

# Fisica ai collider di particelle

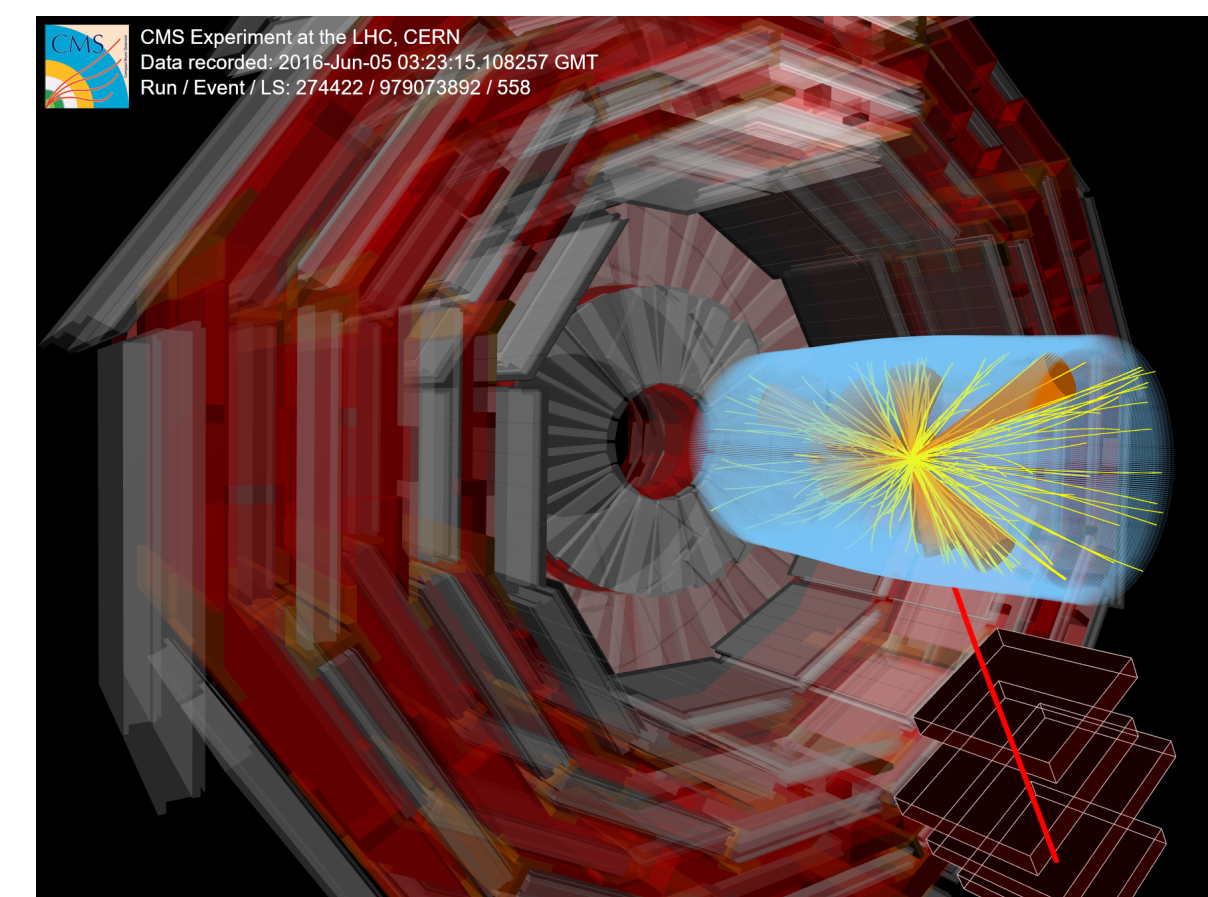
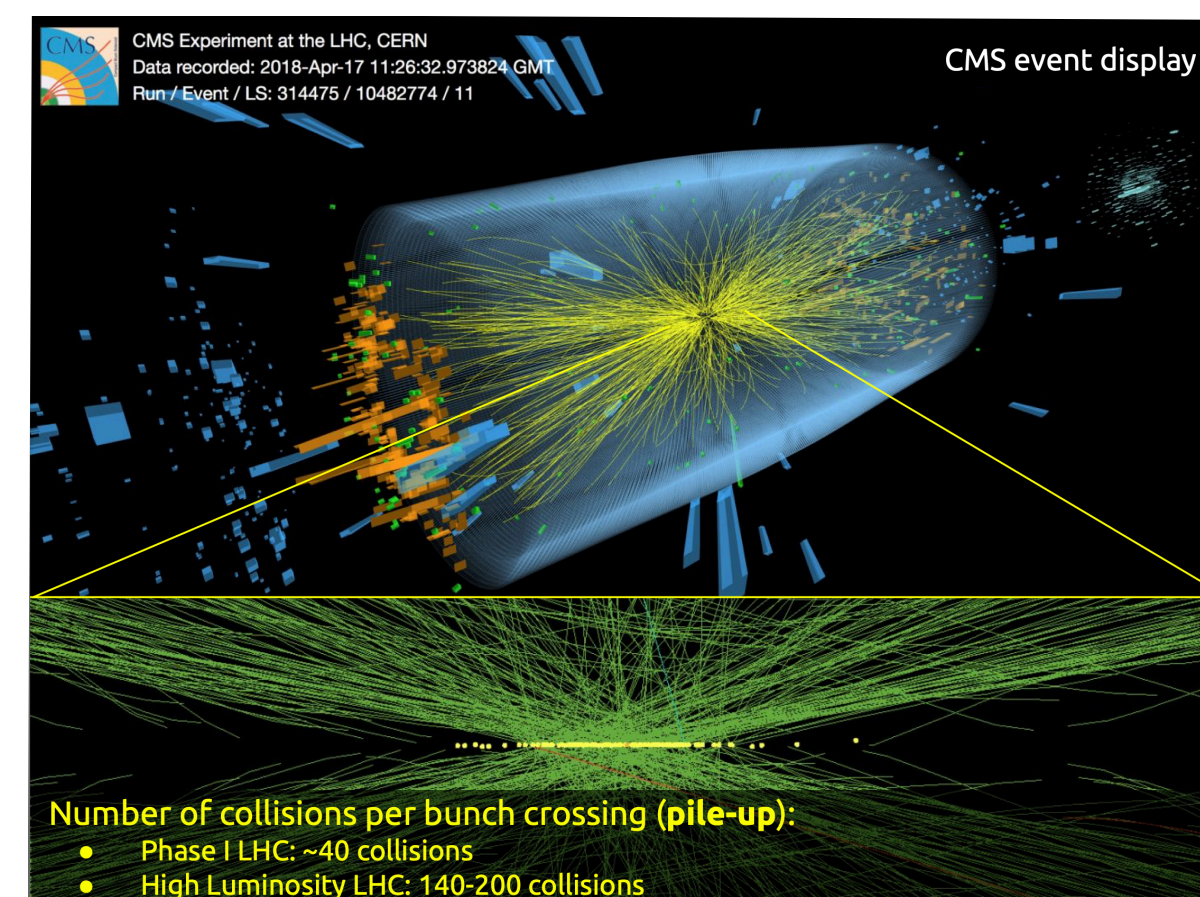
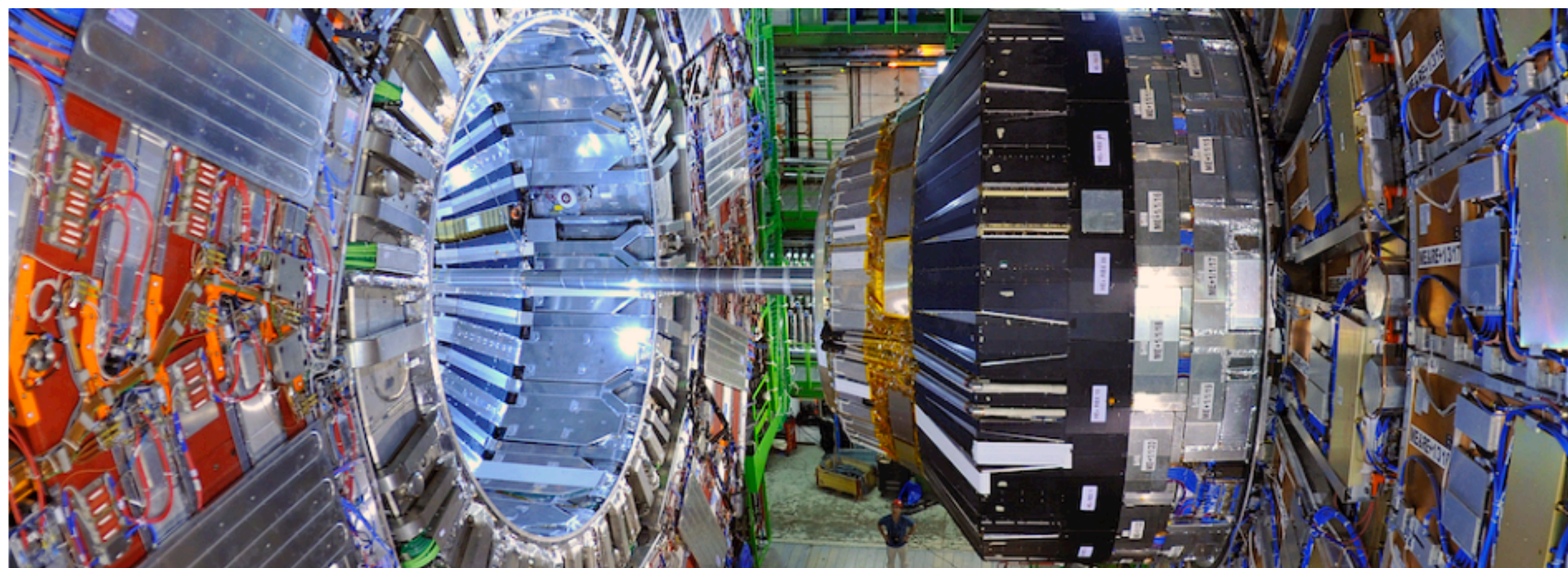
## Proposte di tesi legate all'esperimento CMS

