



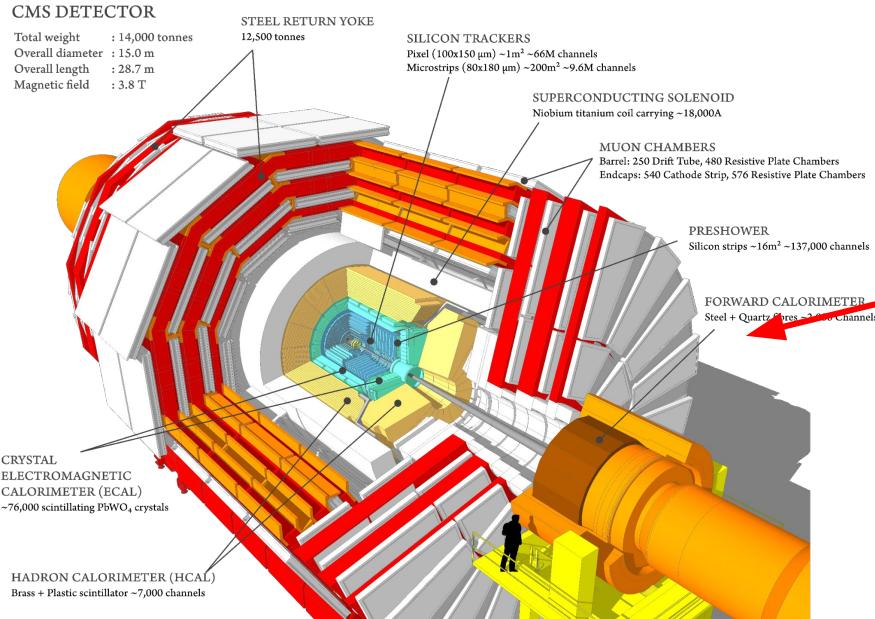
# Fisica ai collisori di particelle: esperimento CMS

[Andrea.Massironi@mib.infn.it](mailto:Andrea.Massironi@mib.infn.it)

# CMS: Compact Muon Solenoid

pag. 2

- Uno dei 4 esperimenti lungo LHC  
**(Large Hadron Collider)**



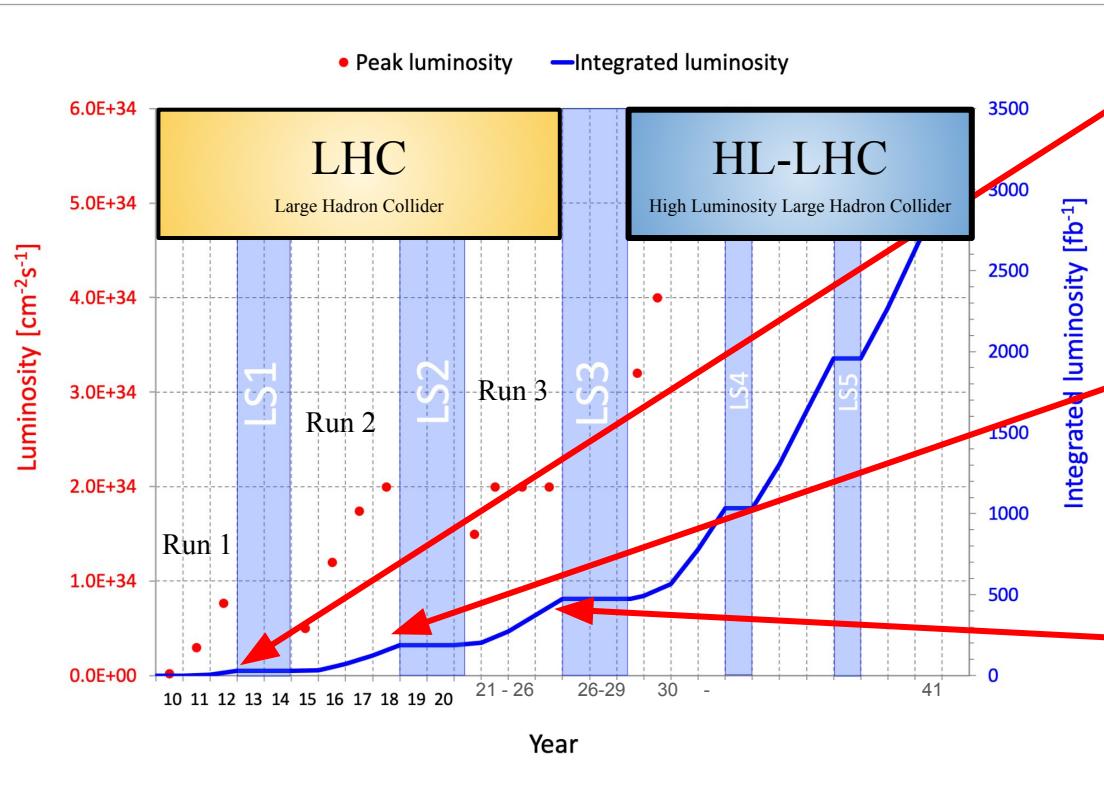
- Una grande macchina fotografica tridimensionale
- **Ricostruzione e identificazione** di diverse particelle: elettroni, fotoni, muoni, leptoni  $\tau$ , jets, neutrini (?), ...



