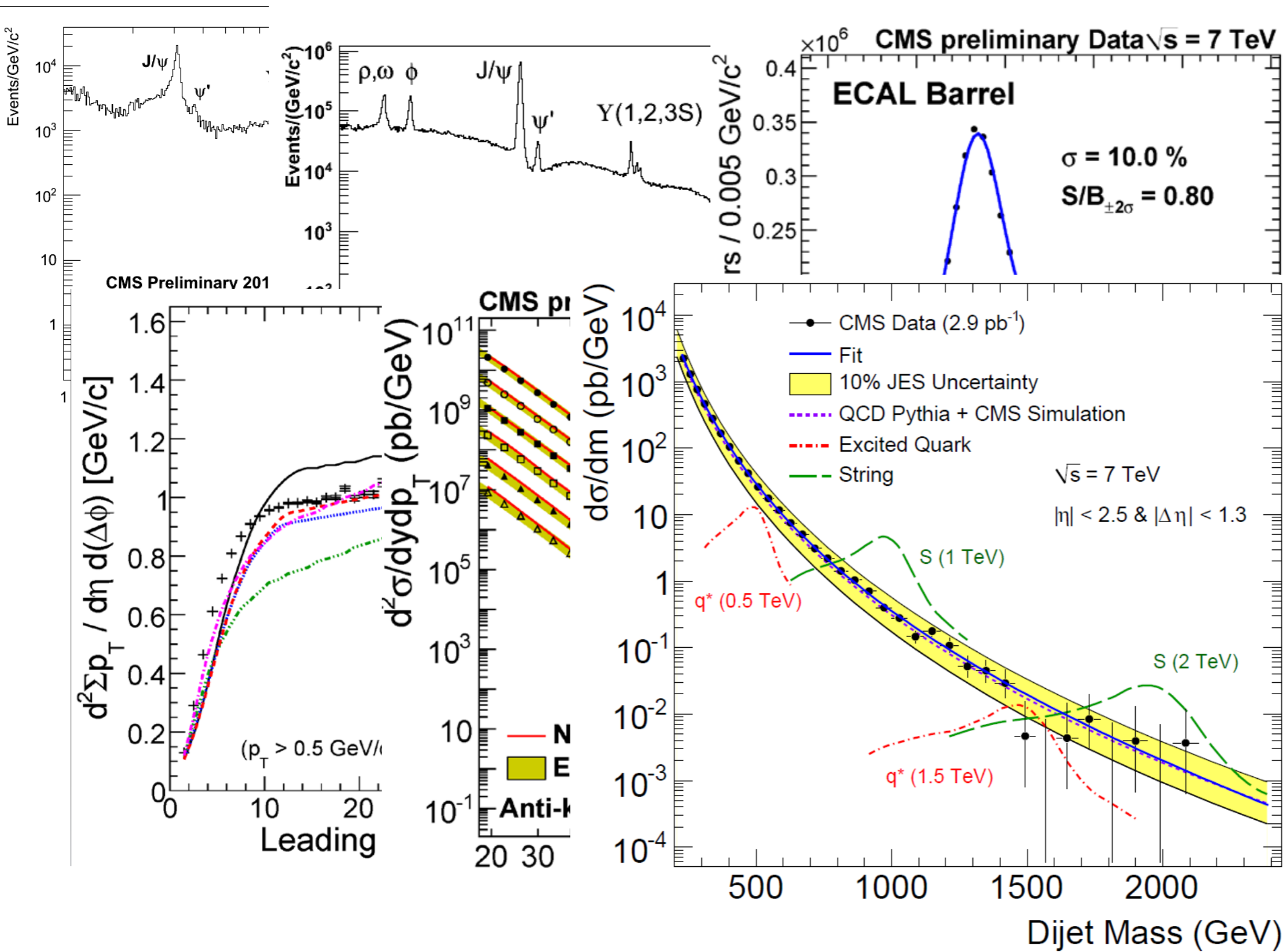
2010 - le "vecchie" misure



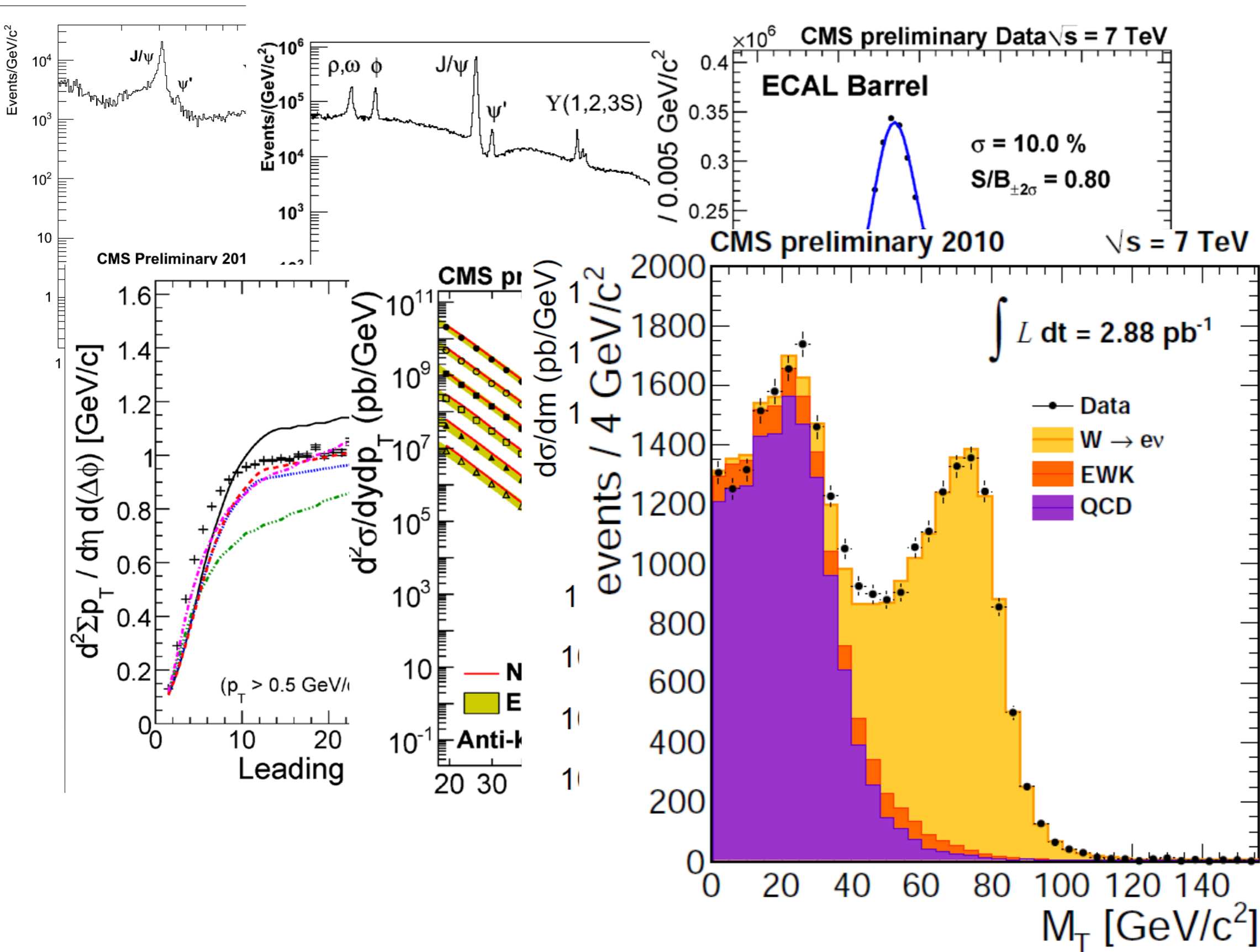
2010 - le "vecchie" misure



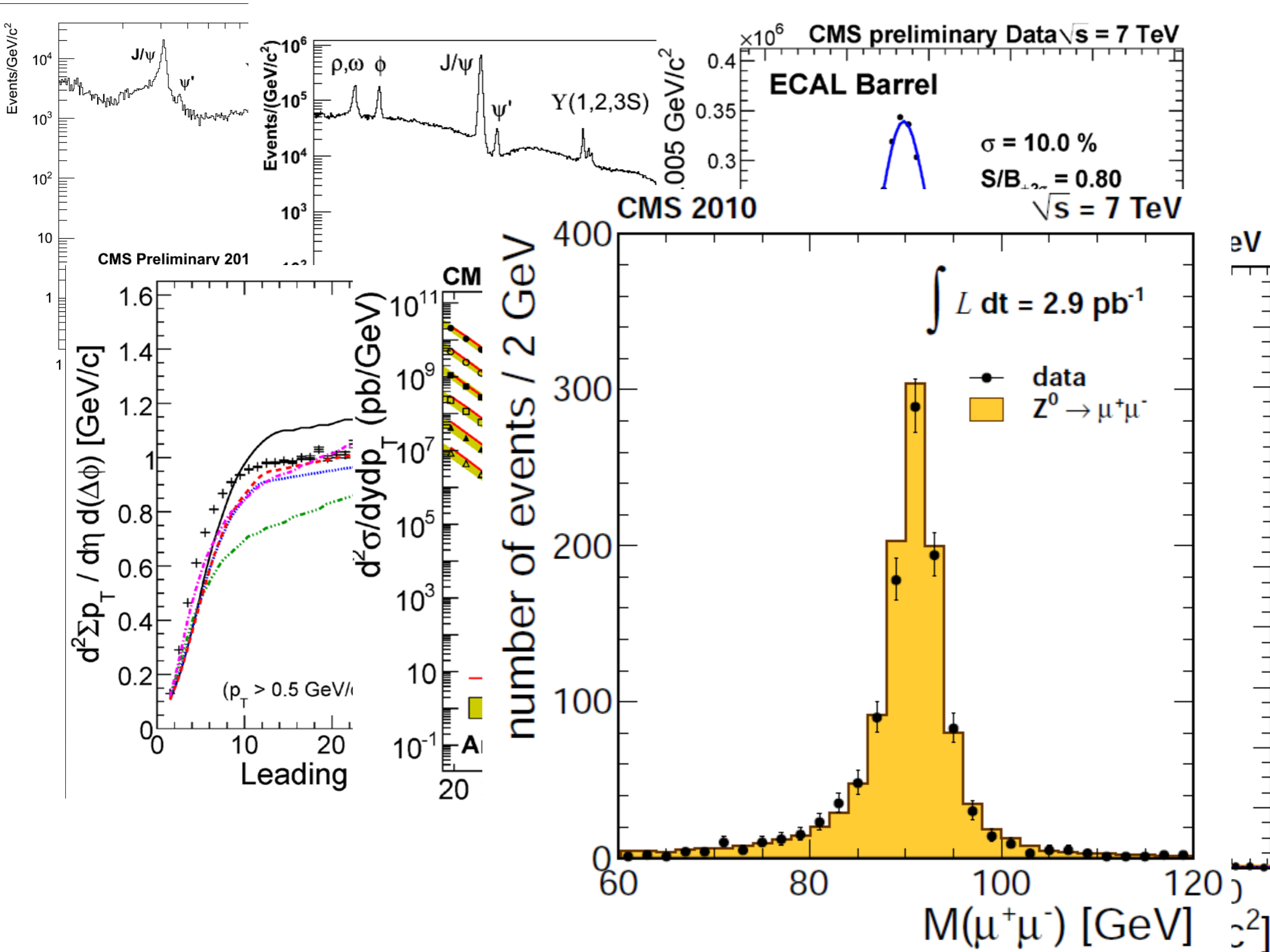
2010 - le "vecchie" misure



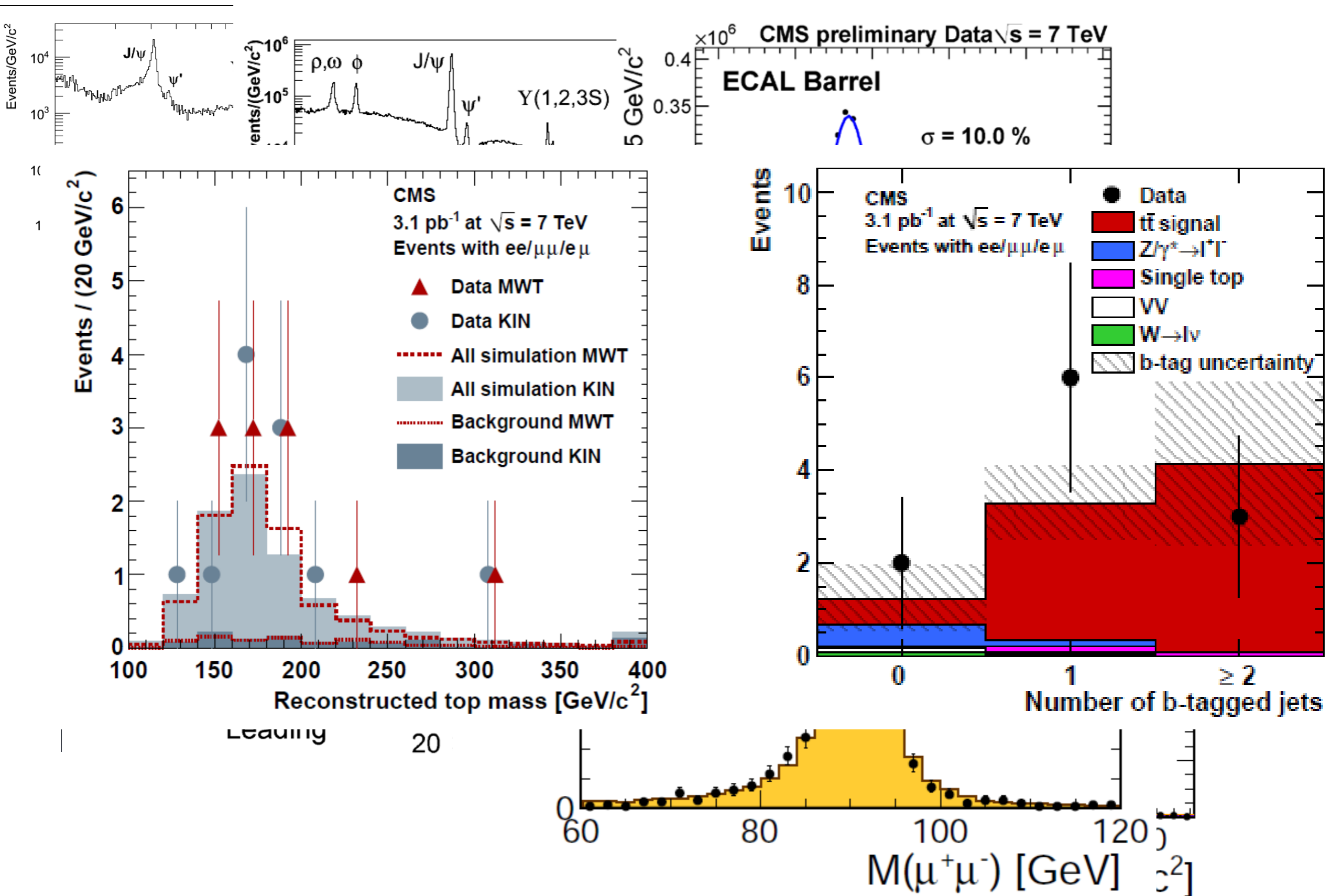
2010 - le "vecchie" misure



2010 - le "vecchie" misure

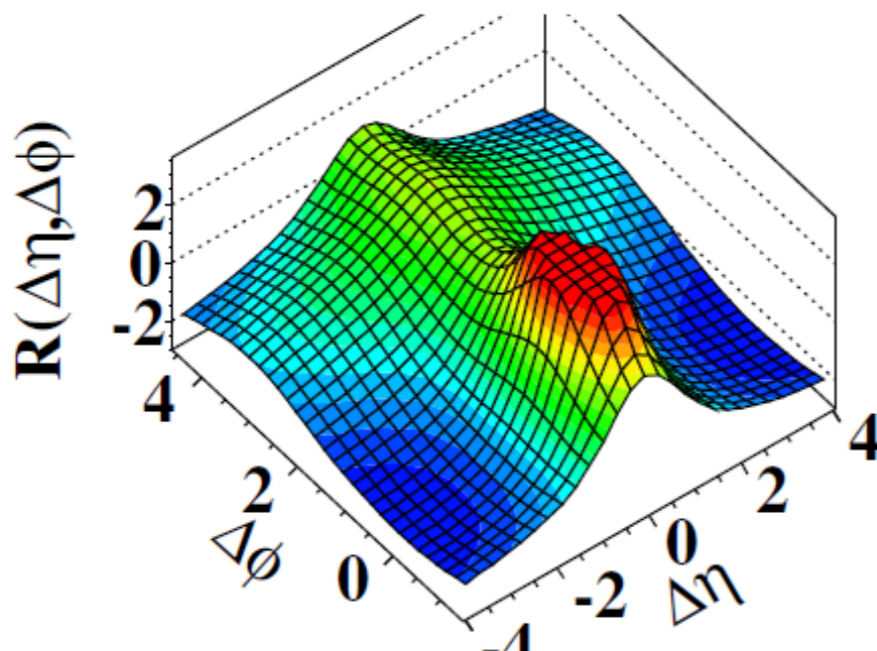


2010 - le "vecchie" misura