### Contesto sperimentale:

- Misure di precisione di processi elettro-deboli
- Ricerche di nuova fisica
- R&D di apparati di misura
- Applicazione di tecniche di IA/ML



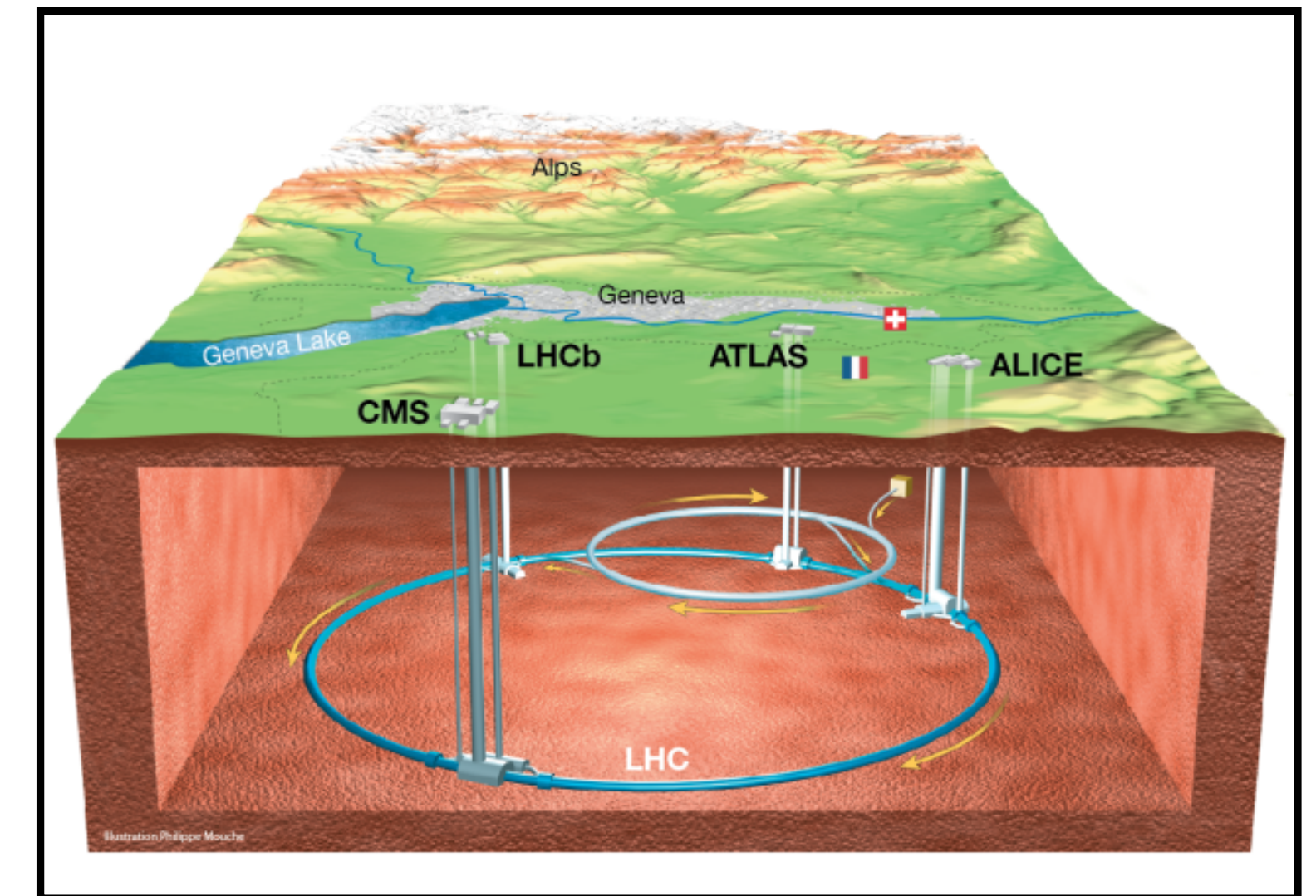
[raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it)



# Il Large Hadron Collider (LHC)

- LHC è un collider **protone-protone** attualmente operante a  $E_{CM} = 13.6$  TeV

