



hands on particle physics

31 Marzo 2025
Bari



La rivelazione di particelle con CMS



Storia del CERN e i premi Nobel per la Fisica

CERN (Conseil européen pour la recherche nucléaire) istituito nel 1954

- Nel **1984 a Carlo Rubbia e Simon van der Meer**:
 - per il contributo decisivo al grande progetto che ha portato alla **scoperta dei mediatori dell'interazione debole W e Z**
- Nel **1992 a Georges Charpak**:
 - per l'**invenzione e lo sviluppo di rivelatori di particelle**, in particolare le camere proporzionali a multifilo (paper del 1968!)
- Nel **2013 a François Englert ed a Peter W. Higgs**:
 - per la **scoperta teorica** di un meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell'origine della **massa delle particelle subatomiche**, recentemente confermato dagli esperimenti **ATLAS e CMS al Large Hadron Collider del CERN** tramite la scoperta della particella fondamentale predetta



Meccanismo BEH proposto nel 1964



Sviluppato indipendentemente da Brout-Englert e Higgs

- [Phys. Rev. Lett. 13, 321 – Published 31 August 1964](#)
- [Phys. Rev. Lett. 13, 508 – Published 19 October 1964](#)

Il **Modello Standard** descrive le particelle fondamentali ed unifica la descrizione dell'interazione elettromagnetica e dell'interazione nucleare debole, che regola i decadimenti delle particelle.

Questo **prevede l'esistenza dei bosoni W e Z**, ma non giustifica come tutte le particelle abbiano **massa**: bisogna introdurre una nuova particella, il **bosone di Higgs**.

Il meccanismo di Higgs prevede che la **massa delle particelle** abbia **origine dalla loro interazione con il bosone di Higgs**.

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*
P. Englert and R. Brout
Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction: by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong interactions might originate from massive gauge fields related to a system of conserved currents. In this note, we shall show that to certain cases vector mesons indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.^{1,2} A characteristic feature of such theories is the possible existence of zero-mass bosons which tend to restore the symmetry.^{3,4} We shall show that if it precisely these singularities which maintain the gauge invariance of the theory, despite the fact that the vector meson acquires mass.

We shall first treat the case where the original fields are a set of bosons ϕ_a which transform as a basis for a representation of a compact Lie group. This example should be considered as a rather general phenomenological model; as such, we shall not study the particular mechanism by which the symmetry is broken but simply assume that such a mechanism exists. A calculation performed in lowest order perturbation theory indicates that

these vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are those which acquire mass (see Ref. (5)). We shall then examine a particular model based on the SU(2) symmetry which may have a more fundamental significance. Here we begin with a characteristic Lagrangian introducing both vector and pseudoscalar gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local U(1) gauge transformations. In this model the gauge fields themselves may break the U(1) invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudoscalar field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reasonable.

Let us start with the case where the vacuum is structured in a chiral order, we first consider a one-parameter Abelian group, representing, for example, the phase transformation of a charged boson; we then present the generalization to an arbitrary compact Lie group.

The interaction between the ϕ and the A_μ fields is

$$L_{int} = i g \phi^\dagger \partial_\mu \phi - i g A_\mu \phi^\dagger \partial_\nu \phi + i g A_\nu \phi^\dagger \partial_\mu \phi - i g A_\mu \phi \partial_\nu \phi + i g A_\nu \phi \partial_\mu \phi \quad (1)$$

where $\phi = (\phi_1 + i\phi_2)/\sqrt{2}$. We shall break the symmetry by fixing $\phi \neq 0$ in the vacuum, with the phase chosen for convenience such that $\langle \phi_1 | \phi | \phi_1 \rangle = \langle \phi_2 | \phi | \phi_2 \rangle$.

We shall assume that the application of the

... (text continues with mathematical derivations and references)

PHYSICAL REVIEW LETTERS 10/26/1964

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE MESONS*
P. Englert and R. Brout
Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction: by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong interactions might originate from massive gauge fields related to a system of conserved currents. In this note, we shall show that to certain cases vector mesons indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.^{1,2} A characteristic feature of such theories is the possible existence of zero-mass bosons which tend to restore the symmetry.^{3,4} We shall show that if it precisely these singularities which maintain the gauge invariance of the theory, despite the fact that the vector meson acquires mass.

We shall first treat the case where the original fields are a set of bosons ϕ_a which transform as a basis for a representation of a compact Lie group. This example should be considered as a rather general phenomenological model; as such, we shall not study the particular mechanism by which the symmetry is broken but simply assume that such a mechanism exists. A calculation performed in lowest order perturbation theory indicates that

these vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are those which acquire mass (see Ref. (5)). We shall then examine a particular model based on the SU(2) symmetry which may have a more fundamental significance. Here we begin with a characteristic Lagrangian introducing both vector and pseudoscalar gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local U(1) gauge transformations. In this model the gauge fields themselves may break the U(1) invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudoscalar field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reasonable.

Let us start with the case where the vacuum is structured in a chiral order, we first consider a one-parameter Abelian group, representing, for example, the phase transformation of a charged boson; we then present the generalization to an arbitrary compact Lie group.

The interaction between the ϕ and the A_μ fields is

$$L_{int} = i g \phi^\dagger \partial_\mu \phi - i g A_\mu \phi^\dagger \partial_\nu \phi + i g A_\nu \phi^\dagger \partial_\mu \phi - i g A_\mu \phi \partial_\nu \phi + i g A_\nu \phi \partial_\mu \phi \quad (1)$$

where $\phi = (\phi_1 + i\phi_2)/\sqrt{2}$. We shall break the symmetry by fixing $\phi \neq 0$ in the vacuum, with the phase chosen for convenience such that $\langle \phi_1 | \phi | \phi_1 \rangle = \langle \phi_2 | \phi | \phi_2 \rangle$.

We shall assume that the application of the

... (text continues with mathematical derivations and references)

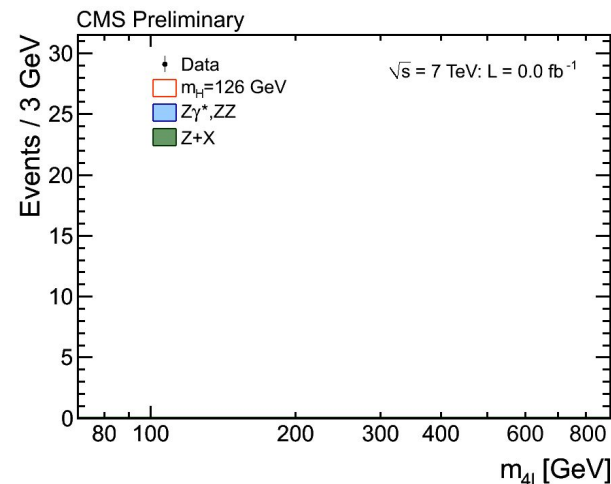
L'annuncio della scoperta Luglio 2012

Il **Large Hadron Collider** (LHC) al CERN è entrato in funzione dal 2010.

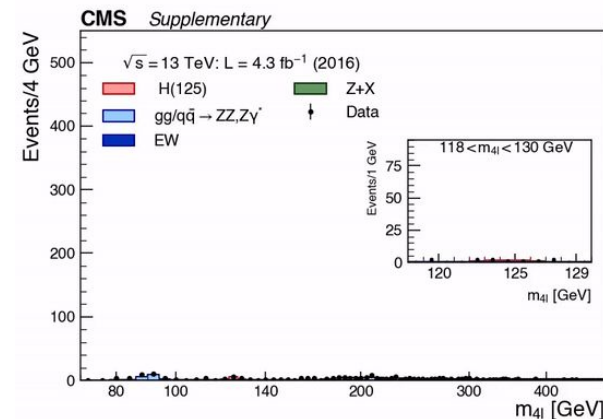
I dati raccolti dagli esperimenti nel 2011 e 2012 hanno confermato ciò che Brout, Englert e Higgs avevano predetto 60 anni prima.

Non ci siamo fermati dopo la scoperta: continuiamo a raccogliere dati per poter capire a fondo le proprietà dell'Higgs e delle altre particelle.

LHC raccoglierà dati fino al 2040 e si discute già ora di progetti futuri e nuovi esperimenti



[link](#)



[link](#)

Cosa serve per vedere il bosone di Higgs

Un acceleratore di particelle

Ad LHC due fasci di protoni (o di ioni pesanti) vengono portati ad altissima energia (accelerati)

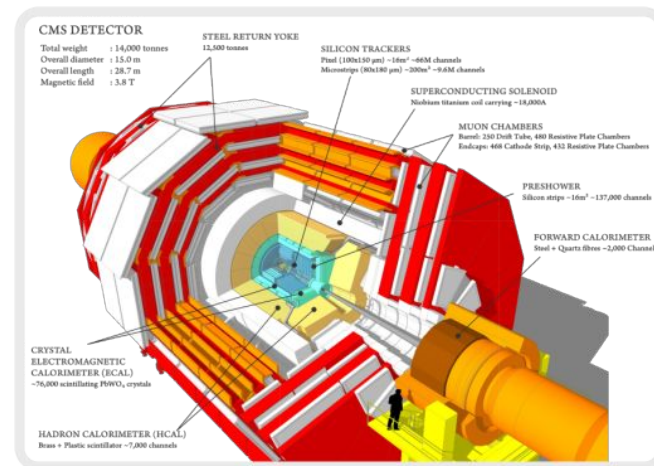
L'energia nell'urto si trasforma in altre particelle, secondo le leggi della relatività $E = mc^2$



Un apparato di rivelazione (anzi, più d'uno!)

per registrare le informazioni particelle prodotte dall'interazione, ci interessa conoscere:

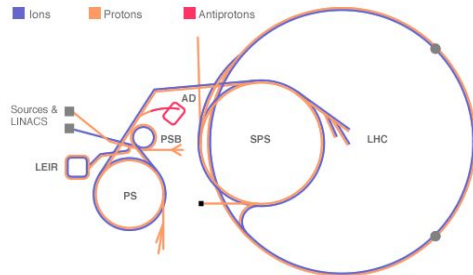
- il loro impulso (modulo e direzione)
- il loro tipo (identificazione)
- dove state prodotte (nel punto di interazione o altrove)