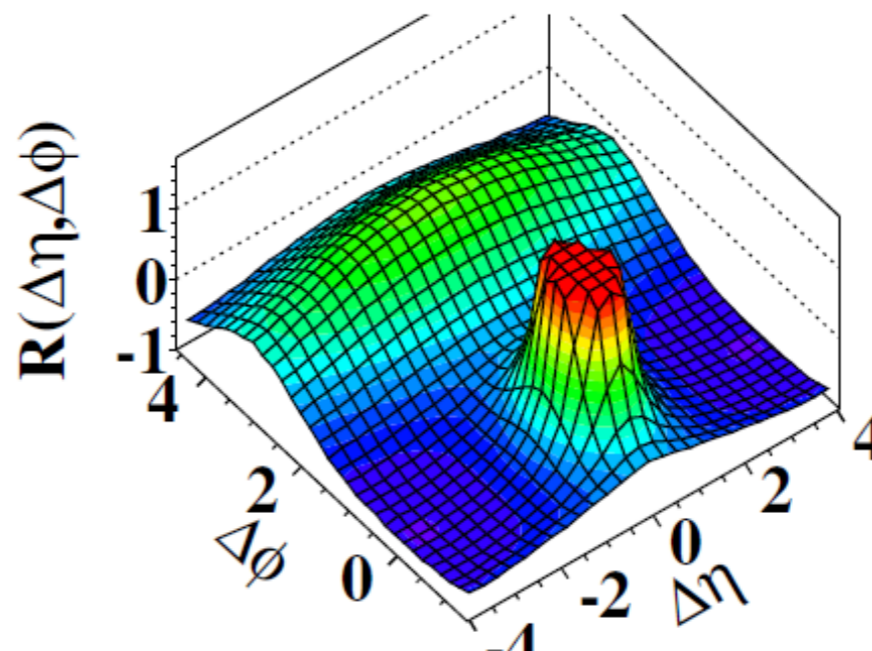
2010 - le prime scoperte

(a) CMS MinBias, $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$



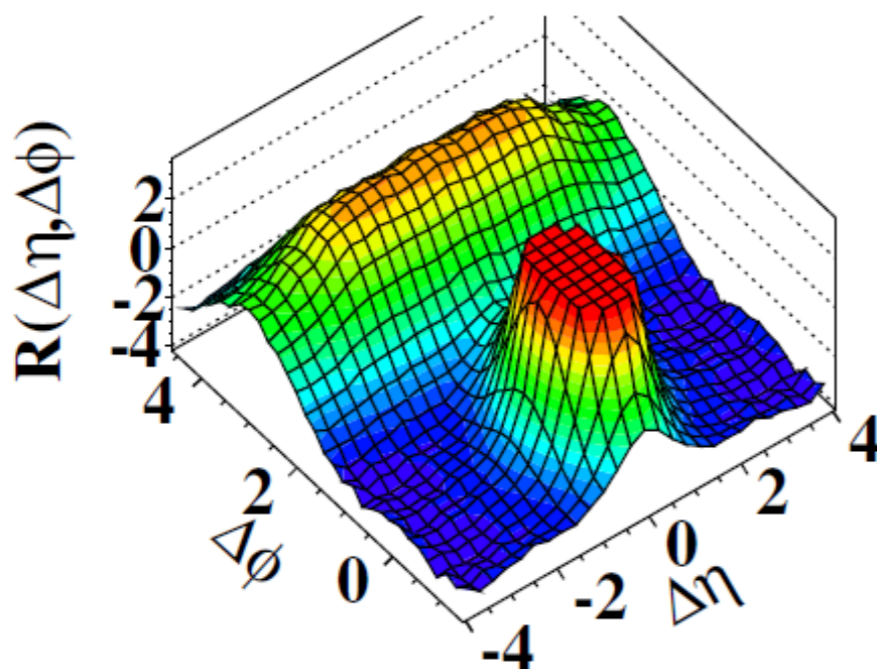
$p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$

(b) CMS MinBias, $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$

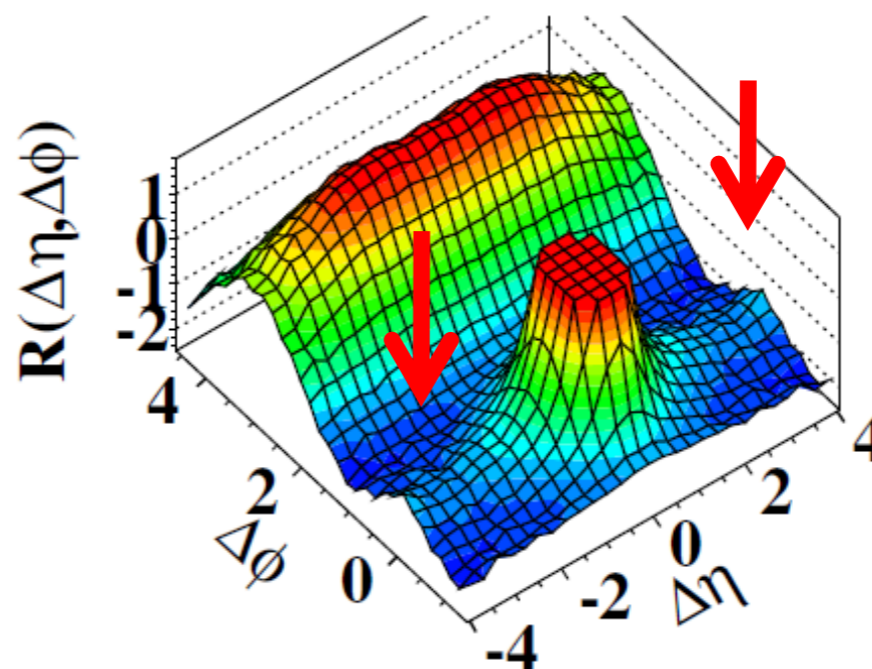


