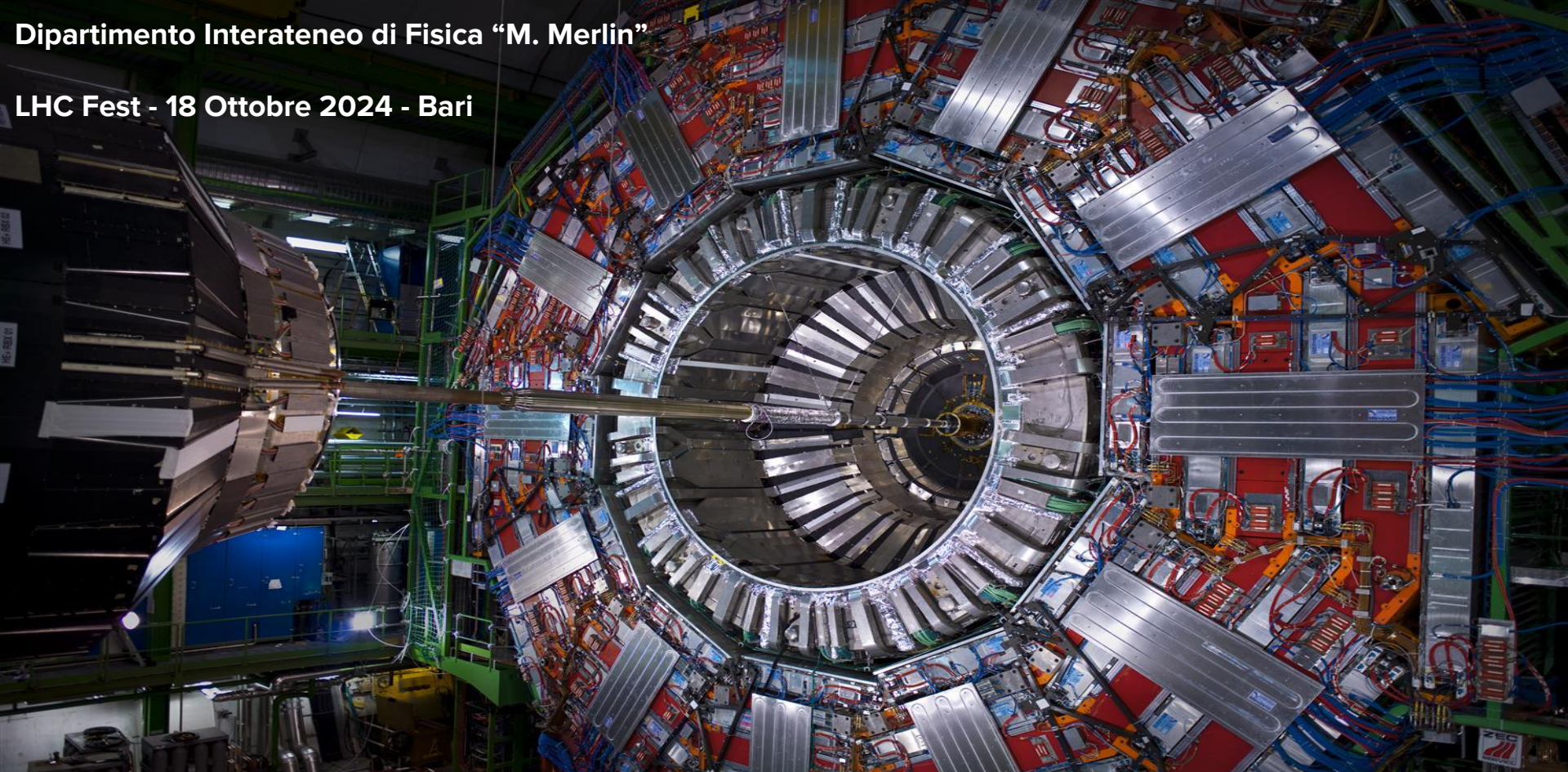


Dipartimento Interateneo di Fisica "M. Merlin"

LHC Fest - 18 Ottobre 2024 - Bari



La rivelazione di particelle con CMS

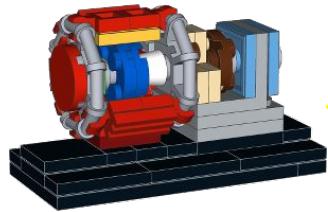




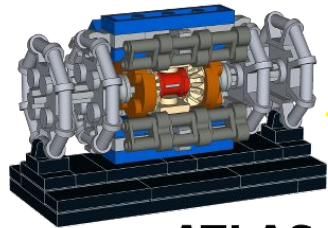
CMS si basa su una **collaborazione** di fisici, ingegneri, tecnici e studenti di più di 6000 persone appartenenti a 247 istituzioni differenti distribuite in 57 paesi [[fonte](#), dati 2022]

- italiani circa 400
- baresi circa 40 ... e in futuro anche qualcunə di voi! - [la nostra pagina web](#)

