



Fisica ai collisori di particelle: esperimento CMS

Andrea.Massironi@mib.infn.it

- Uno dei 4 esperimenti lungo LHC

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel (100x150 μm) - 1m² - 66M channels
Microstrips (80x180 μm) - 200m² - 9.6M channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying - 18,000A

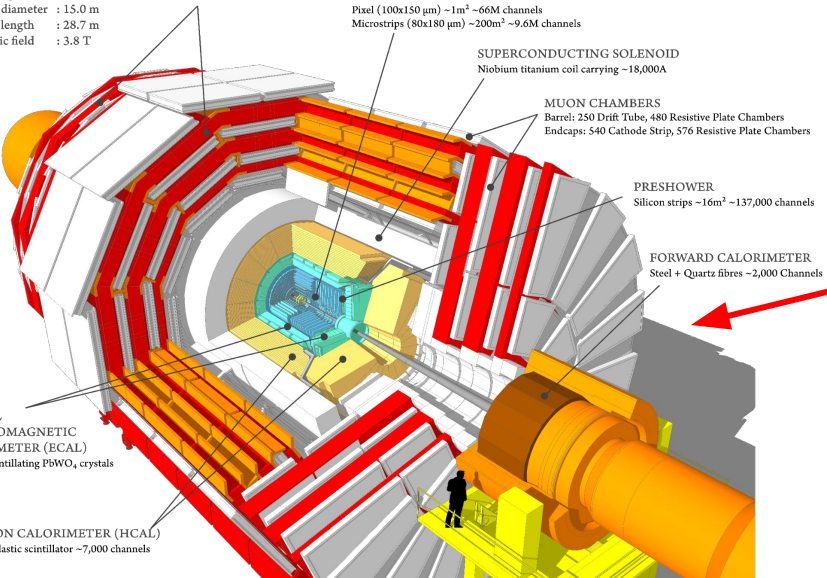
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 540 Cathode Strip, 576 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips - 16m² - 137,000 channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres - 2,000 Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
~76,000 scintillating PbWO₄ crystals

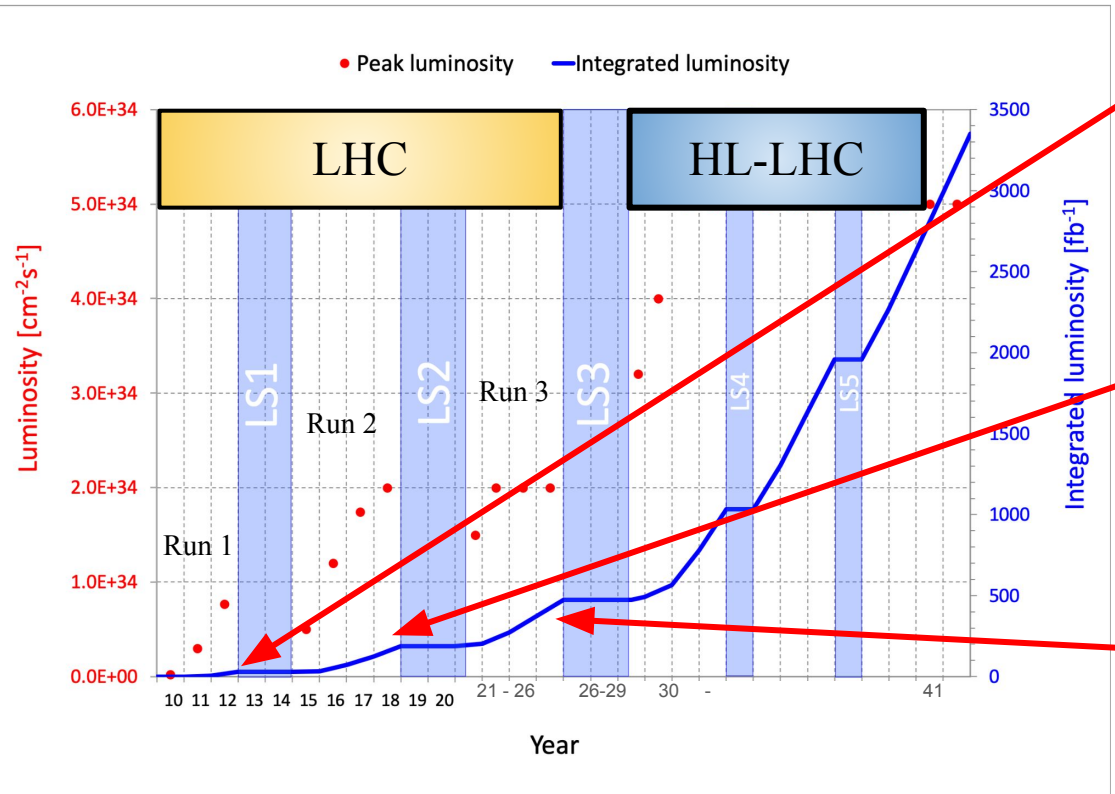
HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator - 7,000 channels



- Una grande macchina fotografica tridimensionale
- **Ricostruzione e identificazione** di diverse particelle: elettroni, fotoni, muoni, leptoni τ , jets, neutrini (?), ...

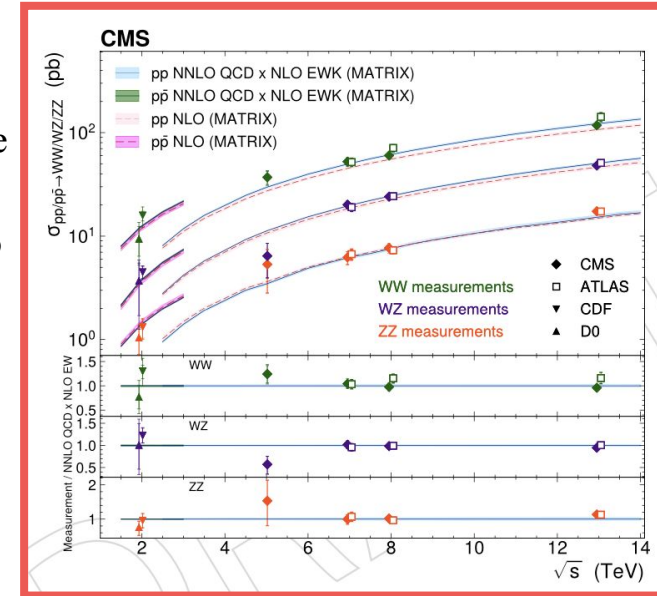


- Informazioni di diverse particelle combinate per eseguire un' **analisi**
- **Misure** di proprietà di particelle note, ricerca di **nuova fisica**, misure di **precisione**, ...