$1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$

(c) CMS $N \geq 110$, $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$



(d) CMS $N \geq 110$, $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$



2010 - i primi sospetti...

<http://www.youtube.com/user/CMSExperimentTV>

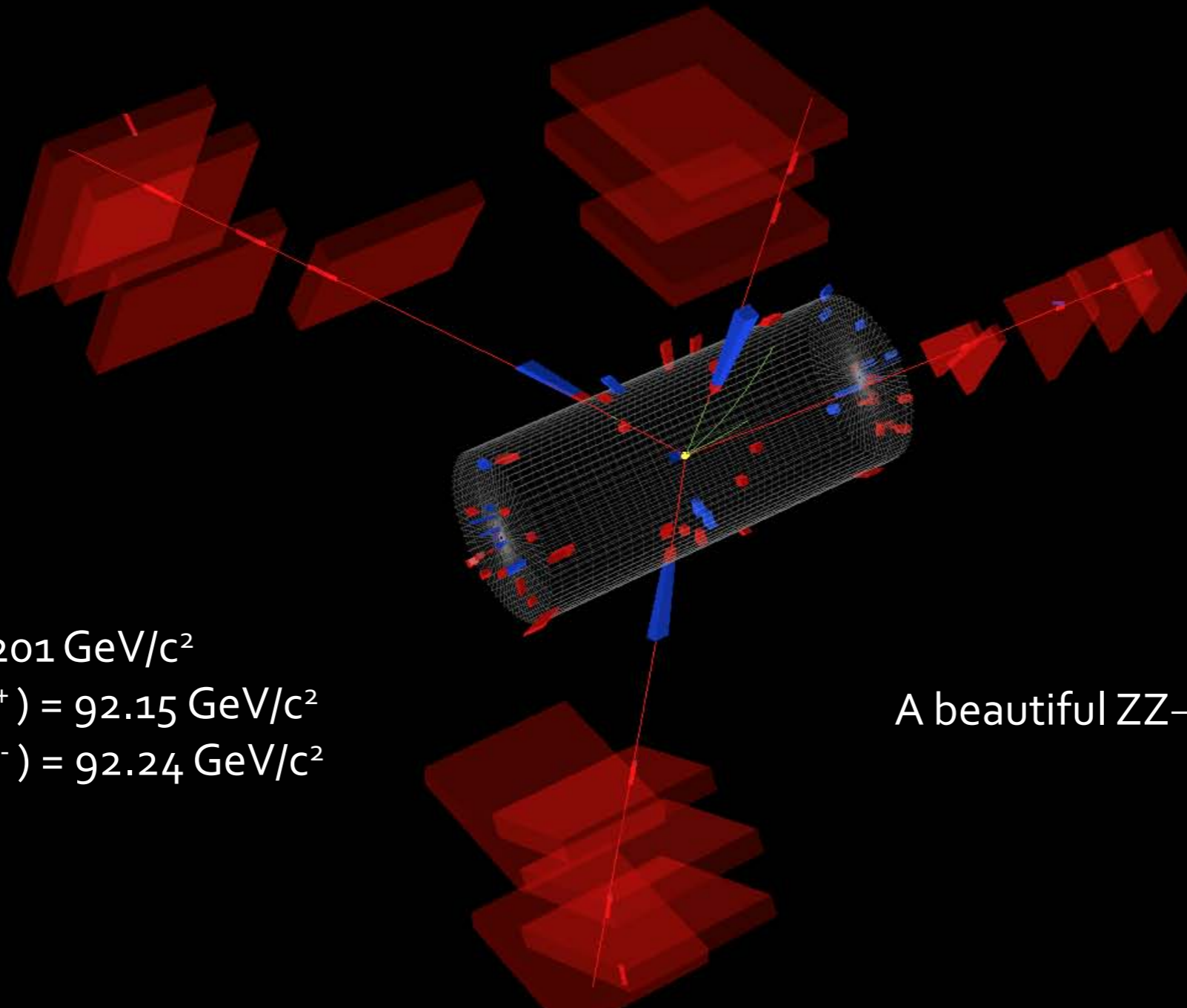
Recorded September 23, 2010
 $L \approx 7 \text{ pb}^{-1}$