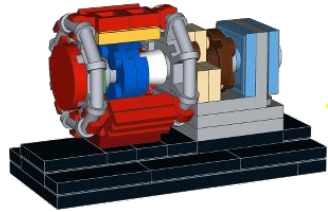
L'acceleratore di particelle: Large Hadron Collider



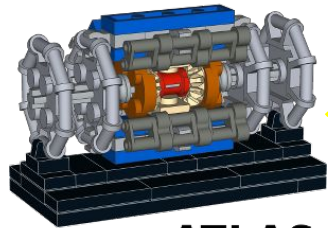
- Anello di LHC ha **circonferenza di 27 km**
- Attraversa il confine Francia-Svizzera
- **In profondità** tra 45 e 170 m
- **1232 magneti superconduttori** per deviare i fasci di protoni in traiettorie circolari.
- Magneti **a 1.9 K** (-271.3 °C)!
- I **protoni viaggiano in pacchetti da 10^{11}** nei tubi, dove viene fatto il vuoto, in entrambe le direzioni
- I protoni sono accelerati ad una **velocità prossima a quella della luce** (300000 km/s) dopo aver percorso 10 miliardi di km
- Collisioni nei quattro punti degli esperimenti



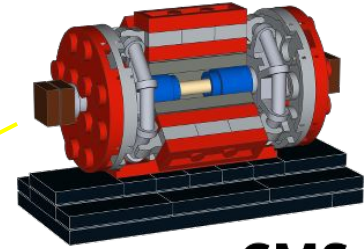
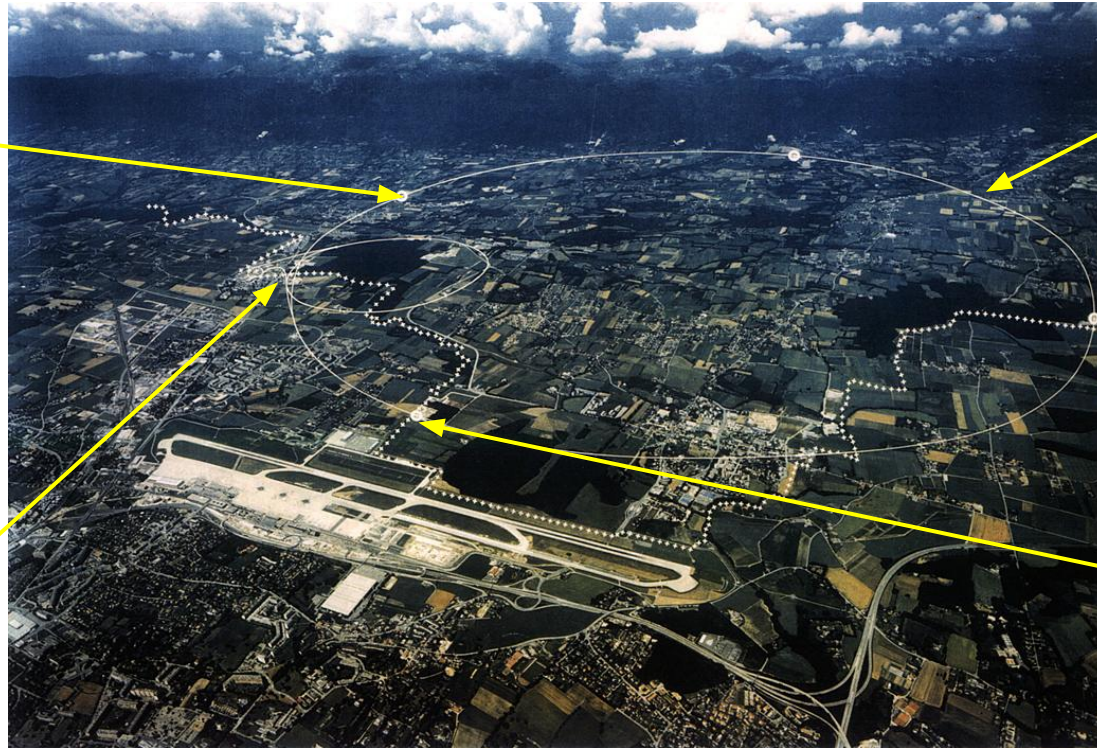
Gli esperimenti più grandi ad LHC



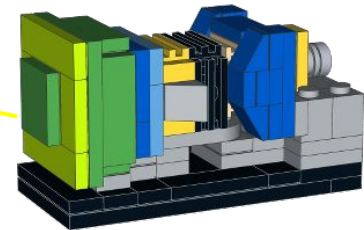
ALICE



ATLAS



CMS



LHCb

L'esperimento CMS



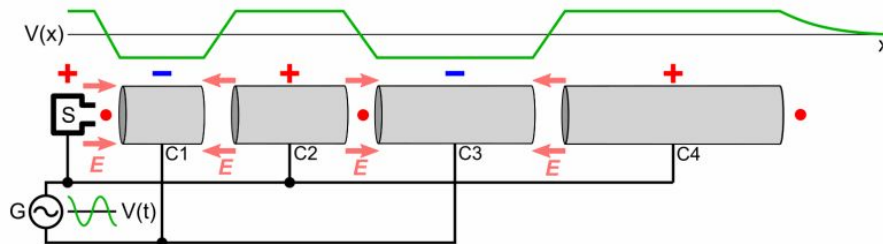
CMS si basa su una **collaborazione** di fisici, ingegneri, tecnici e studenti di più di 6000 persone appartenenti a 247 istituzioni differenti distribuite in 57 paesi [[fonte](#), dati 2022]

La collaborazione è attiva da oltre 15 anni, con oltre 1300 pubblicazioni

- italiani circa 400
- baresi circa 40 ... e in futuro anche qualcunə di voi!

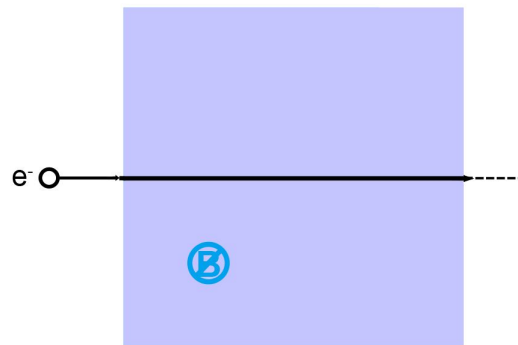
Fasci di particelle per le collisioni possono essere prodotte:

- **riscaldando** filamenti (elettroni)
- per **ionizzazione** (es. H^+ = protone) (**LHC**)
- con **urti** (produzione di coppie di particella e antiparticella)



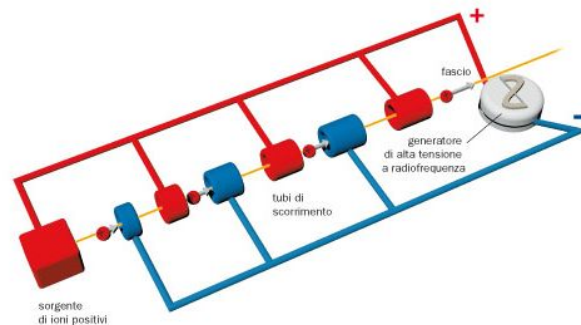
Le particelle elettricamente cariche possono essere:

- **accelerate da campi elettrici**
 - forza di Coulomb: $\vec{F} = q\vec{E}$
- **deflesse da campi magnetici**
 - Forza di Lorentz: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$



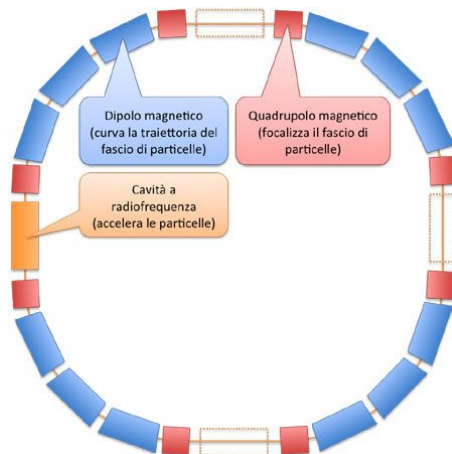
Tipologie di acceleratori

Acceleratore lineare



Linac - Fermilab (US)

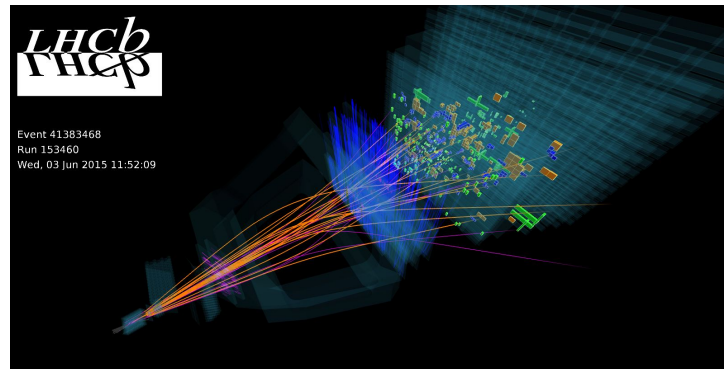
Acceleratore circolare



CNAO - Pavia

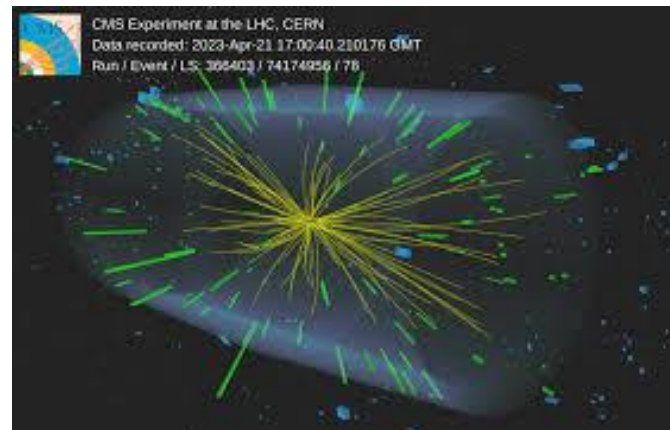
Esperimenti con bersaglio fisso:

fascio di particelle incide su bersaglio fisso, i prodotti della collisione vanno nella stessa direzione del fascio incidente “in avanti”



Esperimenti al collider:

due fasci di particelle si scontrano. Se le particelle che si scontrano hanno la stessa energia, i prodotti vanno in tutte le direzioni (simmetrico attorno all'asse del fascio)