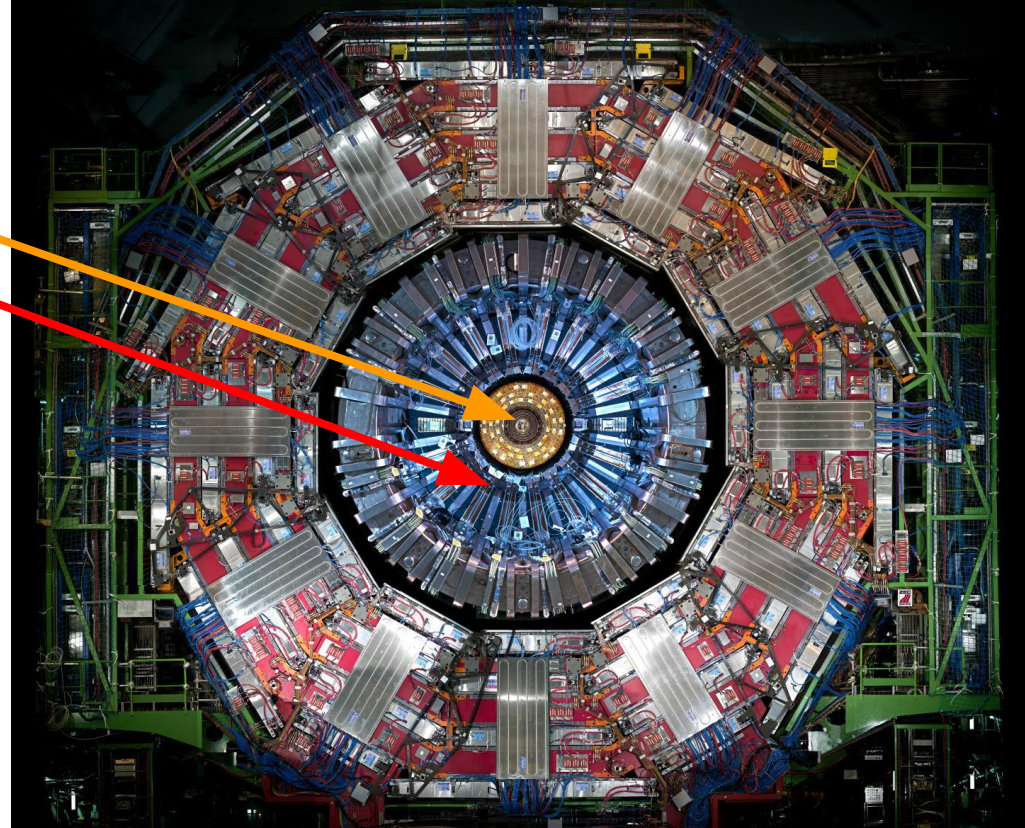


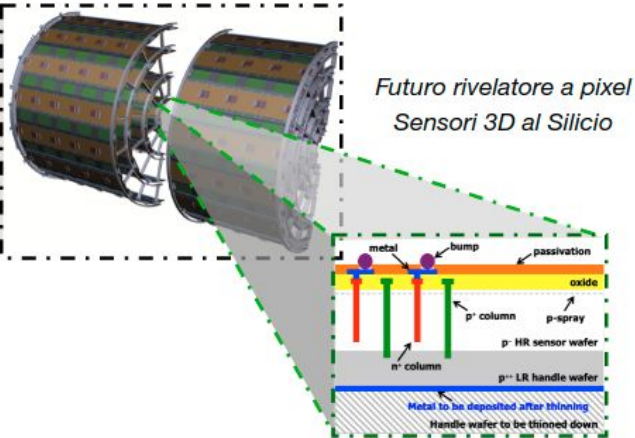
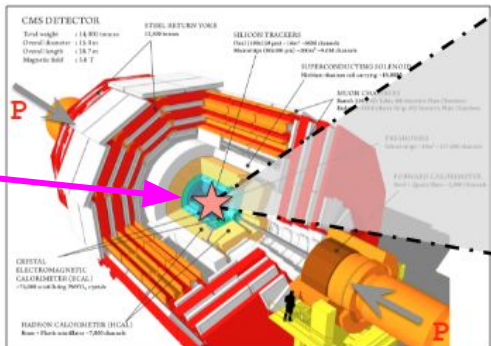
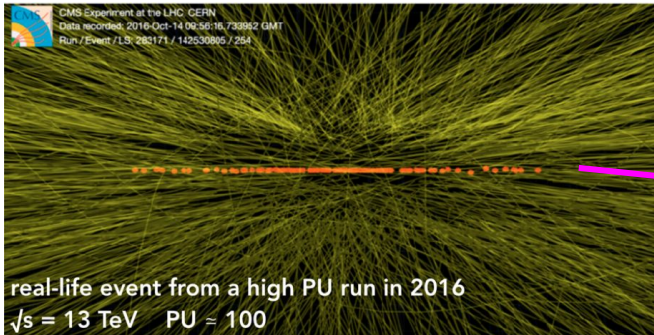
- **Run 1:** con questi dati abbiamo scoperto il bosone di Higgs
 - ~ 24/fb
- **Run 2:** da 8 TeV a 13 TeV
 - ~ 137/fb
- **Run 3:** da 13 TeV a 13.6 TeV
 - ~180/fb (fino ad oggi)
 - Tanti dati da analizzare