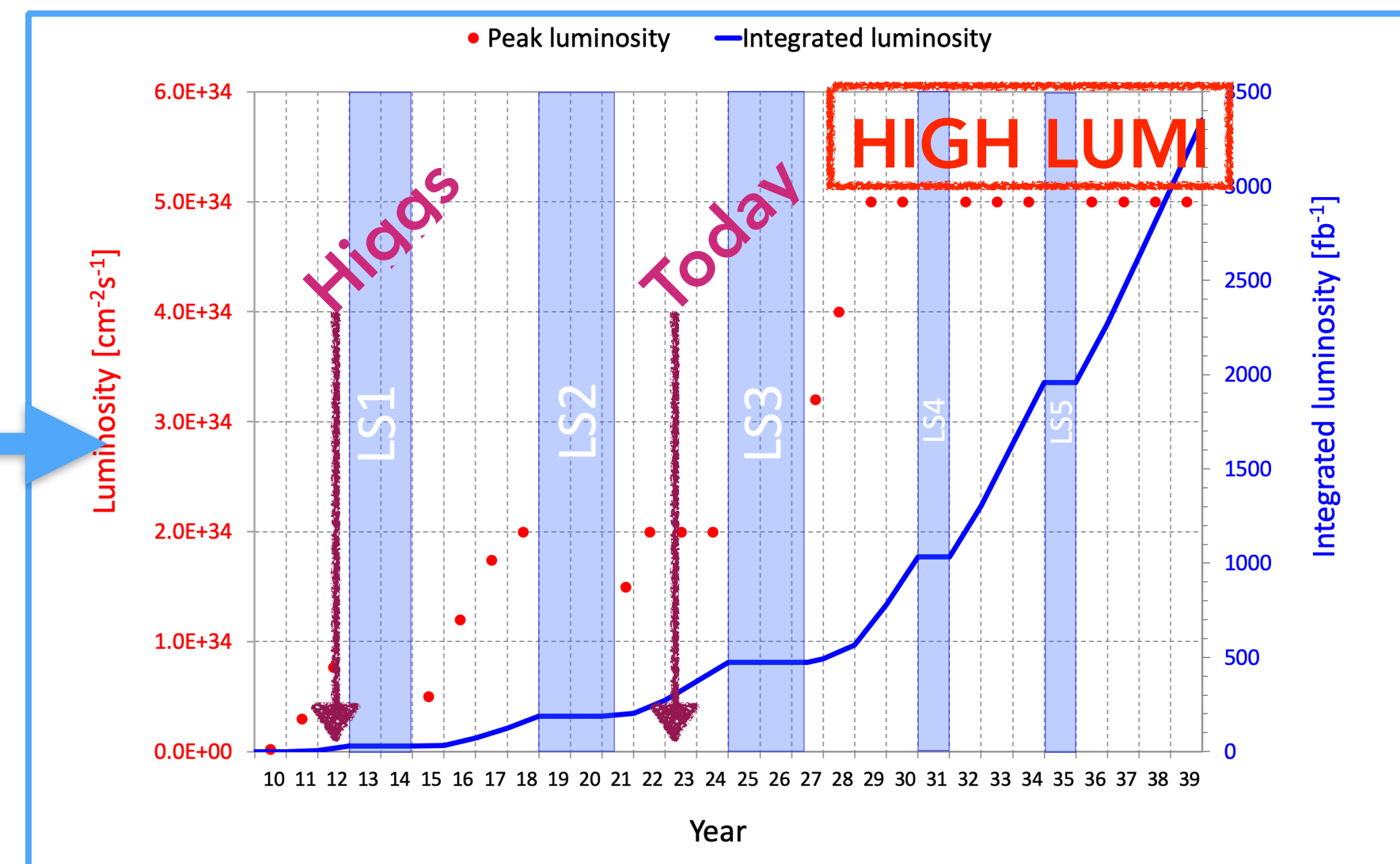
- LHC è in funzione da **13 anni**
- LHC rimarrà in funzione per altri **~15 anni**
- Ad oggi il **10%** di tutti i dati che LHC fornirà sono stati acquisiti
- C'è **ancora molto da esplorare** per poter produrre **misure di precisione** e **ricerca di eventi rari**



- LHC rimarrà la **macchina di riferimento** per “high-energy-physics” fino all fine della sua vita

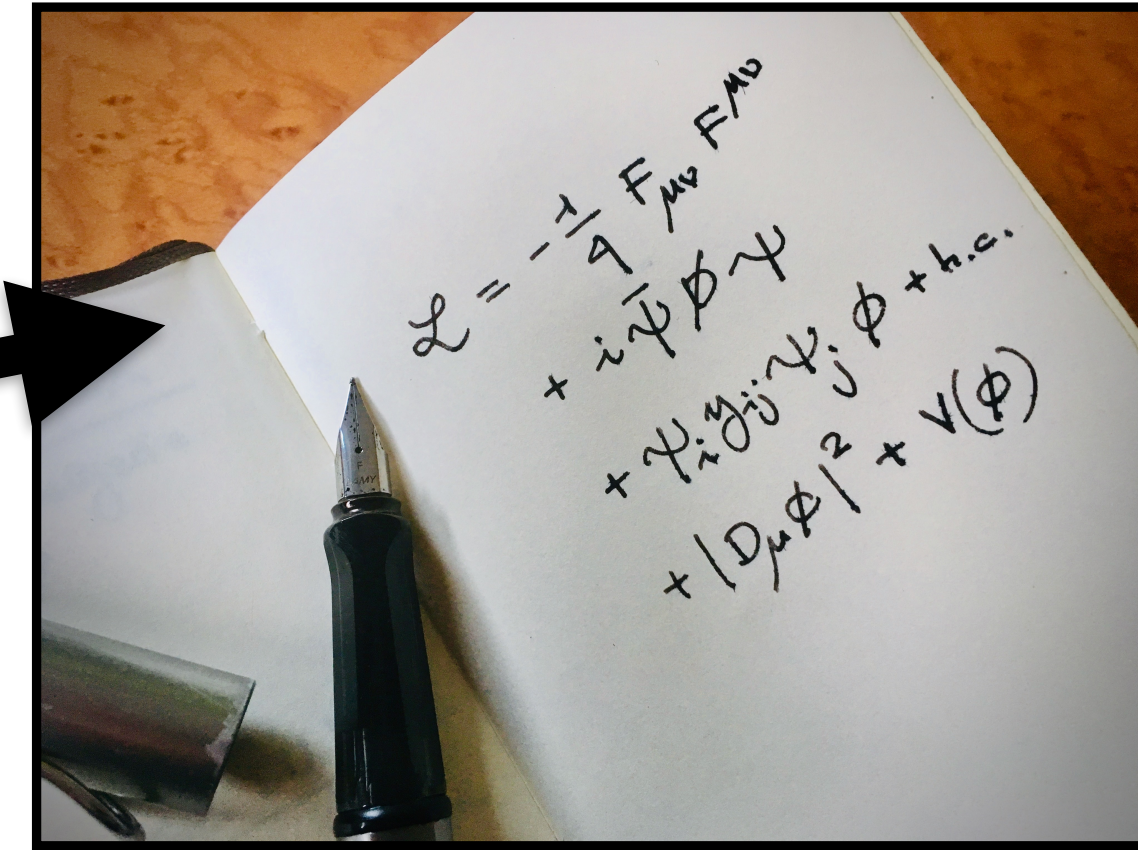
- **Evoluzione temporale:**

- Aumento dell'**energia**  $E_{CM}$  da 7 TeV a 14 TeV
- Aumento dell'**intensità** delle collisioni (luminosità) da  $1 \times 10^{33}$  cm<sup>2</sup>/s a  $5 \times 10^{34}$  cm<sup>2</sup>/s
- **CMS in continua evoluzione:** upgrade dell'esperimento e tecniche di analisi sempre più raffinate