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

# Una plethora di dati a disposizione, ... e nuovi a venire

pag. 4

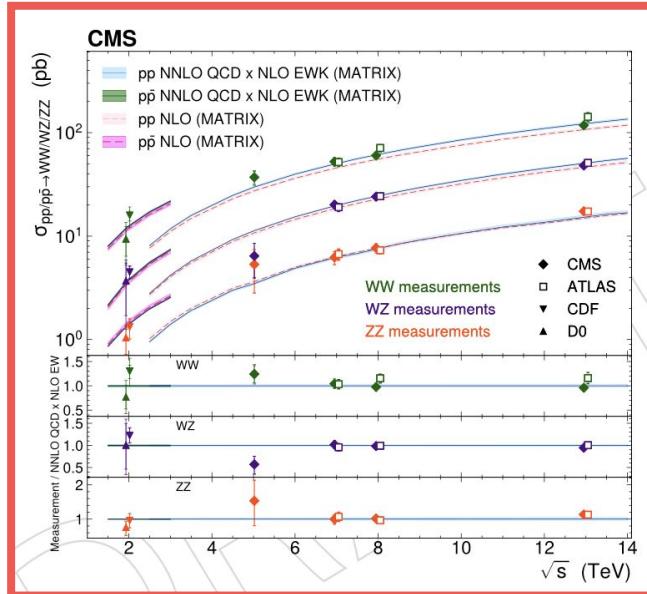


- **Run 1:** con questi dati abbiamo scoperto il bosone di Higgs
  - $\sim 24/\text{fb}$
- **Run 2:** da 8 TeV a 13 TeV
  - $\sim 137/\text{fb}$
- **Run 3:** da 13 TeV a 13.6 TeV
  - $\sim 300/\text{fb}$  (fino ad oggi)
  - Tanti dati da analizzare

# Obiettivi dell'esperimento CMS

pag. 5

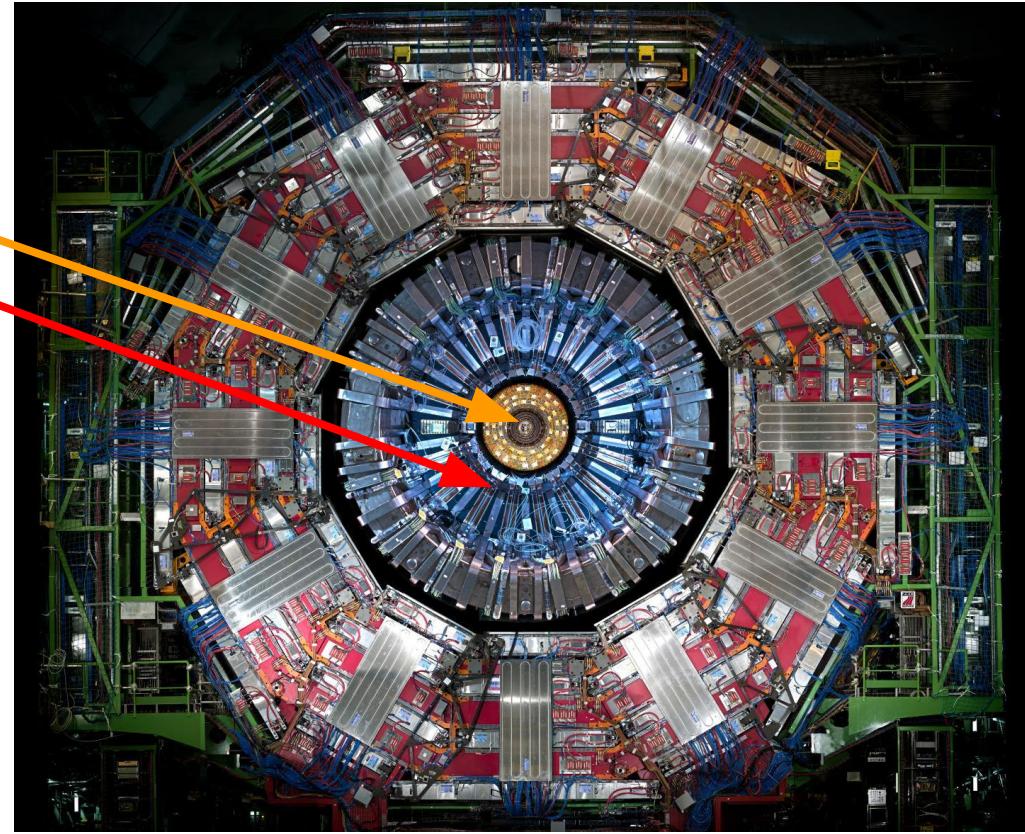
- Scopo generale: sondare la **fisica delle interazioni fondamentali** alla scala del **TeV** con elevata precisione
- Ricerca di nuovi fenomeni:
  - Ricerche **dirette**: osservazione diretta di nuove risonanze  $\Leftrightarrow$  particelle  $\Leftrightarrow$  interazioni
  - Ricerche **indirette**: 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



# Il rivelatore presente e futuro: proposte di tesi

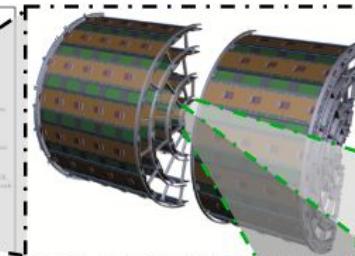
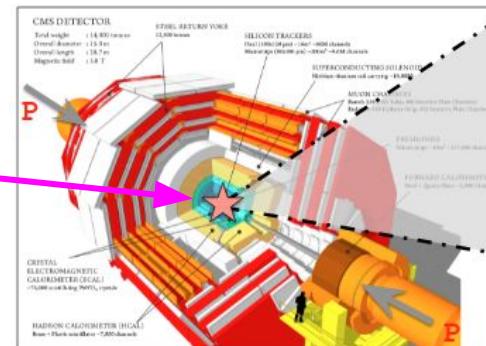
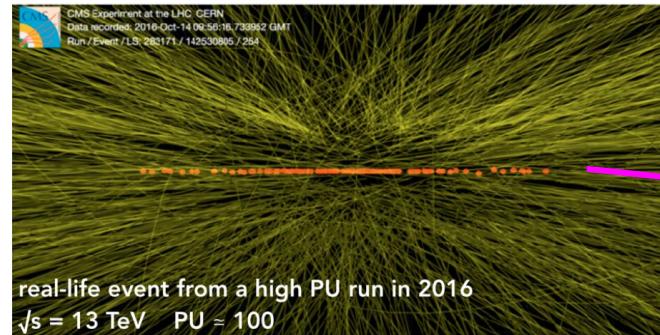
pag. 6