- Scopo generale: sondare la **fisica delle interazioni fondamentali** alla scala del **TeV** con elevata precisione
- Ricerca di nuovi fenomeni:
 - Ricerche **dirette**: osservazione diretta di nuove risonanze \Leftrightarrow particelle \Leftrightarrow interazioni
 - Ricerche **indirette**: osservare deviazioni dalle predizioni del modello standard
- Misure di precisione:
 - Processi elettro-deboli rari
 - Fisica del quark top
 - Proprietà e gli accoppiamenti del bosone di Higgs
 - Misure di precisione della massa di H, W, e top quark
 - Fisica delle collisioni con ioni pesanti



- Tracciatore:
 - Rivelatore a pixel
- Calorimetro:
 - Calorimetro elettromagnetico (ECAL)
- Nuovi rivelatori:
 - Rivelatore di tempo, MTD (Minimum ionizing particle Timing Detector)



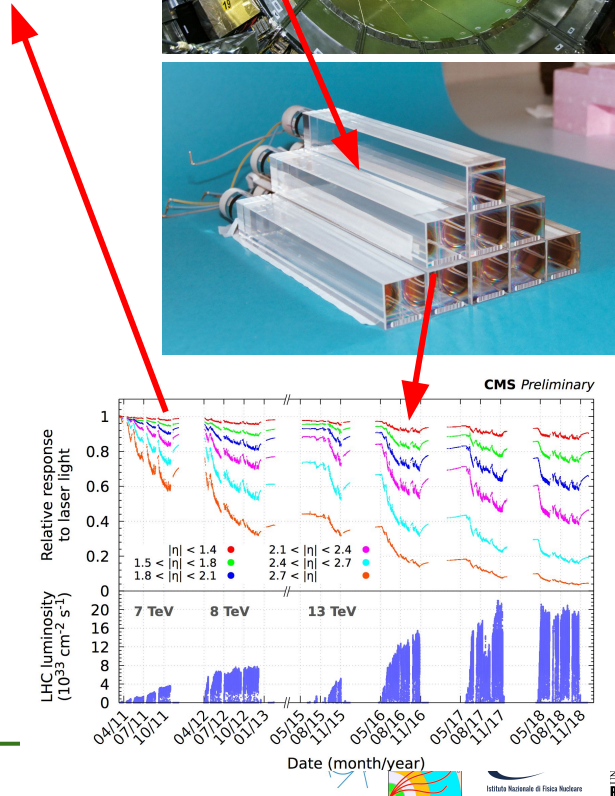
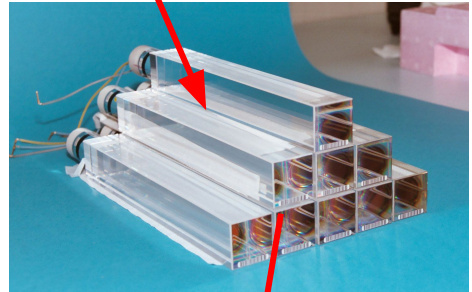
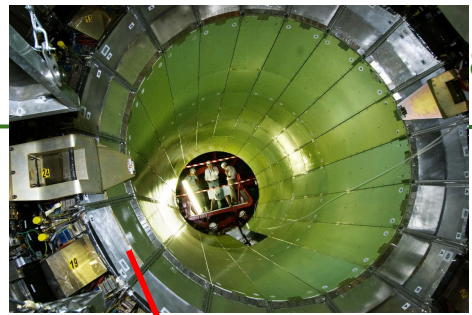


- In preparazione per la fase ad alta luminosità di LHC (HL-LHC)
- Sostituire il rivelatore a pixel, situato nel cuore dell'esperimento, con uno a granularità più fine (x6) e più resistente alle radiazioni (x10)
- R&D dei sensori e nello sviluppo del software per pilotarlo e calibrarlo
- Caratterizzazione dei prototipi con test su fascio e simulazioni

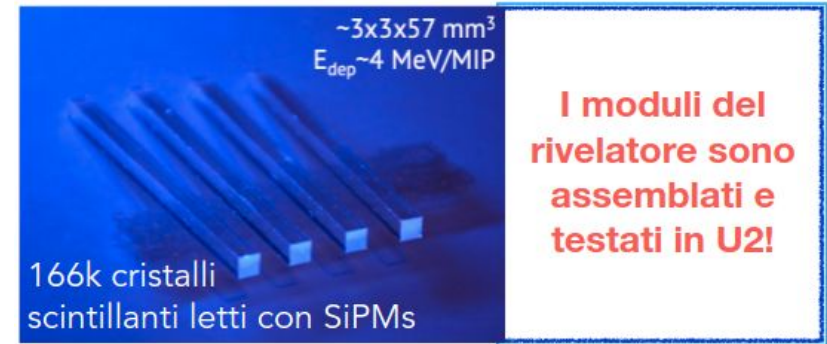
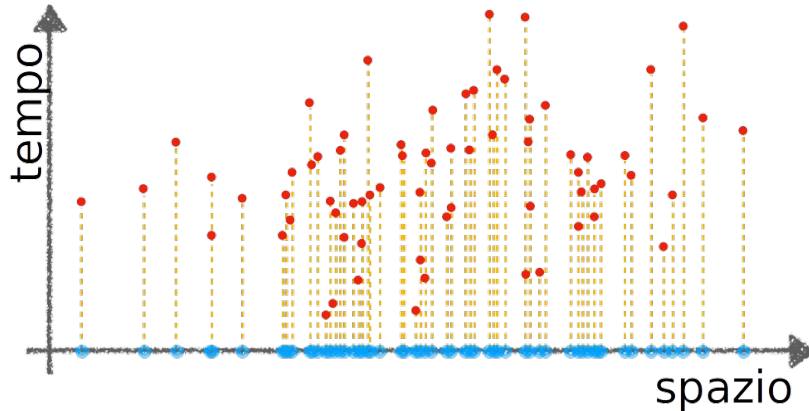
Proposta di tesi: ECAL