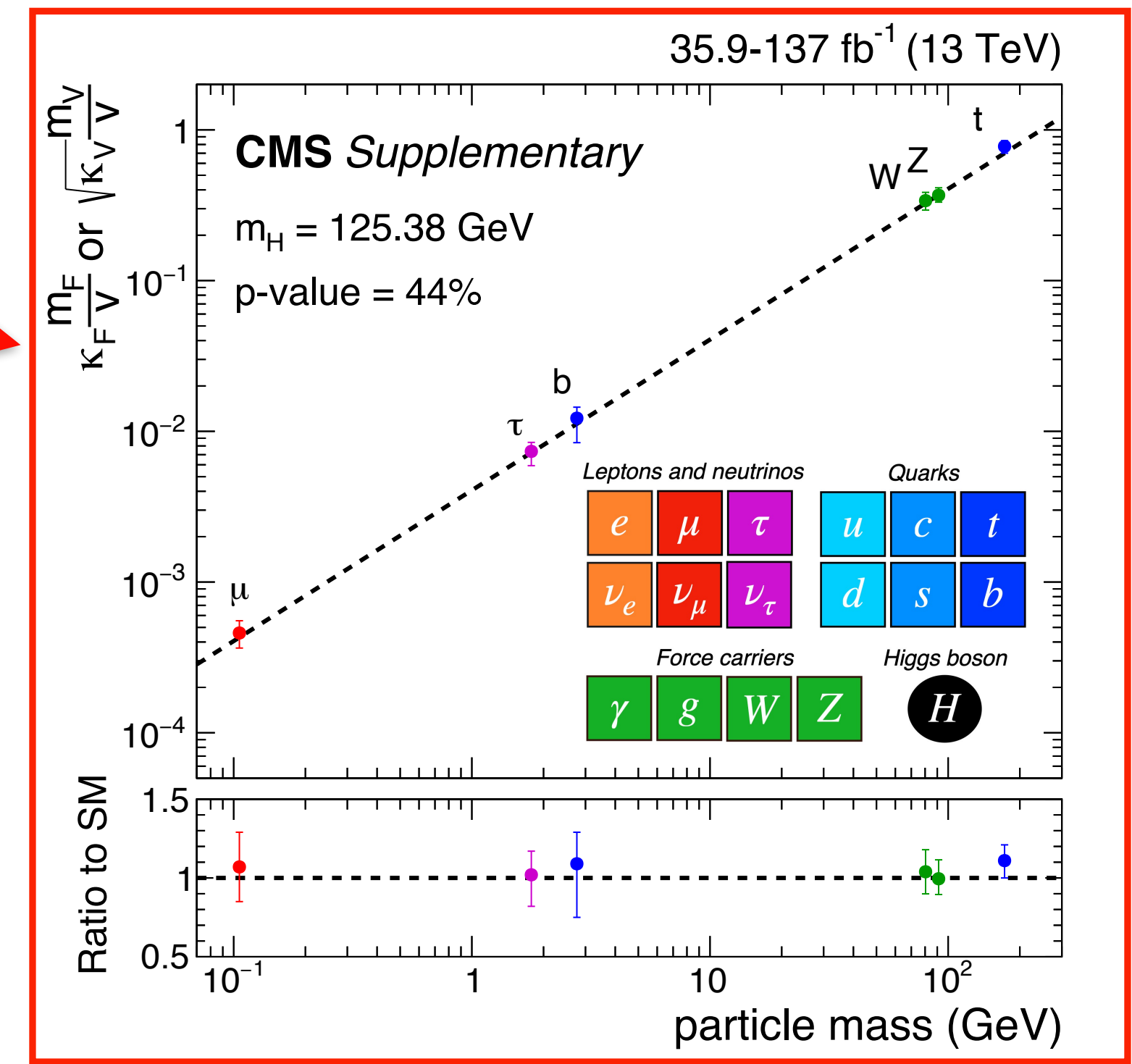
# Lo Standard Model e LHC

- Lo **Standard Model (SM)** è la teoria più completa che spiega la dinamica dei costituenti ultimi della materia
  - **Costituenti:** particelle a spin semi-intero dette fermioni
  - **Interazioni:** mediate da particelle a spin intero dette bosoni

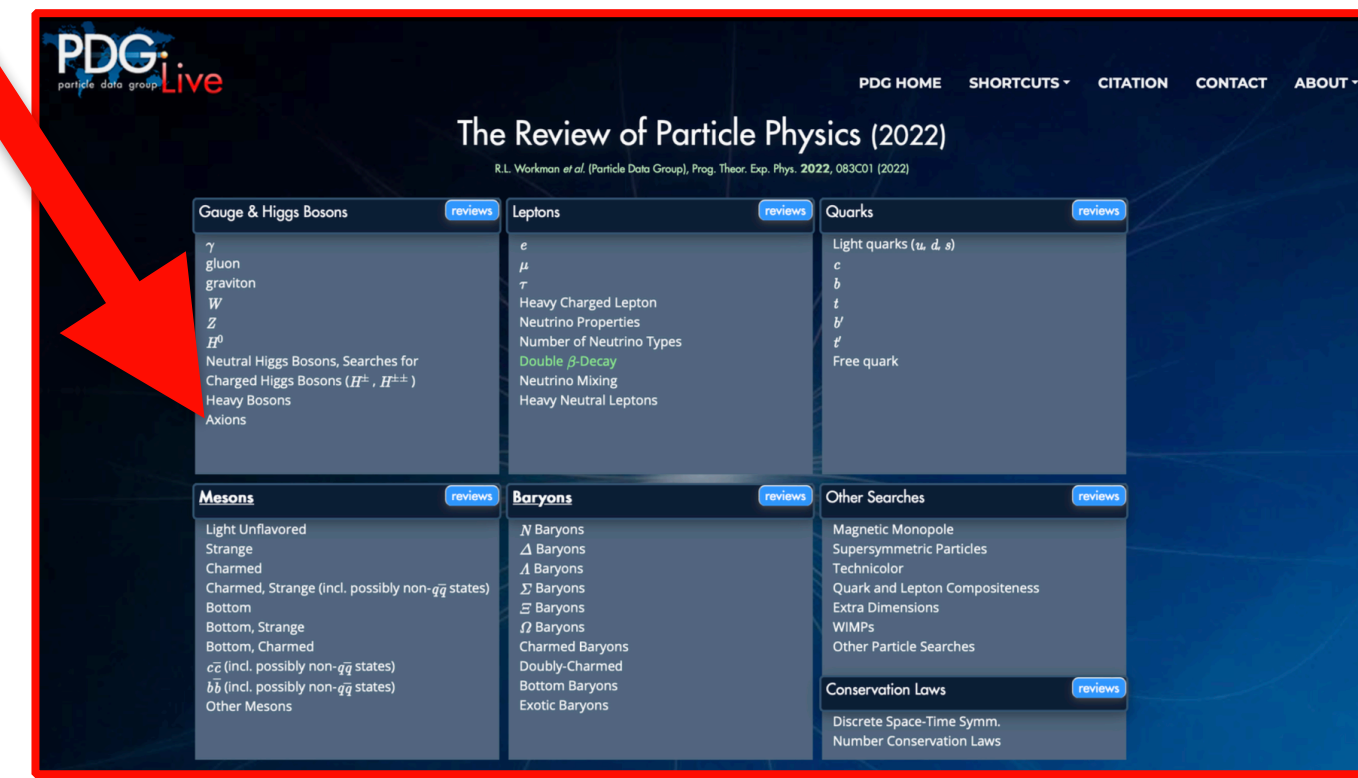


Dominio della teoria

- Lo Standard Model (SM) è **sperimentalmente verificato** fino alle scale di energia accessibili ad LHC  $\rightarrow O(\text{TeV})$ 
  - I processi osservati sono in **accordo** con le sue **previsioni** entro le **incertezze** teoriche e sperimentali
  - **Scoperta del bosone di Higgs**  $\rightarrow$  principale protagonista della rottura spontanea della simmetria elettro-debole
  - **Non è stata osservata** la produzione diretta di nuove particelle

