

Ricerca delle particelle W , Z e H con il rivelatore CMS

Vieri Candelise
(Università di Trieste & INFN)

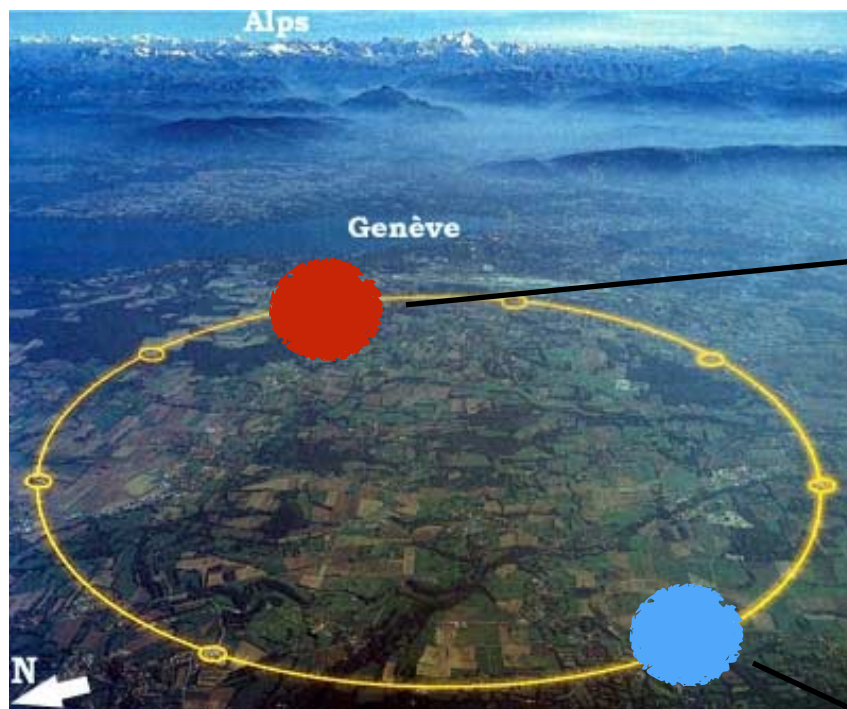
Università di Trieste
01/03/2022

Il Large Hadron Collider (LHC)

visto dall'alto...

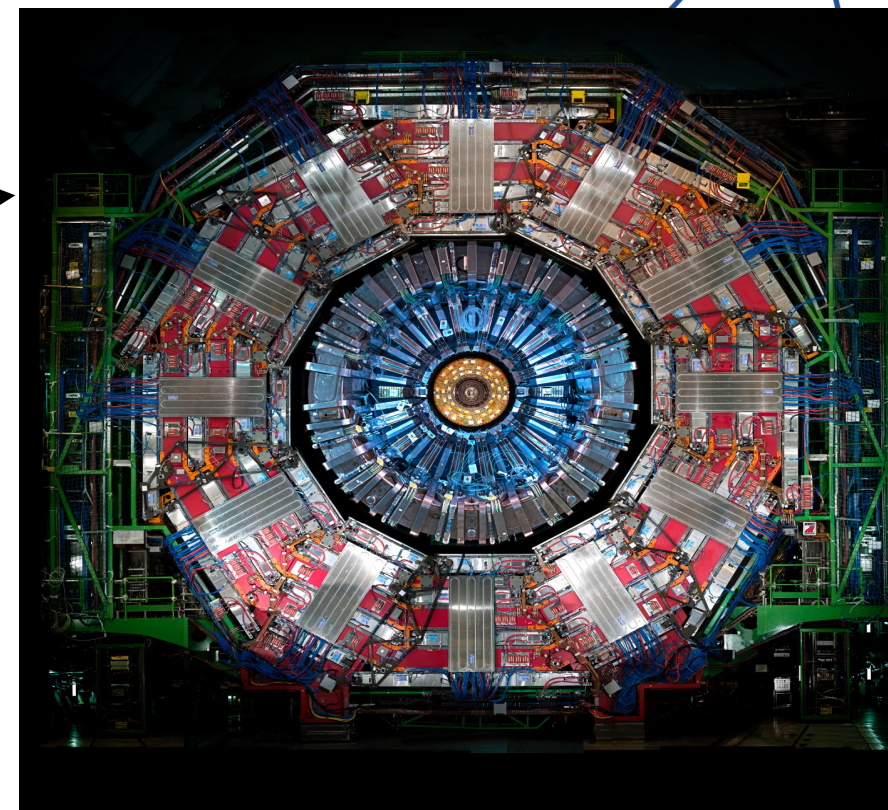
un anello sotterraneo
di 30 Km al confine
tra Francia e
Svizzera