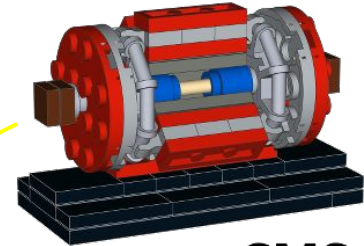
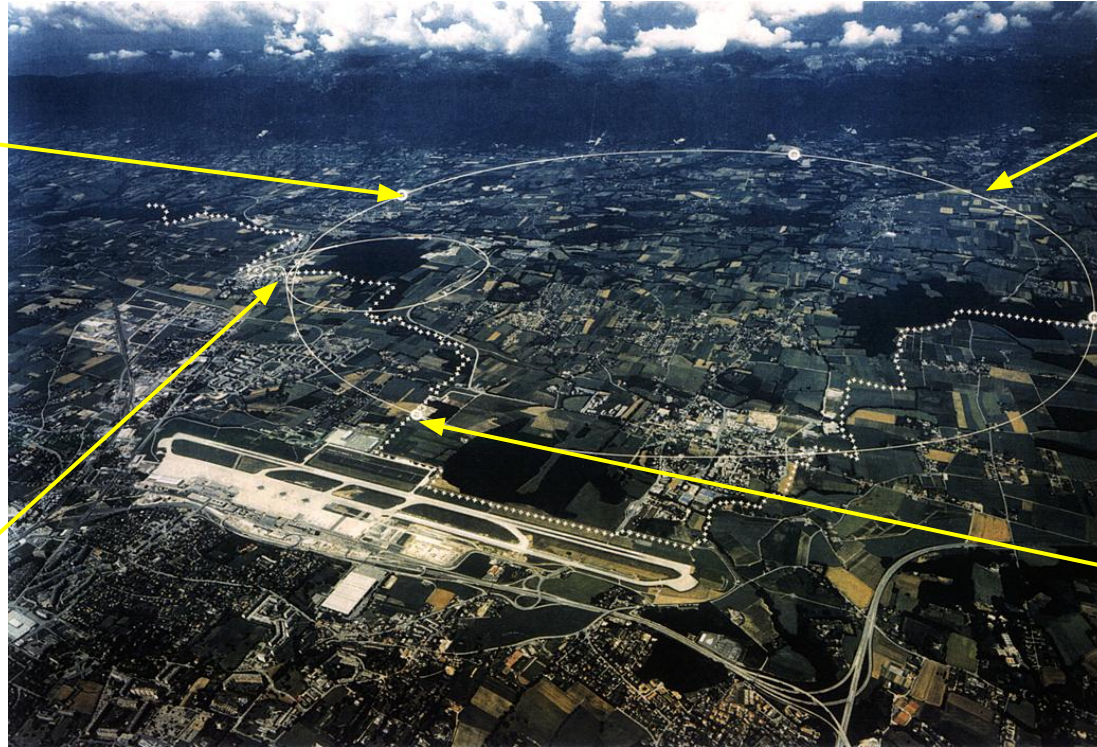
Gli esperimenti più grandi ad LHC



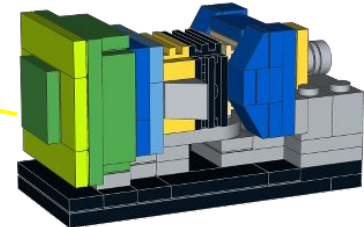
ALICE



ATLAS



CMS



LHCb

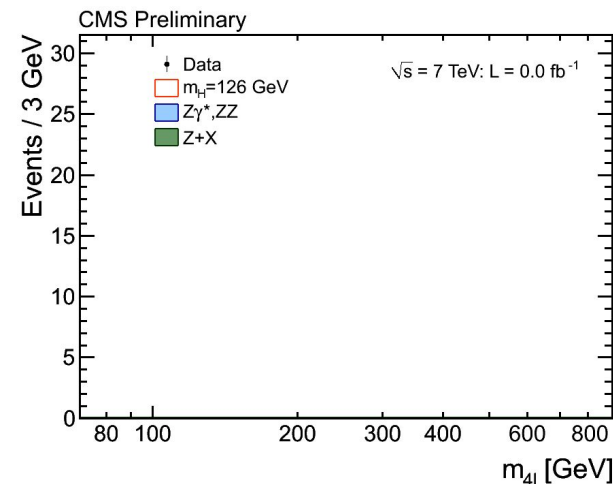
La scoperta del bosone di Higgs

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

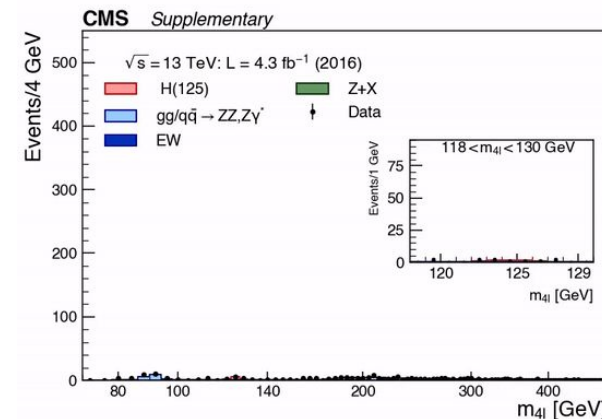
I dati raccolti dagli esperimenti CMS e ATLAS nel 2011 e 2012 hanno confermato ciò che Brout, Englert e Higgs avevano predetto 60 anni prima.