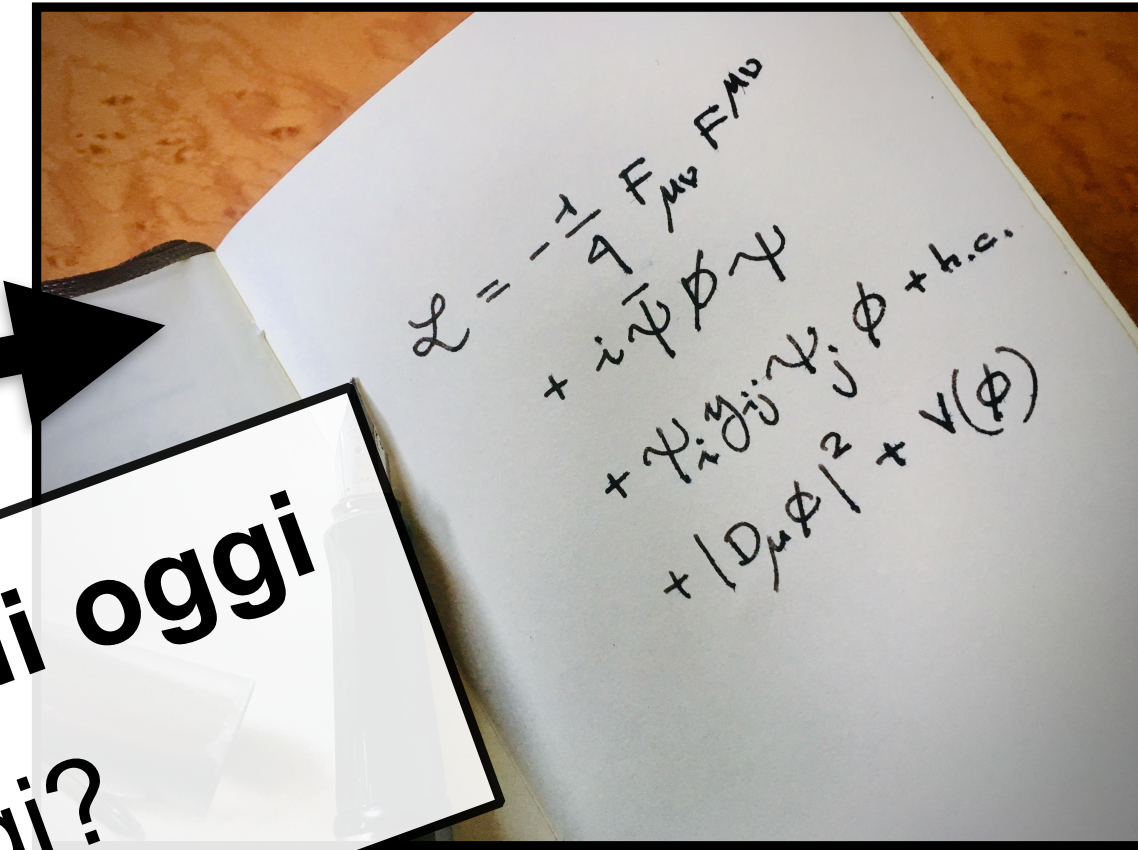


Dominio sperimentale



# Lo Standard Model e LHC

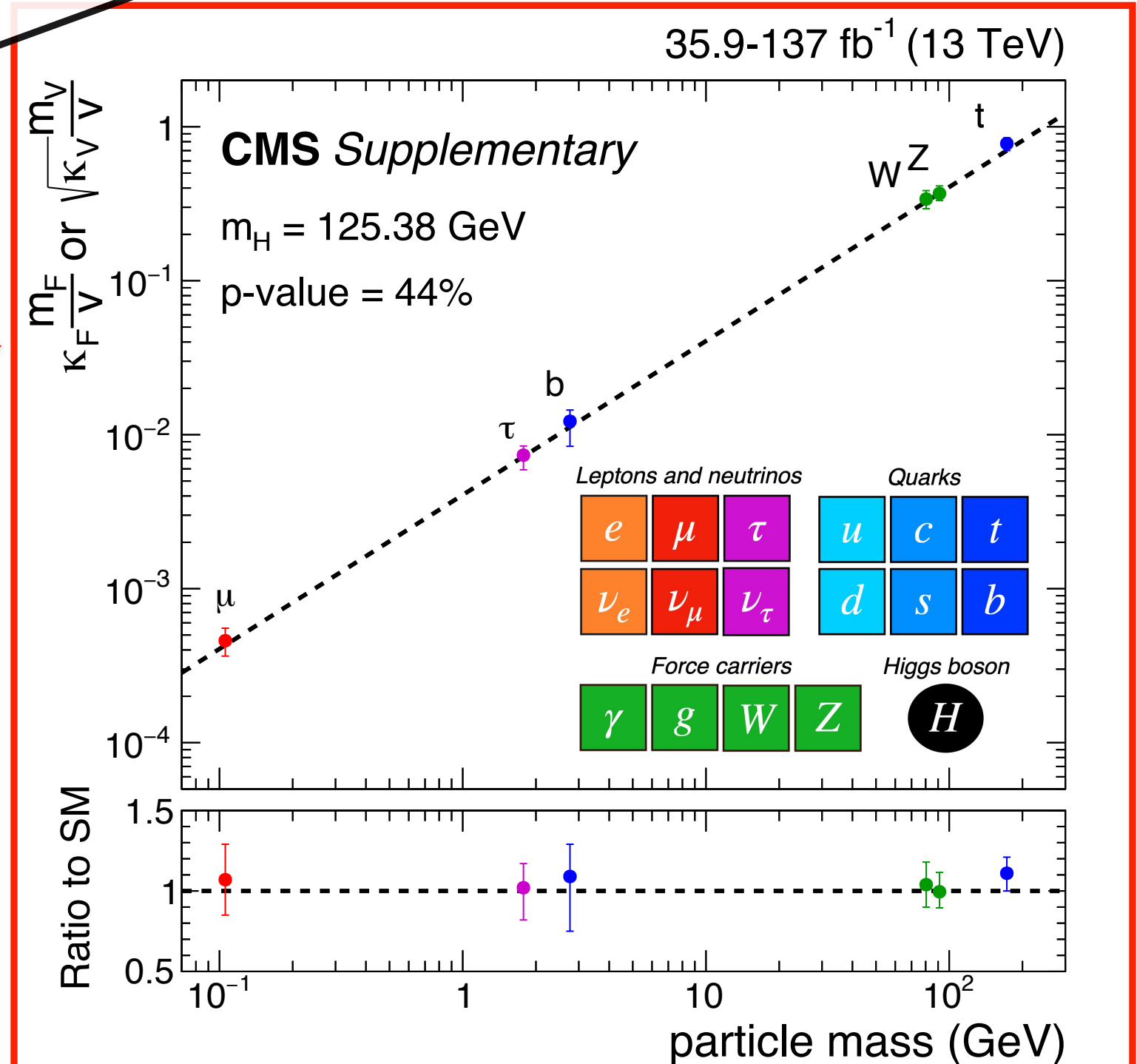
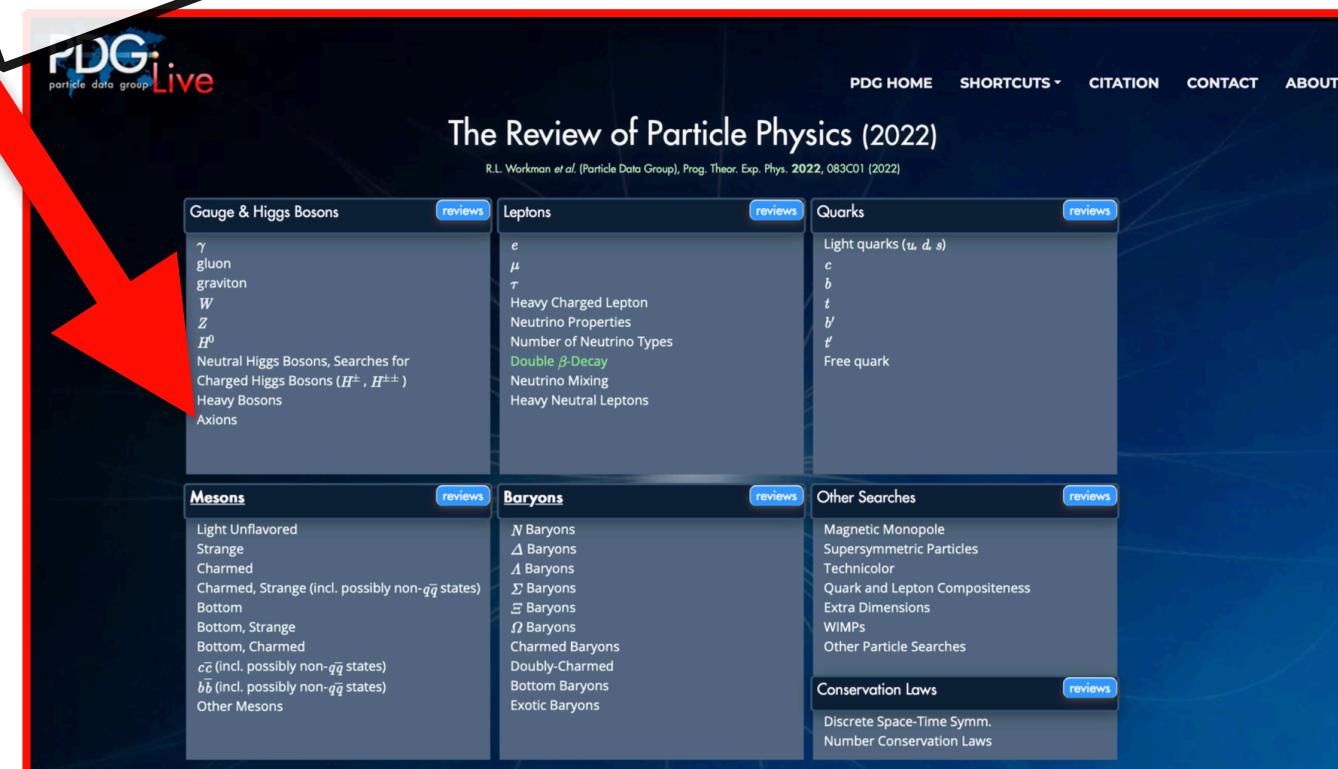
- Lo **Standard Model (SM)** è la teoria più completa che spiega la dinamica dei costituenti ultimi della materia
- **Costituenti:** particelle a spin semi-intero dette fermioni
- **Interazioni:** mediate da particelle a spin intero dette bosoni