- Calorimetro elettromagnetico omogeneo: 75848 cristalli
- L'esposizione alla radiazione danneggia i cristalli → perdita di trasparenza

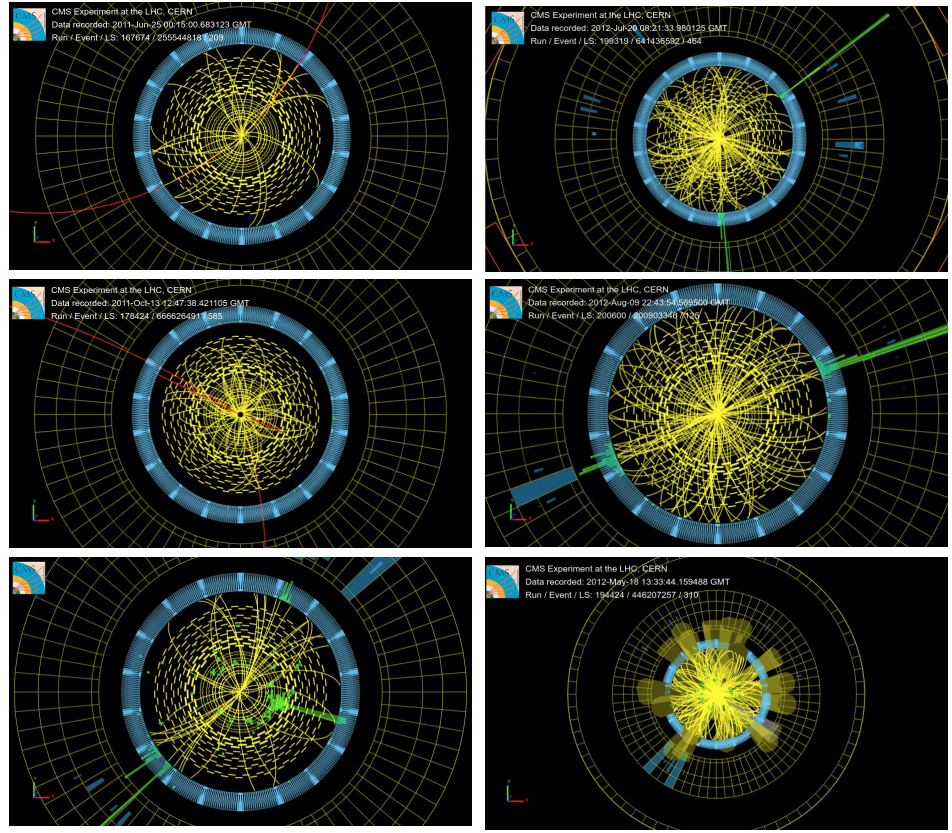
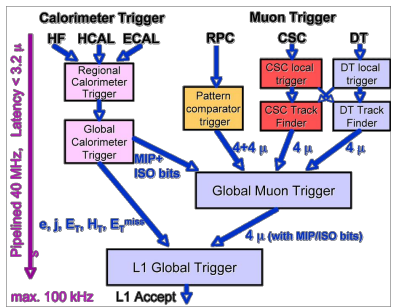
- Studi di predizioni di andamento della perdita di trasparenza con Machine Learning per possibili applicazioni nel trigger per CMS LHC Run 3
 - Perdita di trasparenza vs tempo: dipendenza da luminosità istantanea, luminosità integrata, l'evoluzione passata della trasparenza, ...
 - Approccio:
 - Fit analitico con esponenziali
 - Deep Neural Network (DNN) per regressione
 - Long Short-term memory (LSTM) per regressione
 - Implementazione nel software di CMS (CMSSW)
- Studi di clustering e riduzione di rumore con Machine Learning
 - Possibilità di utilizzare Graph Neural Networks (GNN) per clusterizzare singoli depositi di energia e rimuovere il rumore intrinseco di ogni singolo canale (non correlato coi canali adiacenti)



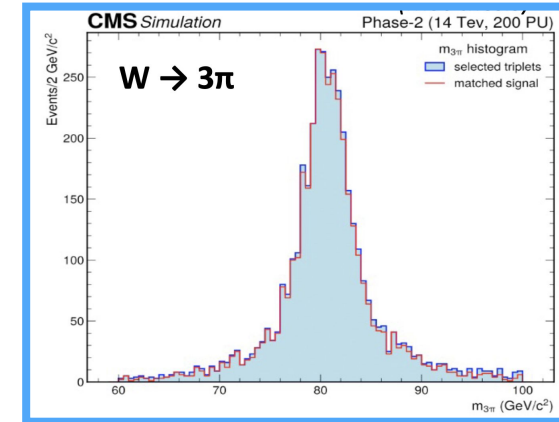
- Misure **temporali** → cambio di paradigma
 - Scopo: attribuire un tempo ad ogni particelle carica
 - Conseguenze: mitigazione del pileup sulla fisica poiché permette la ricostruzione 4D dei vertici
- **Nuovo rivelatore** per cui Bicocca é driving player
- Nuove possibilità permesse da MTD:
 - Tempo di ciascuna traccia con risoluzione temporale $\sigma_t \sim 30$ ps
 - Migliore associazione traccia vertice → implicazione su performance del detector → risoluzione energetica di jet adronici, isolamento dei leptoni, etc.
- Possibilità di lavoro: **simulazione** del sistema, analisi dati di **test beam**, sviluppo **software DAQ**, etc.