- Brout-Englert: [Phys. Rev. Lett. 13, 321 – 31/08/1964](#)
- Higgs: [Phys. Rev. Lett. 13, 508 – 19/10/1964](#)

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

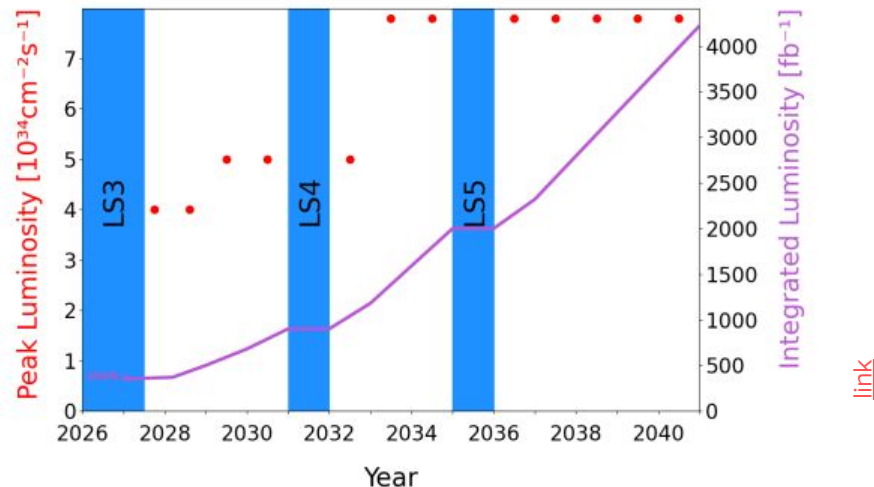
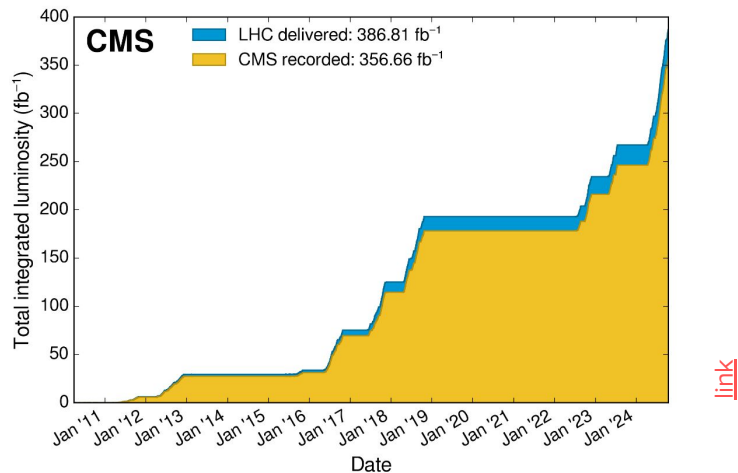


[link](#)



[link](#)

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



- ~ 25 fb⁻¹ per scoperta dell'Higgs, usati anche da voi (esercizio di ieri: 14 fb⁻¹)
- ~ 360 fb⁻¹ raccolti finora
- statistica x10 fino alla fine della presa dati

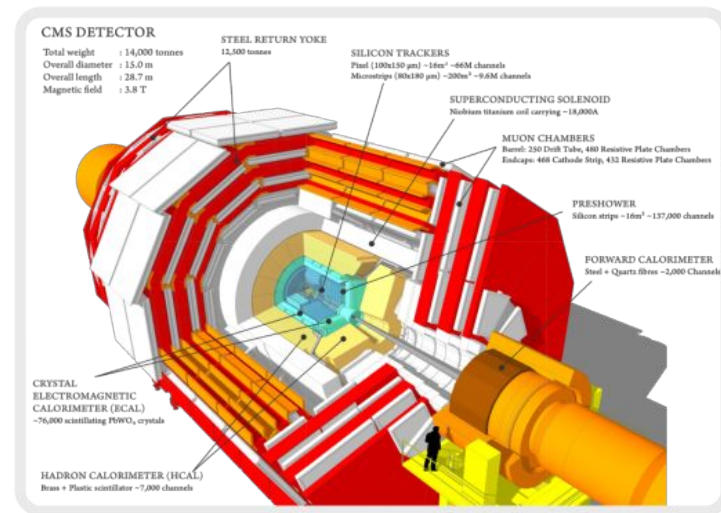
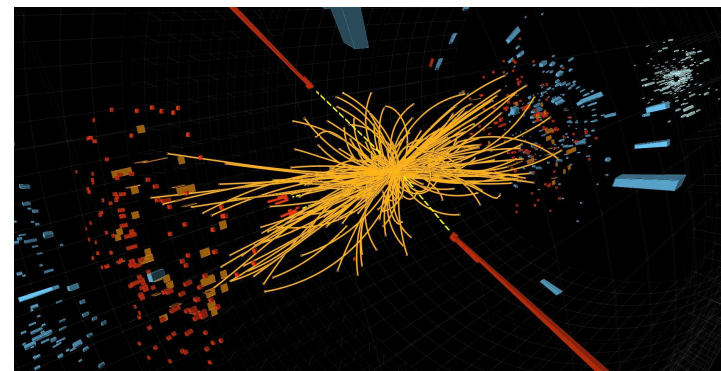
Fotografare con CMS una collisione ad LHC

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

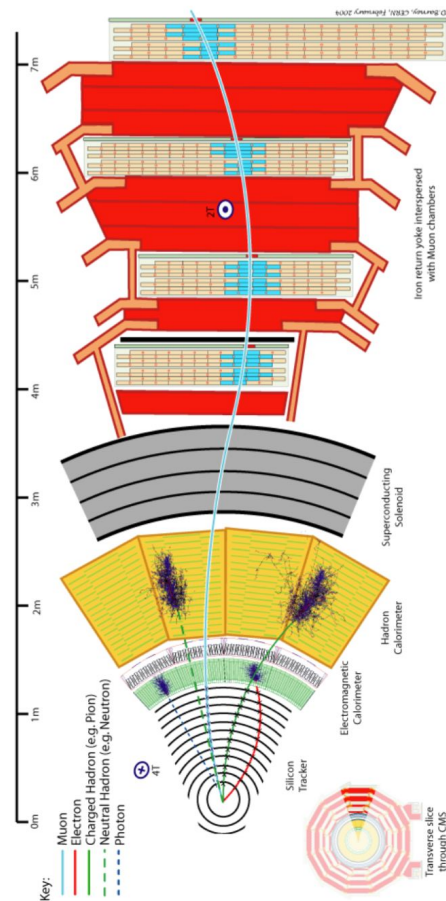
Serve un **apparato complesso** per fare la **ricostruzione**, ossia identificare le particelle prodotte e misurarne le proprietà: **tipologia, impulso, vertice di produzione**