Dominio della teoria

- Lo Standard Model (SM) è **sperimentalmente verificato** fino alle scale di energia accessibili ad LHC  $\rightarrow O(\text{TeV})$
- I processi osservati sono in **accordo** con le sue **incertezze** teoriche e sperimentali
- **Scoperta del bosone di Higgs** e **spontanea della simmetria elettrodebole** e **la rottura**
- **Non è stata osservata** la produzione diretta di nuove particelle

**Domanda spontanea e obiettivo di oggi**  
**Perché fare fisica ad LHC oggi?**



Dominio sperimentale

Lo **SM** è una “teoria efficace” che **descrive bene** la **dinamica** alle energie di **LHC** ma **non è del tutto soddisfacente**

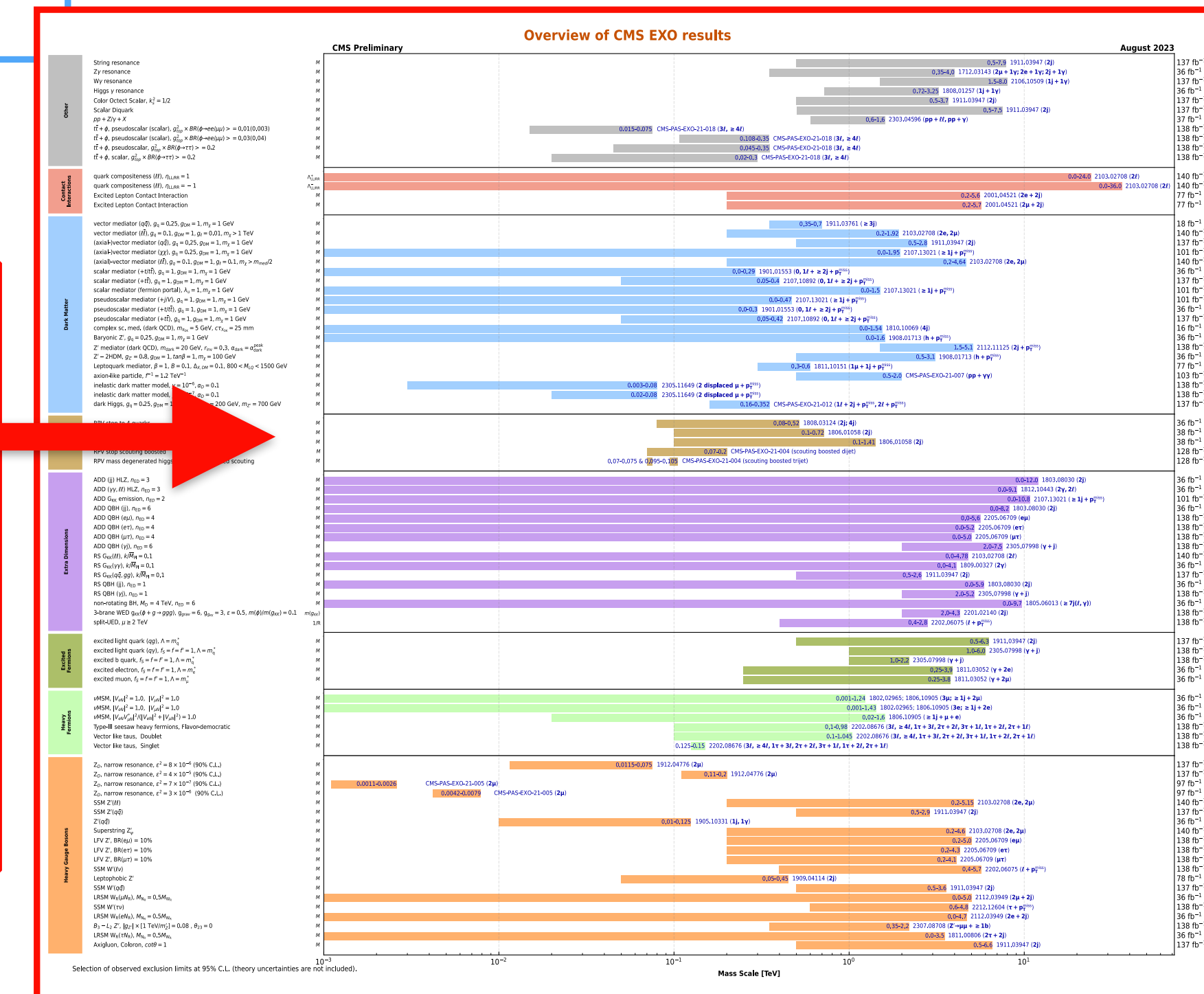
## Motivi “teorici”

- **Non spiega** la gerarchia di massa osservata nelle diverse famiglie di leptoni e quarks
- **Non spiega** dove sia finita anti-materia → violazione di CP è “piccola” nello SM
- **Non contiene** la gravità al suo interno