4 grandi esperimenti
situati in quattro punti
dell'anello



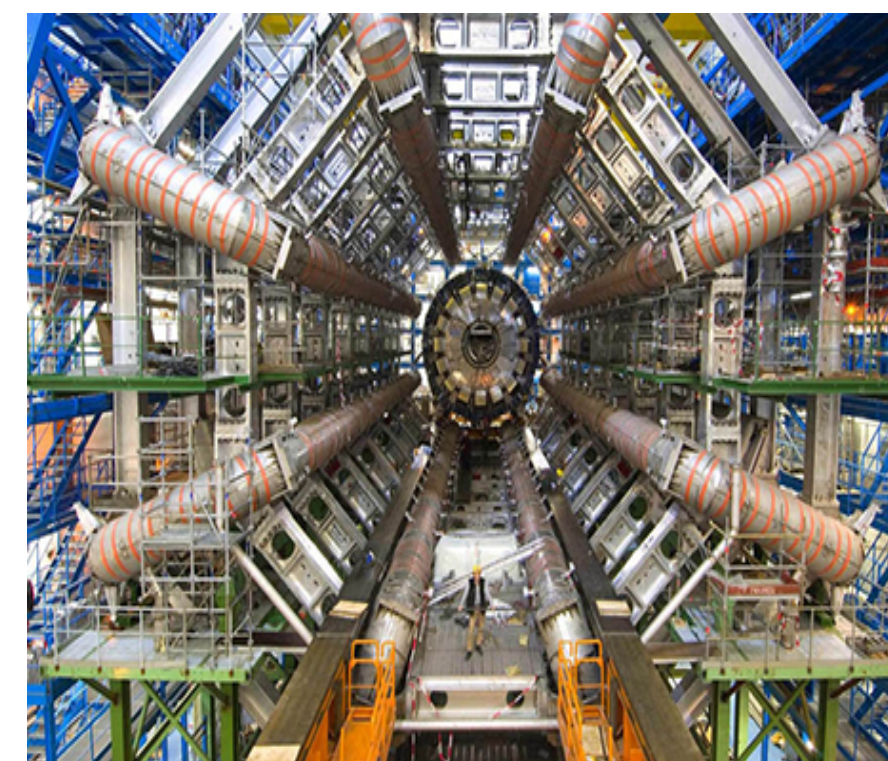
CMS

ATLAS



visto dal "basso"

I fisici accelerano
dentro questo anello
due "fasci" di protoni
i protoni si scontrano
in corrispondenza
dei 4 grandi
esperimenti



**velocita' dei protoni
dentro l'anello:
99.999% c**

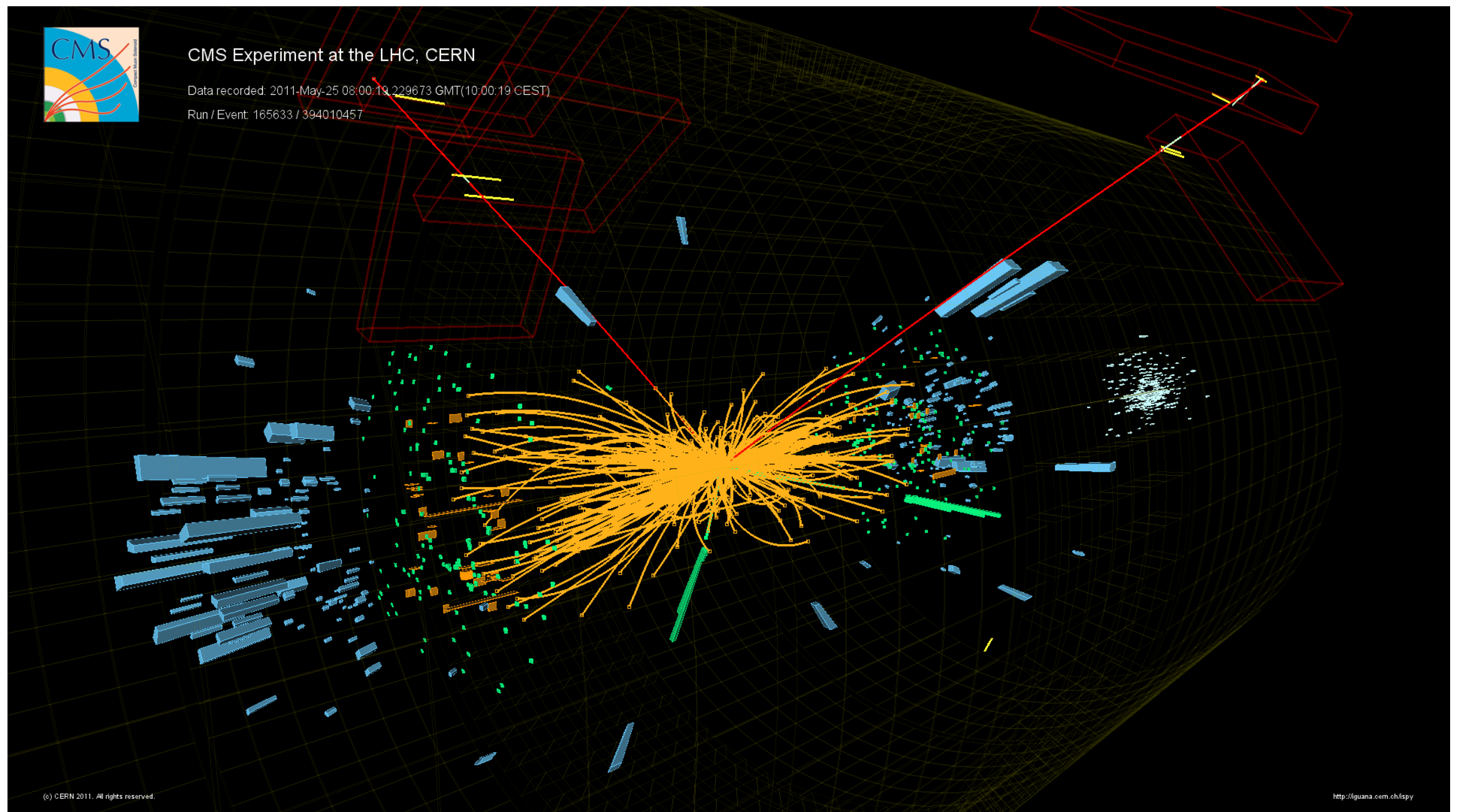
dalla collisione si sprigiona una enorme
quantità di energia che ci appare sotto
forma di decine di particelle conosciute o
sconosciute...