L'esperimento CMS

CMS (Compact Muon Solenoid) è:

- un esperimento molto grande
 - peso: 14 tonnellate
 - diametro x lunghezza: 15 m x 28.7 m
 - per separare spazialmente le varie particelle
 - 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
 - ogni tipologia è caratterizzata da una “firma” (o “segnatura”)
 - è ottimizzato per la ricostruzione dei **Muoni**
- ha simmetria cilindrica
 - contiene un magnete superconduttore **solenoidale**



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

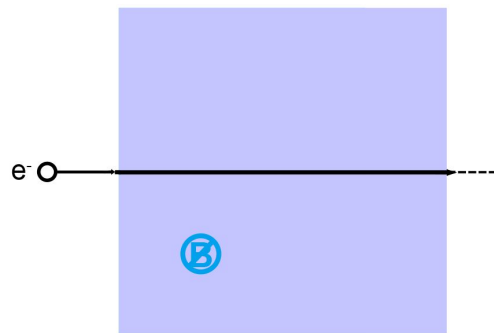
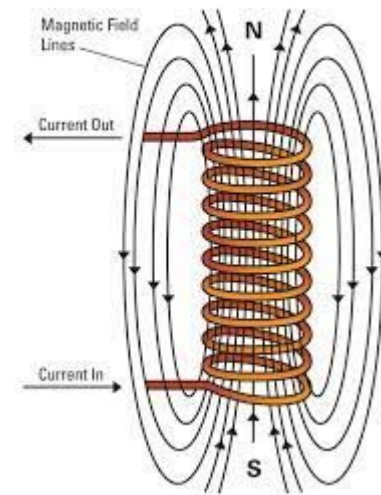
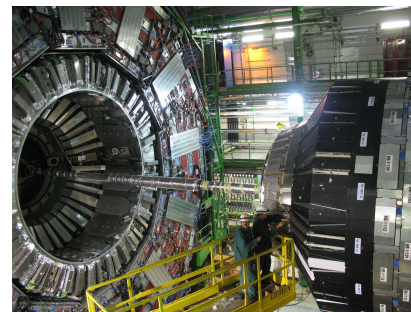
Forza di Lorentz: particella carica (di **carica q**) si muove con **velocità \underline{v}** in **campo magnetico \underline{B}** risente di una **forza**

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

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}



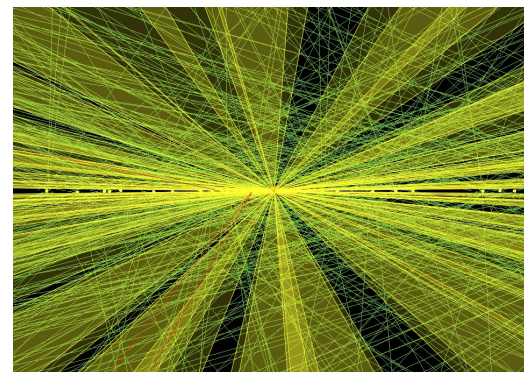
Tracciatori e rivelatori di vertice

Una collisione tra pacchetti di protoni (10^{11}) è molto complicata!

C'è una collisione principale e decine di collisioni secondarie

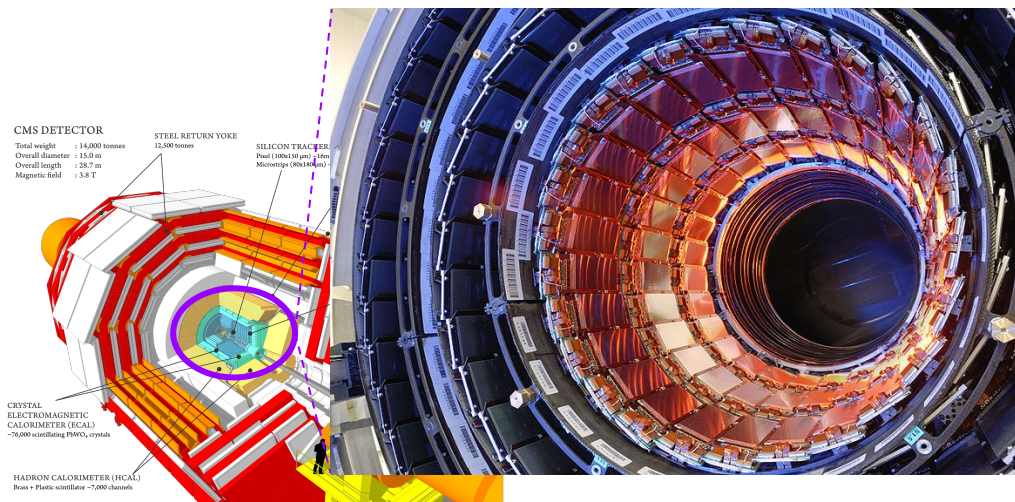
(Run-1: ~30, Run-2: ~45, Run-3: ~65, ... Phase-2: ~200!)