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

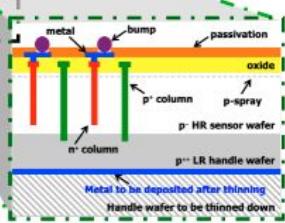


# Proposta di tesi: Pixel

pag. 7



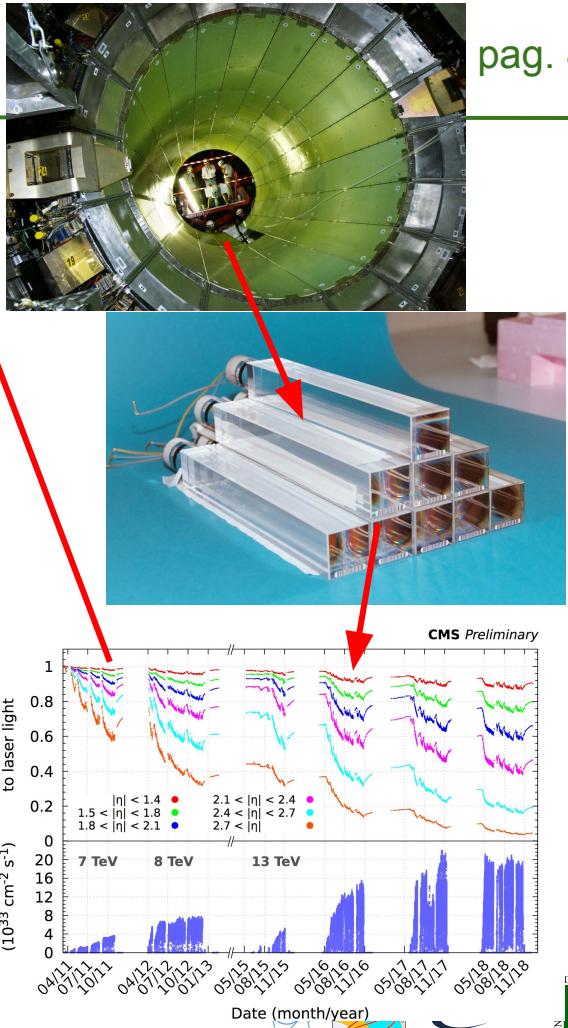
Futuro rivelatore a pixel  
Sensori 3D al Silicio



- 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

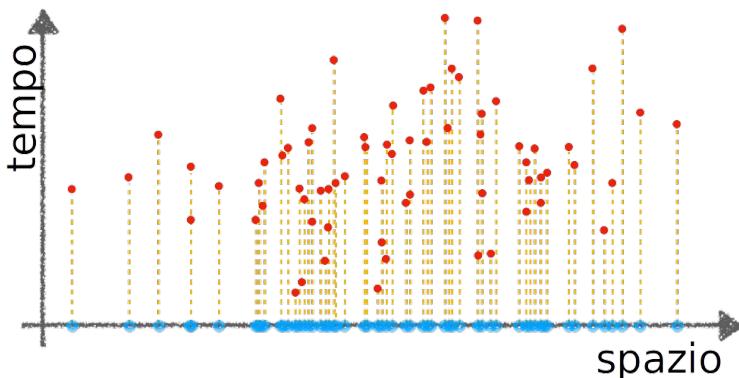
- Calorimetro elettromagnetico omogeneo: 75848 cristalli
- L'esposizione alla radiazione danneggia i cristalli → perdita di trasparenza
- Studi di predizioni di andamento della perdita di trasparenza con Machine Learning per possibili applicazioni nel trigger per CMS LHC Run 3 e HL-LHC
  - Perdita di 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) / Transformers per clusterizzare singoli depositi di energia e rimuovere il rumore intrinseco di ogni singolo canale (non correlato coi canali adiacenti)



# Proposta di tesi: MIP timing detector (MTD)

pag. 9

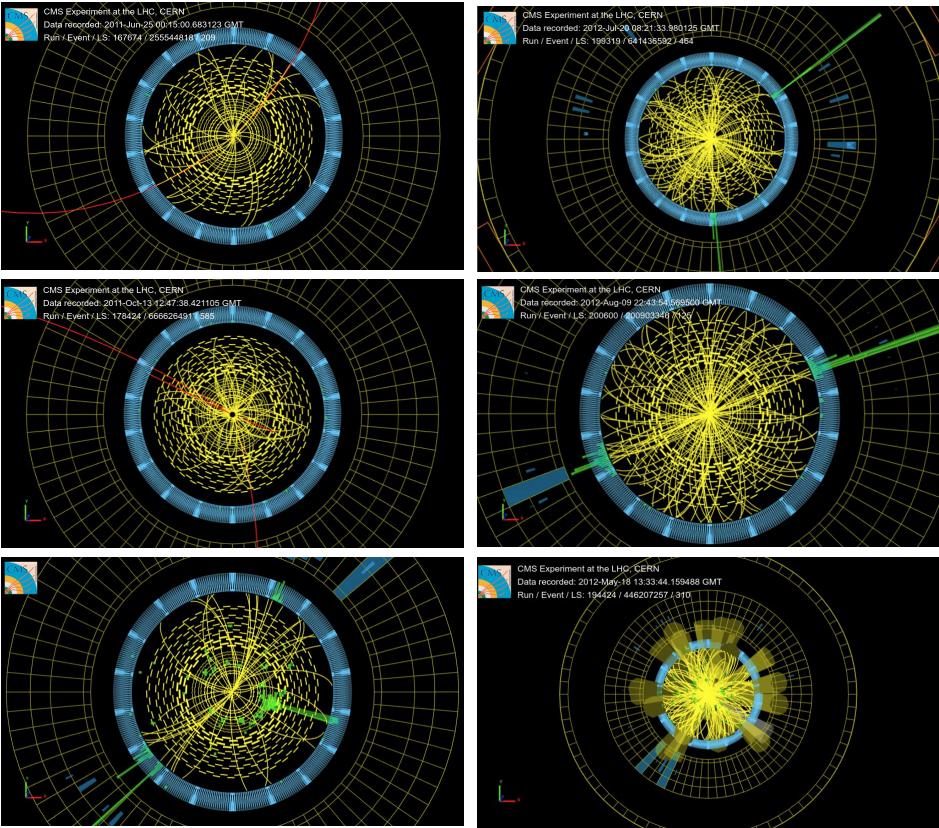
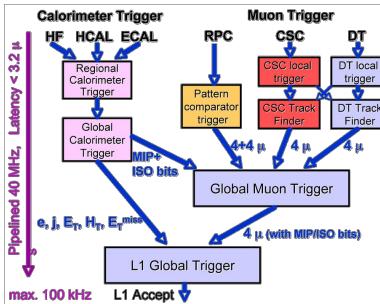
- Misure **temporali** → cambio di paradigma
  - Scopo: attribuire un tempo ad ogni particelle carica
  - Conseguenze: mitigazione del pileup sulla fisica poiché permette la ricostruzione 4D dei vertici
- **Nuovo rivelatore** per cui Bicocca è driving player
- Nuove possibilità permesse da MTD:
  - Tempo 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.