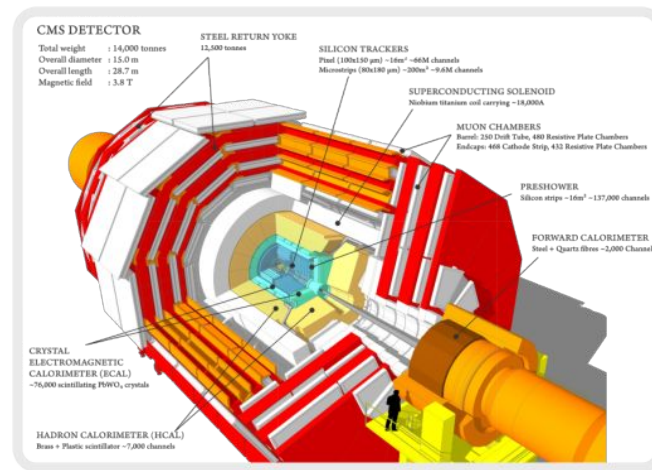
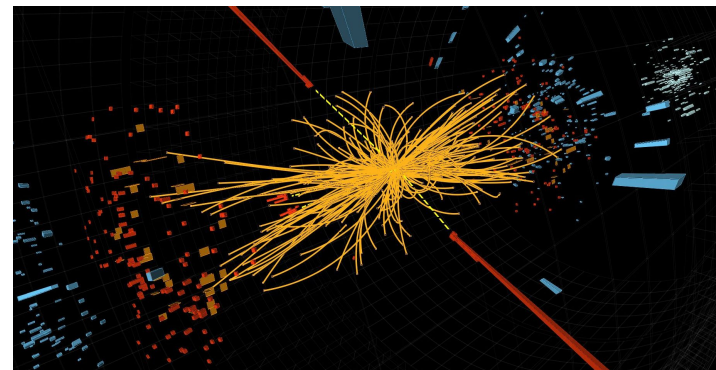
Fotografare con CMS una collisione ad LHC

In ogni collisione tra protoni ad LHC centinaia di particelle vengono prodotte - e avvengono **40 milioni di collisioni al secondo!**

Quello che succede nell'urto avviene su **scale spaziali piccolissime**: tanto più piccole quanto maggiore è l'energia a cui avviene l'urto

Lo **studio dei prodotti delle collisioni** ci dà le informazioni per capire cosa è avvenuto nell'urto

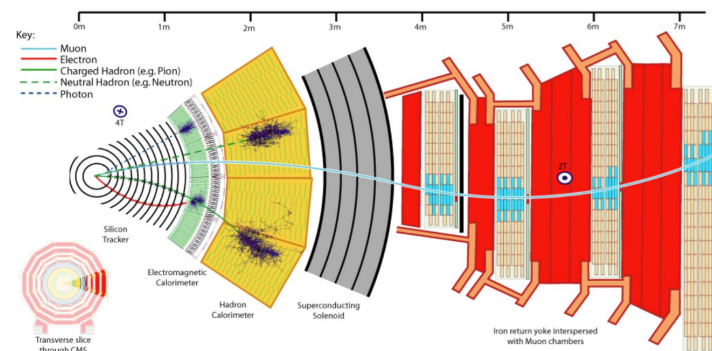
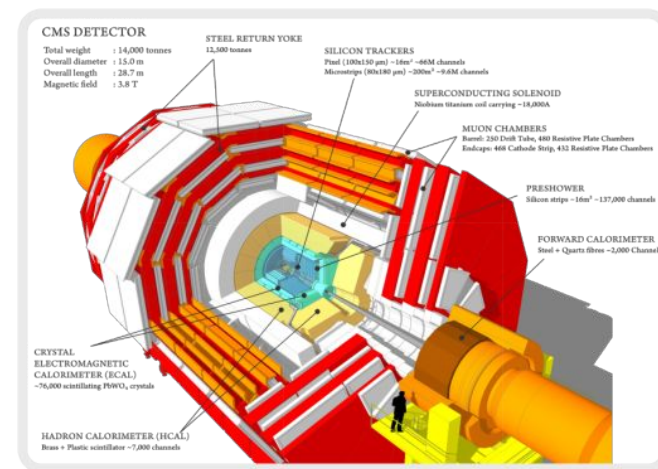
Serve un **apparato complesso** per fare la ricostruzione, ossia identificare le particelle prodotte e misurarne le proprietà



L'esperimento CMS

CMS (Compact Muon Solenoid) è:

- un esperimento molto grande
 - peso: 14000 tonnellate
 - diametro x lunghezza: 15 m x 28.7 m
 - ma **Compact**: il più piccolo dei quattro di LHC
- ha una struttura “a cipolla”
 - ogni strato di rivelatore usa una diversa tecnologia
 - particelle diverse interagiscono diversamente e sono caratterizzate da una tipica firma (“segnatura”) nel rivelatore
 - è ottimizzato per la ricostruzione dei **Muoni**
- ha simmetria cilindrica
 - contiene un magnete superconduttore **Solenoidale**
 - campo magnetico uniforme e parallelo all’asse del cilindro molto intenso, 3.8 T (10000 volte campo magnetico terrestre medio)



Perché il campo magnetico? Misura dell'impulso

Il **solenoid** produce un campo magnetico uniforme al suo interno e diretto lungo l'asse del fascio.

Le linee del campo magnetico si chiudono al di fuori del solenoide nei giochi di ferro tra i rivelatori di muoni

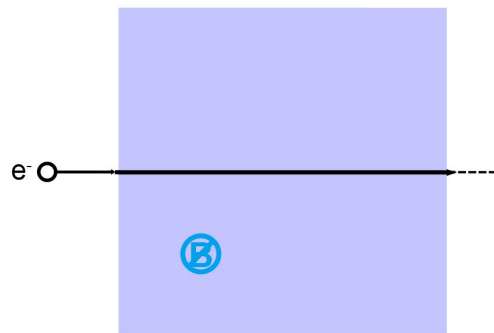
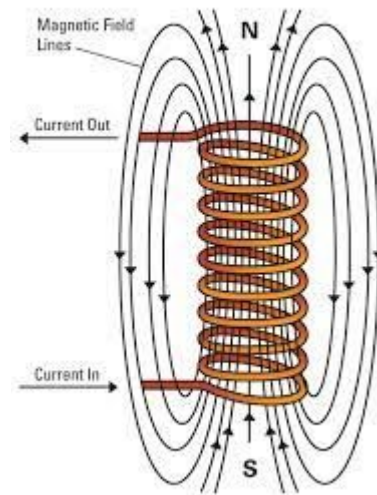
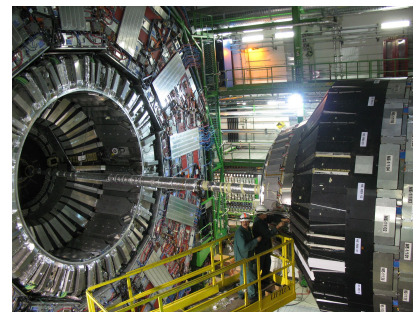
Forza di Lorentz: particella carica (di **carica q**) si muove con **velocità \underline{v}** in **campo magnetico \underline{B}** risente di una **forza**

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Raggio di curvatura $r = \frac{mv}{qB}$

Traiettoria elicoidale: composizione del moto

- rettilineo uniforme lungo l'asse z (\underline{B})
- circolare nel piano trasverso a \underline{B}

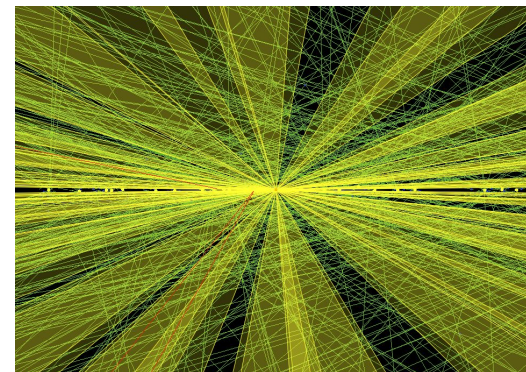


Tracciatori e rivelatori di vertice

Una collisione tra pacchetti di protoni è molto complicata!

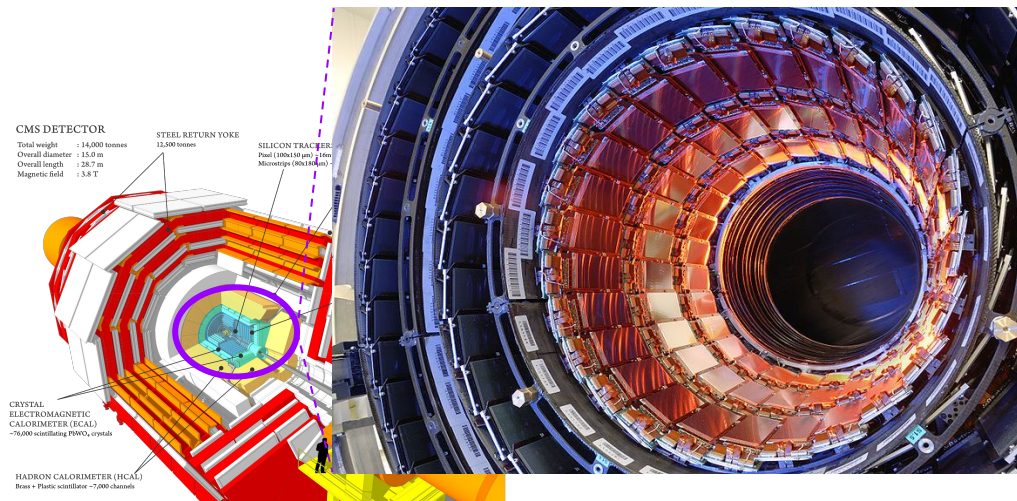
C'è una collisione principale (quella più interessante) e decine di collisioni secondarie.