In totale vengono prodotte migliaia di tracce, tutte da ricostruire



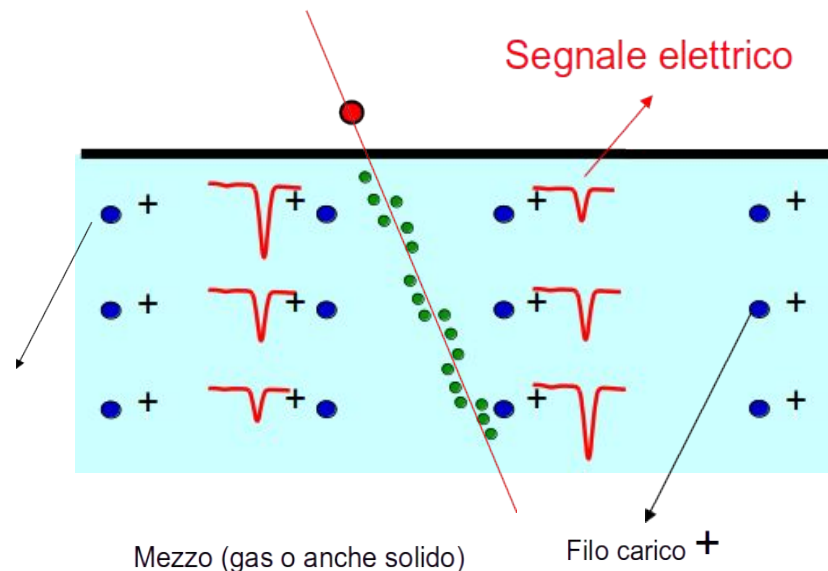
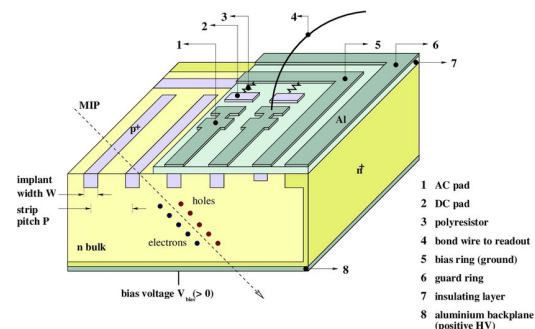
Rivelatori al silicio altamente precisi posti nello strato più interno

- 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

1. Interazione coulombiana
(Ionizzazione / produzione coppia elettrone-lacuna)
2. produzione di un segnale elettrico
3. raccolta del segnale (hit)
4. traiettoria della particella ricostruita unendo le hit di più rivelatori



Calorimetro elettromagnetico

Obiettivo dei calorimetri elettromagnetici:

riconoscere e ricostruire elettroni, positroni e fotoni

Strati di materiale denso alternati a strati di scintillatore

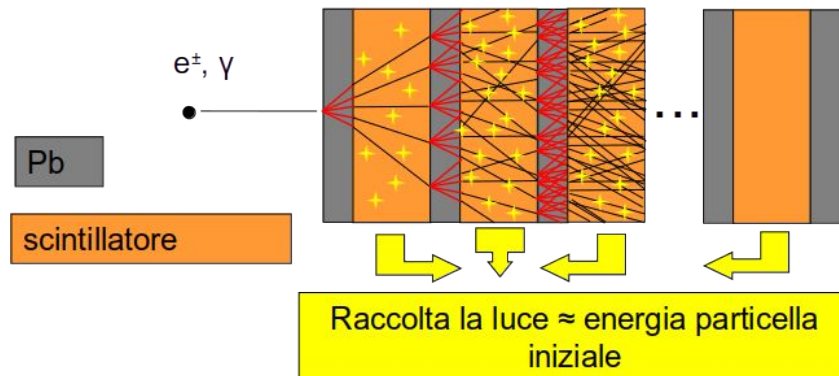
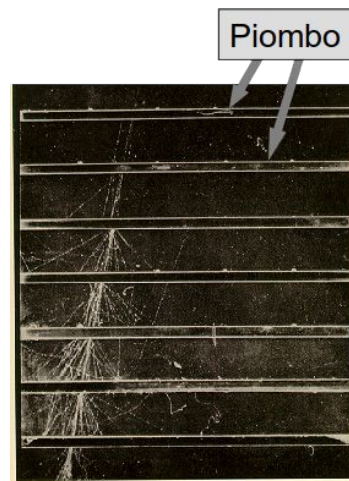
Particella passa e interagisce elettromagneticamente →

→ 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:

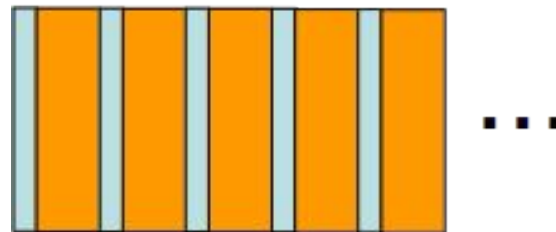
**riconoscere e misurare l'energia degli adroni
prodotti nella collisione**

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

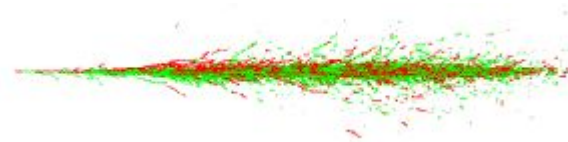
Principio di funzionamento simile al calorimetro
elettromagnetico, ma con materiali e dimensioni
diverse perché è diverso il tipo di particella