$$E = mc^2$$

all'opera

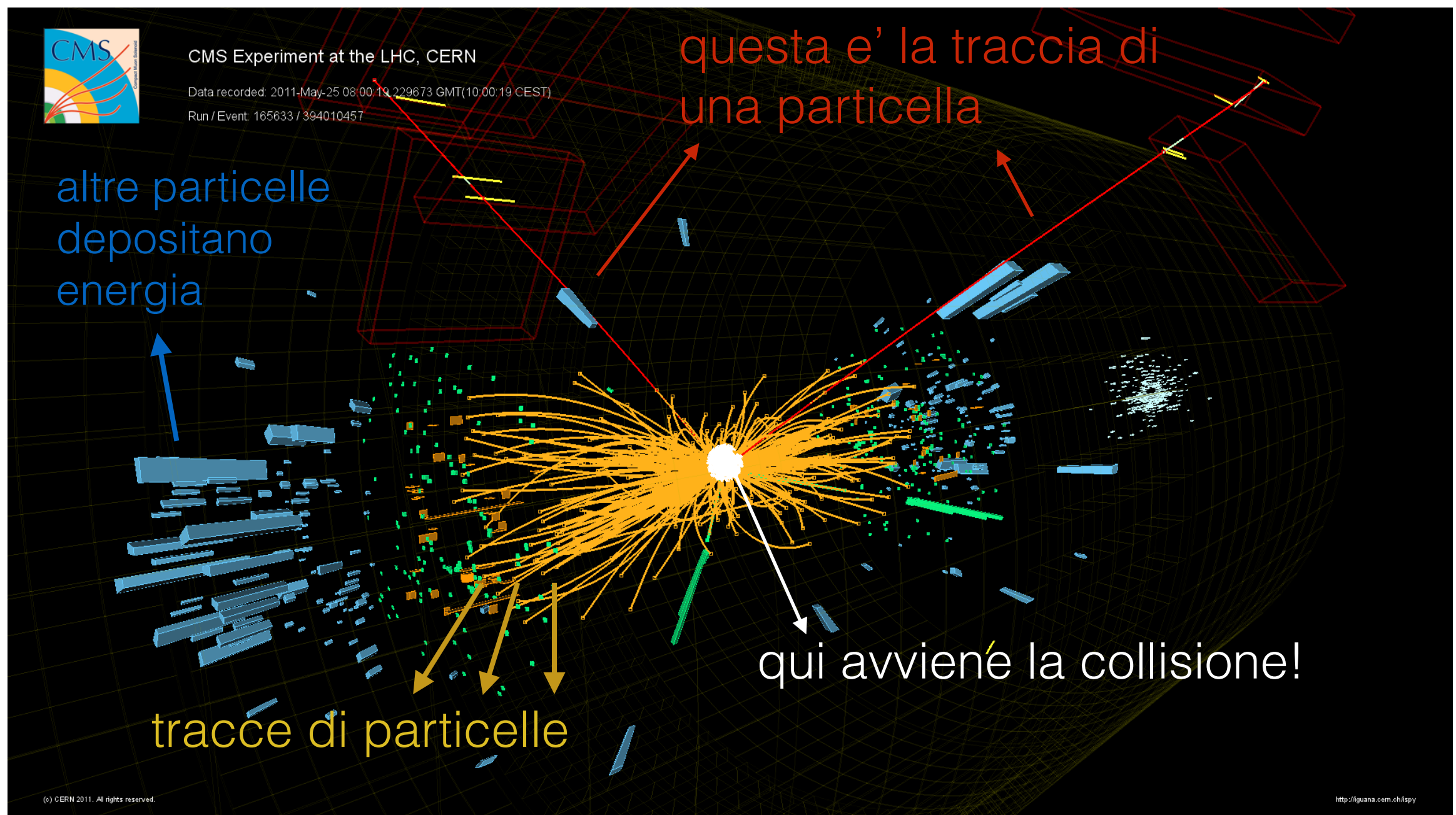
Cosa sono gli *Eventi* in CMS

L'esperimento CMS e' come una gigantesca macchina fotografica: ogni volta che i protoni collidono dentro LHC, CMS "fotografa" il risultato dello scontro: le particelle prodotte vengono poi catturate e misurate dagli apparati interni dell'esperimento



Cosa sono gli *Eventi* in CMS

L'esperimento CMS e' come una gigantesca macchina fotografica: ogni volta che i protoni collidono dentro LHC, CMS "fotografa" il risultato dello scontro: le particelle prodotte vengono poi catturate e misurate dagli apparati interni dell'esperimento



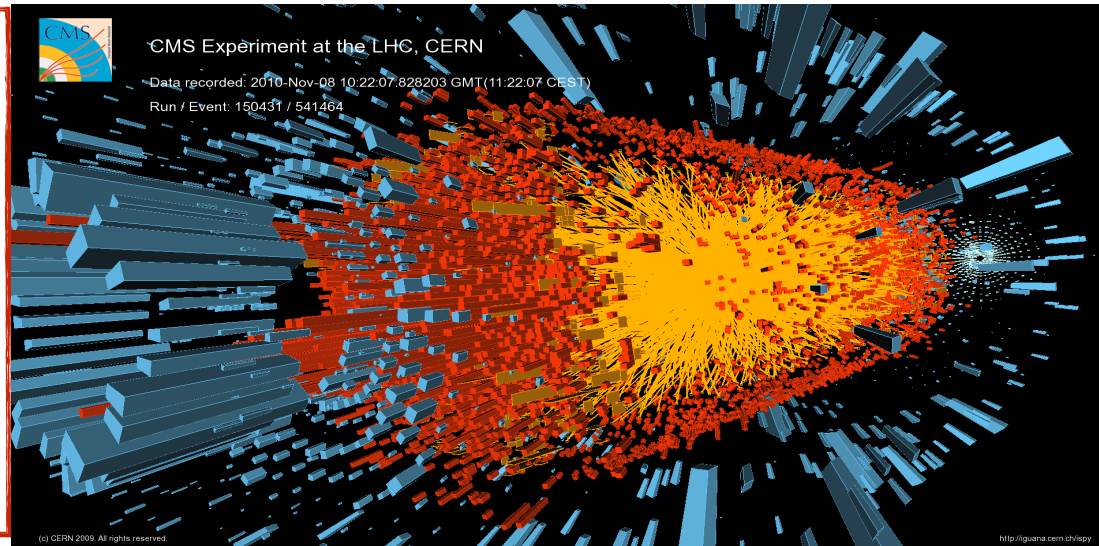
Questo e' un evento! ...ma quanti eventi ci sono? sono tutti interessanti?

L'esito delle collisioni dei fasci di protoni di LHC è casuale!

Non sappiamo cosa la Natura ci nasconde, ma potrebbe manifestarsi in eventi molto rari

100.000 milioni di protoni
"impacchettati" in $64 \mu\text{m}$

(1 milionesimo di metro,
pari allo spessore di un
capello umano!)