# Come funziona un'analisi dati a CMS: primo passo

pag. 10

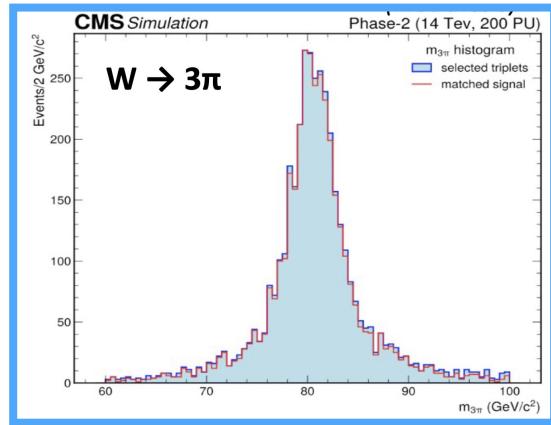
- Selezionare gli eventi interessanti:  
**trigger**
  - **40 milioni** di eventi al secondo
  - Sistema di trigger hardware → **100.000** eventi al secondo
  - Sistema di trigger software → **1000** eventi al secondo salvati e che possono essere analizzati con calma
- Automatizzazione e selezione rapida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



# Proposta di tesi: Trigger, ML su FPGA

pag. 11

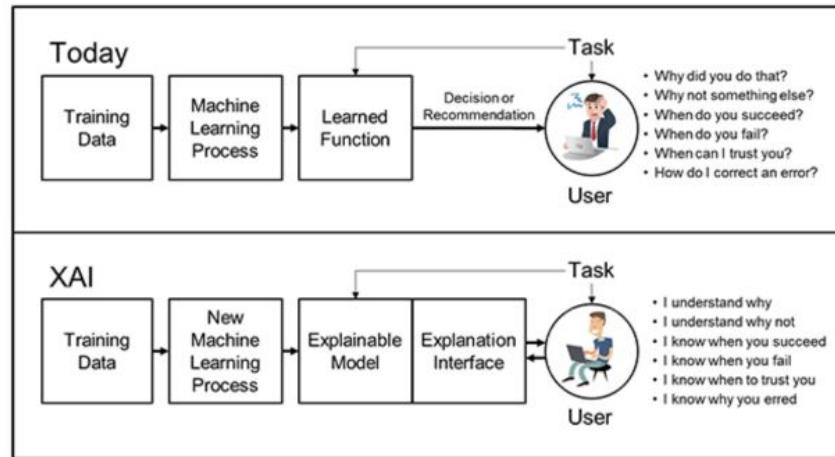
- Un cluster di **FPGA** (Field Programmable Gate Array) è stato installato a Milano nel 2024
- Sviluppo e test di algoritmi di trigger su FPGA per **HL-LHC**
- Progetti di lavoro:
  - Trigger di level-1 dedicati per  $H \rightarrow \tau\tau$
  - Trigger di level-1 dedicati per  $HH \rightarrow bb\tau\tau$
  - 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



# Proposta di tesi: AI/ML esplicativa (XAI)

pag. 12

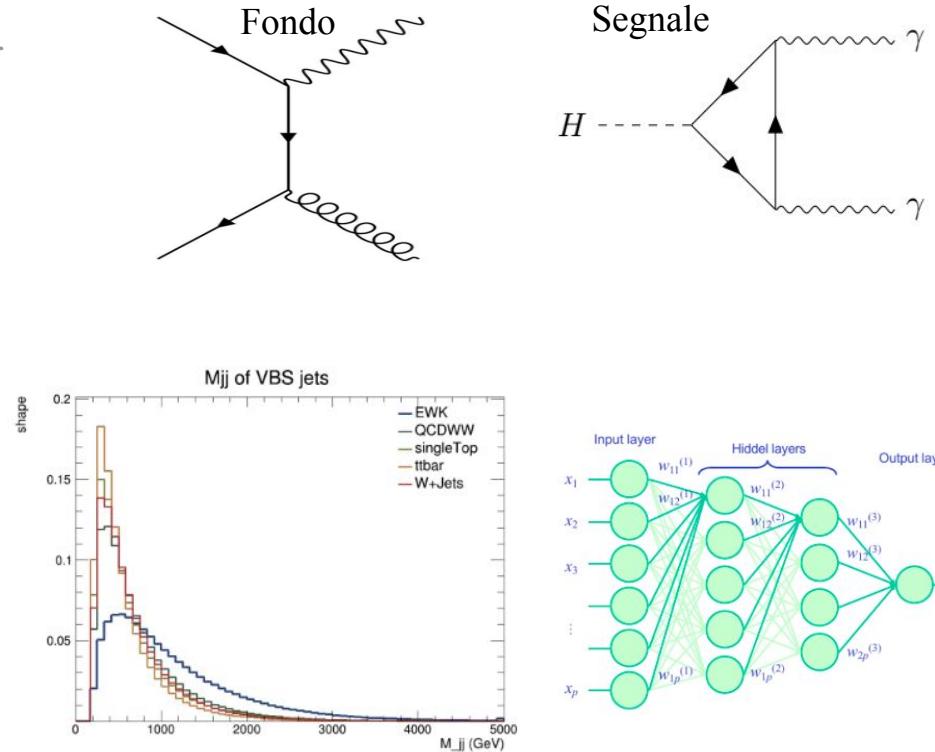
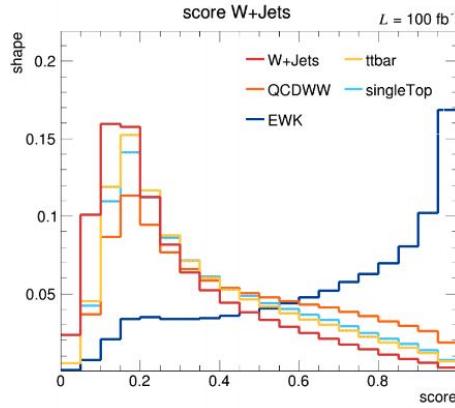
- Sinergia tra **diagnostica medica** e fisica delle alte energie (HEP) per sviluppare modelli AI (**artificial intelligence**) che siano "**spiegabili**"
  - Spiegare cosa ha portato un algoritmo di ML a prendere una decisione
  - Obiettivo: maggiore trasparenza nella risposta, identificazione di possibili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