In totale vengono prodotte migliaia di tracce, tutte da ricostruire



Rivelatori al silicio altamente precisi posti nello strato più interno

- Silicon tracker: 13 strati, 76M canali
- Pixel: $100 \times 150 \mu\text{m}$
- Strip: $80 \times 180 \mu\text{m}$, $25 \text{ cm} \times 180 \mu\text{m}$
- Precisione sul vertice: $15 \mu\text{m}$
- Precisione sull'impulso = 1.5%



La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia

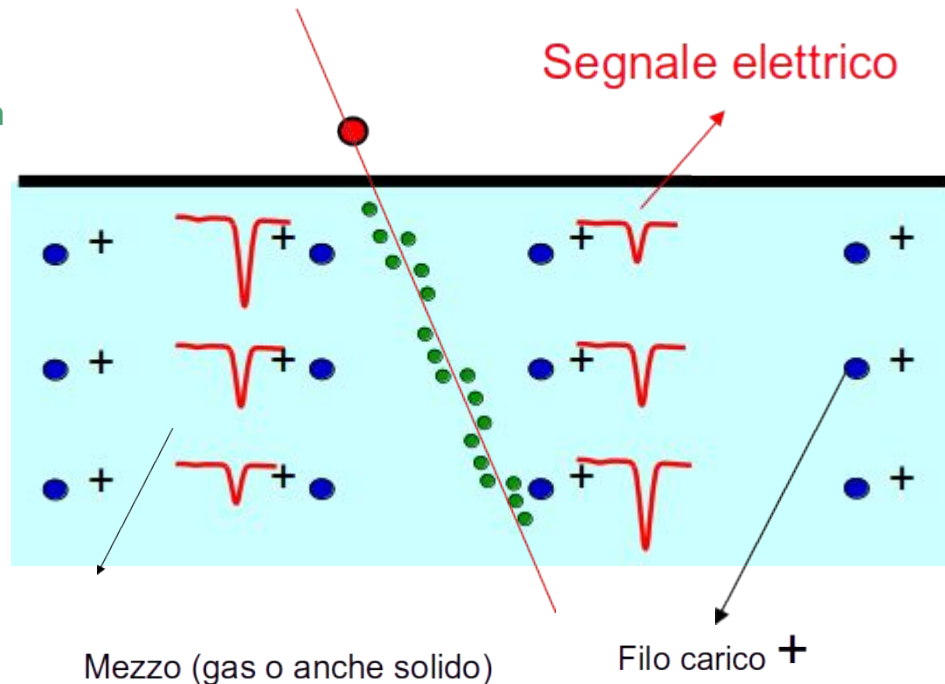
Particelle cariche:

se attraversano un mezzo incontrano atomi →

→ Ionizzazione (forza di Coulomb) →

→ produce un segnale elettrico →

→ Ricostruzione traiettoria della particella



Calorimetro elettromagnetico

Obiettivo dei calorimetri elettromagnetici:

riconoscere e ricostruire elettroni, positroni e fotoni

Strati di materiale denso alternati a strati di scintillatore

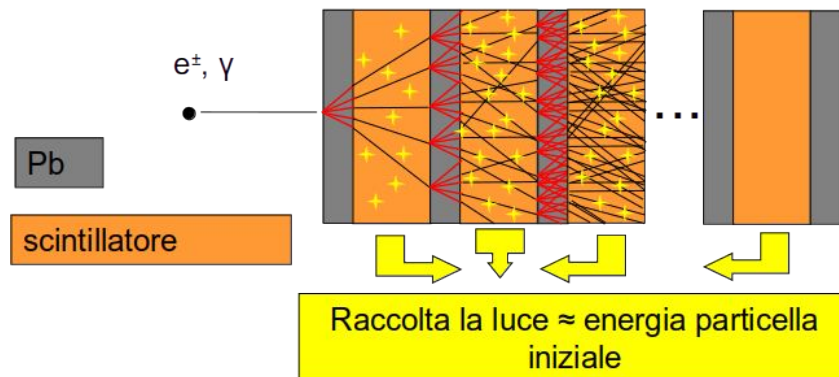
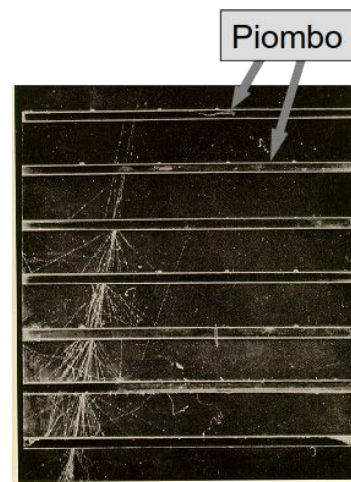
Particella passa e interagisce elettromagneticamente →

→ libera altre particelle che possono interagire →

→ effetto a catena (sciame elettromagnetico) →

→ particelle perdono energia sotto forma di luce →

→ lo sciame si esaurisce ma ... la luce prodotta viene raccolta: misura di energia!



Obiettivo dei calorimetri adronici:

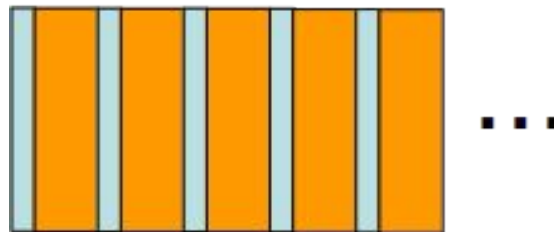
**riconoscere e misurare l'energia degli adroni
prodotti nella collisione**

adroni = cioè protoni, neutroni, pioni, ...

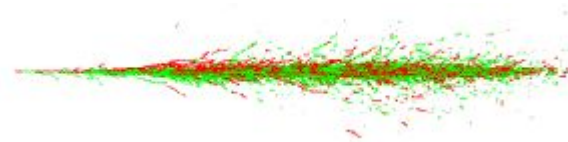
Principio di funzionamento simile al calorimetro
elettromagnetico, ma con materiali e dimensioni
diverse perché è diverso il tipo di particella

Lo sciame adronico, rispetto a quello elettromagnetico:

- inizia dopo (minore probabilità di interazione)
- più aperto (meno collimato)
- meno simmetrico
- ha anche una componente elettromagnetica



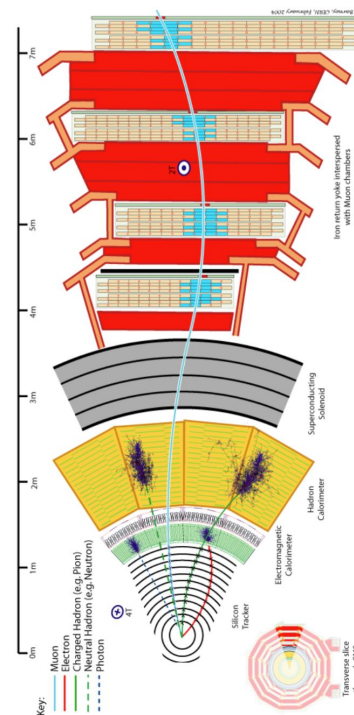
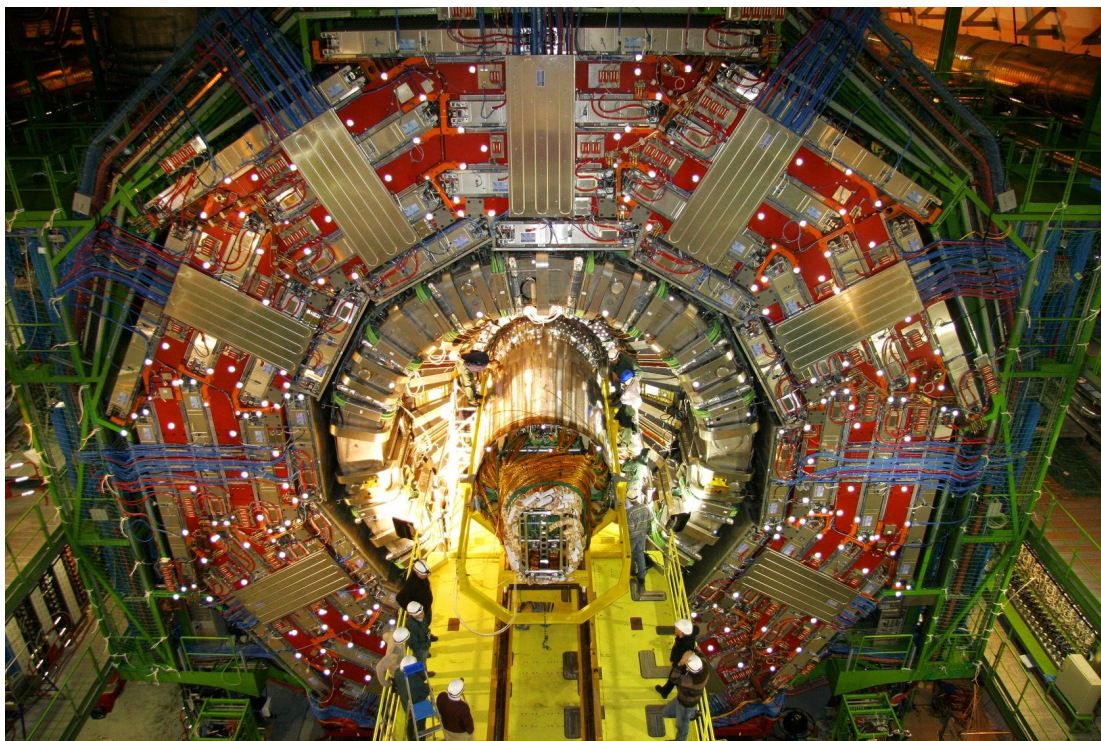
Sciame elettromagnetico



Sciame adronico



Tracciatori nello strato più esterno per raccogliere le particelle più sfuggenti delle altre: i **muoni**



Un'enorme mole di dati!

40 milioni di collisioni al secondo → 40 milioni di “foto”? (eventi ricostruiti)

Noi **cerchiamo eventi rari**: solo poche collisioni sono interessanti!