Lo sciame adronico, rispetto a quello elettromagnetico:

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



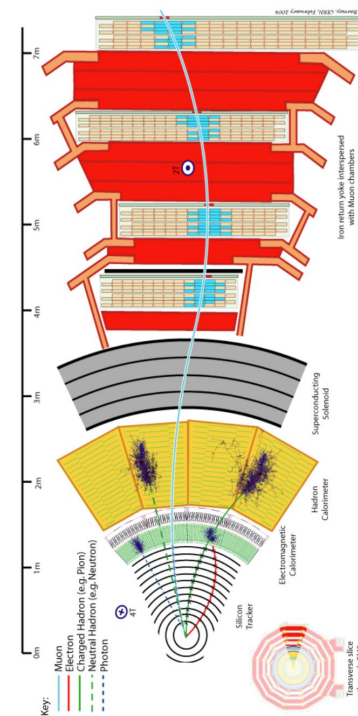
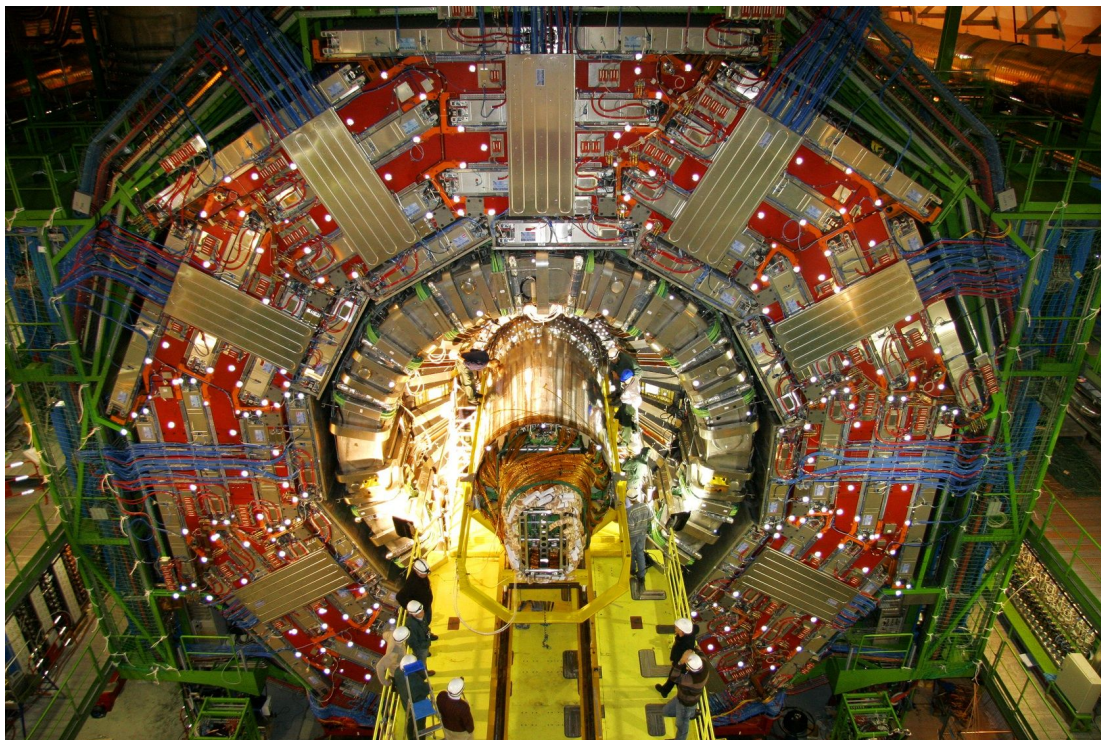
Sciame elettromagnetico



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!

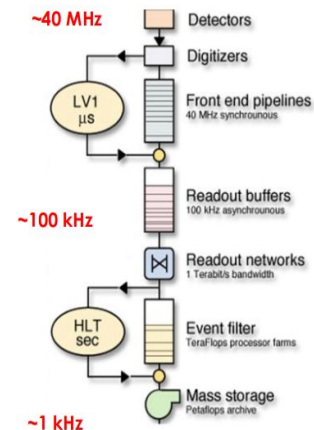
Sistema di trigger a due step:

- effettua una prima ricostruzione approssimata (velocissima, $4 \mu\text{s}$) 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” $\sim 1\text{k}$ eventi/s → 1 TB/s

Nel periodo 2022-2025 ci aspettiamo di raccogliere 600k TB!

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



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) $H \rightarrow \gamma\gamma$