$$M(4\mu) = 201 \text{ GeV}/c^2$$

$$M(\mu_1^-, \mu_2^+) = 92.15 \text{ GeV}/c^2$$

$$M(\mu_3^+, \mu_4^-) = 92.24 \text{ GeV}/c^2$$

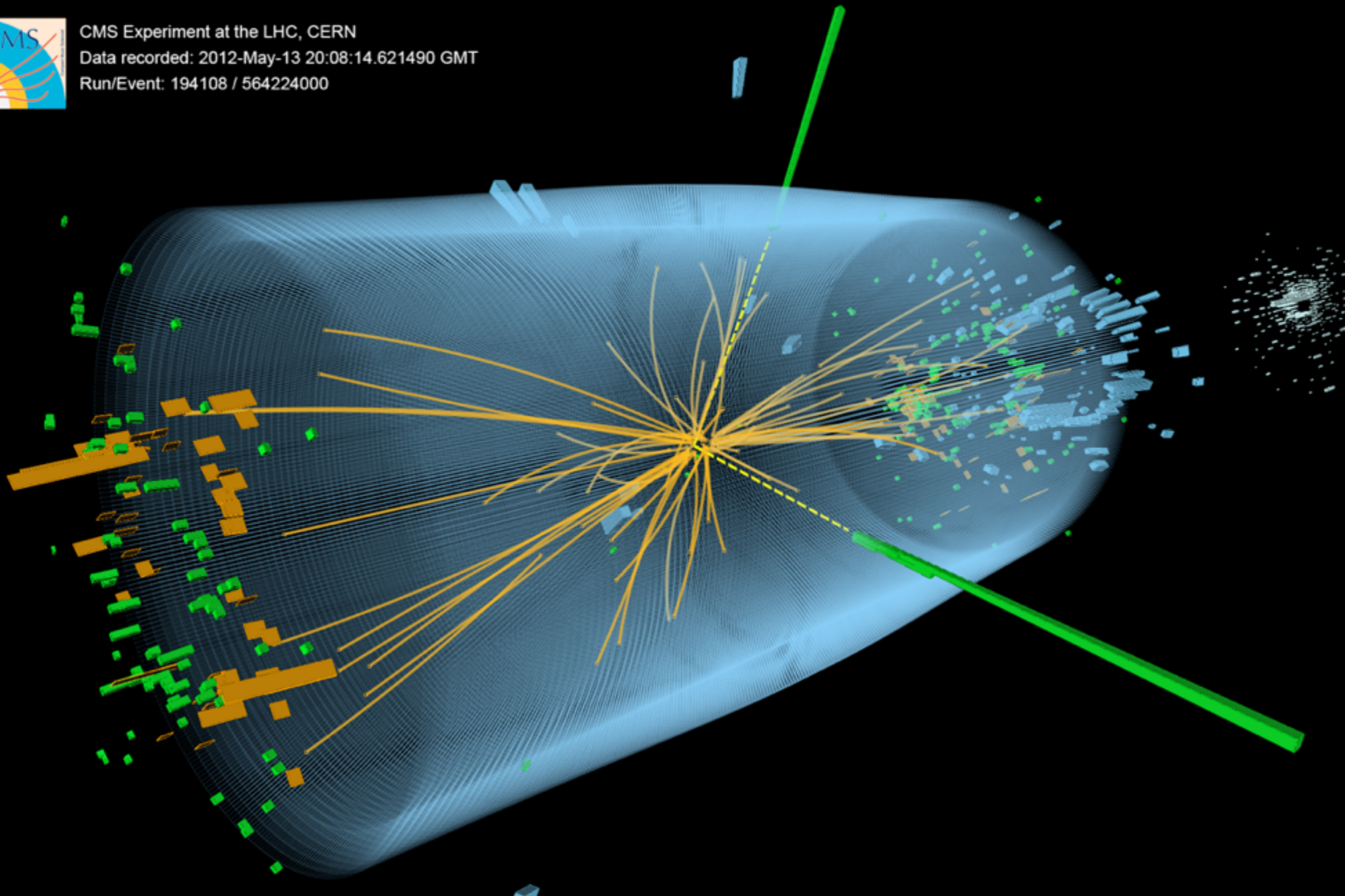
A beautiful $ZZ \rightarrow 4\mu$ candidate !



2012 - nuovi segnali



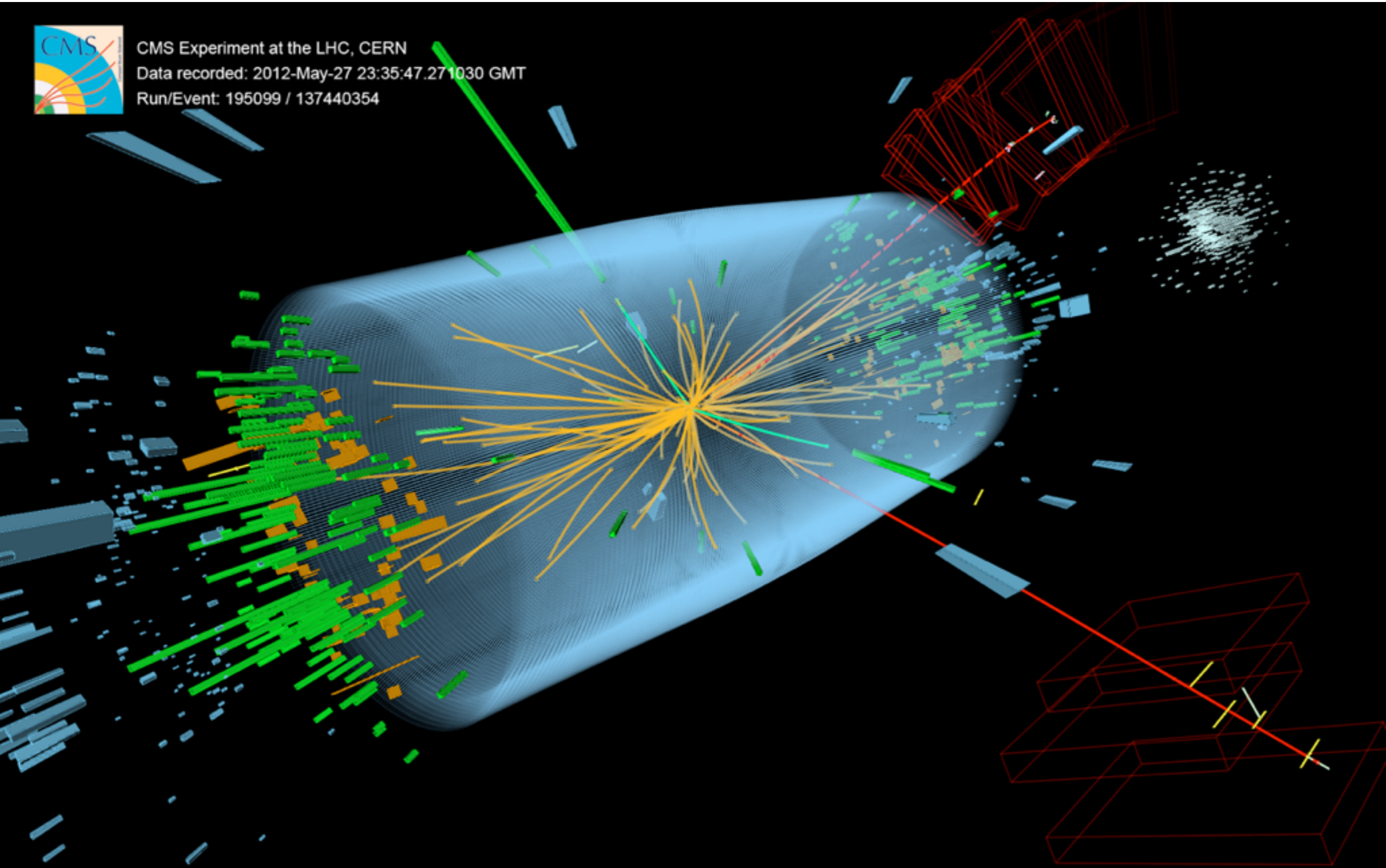
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



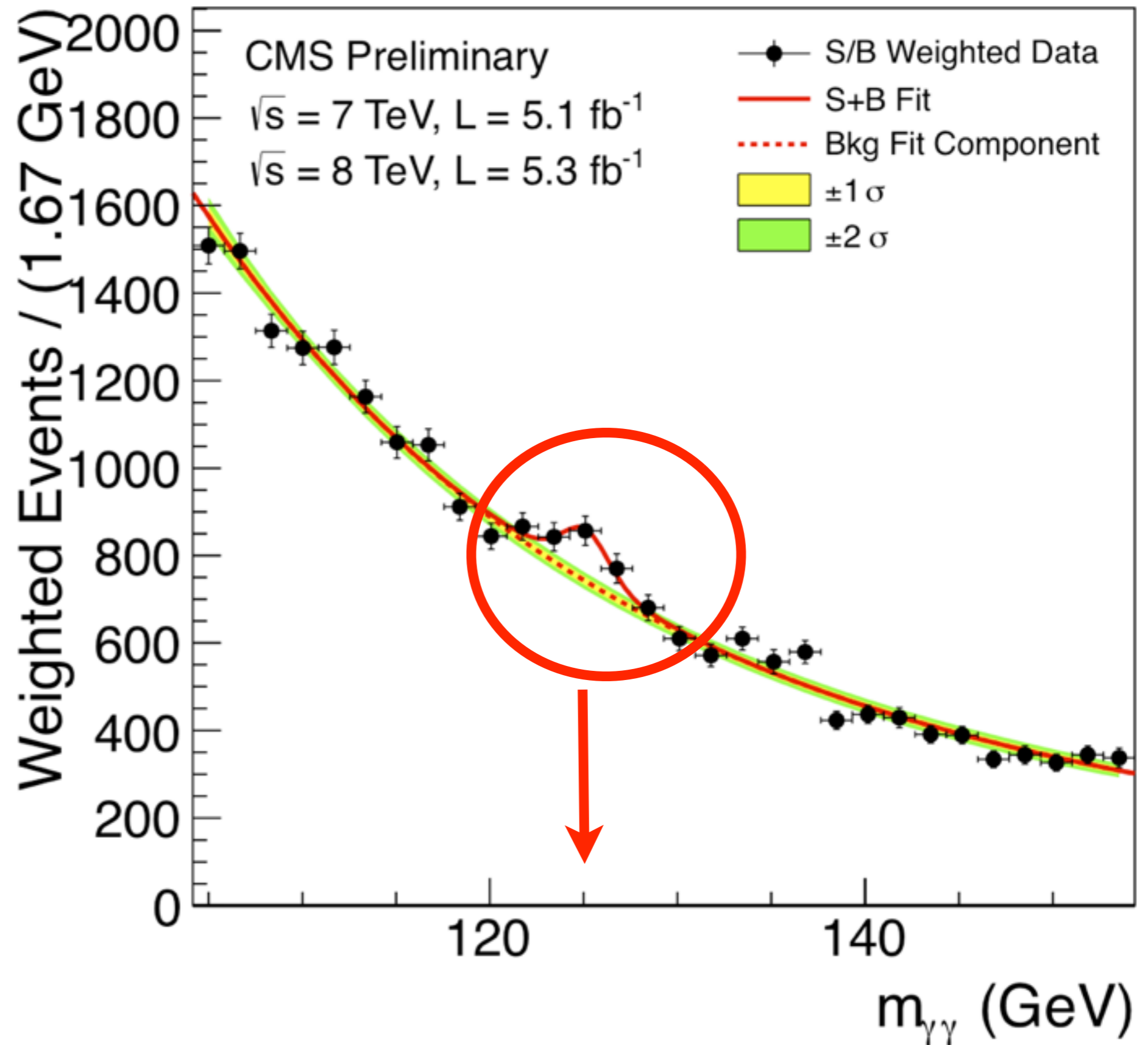
2012 - nuovi segnali



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354



2012 - Higgs - La scoperta



2013 - Higgs - II Nobel



Ma...