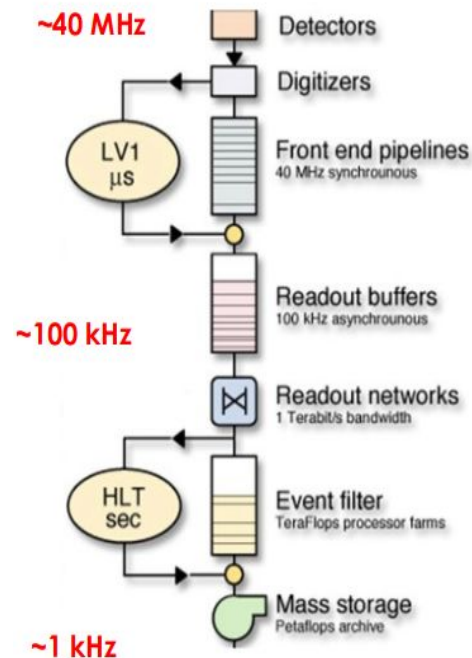
Sistema di trigger a due step:

- effettua una prima ricostruzione approssimata (velocissima, 4 us) per abbattere il numero di eventi di un fattore 400
- una seconda ricostruzione più precisa (ma non quella definitiva) per abbattere il numero di eventi di un ulteriore fattore 100

Vengono salvati “solo” ~ 1k eventi/s → 1 terabyte/s

Nel periodo 2022-2025 ci aspettiamo di raccogliere 600mila terabyte!

I dati sono accessibili agli scienziati e scienziate di tutto il mondo tramite una rete di centri di calcolo (**Computing Grid**)



Adesso tocca a voi!

I dati a disposizione per l'esercizio: collisioni protone-protone registrati a CMS nel 2011 e 2012 resi pubblici

Obiettivo: **riconoscere** la produzione di alcune particelle specifiche, ossia **i bosoni W, Z e H**

Come:

- analizzeremo uno ad uno degli **event display** (foto interattive) ricostruiti da CMS
 - nella realtà scriviamo algoritmi che lo facciamo velocemente per noi
- annoteremo le informazioni degli eventi corrispondenti a W, Z e H
 - sono prodotti nelle collisioni protone-protone di LHC ...
 - ma **come li riconosciamo?** risposta nelle prossime slide
- uniremo le informazioni dai vari gruppi in istogrammi
 - più dati analizziamo, meglio è: accumuliamo **statistica**

Le unità di misura: l'elettronvolt (eV)

L'elettronvolt (eV) è una unità di misura dell'energia

1 eV = energia acquisita da un elettrone ($m = 9.11 \cdot 10^{-31}$ kg, $q = -1.6 \cdot 10^{-19}$ C) dopo aver attraversato una differenza di potenziale di 1 V

In virtù dell'equivalenza massa-energia ($E = mc^2$) può essere **anche unità di misura per la massa**

Massa del protone: circa 1 GeV

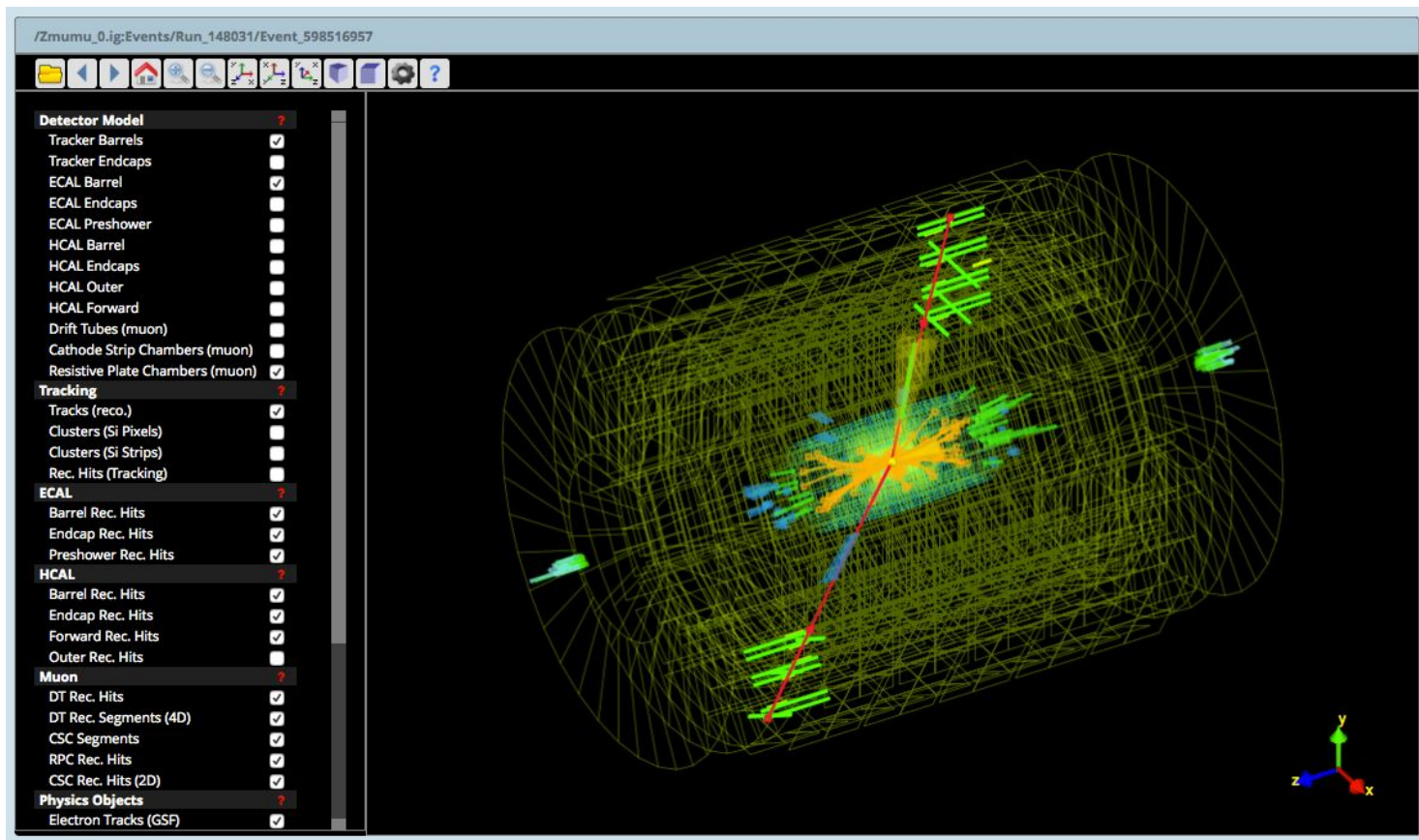
Massa dell'elettrone: circa 0.5 MeV

Massa del muone: circa 105 MeV

L'energia delle collisioni che studieremo è di 7 TeV!

simbolo	multiplo
1 keV	10^3 eV
1 MeV	10^6 eV
1 GeV	10^9 eV
1 TeV	10^{12} eV

Un event display in CMS



Produzione e decadimento del bosone Z^0

Bosone Z^0 responsabile della **interazioni deboli “neutre”**

Massa della Z^0 : circa **91 GeV** (91 volte la massa del protone)

Non viene rivelata direttamente (“invisibile”) perché:

- **vive per un tempo brevissimo: 10^{-25} s**
- **è elettricamente neutra**

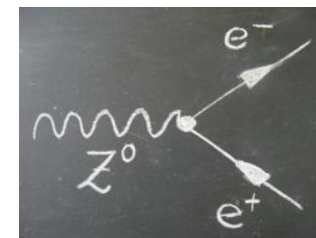
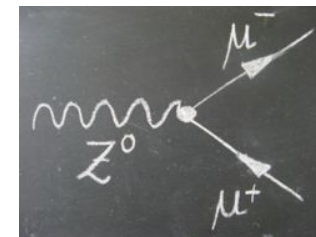
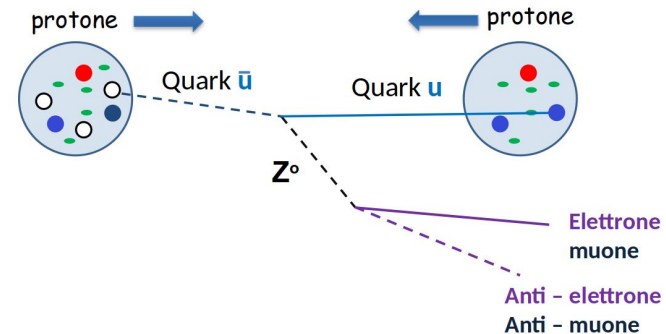
ma possiamo **rivelare i prodotti del suo decadimento!**

Alcune possibilità che possiamo ricostruire “facilmente” in CMS:

- 1) Una coppia di muone e anti-muone
- 2) Una coppia di elettrone e positrone (anti-elettrone)

Sono possibili solo coppie di particella-antiparticella:

stesso tipo ma carica di segno opposto!



Rivelare il bosone Z^0 a CMS

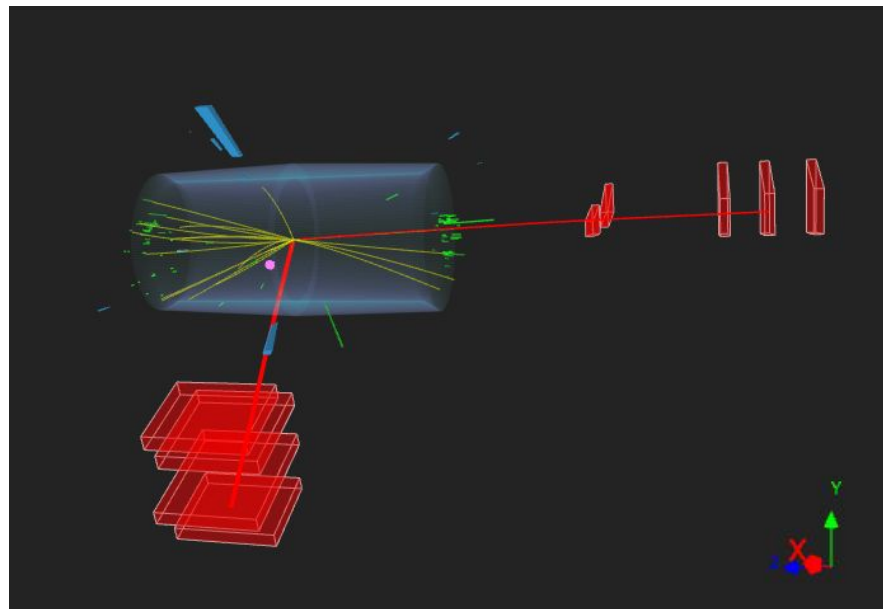
Riconosciamo un decadimento $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$:

- tracce (particelle cariche) partono dal centro
- le tracce arrivano fino alle camere a muoni
- le due tracce hanno carica opposta (curvatura nel piano trasverso)

Cliccando sulla prima traccia, sulla seconda e poi sul tasto m si calcola la **massa invariante** m_{12}

$$m_{12} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2}$$

Se le due particelle (“figlie”) hanno origine dal decadimento di una particella “madre”, la massa invariante corrisponde alla sua massa



Produzione e decadimento dei bosoni $W^{+/-}$

Sono prodotti nell'interazione tra i costituenti dei protoni (quark e gluoni) nella collisione

Diversi meccanismi possibili per W^+ e W^-

Massa dei bosoni W: circa **80 GeV**

Tempo di vita media brevissimo: 10^{-25} s

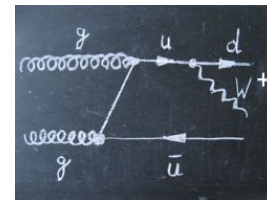
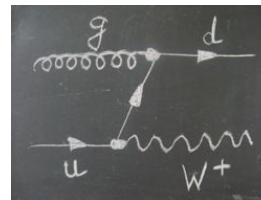
Il rapporto di produzione W^+/W^- riflette la struttura interna del protone!