I pacchetti di protoni si
incrociano ogni 25 ns
(1 miliardesimo di
secondo)

spesso ci troviamo con
600 milioni di collisioni
al secondo

-> 600 milioni di eventi!

Quali eventi selezionare?

aka: come funziona la ricerca delle particelle in pratica:

(freccetta = decade)

particella madre $\longrightarrow$ particella figlia 1 + particella figlia 2 + particella figlia 3 + particella figlia 4...

(quella interessante,
pesante, un bosone ad
esempio)

(piu' leggera, piu' conosciuta,
un elettrone per esempio, che
sappiamo misurare)

(altre particelle leggere che
sappiamo misurare, neutrini,
muoni...)

Nel nostro Universo ci sono 4 forze fondamentali che tengono insieme la materia. A ognuna di esse e' associato un messaggero: una particella che trasporta l'informazione di tale forza nello spazio e nel tempo

Esistono quindi diversi tipi di bosoni! Oggi ci soffermiamo solo su alcuni...

I bosoni deboli W^+ , W^- , Z

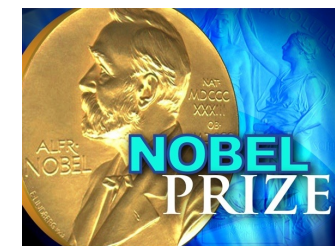
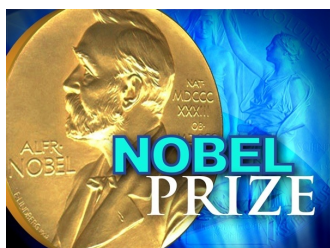


- sono le particelle responsabili dei decadimenti radioattivi!
- sono i messaggeri dell'*Interazione Debole*
- Furono teorizzate negli anni '60
- Furono scoperte negli anni '80 (da Rubbia e altri al CERN)

Il bosone di Higgs H



- E' la particella responsabile del fatto che nell'Universo esiste la massa!
- L'Higgs fornisce la massa a tutte le particelle dell'Universo compreso se stesso
- Fu teorizzato negli anni '60
- Venne scoperto nel 2012 (da CMS e ATLAS al CERN)



Oggi avremo 100 eventi di CMS da analizzare: vogliamo tra tutti questi identificare i bosoni W^+ , W^- , Z , H tramite i loro decadimenti

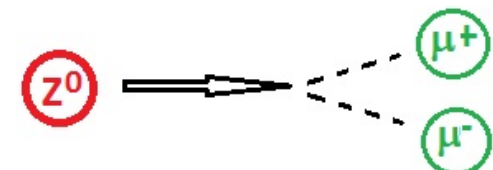
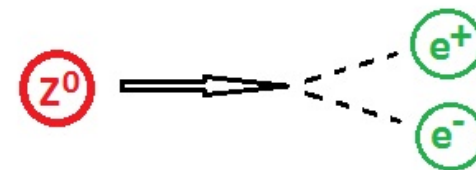
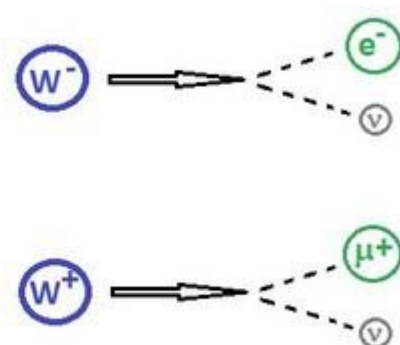
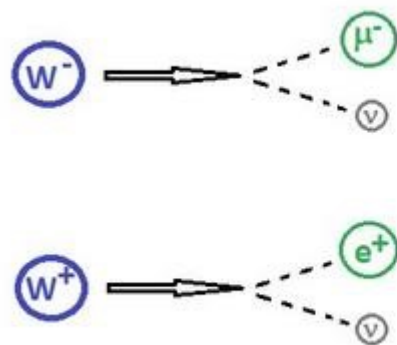
particella madre $\longrightarrow$ particella figlia 1 + particella figlia 2 + particella figlia 3 + particella figlia 4...

vediamo in dettaglio cosa dovreste trovare:

1) decadimento del W

2) decadimento dello Z

schema



processo

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

$$W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

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

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$Z \rightarrow e^+ e^-$$

quanto

11%

11%

3%

3%

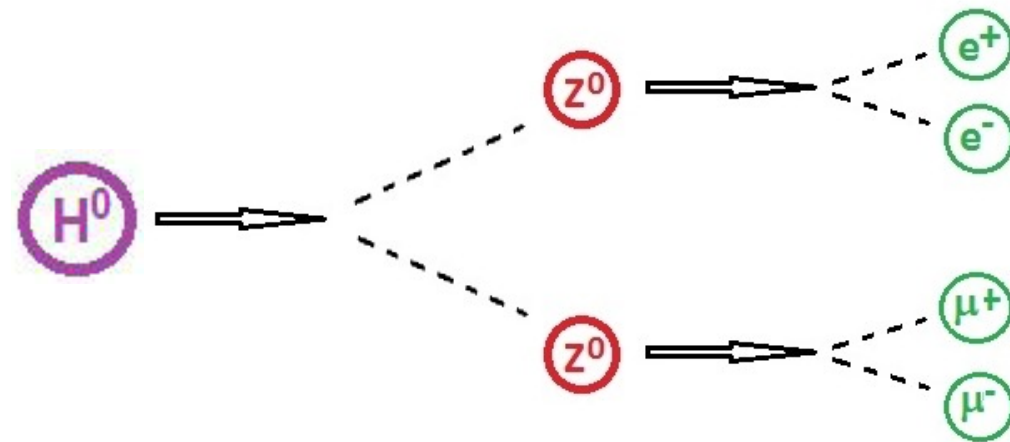
spesso?