1) Sperimentalmente:

+ la massa

+ i neutrini (perchè i neutrini hanno massa?)

+ la materia oscura

+ l'asimmetria barionica dell'universo

materia e non di anti-materia (universo di

2) Teoricamente:

+ la gerarchia delle masse dal quadro formale - (e quindi la massa)

+ la gerarchia della gerarchia ($m^2 \propto \lambda^2$) - sempre la massa...

Ricordatevi queste domande

...il modello standard **non sembra completo**

sono necessarie strutture aggiuntive ?

Ma...

1) Sperimentalmente:

+ la massa **OK! (Higgs)**

+ i neutrini (perchè i neutrini hanno massa ? perchè così piccola?)

+ la materia oscura

+ l'asimmetria barionica dell'universo (perche' un universo di materia e non di anti-materia?)

2) Teoricamente:

+ la **gravita'** resta fuori dal quadro formale - (e quindi la massa)

+ Il problema della gerarchia ($m^2 \propto \lambda^2$) - **sempre la massa...**

...il modello standard **non sembra completo**
sono necessarie strutture aggiuntive ?

massa, gravità, materia oscura...gravità quantistica

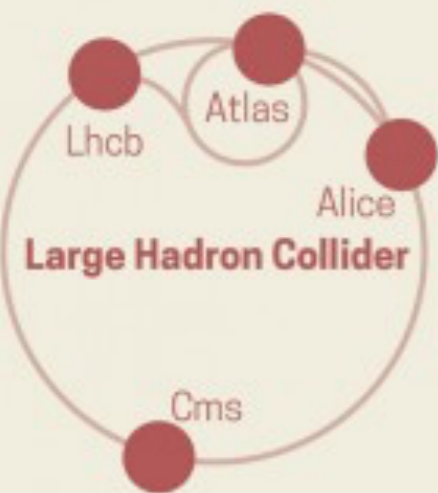
Sondare la struttura dello spazio-tempo



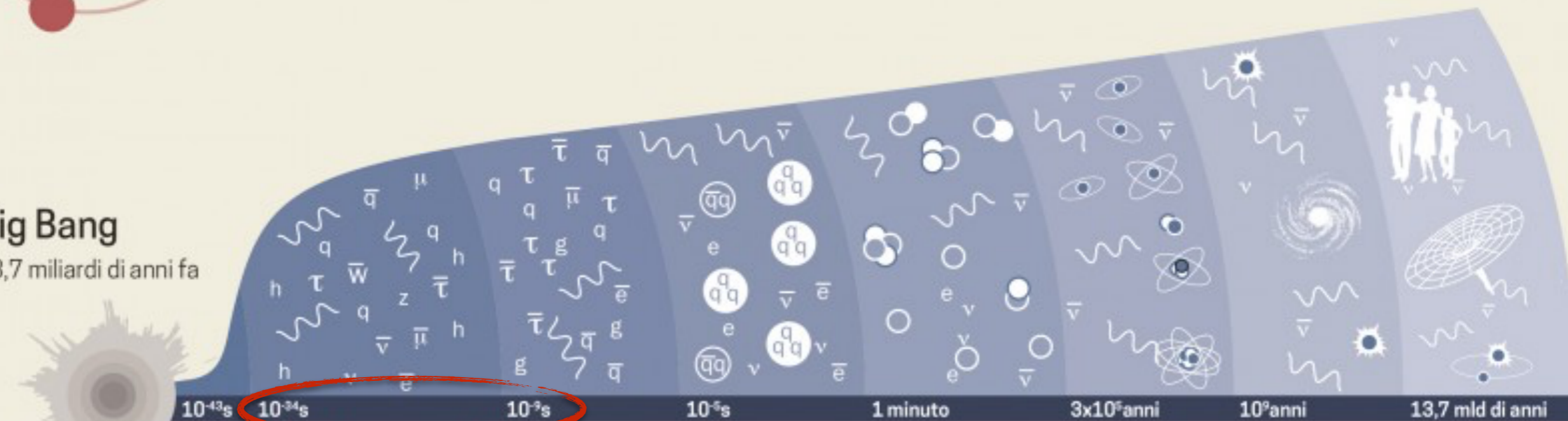
2015/2025 - e ora ?

LHC RUN2: NUOVI ORIZZONTI

La scoperta del bosone di Higgs è stato il primo capitolo della storia di LHC. Grazie ai lavori effettuati, LHC opererà a un'energia quasi doppia (13 TeV) rispetto a quella del Run 1, producendo collisioni ad altissima energia. La ripartenza della macchina (Run 2) segna così l'inizio di un'altra avventura alla scoperta di nuovi orizzonti della fisica.



Big Bang
13,7 miliardi di anni fa



PLASMA DI QUARK E GLUONI
BOSONE DI HIGGS
SUPERSIMMETRIA, EXTRA DIMENSIONI

ASIMMETRIA TRA MATERIA E ANTIMATERIA
MATERIA OSCURA

MATERIA OSCURA
 10^{-30} s
dopo il Big Bang

**ASIMMETRIA
TRA MATERIA E
ANTIMATERIA**
 10^{-28} s
dopo il Big Bang

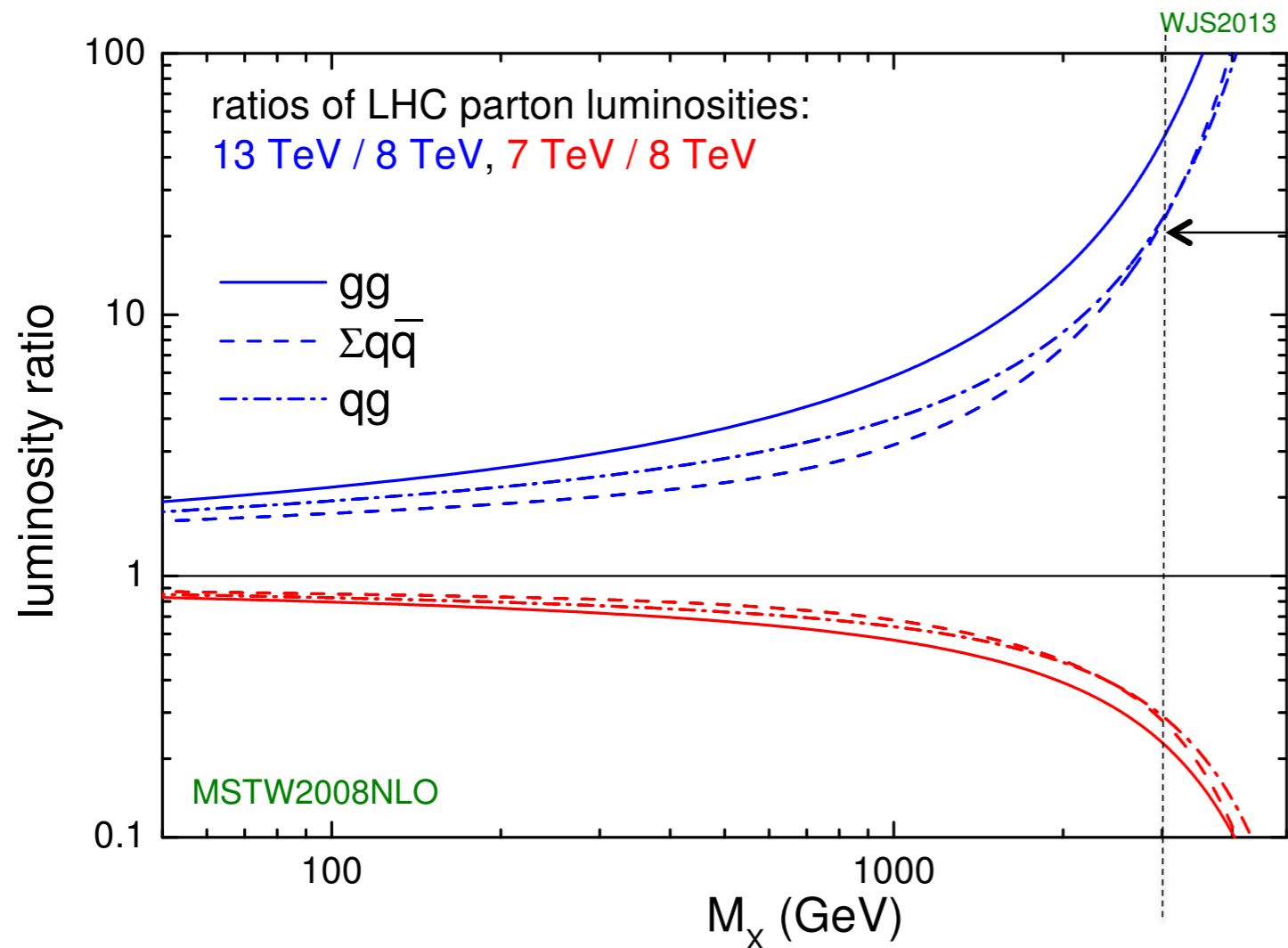
SUPERSIMMETRIA
 10^{-12} s
dopo il Big Bang