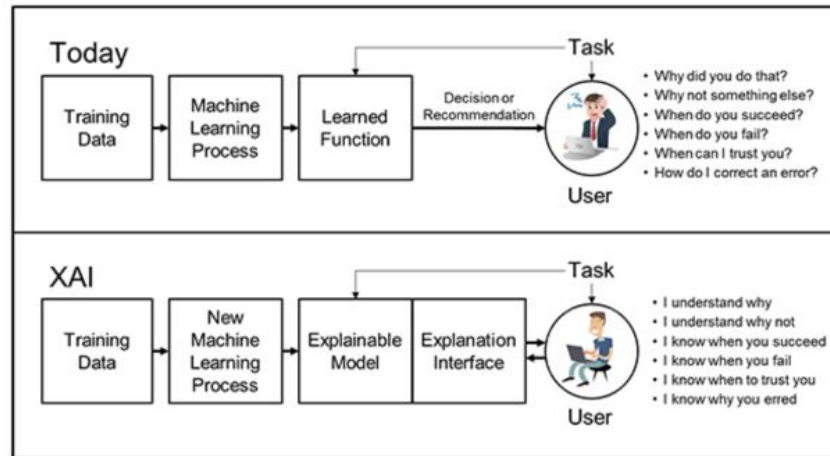
- Selezionare gli eventi interessanti:
trigger
 - **40 milioni** di eventi al secondo
 - Sistema di trigger hardware → **100.000** eventi al secondo
 - Sistema di trigger software → **1000** eventi al secondo salvati e che possono essere analizzati con calma
- Automatizzazione e selezione rapida degli eventi



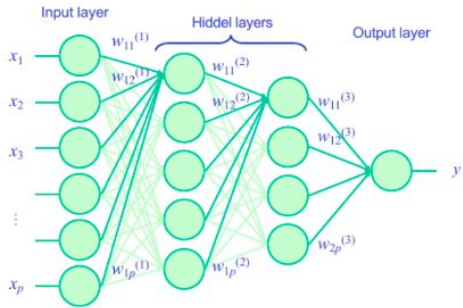
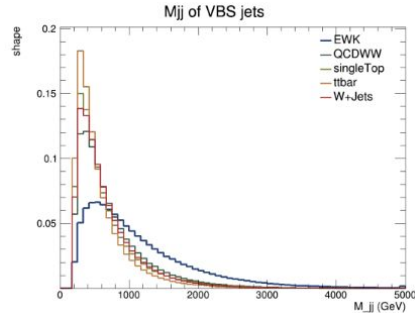
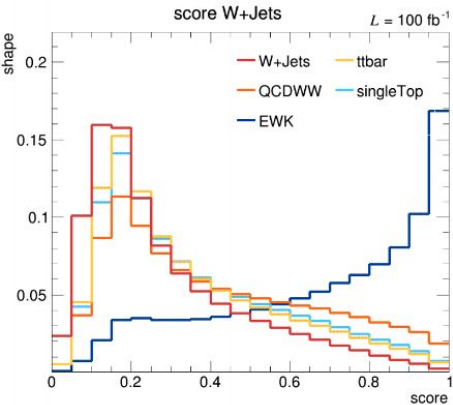
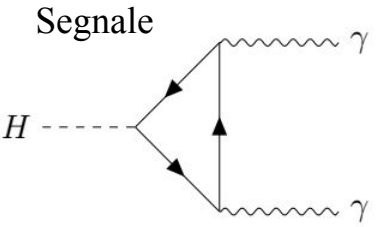
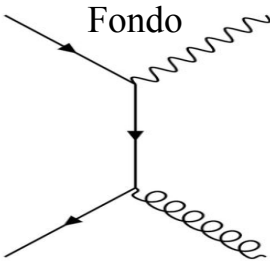
- Un cluster di **FPGA** (Field Programmable Gate Array) è stato installato a Milano nel 2024
- Sviluppo e test di algoritmi di trigger su FPGA per **HL-LHC**
- Progetti di lavoro:
 - Trigger di level-1 dedicati per $H \rightarrow \tau\tau$
 - Trigger di level-1 dedicati per $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$
 - Ricerca del decadimento raro $W^\pm \rightarrow 3\pi$
- **Simulazione ultra-veloce** per fisica delle alte energie
 - Usare **ML** per generare eventi simulati
→ Generative Adversarial Networks (GANs)
 - Avere a disposizione un grande quantità di eventi simulati e' cruciale per la fisica di HL-LHC
 - FPGA sono device costosi ma molto veloci



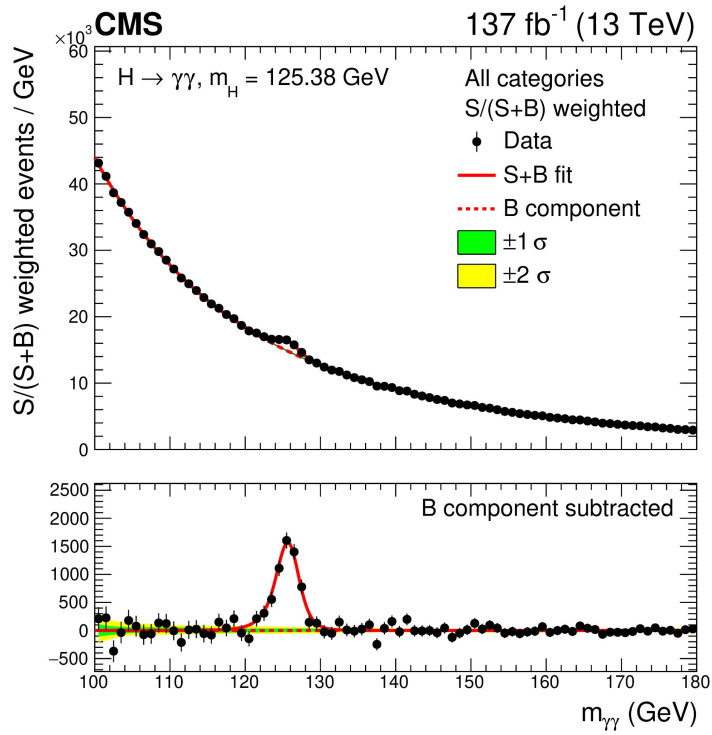
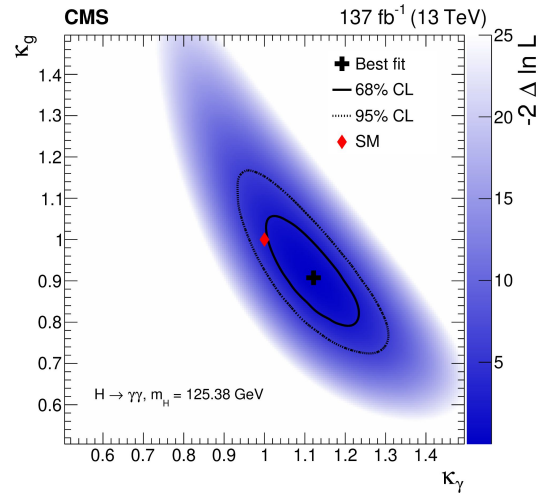
- Sinergia tra **diagnostica medica** e fisica delle alte energie (HEP) per sviluppare modelli AI (**artificial intelligence**) che siano "**spiegabili**"
 - Spiegare cosa ha portato un algoritmo di ML a prendere una decisione
 - Obiettivo: maggiore trasparenza nella risposta, identificazione di possibili bias nel training dataset
 - Evitare di utilizzare un algoritmo di ML come una black box
 - Fra le applicazioni: diagnostica di tumori, etc ...