3) decadimento del bosone di Higgs *coppie di bosoni Z*

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^-$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^-e^+e^-$$



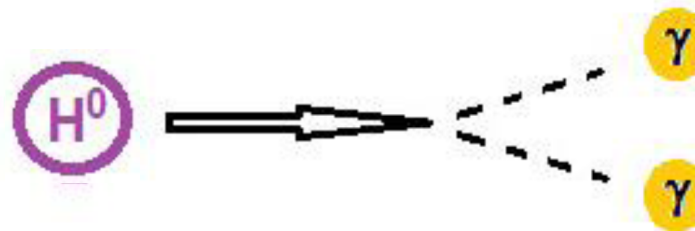
0.003%

0.003%

0.006%

3) decadimento del bosone di Higgs *coppie di fotoni*

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



0.3%

anche i fotoni sono bosoni!



ricerca dei *candidati*

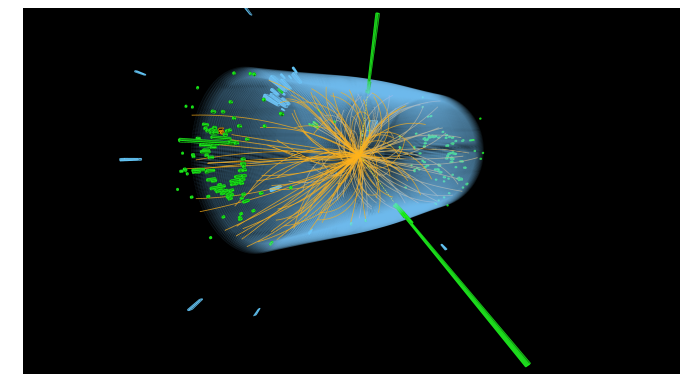
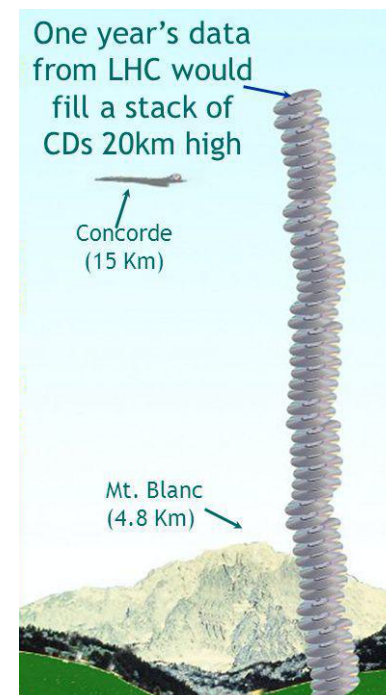
candidati: vogliamo identificare W/Z/H ma in realta' identifichiamo le particelle figlie, non e' garantito che prendiamo le figlie giuste!

come si fa?

- 1) individuare le caratteristiche del processo cercato **es. : due elettroni di carica opposta**
- 2) stabilire a priori un set di criteri oggettivi di selezione **es. : contare gli elettroni con carica +**
- 3) applicare questi criteri a tutti gli eventi disponibili **e' fondamentale non modificare i criteri!**

nella realtà

La ricerca che voi farete “a mano” su 100 eventi, in genere la si fa in modo computerizzato su miliardi di eventi, ma la procedura è la stessa!



Le particelle instabili decadono immediatamente in particelle più leggere (particelle figlie) prima di poter essere rivelate.

Sfruttando le leggi di conservazione (impulso, energia, carica elettrica ...), è possibile determinare le caratteristiche e il tipo (“ricostruire”) della particella instabile a partire dalle particelle figlie!

particella madre $\longrightarrow$ **particella figlia 1** + **particella figlia 2** + **particella figlia 3** + **particella figlia 4...**

↑
decade in tempi $\sim$ picosecondo, non riesco a vederla!

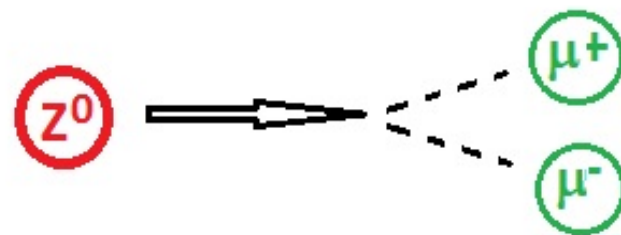
↑
più stabile

↑
osservo le proprietà...

↑
guardo le loro caratteristiche (carica...)

Un Esempio

$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



carica dello Z = somma cariche figlie:

$$Q = q_1 + q_2 = +1 - 1 = 0$$

impulso dello Z = somma impulsi figlie

$$P = p_1 + p_2$$

massa della Z = ...un po' più difficile

$$M^2 c^2 = m_1^2 c^2 + m_2^2 c^2 + 2 (E_1 E_2 - p_1 c \cdot p_2 c)$$

Leggi di Conservazione

carica iniziale = carica finale

impulso iniziale = impulso finale

energia (“massa”) iniziale = energia finale

Ricerca di Particelle II

carica iniziale = *carica* finale
impulso iniziale = *impulso* finale
energia ("massa") iniziale = *E* finale

**grandezze fisiche stato iniziale =
 grandezze fisiche stato finale**



FACT: about 65 million neutrinos pass through your thumbnail every second.

Learn Something
New Every Day
LSNED.com

Aggiungiamo altre due grandezze, utili per misurare in particolare i **neutrini**

I neutrini sono elusivi: non lasciano tracce, non interagiscono e non hanno carica elettrica... **come identificarli?**

Ci servirà per scoprire il $W \rightarrow e\nu$

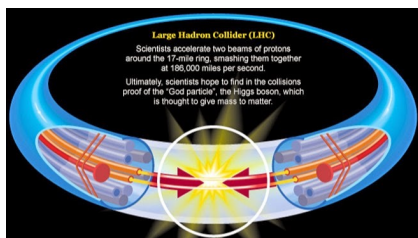
“energia mancante (missing energy)”

**stato iniziale
prima**

conosco
l'energia!

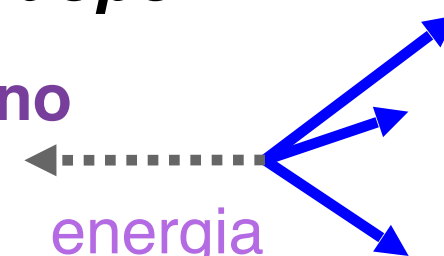


collisione



**stato finale
dopo**

neutrino



**energia
mancante**

particelle figlie prodotte

non conosco
il momento/energia!

ma lo ricavo con
 $E_i = E_1 + E_2 + \dots$



ricavo quello mancante,
che è il neutrino!