# Come funziona un'analisi dati a CMS: i dati

pag. 13

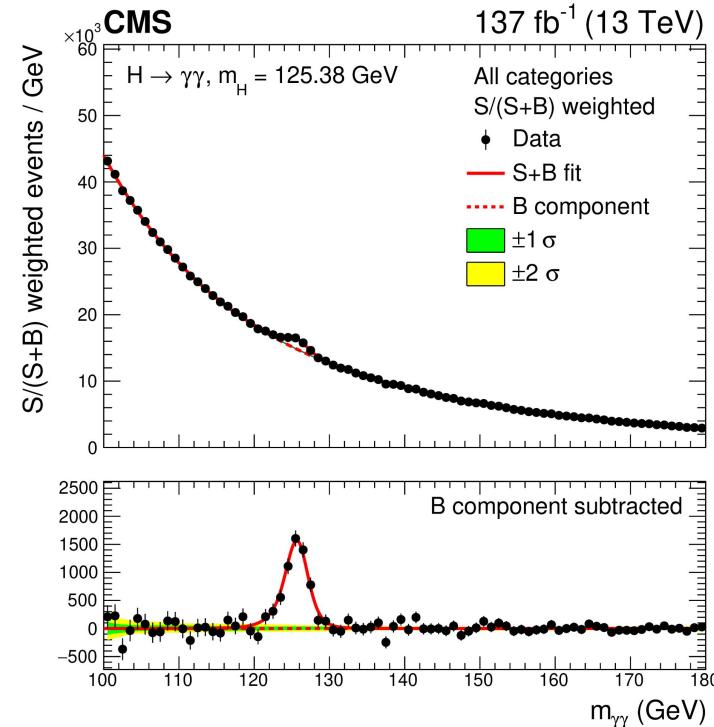
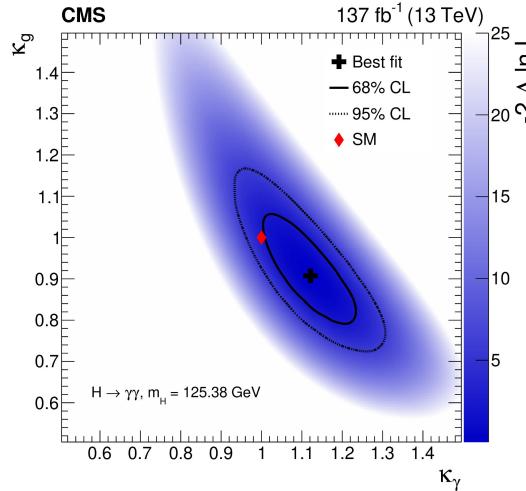
- Selezionare gli eventi interessanti: trigger
- **Analizzare** gli eventi
  - **Identificare** lo stato finale
  - Definire le **selezioni** migliori per isolare il segnale
  - Applicare algoritmi avanzati, **Machine Learning**, Deep Neural Network, BDT, ...



# Come funziona un'analisi dati a CMS: il risultato

pag. 14

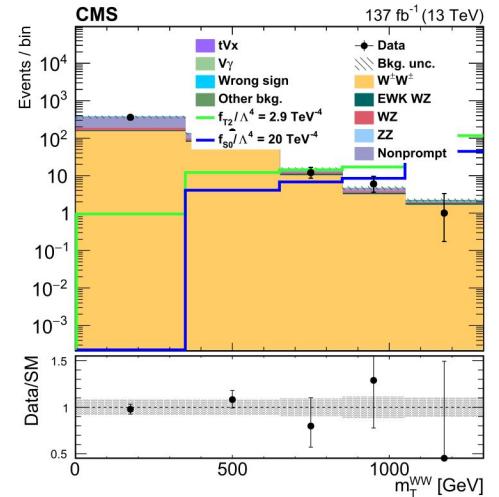
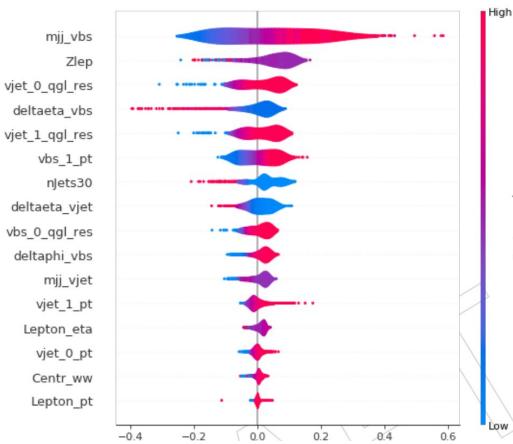
- Selezionare gli eventi interessanti:  
trigger
- Analizzare gli eventi
- Eseguire un'**analisi statistica** del  
risultato