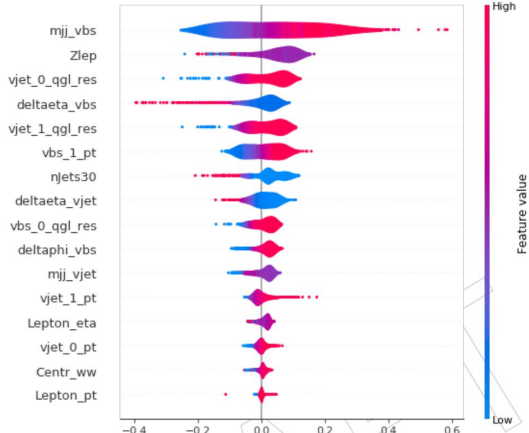
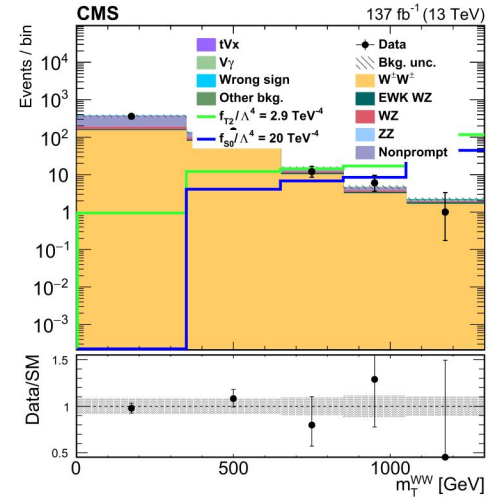
- Selezionare gli eventi interessanti: trigger
- **Analizzare** gli eventi
 - **Identificare** lo stato finale
 - Definire le **selezioni** migliori per isolare il segnale
 - Applicare algoritmi avanzati, **Machine Learning**, Deep Neural Network, BDT, ...



- Selezionare gli eventi interessanti: trigger
- Analizzare gli eventi
- Eseguire un'analisi statistica del risultato

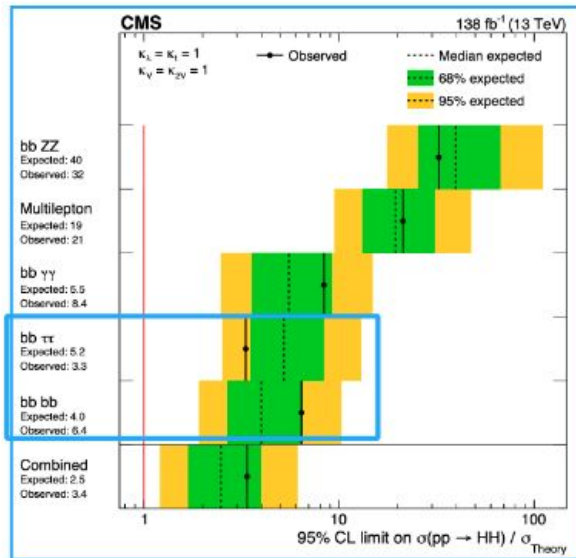
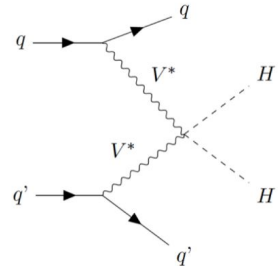
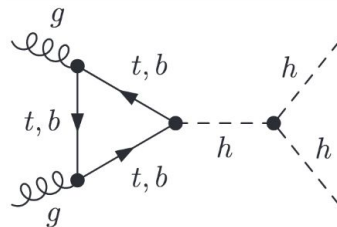


- Misura della **sezione d'urto elettrodebole**
 - Uno dei processi più rari ad LHC
 - Sensibile a nuova fisica anche nel settore di Higgs
 - Chiave di accesso unica al settore elettrodebole del modello standard
- Ricerca di deviazioni attraverso un modello **Effective Field Theory (EFT)**
- Necessità di analisi dati avanzata per ricostruire gli eventi e separare segnale dai fondi
- **Machine Learning** per identificare il segnale e scartare i fondi