EXTRA DIMENSIONI
 10^{-12} s
dopo il Big Bang

BOSONE DI HIGGS
 10^{-11} s dopo il Big Bang

**PLASMA DI
QUARK E GLUONI**
 10^{-9} s
dopo il Big Bang

Ricerca di nuova Fisica - maggior energia



Ratio of 13 TeV / 8 TeV

Cross sections:

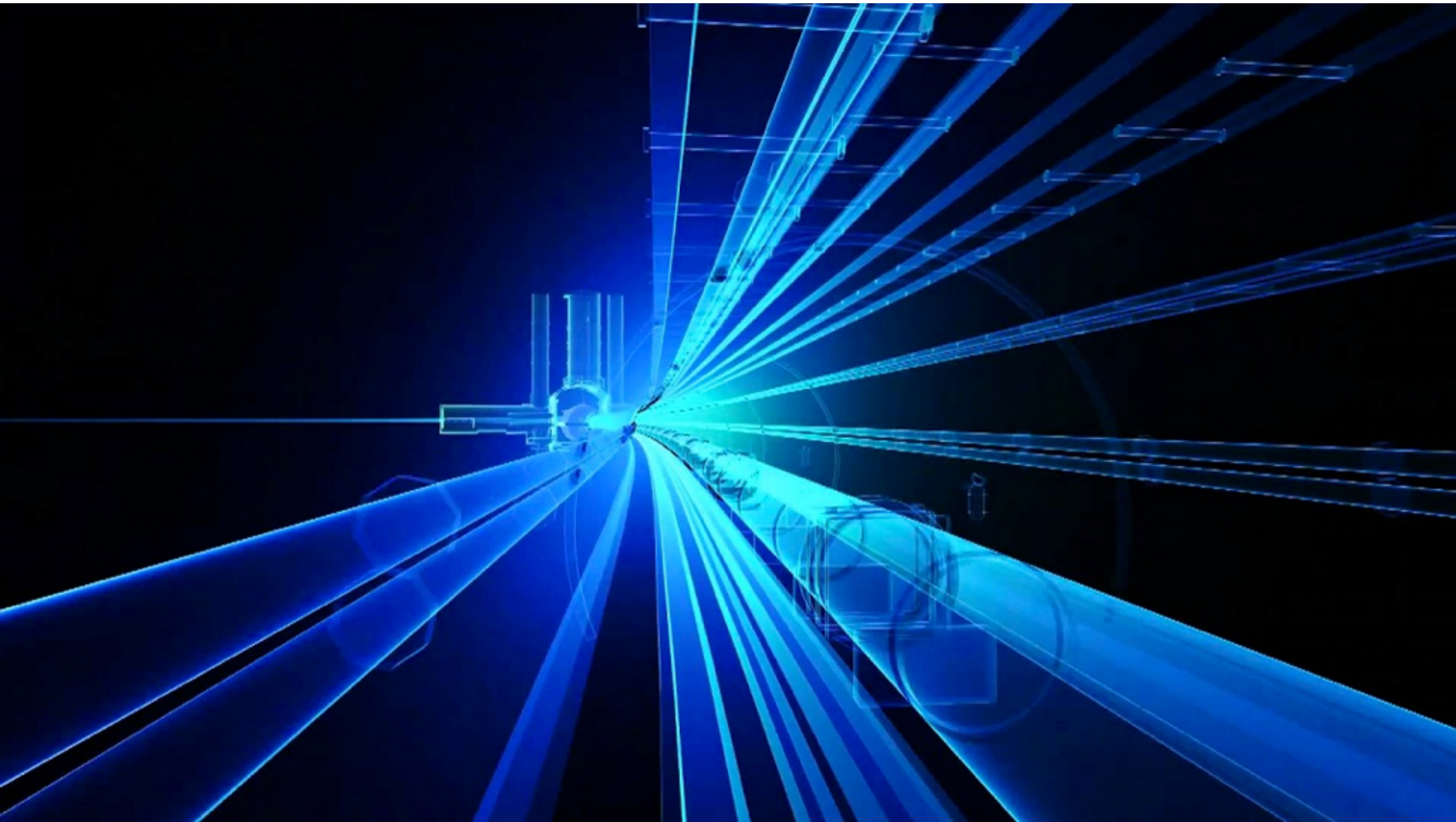
- Z' at 3 TeV: **20**
- q* at 4 TeV: **56**
- QBH at 5 TeV: **370**
- QBH at 6 TeV: **9000**

maggior energia:

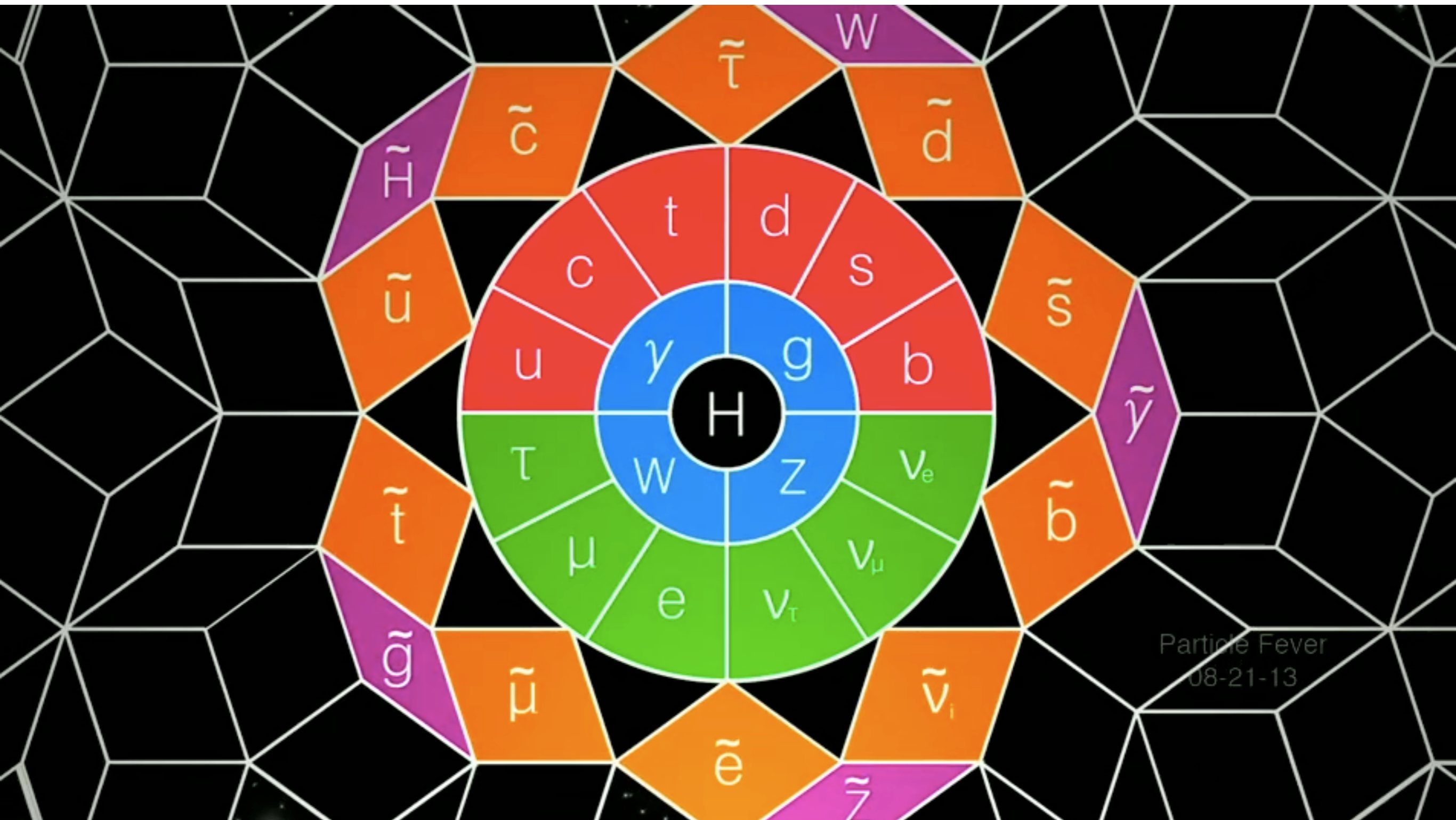
1) fenomeni rari diventano più frequenti

2) possiamo produrre particelle più “pesanti”