# Proposta di tesi: Vector Boson Scattering (VBS)

pag. 15

- 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

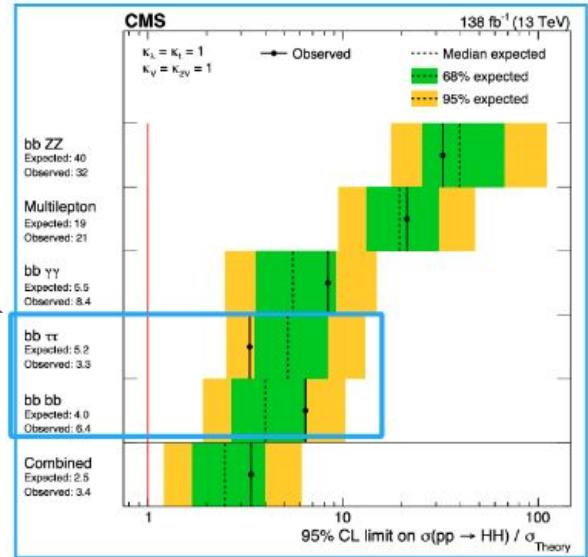
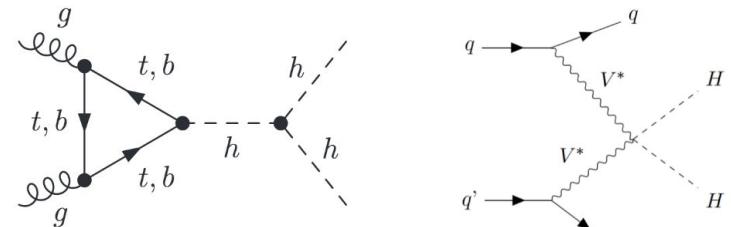


- Bicocca coordina una **rete mondiale di analisi sperimentali + previsioni teoriche** su VBS
- Tesi sperimentali o fenomenologiche assegnate in passato sull'argomento:
  - <https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi/>

# Proposta di tesi: coppie di bosoni di Higgs, HH

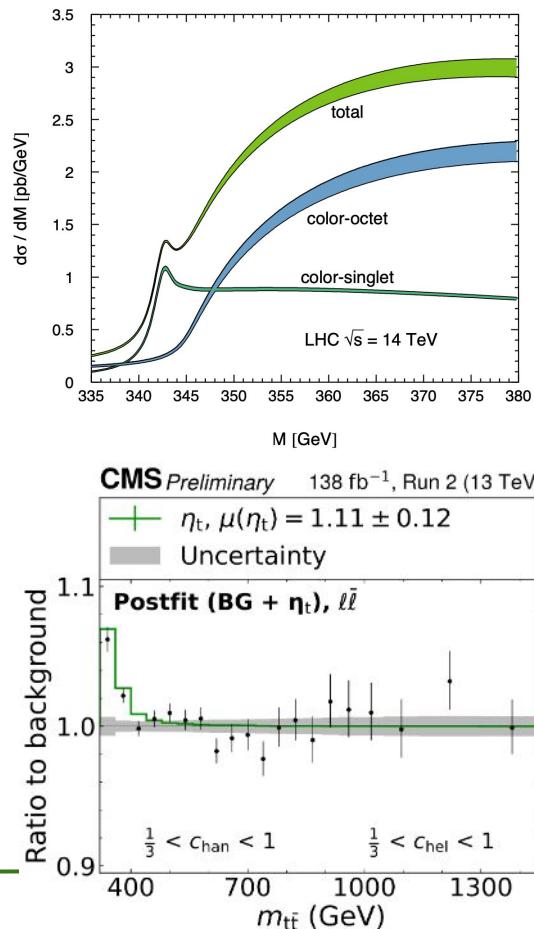
pag. 16

- 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
  - $\text{HH} \rightarrow \text{bbbb}$
  - $\text{HH} \rightarrow \text{bb}\tau\tau$
- 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 Run 3



# Proposta di tesi: toponio (a.k.a. Stato legato top anti-top) pag. 17

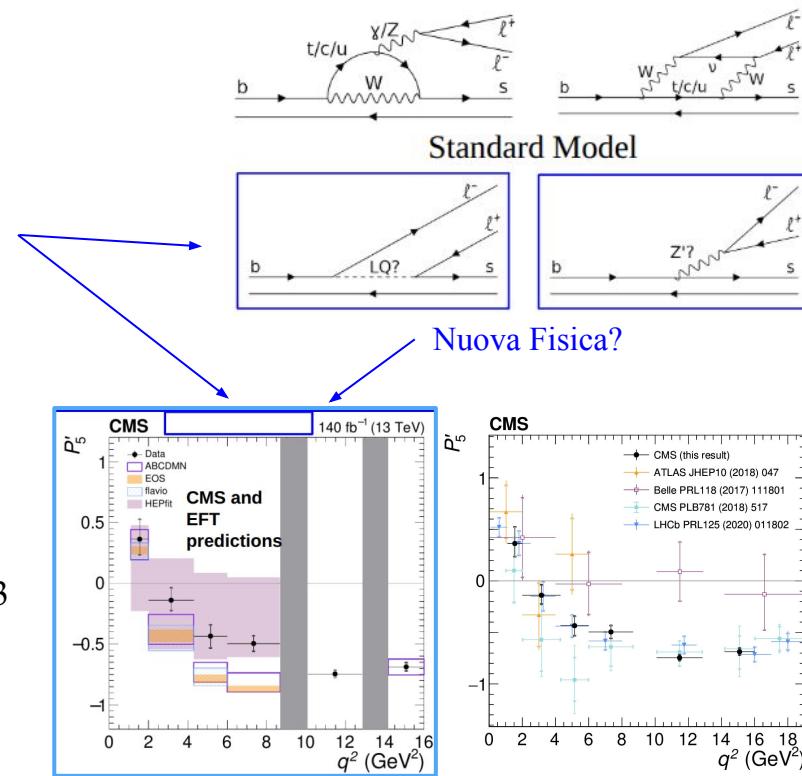
- Evidenza di un eccesso di eventi interpretabile come  $\eta_{\text{top}}$  (stato legato top-antitop), a.k.a. toponio
- Per confermare l'osservazione si cercano canali di decadimento esclusivi del toponio
  - $\eta_{\text{top}} \rightarrow \gamma\gamma$
  - $\eta_{\text{top}} \rightarrow Z(l\bar{l})H(b\bar{b})$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