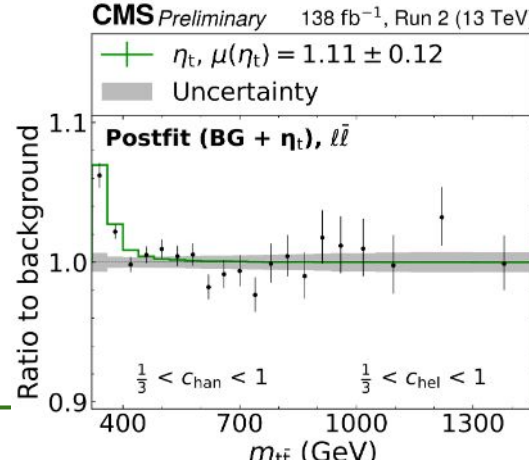
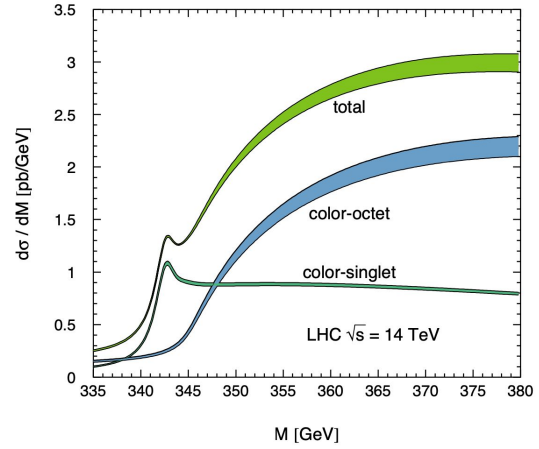


- Bicocca coordina una **rete mondiale di analisi sperimentali + previsioni teoriche** su VBS
- Tesi sperimentali o fenomenologiche assegnate in passato sull'argomento:
 - <https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi/>

- Scopo: osservare un'interazione ancora ignota nel modello standard
 - Possibili **anomalie** → accesso diretto a **nuova fisica**
 - **Higgs self-coupling** → produzione non risonanze di coppie di bosoni di Higgs
- Stato finale analizzato a Milano
 - **HH** → **bbbb**
 - **HH** → **bbττ**
- Aree di lavoro e sviluppo:
 - Usare **ML** per migliorare aspetti cruciali dell'analisi: reiezione dei fondi, massa dell'Higgs, stima data-driven dei fondi, etc.
 - Studiare impatto di nuovi **trigger** sviluppati per Run3

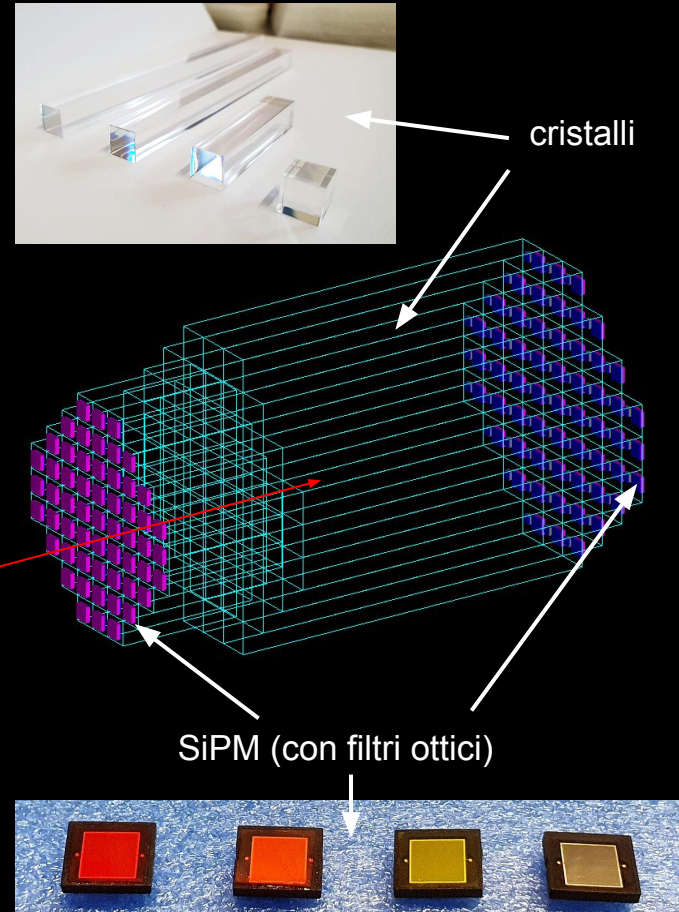


- Evidenza di un eccesso di eventi interpretabile come η_{top} (stato legato top-antitop), a.k.a. **toponio**
- Per confermare l'osservazione si cercano canali di decadimento esclusivi del toponio
 - $\eta_{\text{top}} \rightarrow \gamma\gamma$
 - $\eta_{\text{top}} \rightarrow Z(\ell\ell)H(bb)$
 - $\eta_{\text{top}} \rightarrow \gamma H(bb)$
- Stima del Branching Ratio dei segnali
- Misura di **massa** top, al netto di correzione di energia di legame QCD



Proposta di tesi: Calorimetro 6D per future colliders

- Cosa ci sarà **dopo HL-LHC**?
 - Obiettivo-1: aprire una nuova frontiera sulle misure di **precisione** del modello standard
 - Obiettivo-2: raggiungere **energie più alte** di quelle di LHC
- Opzioni in discussione
 - Collider e^+e^- con $E_{CM} \sim 250$ GeV e $L = 100$ km
 - Collider pp con $E_{CM} \leq 100$ TeV e $L = 100$ km
 - Collider $\mu^+\mu^-$ con $E_{CM} \sim 10$ TeV
- Milano Bicocca → **calorimetro a cristalli per e^+e^-**
 - Necessità di una nuova generazione di detector di particelle
 - Possibile nuovo detector: calorimetro ad alta risoluzione 6D
 - **Misura posizione, energia, tempo, e tipo di particella**
 - Stage di tesi permette di lavorare su:
 - **Cristalli scintillanti** e foto-moltiplicatori al silicio (**SiPM**)
 - Misure in **laboratorio**, **test su fascio al CERN**, **simulazioni**
 - Costruzione e caratterizzazione **prototipo** calorimetro