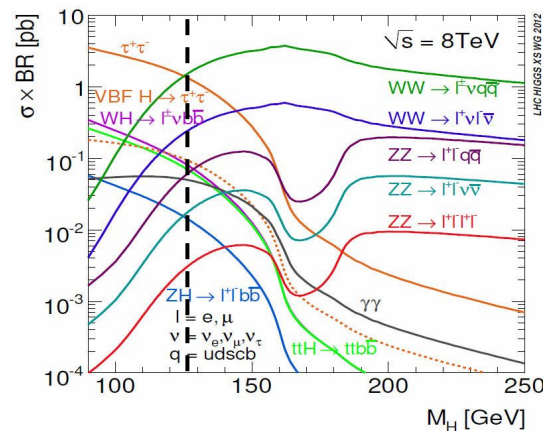
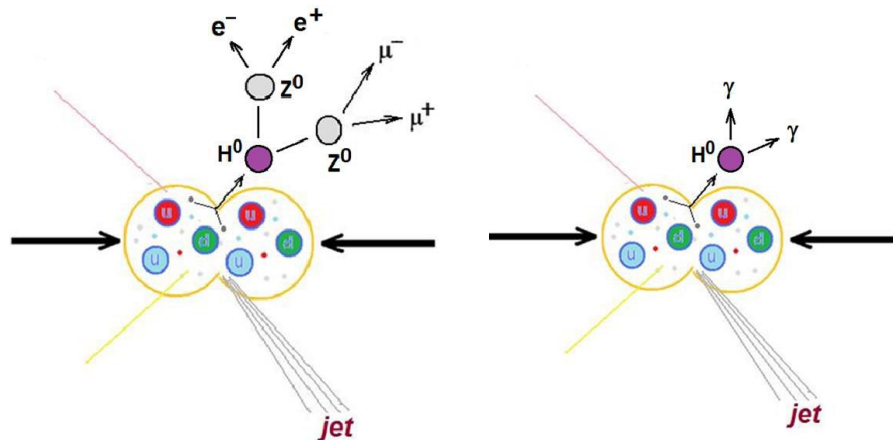
Per il primo canale, tre combinazioni possibili:

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

Per il secondo canale, due fotoni nello stato finale

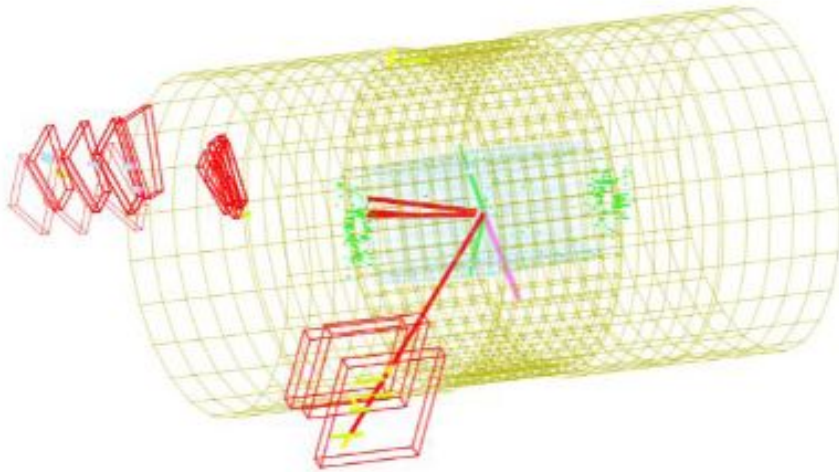
I fotoni rilasciano un segnale nel calorimetro elettromagnetico,

ma sono particelle neutre \rightarrow nessun segnale nel tracciatore

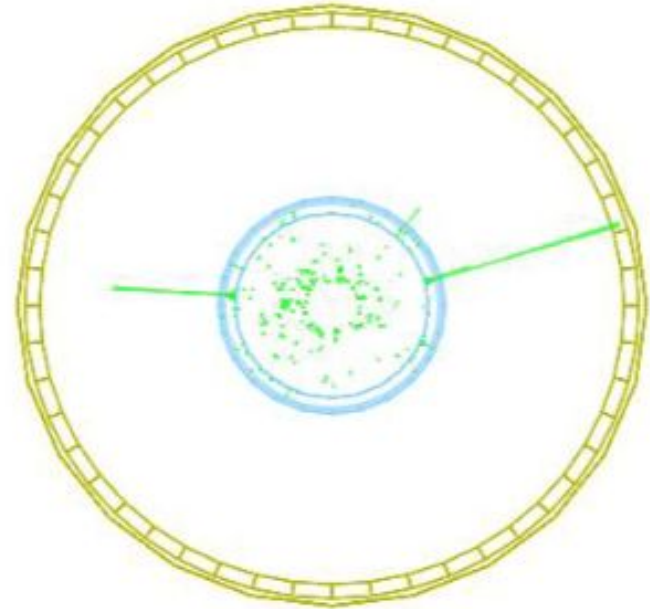


Higgs boson candidates

Higgs decay to two Z bosons:



Higgs decay to two photons:



L'enorme mole di dati non consente di lavorare guardando le “fotografie” una per una

Trigger: effettua una prima ricostruzione e categorizza gli eventi richiedendo la presenza di alcune particelle con determinate caratteristiche

Gran parte degli eventi viene scartata (gli eventi più comuni non sono interessanti per la fisica)

Segue una ricostruzione più fine per gli eventi restanti

Ciascun gruppo di lavoro seleziona i trigger di interesse ed effettua una ricerca dello stato finale di interesse

I dati di ieri erano stati già preparati al fine di cercare il decadimento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

Gli eventi selezionati non sono tutti eventi di “segnale”: delle strategie (spesso innovative!) vanno sviluppate per comprendere i dati raccolti

Infine i risultati si discutono collettivamente, con verifica delle procedure/tecniche utilizzate e delle conclusioni