# Proposta di tesi: studio dei decadimenti FCNC $b \rightarrow sll$

pag. 18

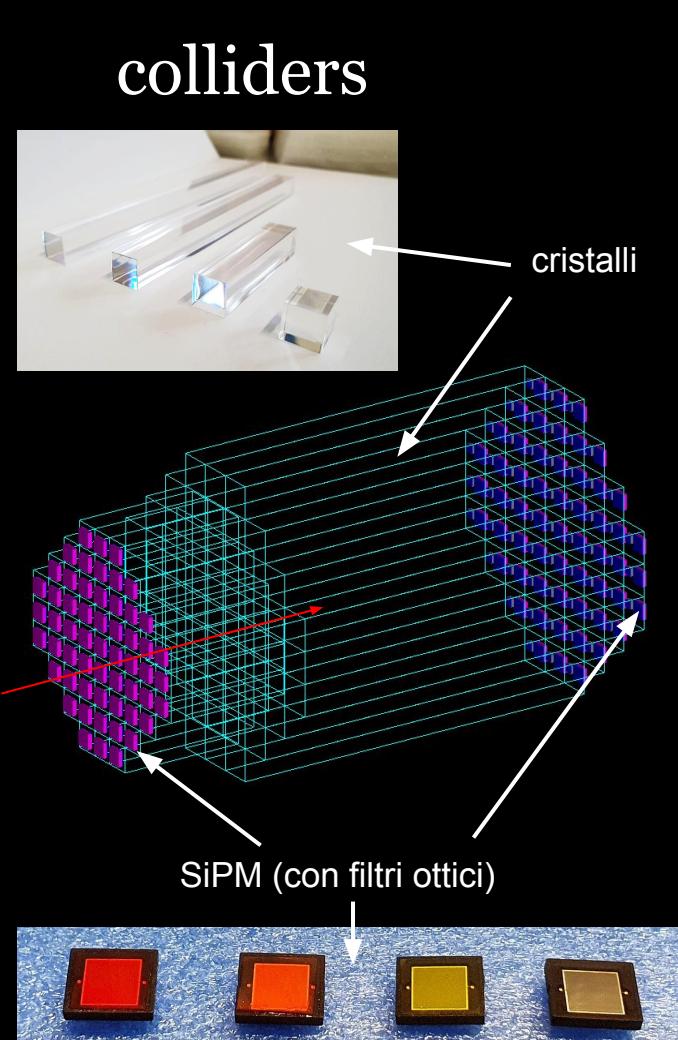
- Scopo: misura indiretta di **nuova fisica**
  - Processi proibiti a tree-level e CKM sfavoriti ( $\text{BR} < 10^{-6}$ )
  - FCNF: flavour changing neutral currents
  - La **nuova fisica** puo' quindi competere con quella dello SM manifestandosi nelle frazioni di decadimento, nella distribuzione angolare e nelle osservabili ad essa correlate (es.:  $P_5'$ )
- Stato finale studiato:  $B^0 \rightarrow K^*(892)^0 (\rightarrow K^+ \pi^-) \mu^+ \mu^-$ 
  - Analisi sui dati di Run 2 pubblicata nel 2025 con precisione comparabile a quella di LHCb
  - Analisi di Run 3 (dati 2022-2024) appena iniziata!
- Aree di lavoro e sviluppo:
  - Studio del segnale e della reiezione dei fondi usando ML in Run 3
  - Studio di nuovi criteri di preselezione del segnale in Run 3
  - Studio della correzione di MC tramite i canali di controllo



*B anomalies: "Grande è la confusione sotto il cielo, quindi la situazione è eccellente!". Mao Zedong*

# Proposta di tesi: Calorimetro 6D per futuri 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



# Se volete più informazioni, contattateci

pag. 20

<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](mailto:andrea.massironi@mib.infn.it), [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it),  
[alessio.ghezzi@unimib.it](mailto:alessio.ghezzi@unimib.it)
- Pixel
  - [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it), [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it), [pao.lo.dini@mib.infn.it](mailto:pao.lo.dini@mib.infn.it), [sandra.malvezzi@mib.infn.it](mailto:sandra.malvezzi@mib.infn.it)
- MTD
  - [tommaso.tabarelli@unimib.it](mailto:tommaso.tabarelli@unimib.it), [federico.degugli@unimib.it](mailto:federico.degugli@unimib.it), [alessio.ghezzi@unimib.it](mailto:alessio.ghezzi@unimib.it), [andrea.benaglia@mib.infn.it](mailto:andrea.benaglia@mib.infn.it), [martina.malberti@mib.infn.it](mailto:martina.malberti@mib.infn.it),  
[marco.paganoni@unimib.it](mailto:marco.paganoni@unimib.it), [marco.lucchini@unimib.it](mailto:marco.lucchini@unimib.it)
- VBS
  - [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it), [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it), [andrea.massironi@mib.infn.it](mailto:andrea.massironi@mib.infn.it), [marco.paganoni@unimib.it](mailto:marco.paganoni@unimib.it)
- Trigger, ML, FPGA
  - [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it), [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it), [pao.lo.dini@mib.infn.it](mailto:pao.lo.dini@mib.infn.it), [francesco.brivio@mib.infn.it](mailto:francesco.brivio@mib.infn.it)
- HH
  - [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it), [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it), [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it), [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it), [martina.malberti@mib.infn.it](mailto:martina.malberti@mib.infn.it)
- Toponio
  - [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it), [tommaso.tabarelli@unimib.it](mailto:tommaso.tabarelli@unimib.it)
- Studio dei decadimenti FCNC b→sll
  - [pao.lo.dini@mib.infn.it](mailto:pao.lo.dini@mib.infn.it), [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it)
- Calorimetri per Future colliders
  - [marco.lucchini@unimib.it](mailto:marco.lucchini@unimib.it), [andrea.benaglia@mib.infn.it](mailto:andrea.benaglia@mib.infn.it)