Decadimento in un leptone carico
(elettrone, positrone, muone, antimuone)
e corrispondente neutrino

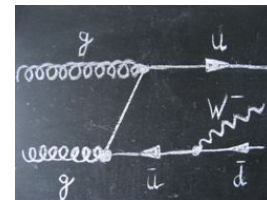
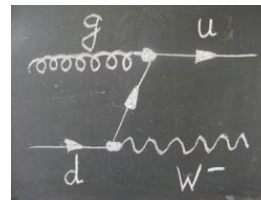
Il leptone ha la stessa carica del bosone W

Il neutrino non interagisce e sfugge alla rivelazione ... come lo identifichiamo?

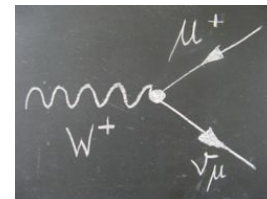
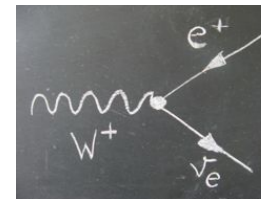
Produzione W^+



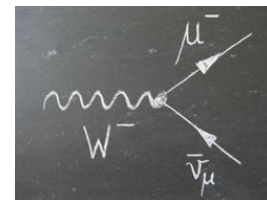
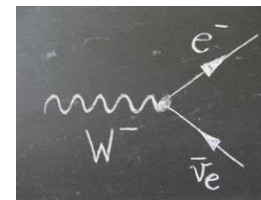
Produzione W^-



Decadimento W^+



Decadimento W^-



Rivelare l'energia mancante

Urto collineare tra protoni di stesso impulso

Principio di conservazione dell'impulso:

- impulso iniziale totale dei due protoni = 0 = somma degli impulsi finali di tutte le particelle prodotte

Dovremmo ricostruire tutte le particelle rivelabili per capire la parte mancante

Nella realtà:

- le misure degli impulsi hanno una loro incertezza sperimentale
- l'efficienza di identificazione e ricostruzione delle particelle non è del 100%
- ci sono zone del rivelatore non attive (ad esempio vicino alla pipeline o in altri "buchi" dove c'è materiale inattivo ma necessario al sostegno meccanico del rivelatore)
- ci sono particelle che non interagiscono con il rivelatore (es. neutrini) e quindi non rilasciano segnali

Risultato:

L'energia mancante nel piano trasverso (MET, Missing ET, Missing Energy in Transverse plane) viene usata come osservabile sperimentale perché più precisa e più semplice da avere sotto controllo

Rivelare i bosoni W a CMS

Riconosciamo un decadimento $W \rightarrow l\nu_l$:

- vediamo una sola traccia verde e la freccia rosa
- **freccia verde**: elettrone/positrone
 - curvatura nel piano trasverso $\rightarrow e^-$
- **freccia rosa**: missing energy (MET)
- quindi $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ (qui anti-neutrino elettronico)

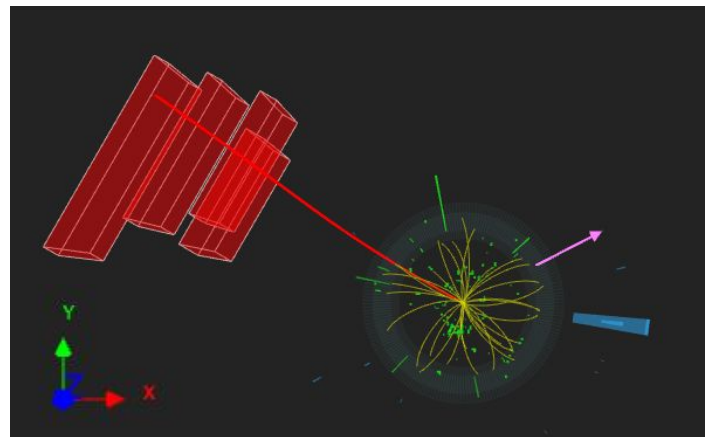
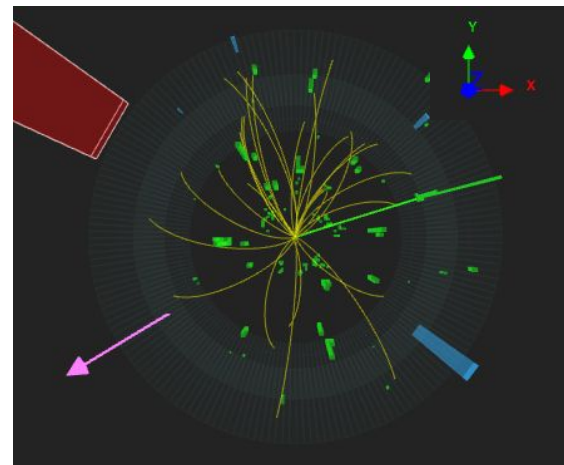
Non possiamo calcolare la massa invariante
(abbiamo ricostruito una sola delle due particelle figlie)

Ma è interessante studiare:

- **frequenza del decadimento in μ o e**
- **rapporto di produzione W^+/W^-**

Campo magnetico intenso \rightarrow curvatura visibile anche
per particelle energetiche

... ma se in dubbio segniamo W^\pm



Il bosone di Higgs a CMS

I canali di decadimento preferiti da guardare a CMS

(golden channels) - ma ce ne sono altri!

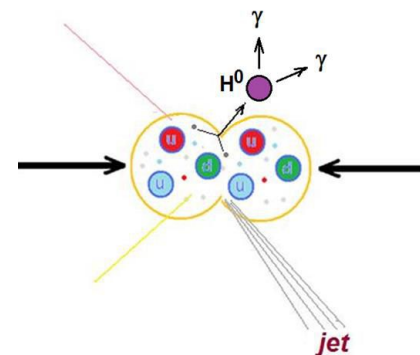
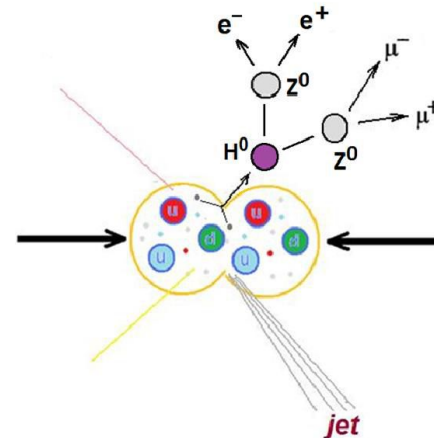
- 1) $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow 4 \text{ leptoni}$
- 2) $H \rightarrow \gamma\gamma$

Per il primo canale, tre combinazioni possibili:

- $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$
- $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$
- $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

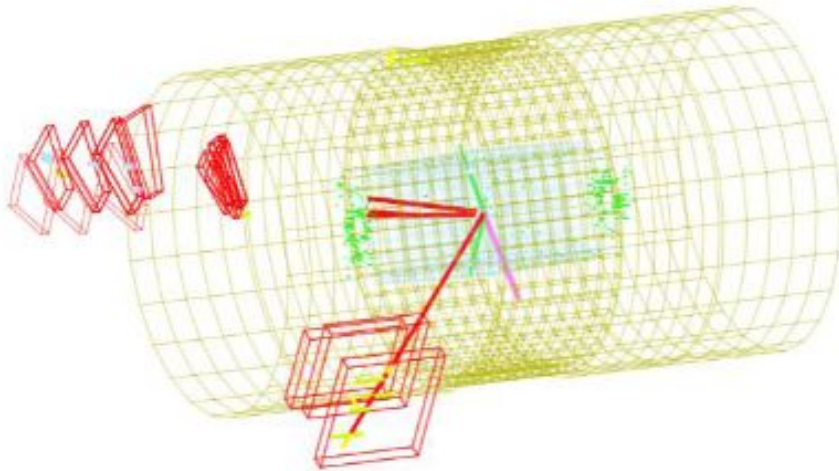
Per il secondo canale, due fotoni nello stato finale

I fotoni rilasciano un segnale nel calorimetro elettromagnetico,
ma sono particelle neutre \rightarrow nessun segnale nel tracciatore

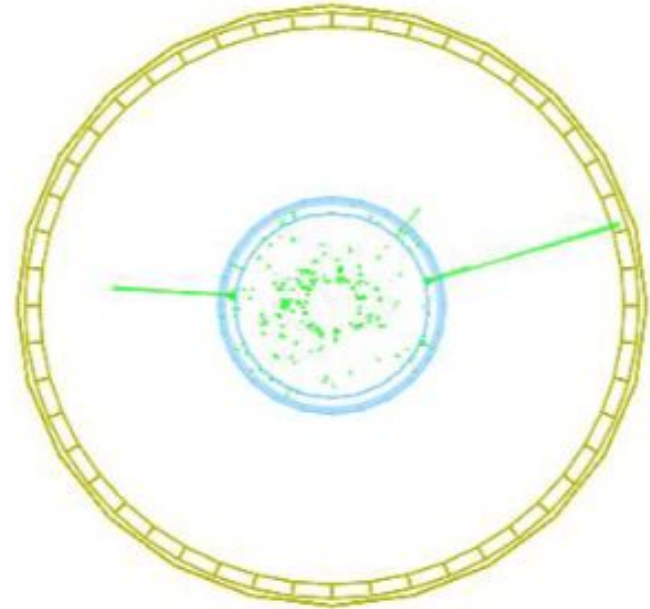


Higgs boson candidates

Higgs decay to two Z bosons:



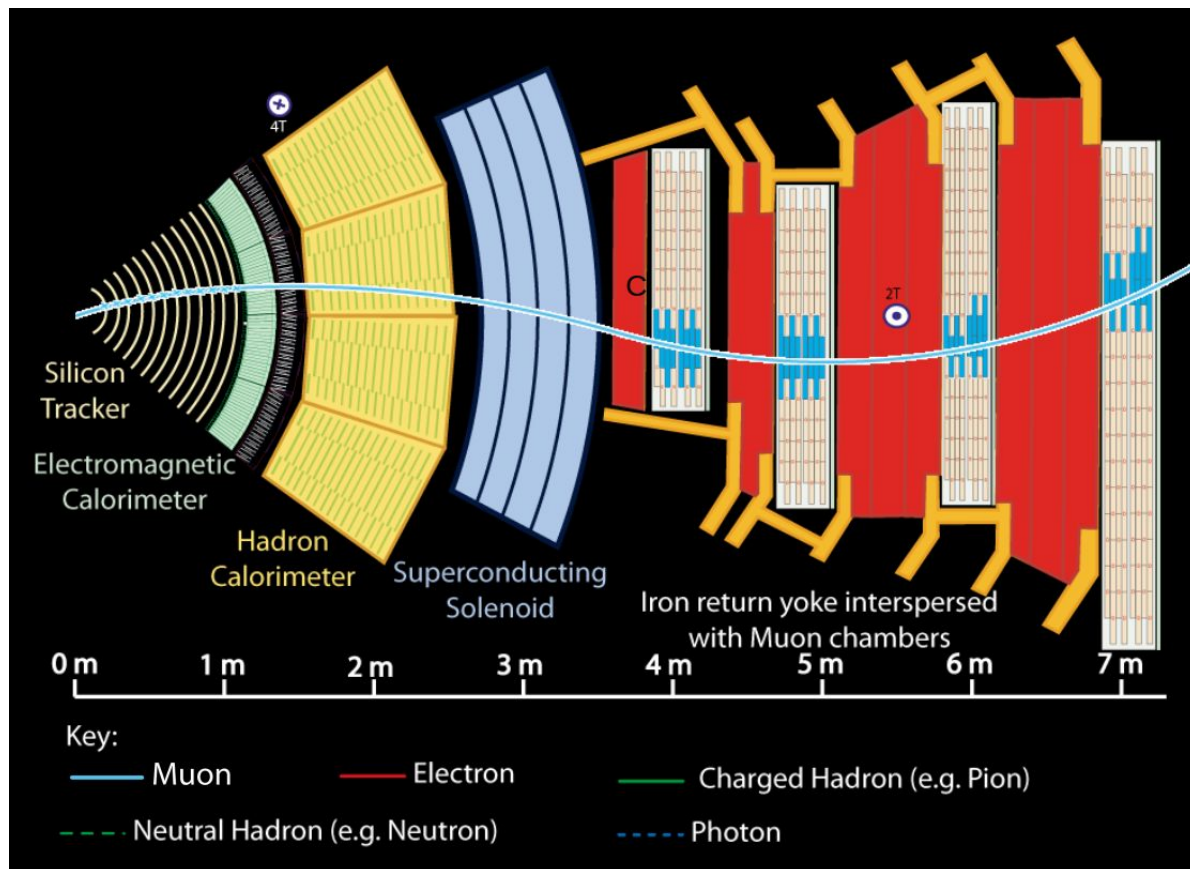
Higgs decay to two photons:



Ricapitolando le “segnature” in CMS

Muoni:

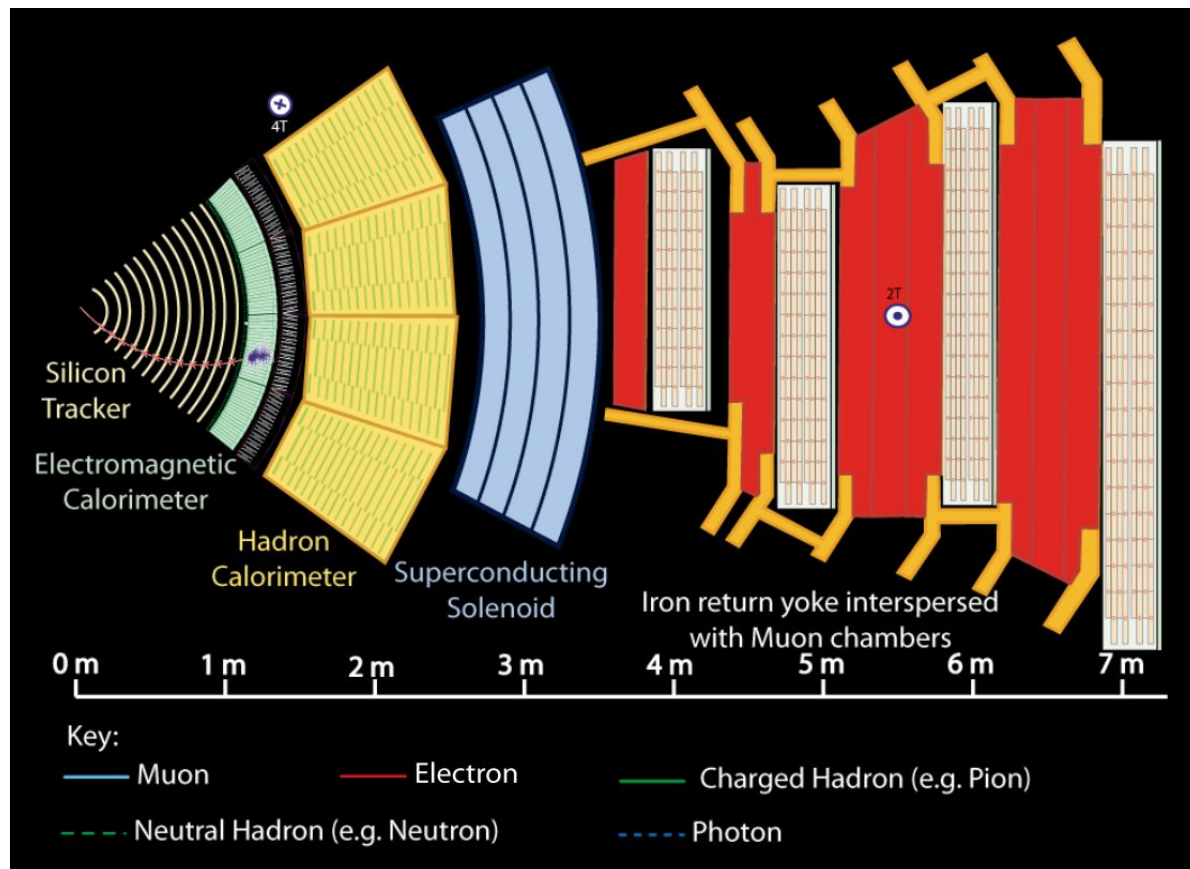
- traccia rossa nell’event display
- attraversano tutto il rivelatore (traccia lunga)
- accendono le camere a muoni:
 - le più esterne
 - rosse in iSpy



Ricapitolando le “signature” in CMS

Elettroni:

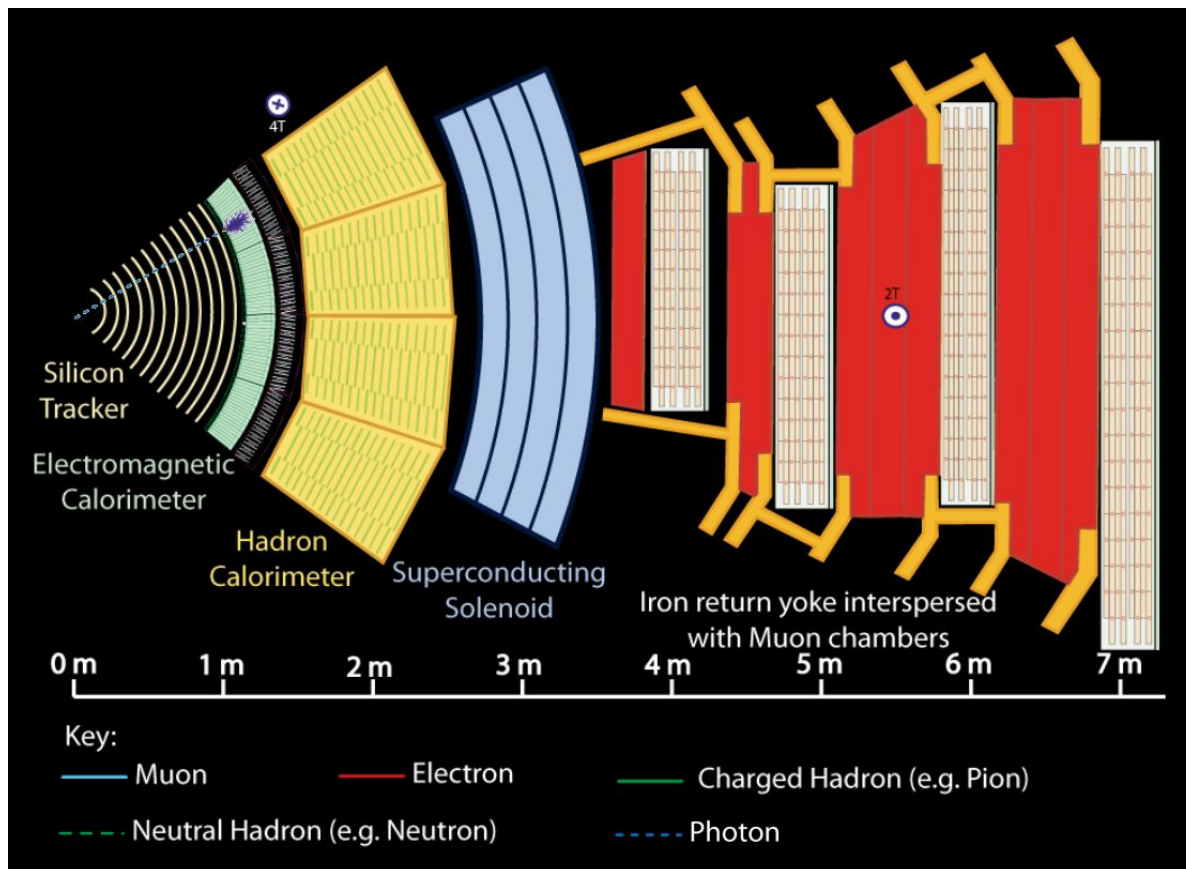
- traccia verde nell’event display
- lasciano traccia nel tracciatore
- depositano energia nel calorimetro elettromagnetico
- dove la traccia si arresta