Maggior energia - LHC RunII - 13 TeV



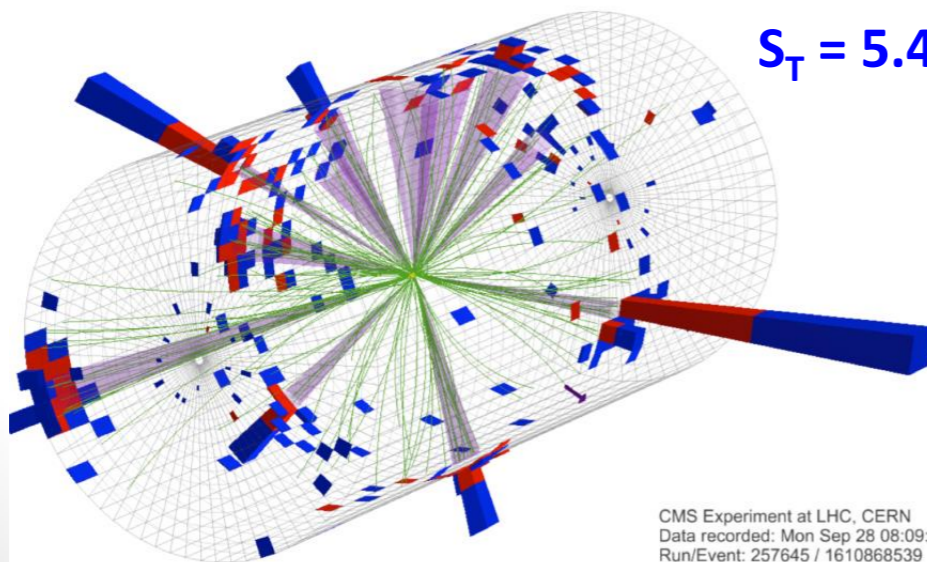
Ricerca di SuperSimmetria (SUSY)



Particle Fever
08-21-13

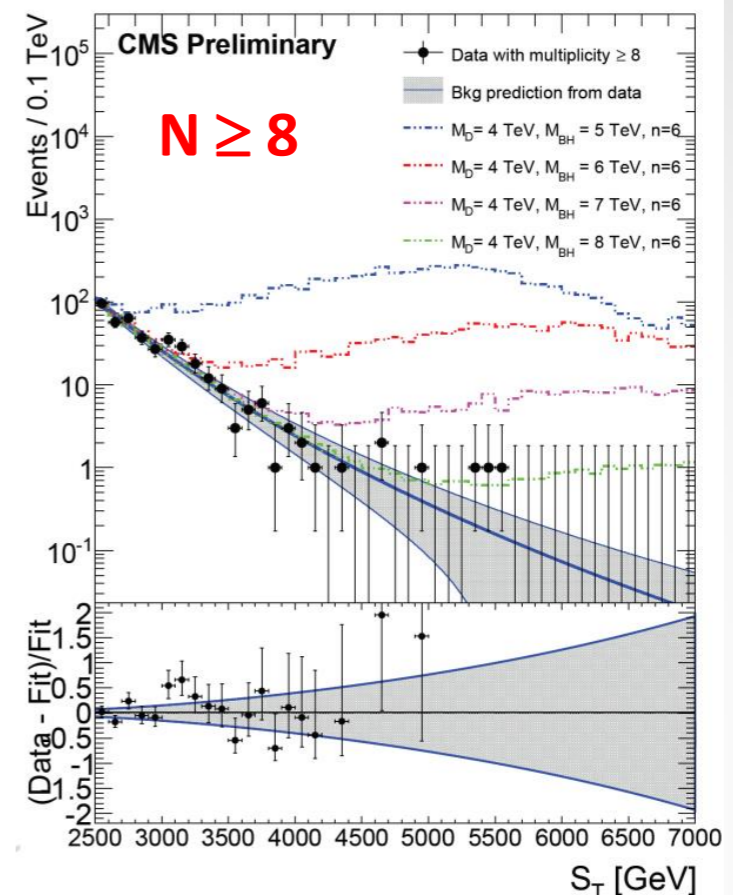
Search for black holes

- Search for semi-classical and quantum black holes
- Analysis binned in number of objects (jets, leptons, photons) and S_T
- Model-independent limits set as function of (N, S_T) , **mass limits are 8 TeV for QBH and 8.7 TeV for semi-classical** (Run 1: 5.5-6.0 TeV)

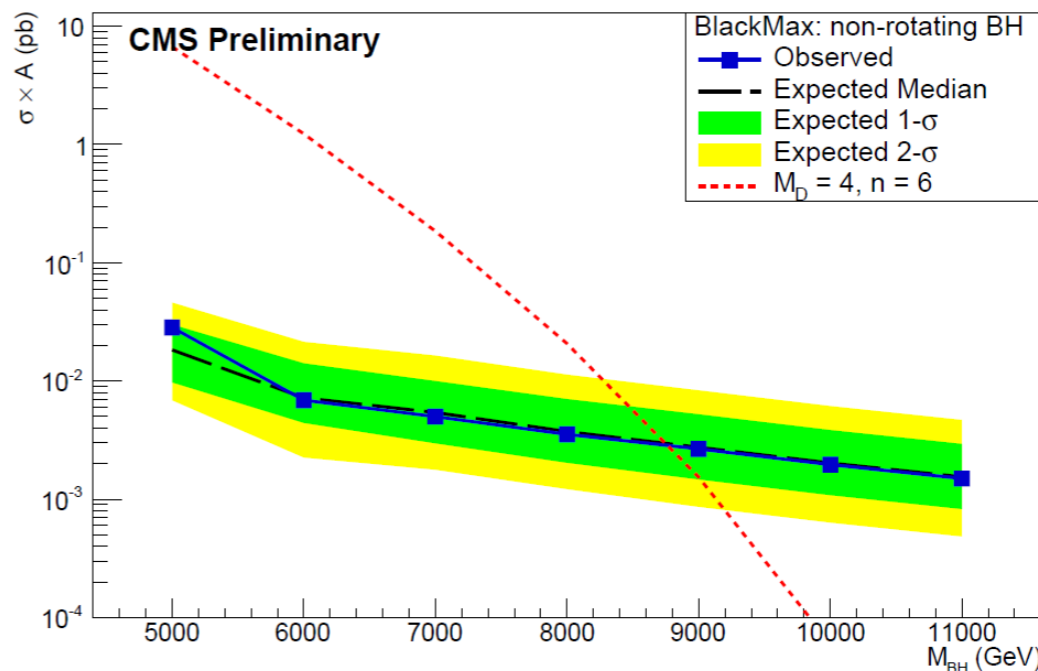


$N = 12$
 $S_T = 5.4 \text{ TeV}$

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Sep 28 08:09:43 2015 CEST
Run/Event: 257645 / 1610868539
Lumi section: 1073