Limiti esclusioni per nuove particelle beyond SM

## Motivi “sperimentali”

- **Non contiene** candidati di materia oscura e di energia oscura
- **Produzione diretta** di nuove particelle (materia oscura, SUSY, etc) non osservata entro le precisioni sperimentali → nessuno vieta che sia weakly coupled
- **Ricerche indirette:** nuove particelle possono modificare la dinamica di processi noti attraverso correzioni d’ordine superiore
  - **Discrepanze** dalle predizioni dello SM in alcune misure da alcuni esperimenti



Lo **SM** è una “teoria efficace” che **descrive bene** la **dinamica** alle energie di **LHC** ma **non è del tutto soddisfacente**

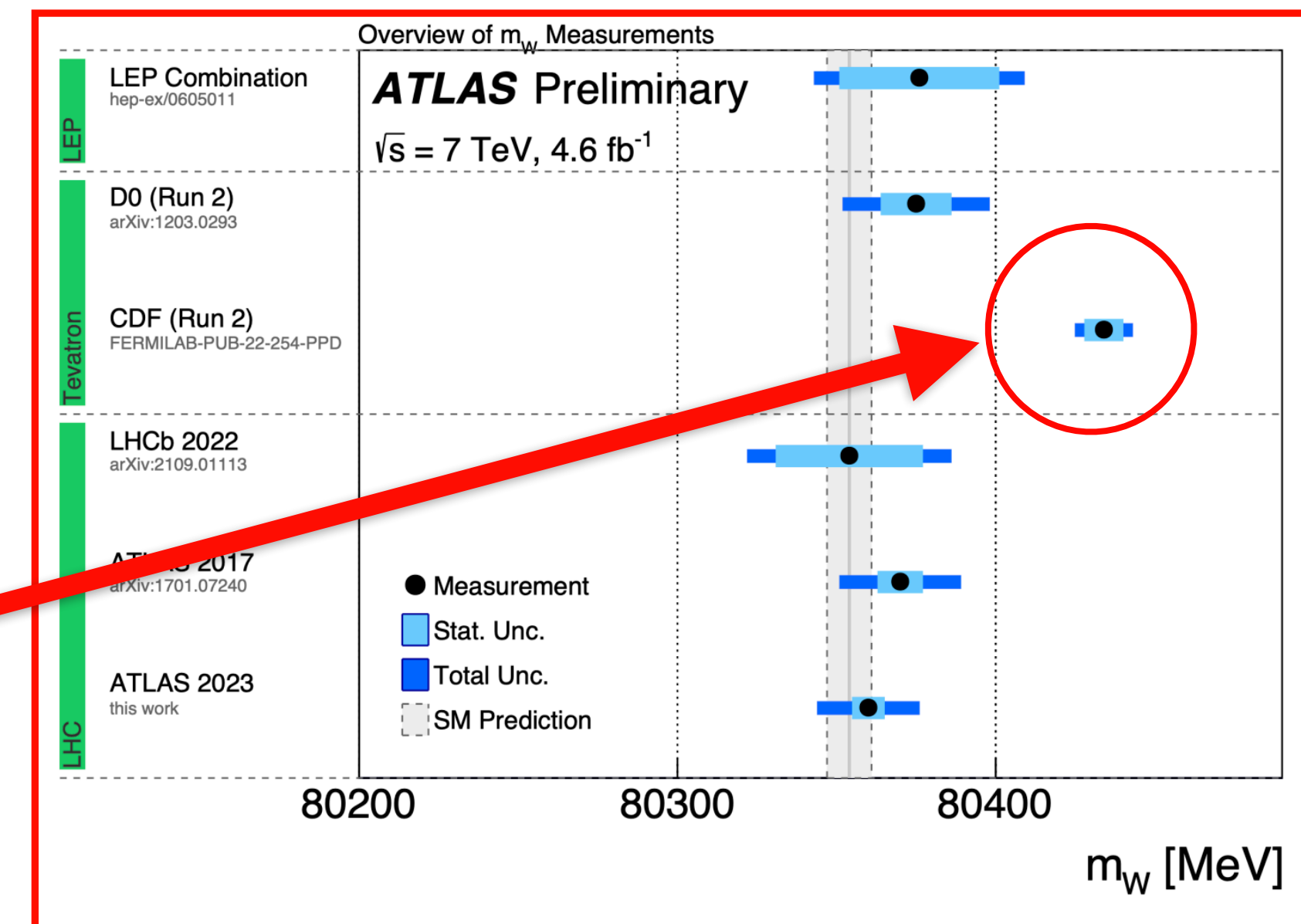
## Motivi “teorici”

- **Non spiega** la gerarchia di massa osservata nelle diverse famiglie di leptoni e quarks
- **Non spiega** dove sia finita anti-materia → violazione di CP è “piccola” nello SM
- **Non contiene** la gravità al suo interno

## Motivi “sperimentali”

- **Non contiene** candidati di materia oscura e di energia oscura
- **Produzione diretta** di nuove particelle (materia oscura, SUSY, etc) non osservata entro le precisioni sperimentali → nessuno vieta che sia weakly coupled
- **Ricerche indirette**: nuove particelle possono modificare la dinamica di processi noti attraverso correzioni d’ordine superiore
  - **Discrepanze** dalle predizioni dello SM in alcune misure da alcuni esperimenti

## Misura di massa del bosone W



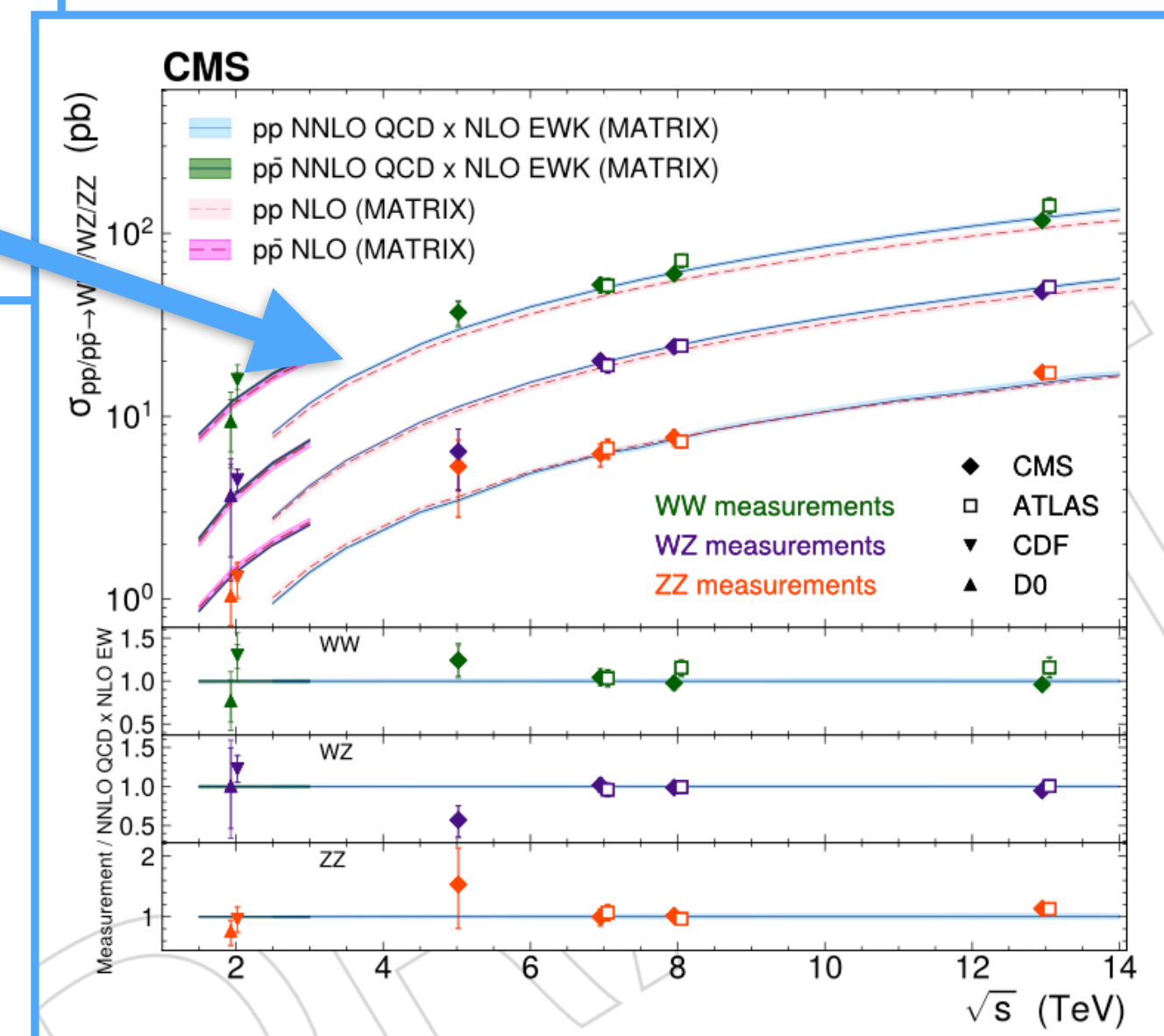
La fisica di LHC non ha competitors diretti → sondare la fisica delle interazioni fondamentali alla scala del TeV