Proposte di tesi magistrale affini alle nostre attività



Argomento	Abstract	Contatti
Eco-Gas studies for RPC for future HEP and Beyond applications		Gabriella Pugliese /Dayron Ramos
Performance studies of the CMS RPC system during RUN3 data taking		Gabriella Pugliese
Measurement and Simulation of background in Muon system in Run-3	Measurement of the background in the CMS muon system with data taken in 2024. Evaluation of newly installed shielding on the background. Comparing the measured data with fluka simulation and extrapolation of the background for high-luminosity LHC	Piet Verwilligen
Simulation of the CMS Triple-GEM detectors	Simulation of the detector physics of a CMS Triple-GEM detector. Comparing simulated and measured signal waveforms. Investigating the impact of ion space charge on the gain of the Triple-GEM detectors	Piet Verwilligen
Spettroscopia del bottomonio e ricerca di stati esotici	Studiando le transizioni adroniche nel sistema del bottomonio (b-bbar) si cercano possibili stati esotici bottomonium-like, esplorando stati finali con due pioni o due kaoni. Si usano dati del Run3 ma anche del Run2 in aggiunta. Tesi sperimentale di analisi dati.	Alexis Pompili (alexis.pompili@ba.infn.it)
Spettroscopia del sistema mesonico (b-cbar): ricerca di stati eccitati del mesone Bc	Si vuole ricostruire le transizioni dipioniche e radiative degli stati eccitati Bc(3S) e Bc(2P) rispettivamente (con il mesone Bc nello stato finale). Si usano dati del Run3 ma anche del Run2 in aggiunta. Tesi sperimentale di analisi dati.	Alexis Pompili
Ricerca di stati barionici con due quark beauty (bbq)	Mediante l'uso dei dati del Run-3, sfruttando il trigger inclusivo del mesone Bc, si vogliono cercare signature del decadimento di barioni con due quark pesanti del tipo bbq, predetti dal modello a quark ma non ancora scoperti sperimentalmente. Tesi sperimentale di analisi dati.	Alexis Pompili
Studio delle transizioni radiative della X(3872) in charmonium+ fotone usando i dati del Run-3	Il confronto fra i decadimenti dello stato esotico X(3872) in J/psi+fotone e PsiPrime+fotone e' in grado di fornire importanti informazioni sulla natura della X(3872). Si vuole usare tutta la statistica disponibile del Run3 usando il trigger dimuonico inclusivo. Tesi sperimentale di analisi dati.	Alexis Pompili
Simulazione angolare completa del decadimento di stati esotici negli stati finali J/psi+J/psi e J/psi+Phi per il generatore JHUGen	L'implementazione del decadimento di stati esotici tipo X(6900) e X(4140), promptly-produced, rispettivamente negli stati finali J/psi+J/psi e J/psi+Phi, nel generatore JHUGen mediante il formalismo di elicità, e' indispensabile per permettere lo studio di spin-parità di stati esotici prodotti direttamente. La tesi e' a cavallo fra la fisica delle particelle teorica e sperimentale.	Alexis Pompili
Characterization of strip sensor for the upgrade of the CMS Tracker at high luminosity		Salvatore My, Donato Creanza
Assembling and detection efficiency studies on PS modules for the HL-LHC CMS Tracker		Salvatore My, Donato Creanza
Noise Studies on Full Size PS Modules Prototypes for the Phase-2 Upgrade of the CMS Experiment		Salvatore My, Donato Creanza

Proposte di tesi magistrale affini alle nostre attività



Assembling and detection efficiency studies on PS modules for the HL-LHC CMS Tracker		Salvatore My, Donato Creanza
Noise Studies on Full Size PS Modules Prototypes for the Phase-2 Upgrade of the CMS Experiment		Salvatore My, Donato Creanza

attività di cloud computing a supporto dell'esperimento CMS	L'implementazione di soluzioni moderne di calcolo distribuito e parallelo in ambito cloud per supportare l'analisi dei dati di CMS	Giacinto Donvito
Search for the Higgs boson decaying in a pair of charmed quarks with CMS Run3 data	The study will be focused on the background suppression with machine learning techniques	Anna Colaleo
Search for Lepton Flavor Violation at CMS with Run3 data	Charged lepton flavor violation has long been recognized as unambiguous signature of New Physics. New Physics models with charged lepton flavor violation in the tau sector have high discovery potential thanks to their experimental signature, accessible at the CMS experiment at the LHC. This project focuses on $\tau \rightarrow 3\mu$ decays, specifically on the enhancement of the analysis sensitivity through dedicated background studies and the development of deep learning methods for the suppression of the combinatorial background.	Anna Colaleo
Performance studies of the triple GEM detectors at CMS	Evaluation of the trigger and offline performance of triple GEM during CMS data taking. Lab test on the new triple GEM modules to be installed in the next LHC runs.	Anna Colaleo
Performance studies on identification algorithms for Lorentz-boosted objects at CMS	Electroweak scale resonances (Z/W bosons), Higgs bosons and top quarks are often produced with high Lorentz-boosts, with their products so collimated to be reconstructed as large and massive jets. In order to distinguish those particles from QCD background, machine learning algorithms have been developed. In the study, the performance of those algorithms will be evaluated on CMS Run3 data.	Anna Colaleo
Anomaly Detection for the Data Quality Monitoring at CMS	Ensuring the quality of data in large HEP experiments such as CMS at the LHC is crucial for producing reliable physics outcomes. The CMS protocols for Data Quality Monitoring (DQM) are based on the analysis of a standardized set of histograms offering a condensed snapshot of the detector's condition. Recently, unsupervised machine learning (ML) models such as (variational) autoencoders have been successfully employed for the anomaly detection in DQM, with the goal to improve the certification of the data collected in Run3 and the online monitoring of the detector. In this project, the student will optimize a ML architecture to detect anomalies in time series data using Long-Short Term Memory (LSTM) autoencoders. The algorithm will perform time series forecasting, providing a dynamic tool for anomaly detection in real-time data taking. The development will focus on the monitoring of the CMS Muon detector, using one- and two-dimensional data (histograms and images) recorded during the Run-3.	