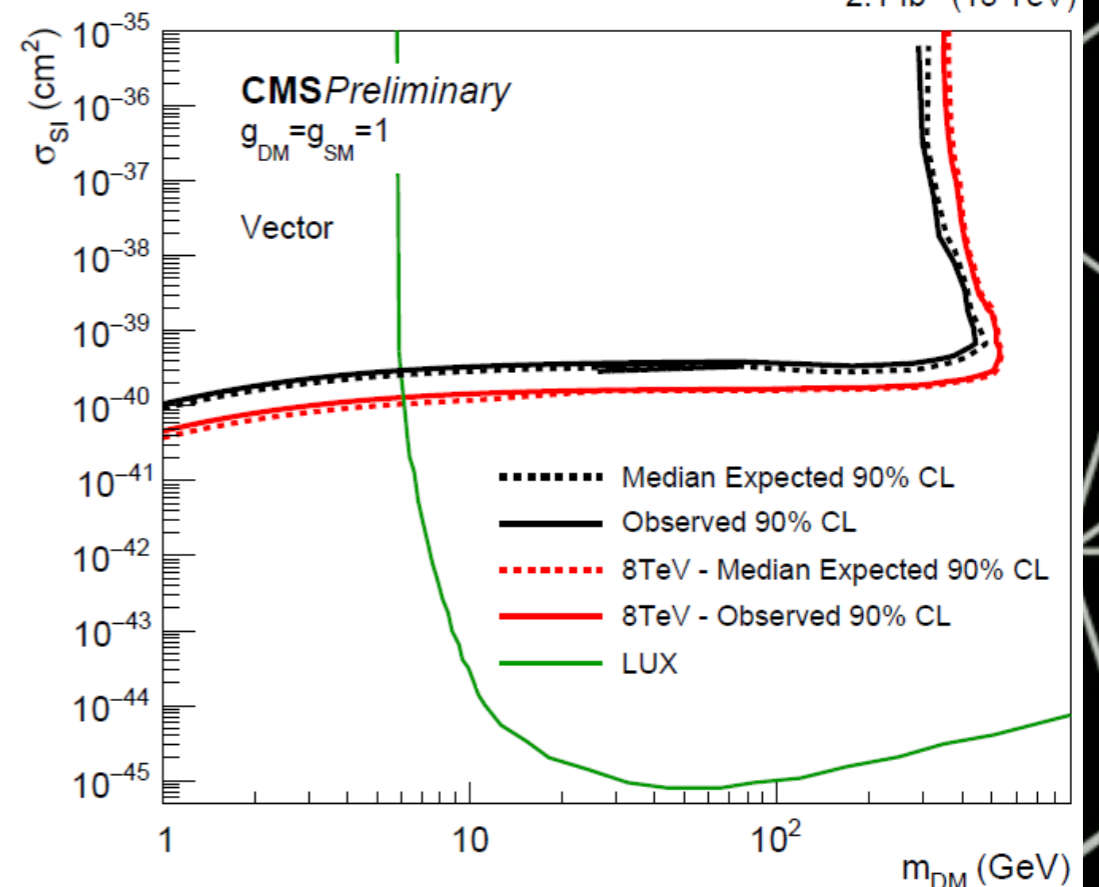
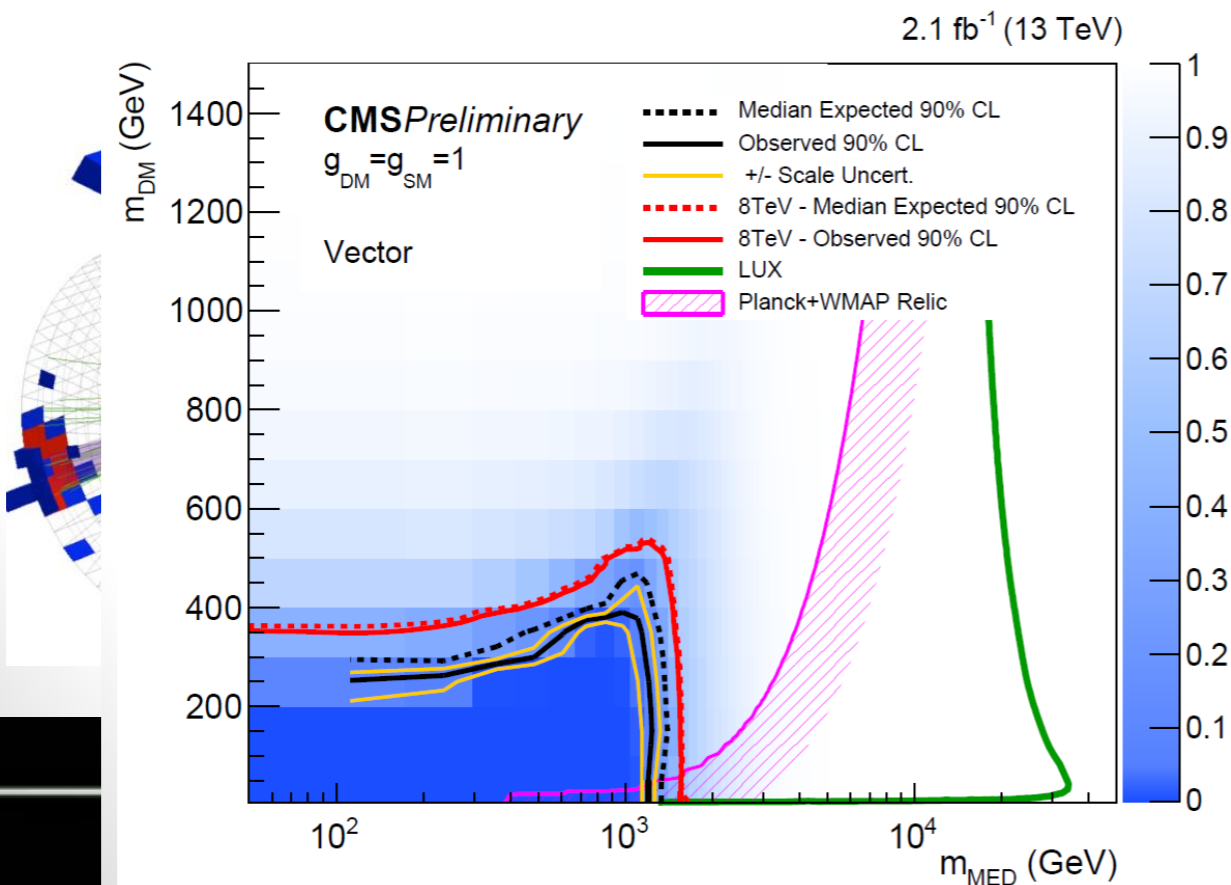
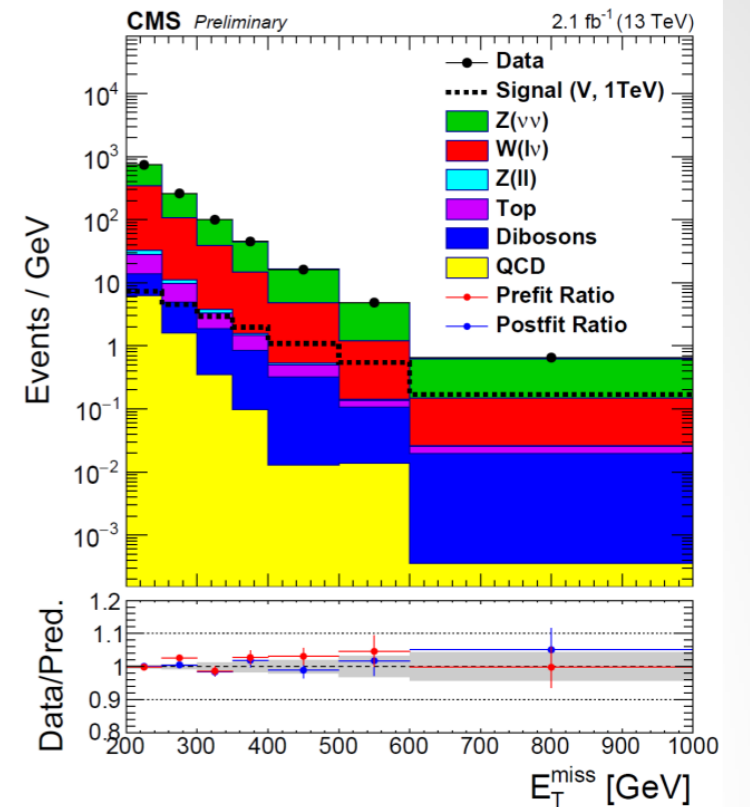
2.2 fb⁻¹ (13 TeV)



EXO-15-003

Search for dark matter

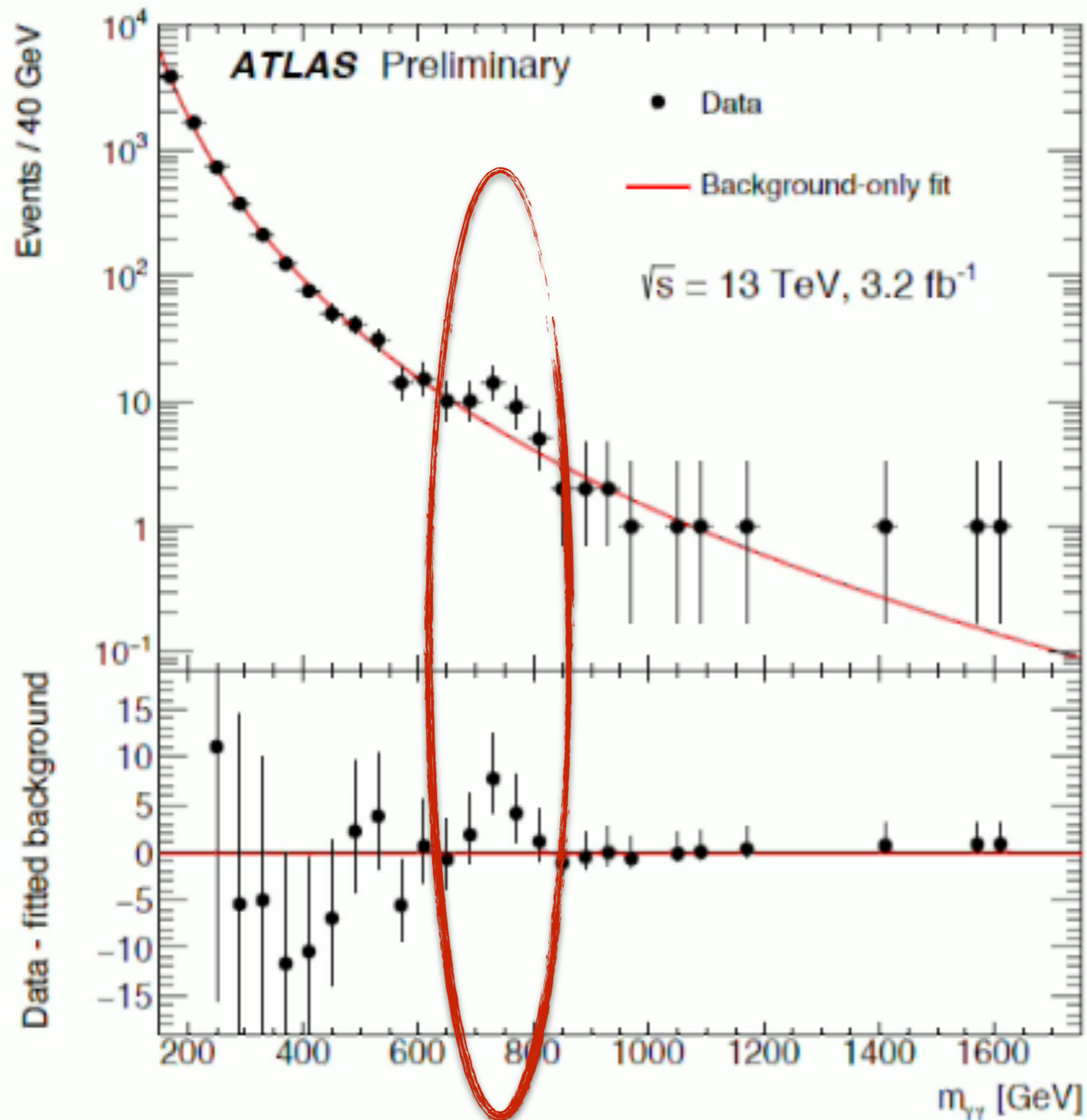
- Search for generic dark matter in **final states with jets and large missing transverse energy**
- Traditional monojet search extended to multijet final states, searching for DM pairs produced via a **vector mediator**
- Limits comparable to those set in Run 1



Maggior energia - LHC RunII - 13 TeV

Già qualche indicazione?!

forse una nuova particella di ~ 750 GeV - chi sei ?



Falso segnale
(fluttuazioni) ?

SUSY ?

Dark Matter ?

Extra Dimensioni ?

Potremo finalmente dire
qualcosa sulla gravità
quantistica ?