Una Galleria di Eventi

Per finire... una carrellata di eventi W , Z , H
“visti” da CMS usando il programma che
utilizzerete oggi pomeriggio



Candidato $Z \rightarrow e^+e^-$

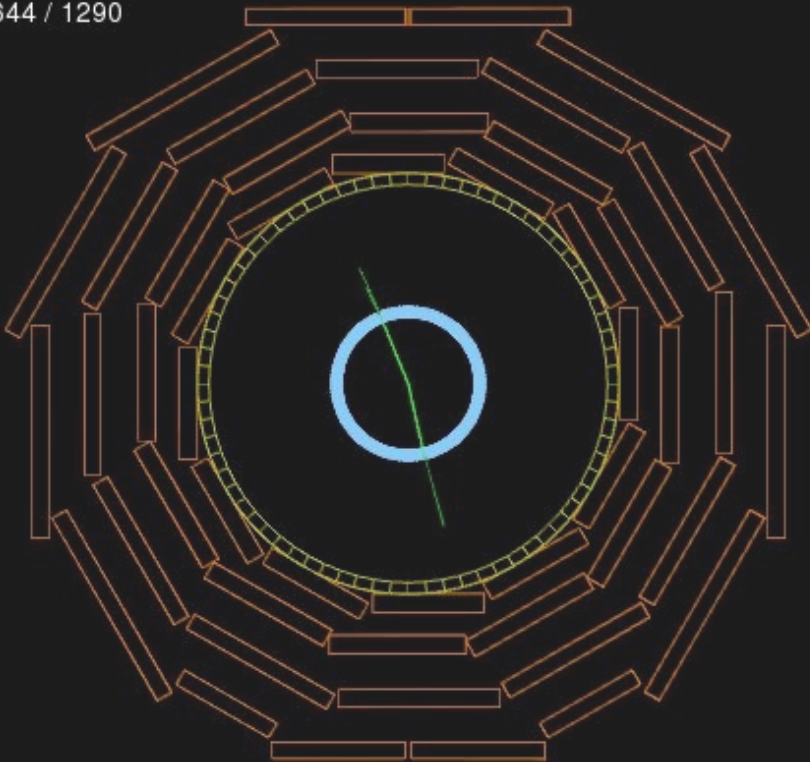
iSpy WebGL CIMA

https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#

iSpy WebGL masterclass_99.ig:Events/Run_99/Event_2 [2 of 100]

Detector Imported Provenance Tracking ECAL HCAL Muon Physics

 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Jun-05 15:33:11.085209 GMT
Run / Event / LS: 166512 / 1457273644 / 1290



Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table

Candidato Candidato $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

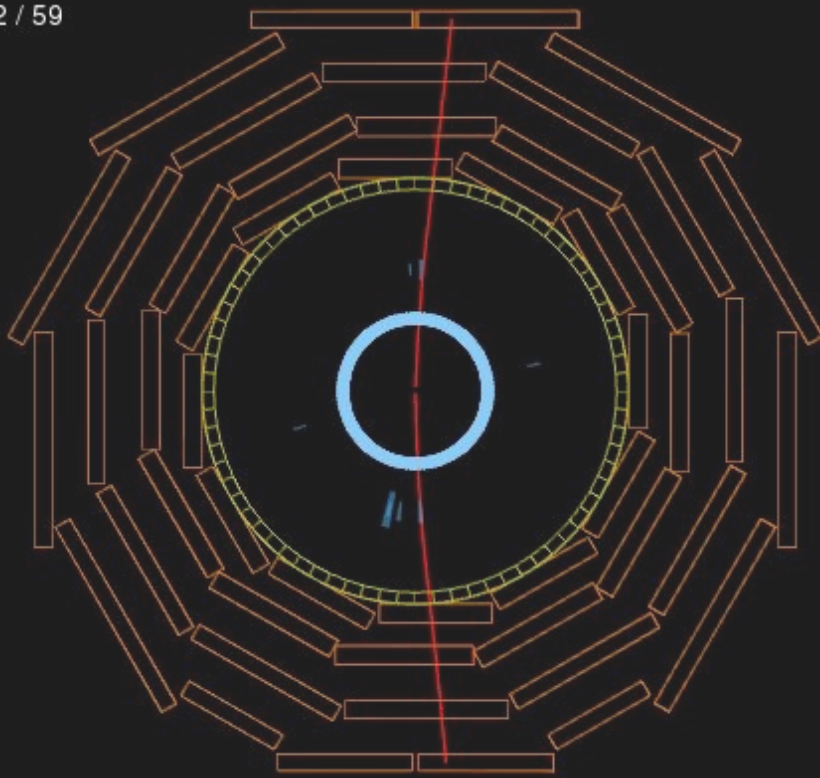
iSpy WebGL CIMA

https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#

iSpy WebGL masterclass_94.ig:Events/Run_94/Event_99 [99 of 100]

Detector Imported Provenance Tracking ECAL HCAL Muon Physics

 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Jun-09 18:08:32.407514 GMT
Run / Event / LS: 166784 / 56521192 / 59



Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table

Candidato Candidato $W^+ \rightarrow e^+ \nu$

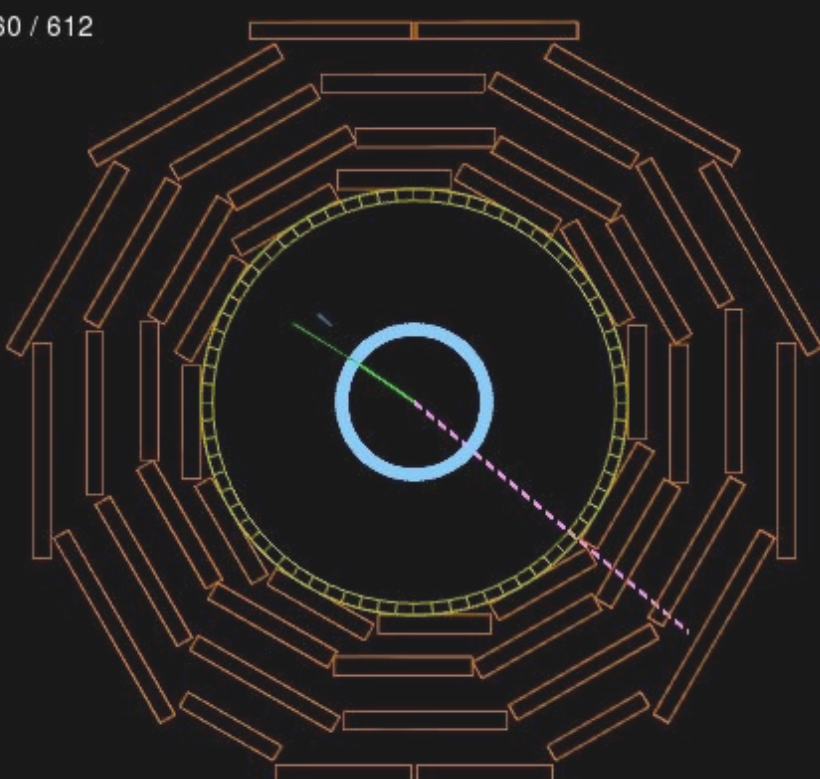
iSpy WebGL CIMA

https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#

iSpy WebGL masterclass_100.ig:Events/Run_100/Event_27 [27 of 100]

Detector Imported Provenance Tracking ECAL HCAL Muon Physics

CMS CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Jul-25 01:52:39.049341 GMT
Run / Event / LS: 171446 / 784699360 / 612



Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table

Candidato $W^+ \rightarrow \mu^+ \nu$

iSpy WebGL x CIMA x +

https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#

iSpy WebGL masterclass_100.ig:Events/Run_100/Event_24 [24 of 100]

Detector Imported Provenance Tracking ECAL HCAL Muon Physics

CMS CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Aug-06 22:31:09.296781 GMT
Run / Event / LS: 172822 / 1764999224 / 1311

Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table

The image shows a 3D visualization of the CMS detector, which is a large, cylindrical structure composed of many concentric layers of detector components. The detector is shown in a perspective view, with the central region (the interaction point) highlighted by a blue circle. A red line represents the path of a muon, and a dashed blue line represents the path of a neutrino. The detector is surrounded by a grid of orange lines, likely representing the detector's geometry or the path of the particles. The interface includes a sidebar with a list of detector components (Detector, Imported, Provenance, Tracking, ECAL, HCAL, Muon, Physics) and a main display area showing the 3D visualization. The top of the interface displays the URL and the event information.

Candidato $H \rightarrow \gamma\gamma$

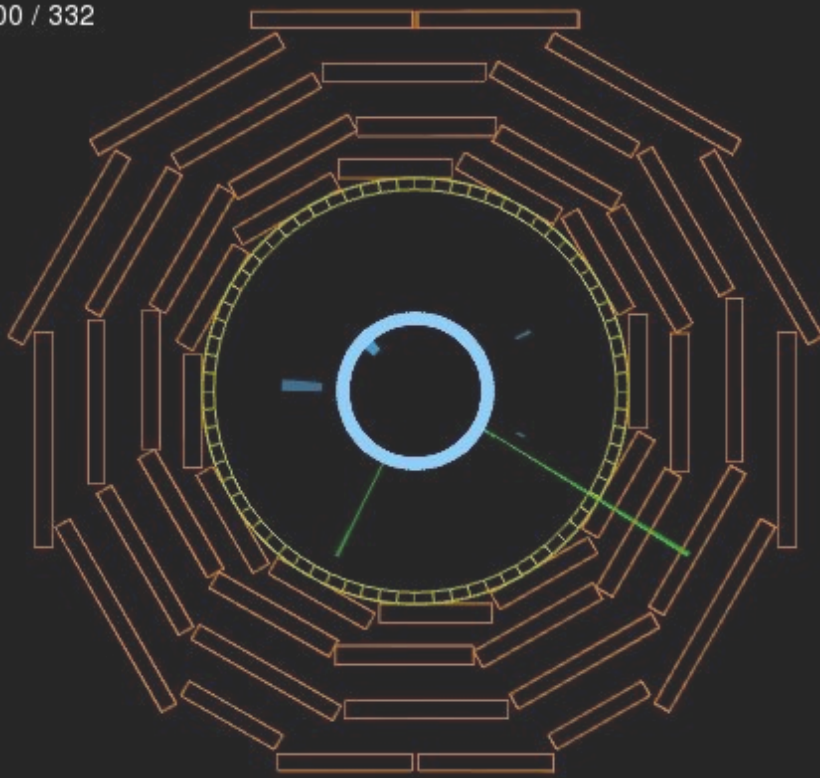
iSpy WebGL CIMA

https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#

iSpy WebGL masterclass_100.ig:Events/Run_100/Event_62 [62 of 100]

Detector Imported Provenance Tracking ECAL HCAL Muon Physics

 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-Nov-26 04:14:39.973876 GMT
Run / Event / LS: 207924 / 315722300 / 332



Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table

Candidato $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^-$

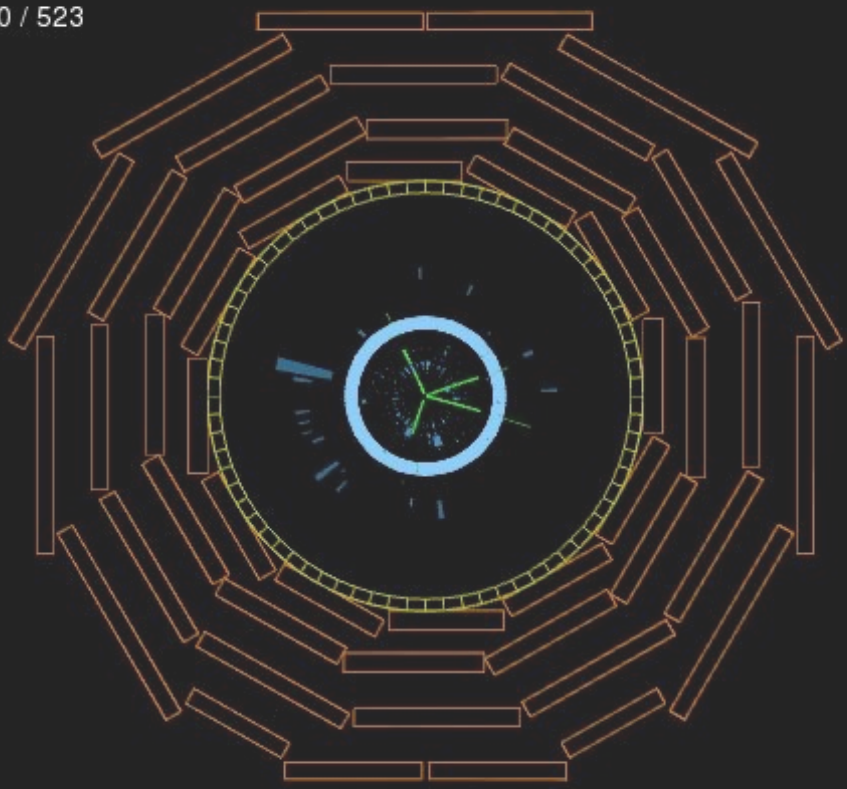
iSpy WebGL CIMA

https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#

iSpy WebGL masterclass_20.ig:Events/Run_20/Event_6 [6 of 100]

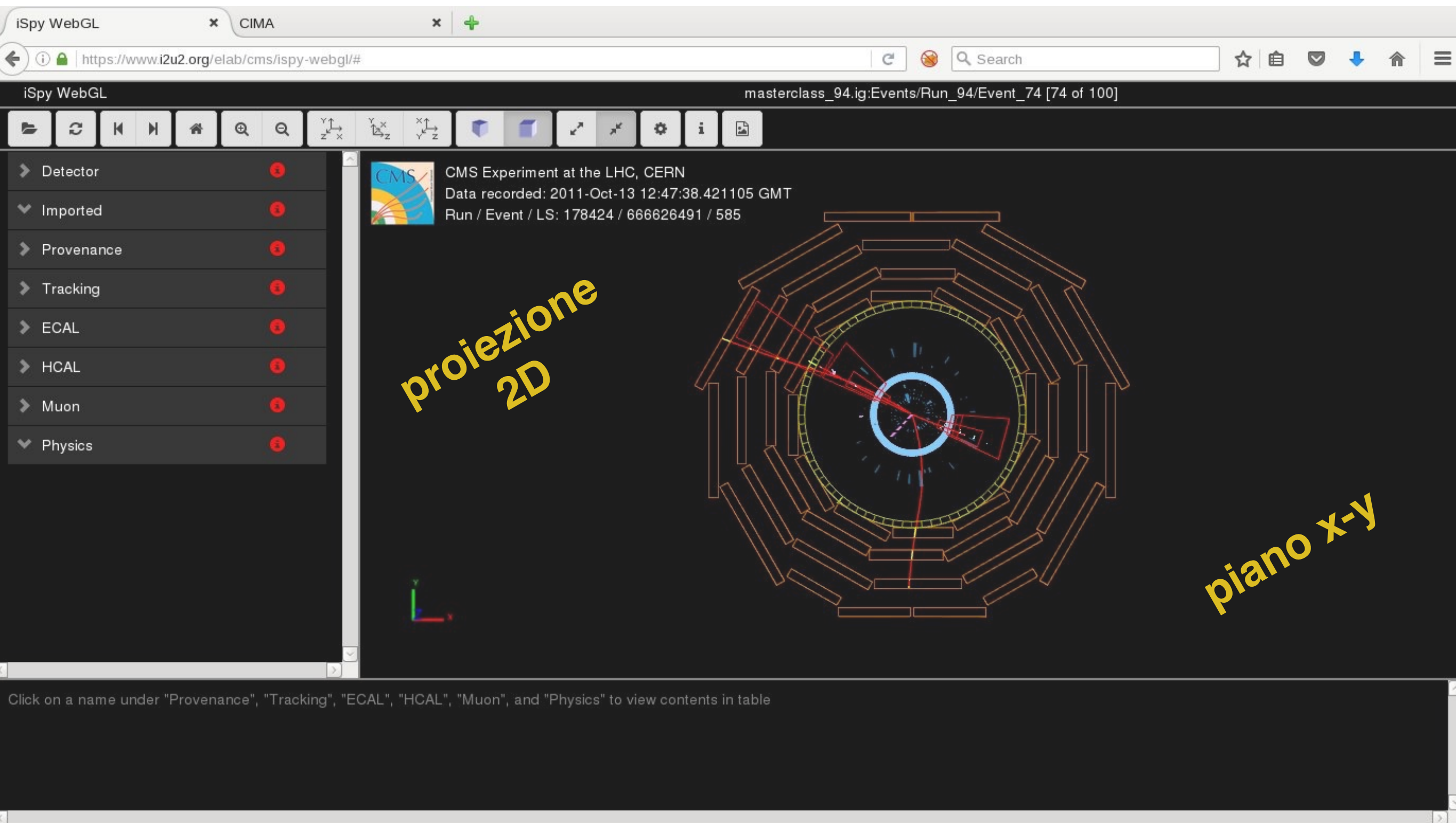
Detector Imported Provenance Tracking ECAL HCAL Muon Physics

 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-07 07:46:20.384985 GMT
Run / Event / LS: 193575 / 400912970 / 523



Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table

Candidato $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$



Candidato $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

iSpy WebGL x CIMA

https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/#

iSpy WebGL masterclass_94.ig:Events/Run_94/Event_74 [74 of 100]

Detector Imported Provenance Tracking ECAL HCAL Muon Physics

proiezione 3D

spazio x-y-z

CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Oct-13 12:47:38.421105 GMT
Run / Event / LS: 178424 / 666626491 / 585

Click on a name under "Provenance", "Tracking", "ECAL", "HCAL", "Muon", and "Physics" to view contents in table