Ricapitolando le “signature” in CMS

Fotoni:

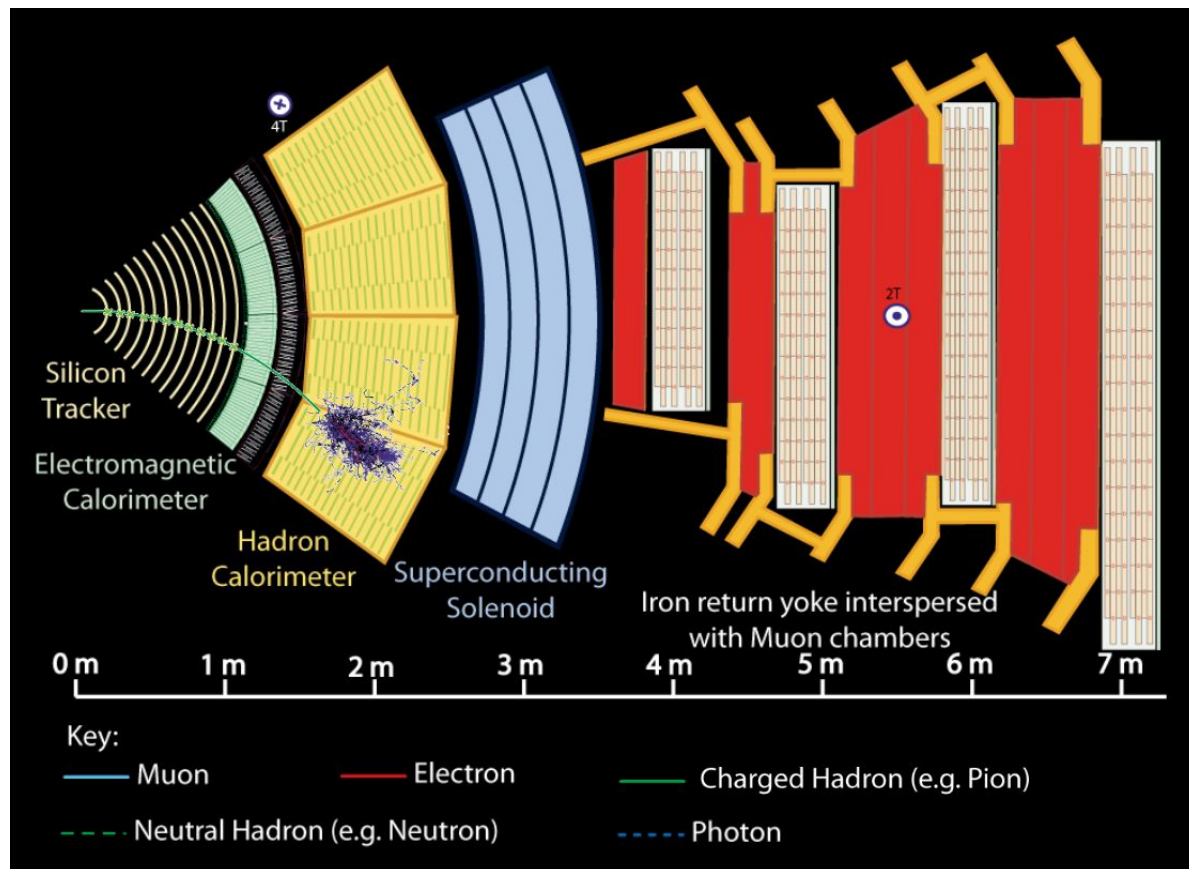
- neutri: nessun segnale nel tracciatore
- depositano energia nel calorimetro elettromagnetico
- dove la traccia si arresta



Ricapitolando le “signature” in CMS

Adroni carichi (p , K^\pm , π^\pm , ...):

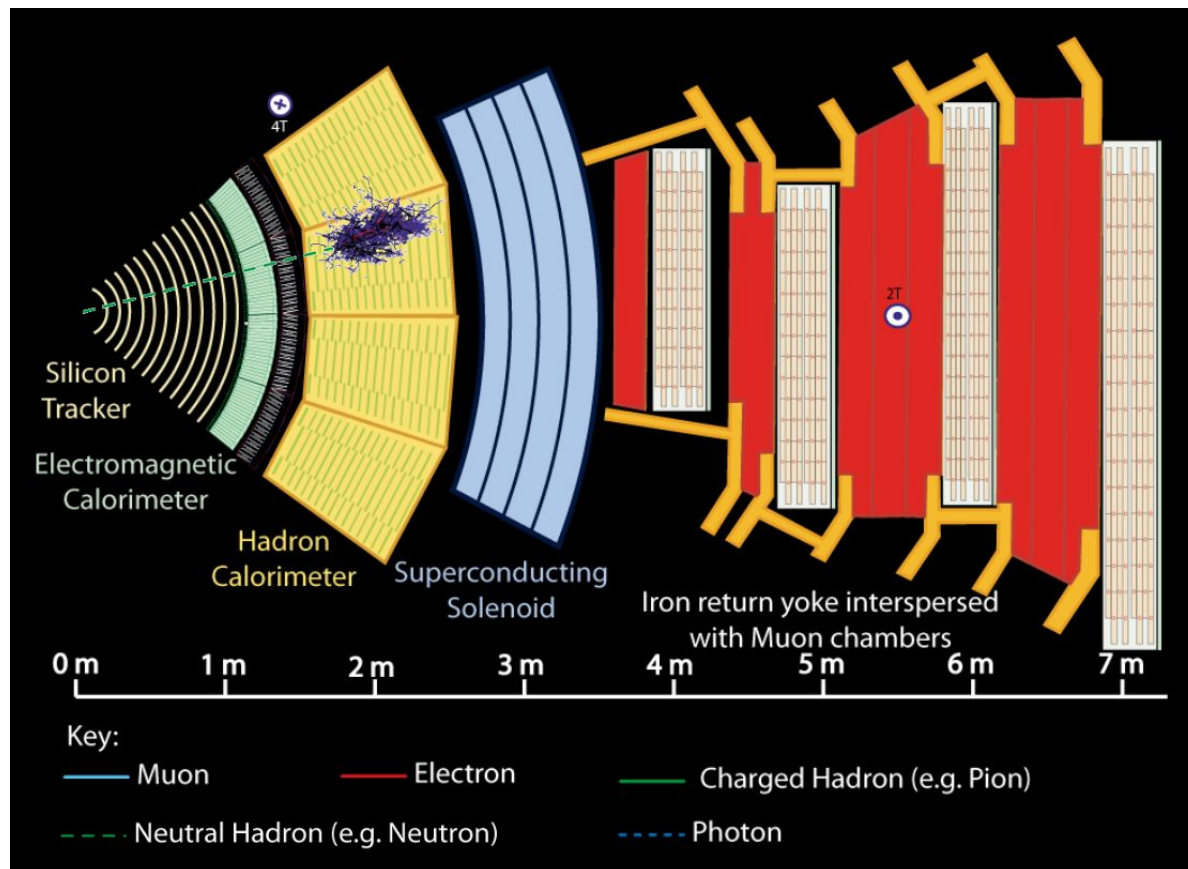
- lascia segnale nel tracciatore
- traiettoria deviata dal campo magnetico
- deposito energetico nel calorimetro adronico
- dove la traccia si arresta



Ricapitolando le “signature” in CMS

Adroni neutri:

- NON lascia segnale nel tracciatore
- traiettoria NON deviata dal campo magnetico
- deposito energetico nel calorimetro adronico
- dove la traccia si arresta



Adesso tocca a voi: istruzioni

- Ciascunə di voi analizzerà un blocco di eventi
- Pagina web per visualizzazione eventi: [iSpy event display](#)
- Analizzerete “fotografie” di collisioni realmente registrate nel 2011 e 2012
- Gli eventi sono stati selezionati per essere di interesse per la ricerca di H, Z e W
- Avrete un numero identificativo X
- Su [iSpy](#) selezionate il file /N50/masterclass_X.ig 
- Dovrete analizzare i 100 eventi presenti nel file
- Ogni evento va registrato sul portale: [CIMA](#) CMS Instrument for Masterclass Analysis
- CERN-31Mar2025 > Bari > 50.X
- Inserite i dati evento per evento
- I dati raccolti saranno presentati automaticamente come istogrammi

Select Event Event index: <input type="text" value="1"/> Event number: 50.1-1	Final State <input type="radio"/> e v <input type="radio"/> μ v <input type="radio"/> e e <input type="radio"/> μ μ <input type="radio"/> 4e <input type="radio"/> 4 μ <input type="radio"/> 2e 2 μ	Primary State Charged Particle: <input type="radio"/> W+ <input type="radio"/> W- <input type="radio"/> W \pm <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H) <input type="radio"/> Zoo	Enter Mass <input type="text"/> GeV/c ² <input type="button" value="Next"/>
--	--	---	---

μ^\pm	Traccia rossa	attraversa tutto il rivelatore
e^\pm	Segnale verde	con traccia gialla
Fotone	Segnale verde	senza traccia gialla
MET	Freccia rosa	

Per capire il segno della carica bisogna allineare la visuale all'asse z:

- curvatura in senso orario \rightarrow positiva
- curvatura in senso antiorario \rightarrow negativa

Higgs (H)	125 GeV	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu, 4e, 2\mu 2e$ $H \rightarrow 2$ fotoni
Bosone Z	90 GeV	$Z \rightarrow 2\mu$ $Z \rightarrow 2e$
Bosone W^+	80 GeV	$W^+ \rightarrow e^+ + \text{MET}$
Bosone W^-	80 GeV	$W^- \rightarrow e^- + \text{MET}$
"Zoo"	altre particelle	che decadono negli stessi stati finali