## Fisica agli acceleratori

### Test del settore di gauge

#### CMS

Referenti: F. De Guio, M. Dinardo, P. Dini, S. Gennai, R. Gerosa, A. Ghezzi, P. Govoni, M. Lucchini, S. Malvezzi, A. Massironi, M. Paganoni, T. Tabarelli de Fatis

L'esperimento CMS è installato lungo l'anello di accelerazione LHC al CERN di Ginevra e misura soprattutto eventi prodotti dalle collisioni di fasci di protoni circolanti in senso antiorario contro fasci di protoni circolanti in senso orario nell'acceleratore. In questo modo si realizzano le collisioni artificiali più energetiche mai prodotte, consentendo di studiare il Modello Standard delle Interazioni Fondamentali con sistematicità a scale mai investigate in precedenza. Le tesi proposte coprono un ampio spettro di argomenti: dall'analisi statistica dei dati, allo studio di funzionamento del rivelatore, alla preparazione di importanti upgrade previsti per la fase di acquisizione ad alta luminosità. Gli argomenti di tesi disponibili includono:

- A breve verranno pubblicati bandi per borse per trascorrere **1 mese al CERN** e lavorare su alcuni dei lavori sopra-elencati
  - Anno 2025: <https://web.infn.it/csn1/index.php/it/notizie/news/127-borse-trimestrali-2025>
  - Anno 2026: ... a breve qui: <https://web.infn.it/csn1/index.php/it/>

## News CSN1

2026

Borse di studio trimestrali per Laureandi e Neolaureati **2025** "LA  
FISICA DELLE PARTICELLE PER ESPLORARE L'UNIVERSO"



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

### PROGETTO FORMATIVO “LA FISICA DELLE PARTICELLE PER ESPLORARE L'UNIVERSO”

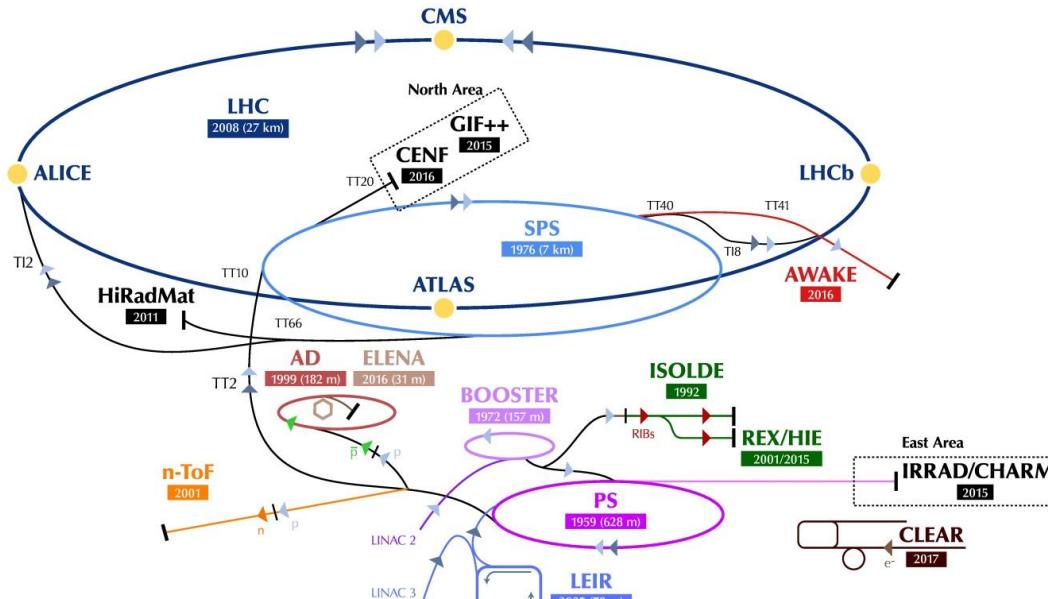
È disponibile l'elenco dei progetti CSN1 selezionati nell'ambito del programma  
formativo **2025** "LA FISICA DELLE PARTICELLE PER ESPLORARE L'UNIVERSO"  
**2026**

Backup

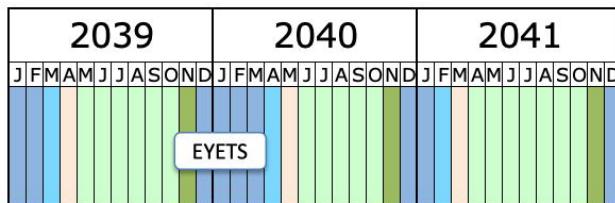
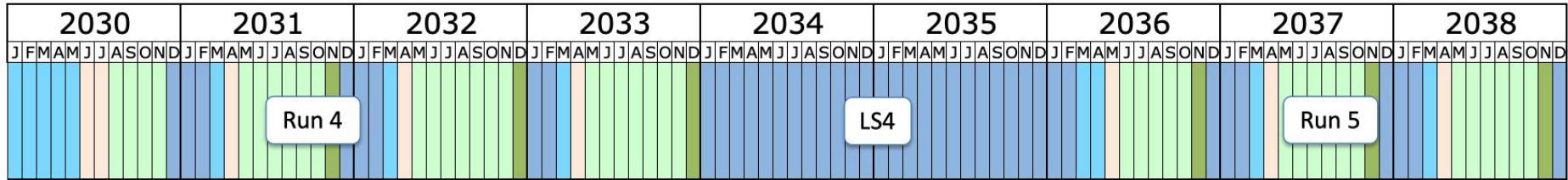
# The CERN accelerator complex

## Complexe des accélérateurs du CERN

pag. 23



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 AcceleRator Mixed field facility // IRRAD - proton IRRADiation facility // GIF++ - Gamma Irradiation Facility // CENF - CErn Neutrino platForm



Last update: November 24