<https://www.fisica.unimib.it/it/didattica/corsi-studio/corso-laurea-triennale-fisica/argomenti-prova-finale-del-terzo-anno/argomenti-prova-finale-del-terzo-anno-fisica-delle-particelle>

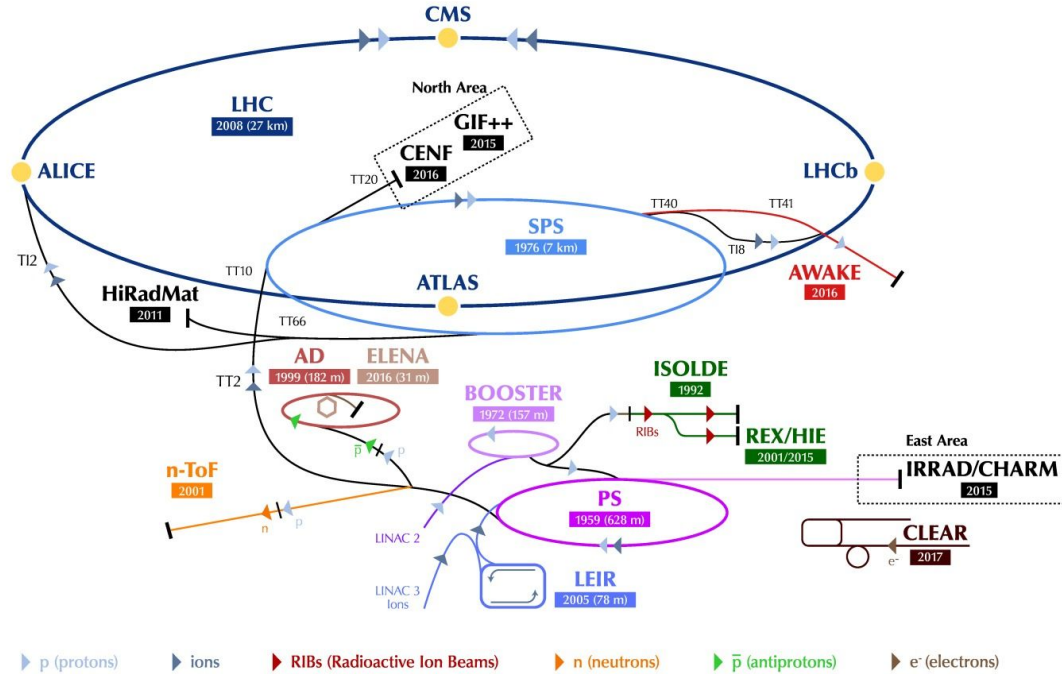
Come contattarci per tesi triennali

- ECAL
 - andrea.massironi@mib.infn.it, simone.gennai@mib.infn.it, alessio.ghezzi@unimib.it
- Pixel
 - simone.gennai@mib.infn.it, mauro.dinardo@unimib.it, paolo.dini@mib.infn.it, sandra.malvezzi@mib.infn.it
- MTD
 - tommaso.tabarelli@unimib.it, federico.deguio@unimib.it, alessio.ghezzi@unimib.it, andrea.benaglia@mib.infn.it, martina.malberty@mib.infn.it, marco.paganoni@unimib.it, marco.lucchini@unimib.it
- VBS
 - raffaele.gerosa@unimib.it, pietro.govoni@unimib.it, andrea.massironi@mib.infn.it, marco.paganoni@unimib.it
- Trigger, ML, FPGA
 - simone.gennai@mib.infn.it, mauro.dinardo@unimib.it, paolo.dini@mib.infn.it, francesco.brivio@mib.infn.it
- HH
 - simone.gennai@mib.infn.it, raffaele.gerosa@unimib.it, mauro.dinardo@unimib.it, pietro.govoni@unimib.it, martina.malberty@mib.infn.it
- Toponio
 - raffaele.gerosa@unimib.it, tommaso.tabarelli@unimib.it
- Calorimetri per Future colliders
 - marco.lucchini@unimib.it, andrea.benaglia@mib.infn.it

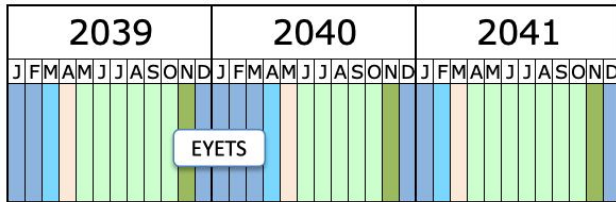
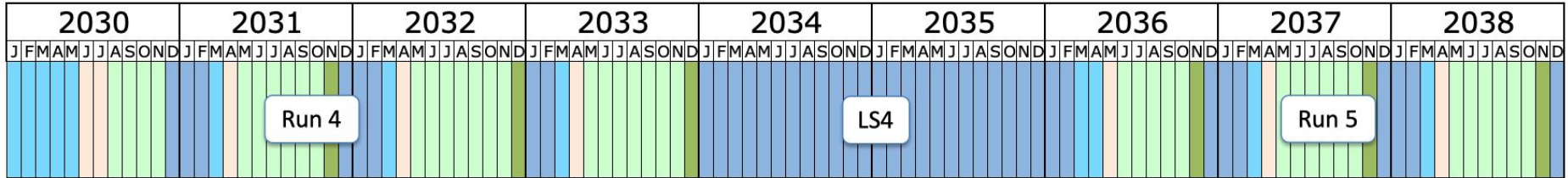
Backup

The CERN accelerator complex

Complexe des accélérateurs du CERN



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LInear ACcelerator // n-ToF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // CHARM - Cern High energy AccelRator Mixed field facility // IRRAD - proton IRRADiation facility // GIF++ - Gamma Irradiation Facility // CENF - CERN Neutrino platform



- Shutdown/Technical stop
- Protons physics
- Ions
- Commissioning with beam
- Hardware commissioning

Last update: November 24