- LHC è l'unica "Higgs boson factory":
  - **Misure sperimentali:** accoppiamenti, massa, spin, CP-structure, larghezza ( $\Gamma$ ), distribuzioni differenziali, self-coupling
  - **Misure fondamentali** per comprendere la fisica EW e il processo di rottura spontanea della simmetria EW

- LHC è anche una potente weak-boson (W,Z) e top-quark factory:
  - Studio **interazioni multiple** tra bosoni vettori → produzione simultanea di due o tre bosoni vettori
  - Studio **proprietà del top**, produzione t + bosoni vettori, spin-polarization t → Wb, etc ..

- LHC è una meson e hadron factory:
  - Misure di precisione in fisica del **beauty** e **charm** quark
  - Studio di **decadimenti rari** di mesoni B, D, K ...
  - **Violazione di simmetria CP** in decadimenti di mesoni B e D

V-boson pairs cross section







**Lavorando** su un progetto di *tesi* legato a **CMS**, indipendentemente che si tratti di analisi dati per una misura o per lo sviluppo di un detector (R&D), si costruisce un **curriculum scientifico completo** con **competenze trasversali**

## Algoritmi di simulazione e ricostruzione

- Usare e conoscere software per il calcolo di **elementi di matrice** e **parton shower**
- Usare e sviluppare software per la simulazione **della risposta del rivelatore** alla particelle prodotte da un bunch crossing
- Usare e sviluppare algoritmi per la **ricostruzione di un evento** a partire dalle singole deposizioni di energia nel detector

## Computing e statistica

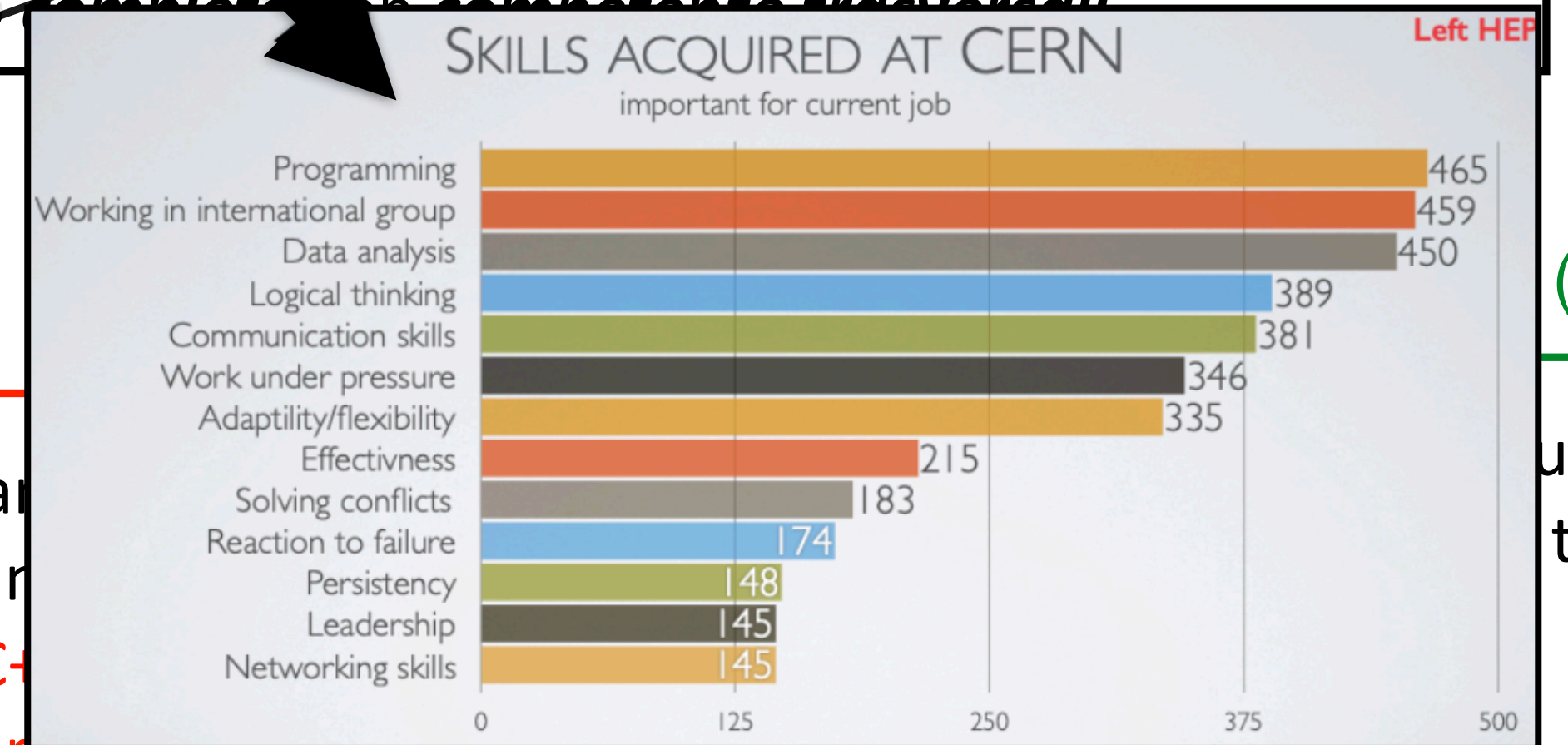
- Gestire e manipolare una grande mole di dati (**big data**) attraverso linguaggi di programmazione moderni (**C++**, **python**), **librerie avanzate per analisi dati** (ROOT, pandas, scipy, scikit-learn, numpy) e utilizzo di **cluster per il calcolo distribuito**.
- **Metodi statistici** per stima di parametri, test d'ipotesi, unfolding della risposta del detector, etc ...

## Machine Learning (ML)

- Tecniche di ML sono ampiamente usate ad LHC per la risoluzione di diversi tipi di problemi:
  - **Classificazione d'eventi**
  - **Identificazione di particelle**
  - **Sviluppo di nuovi algoritmi di trigger**
  - **Calibrazione energetica**
  - **Ricerca di segnali anomali**
  - **Simulazione veloce della risposta del rivelatore**
  - **Unfolding distribuzioni differenziali**

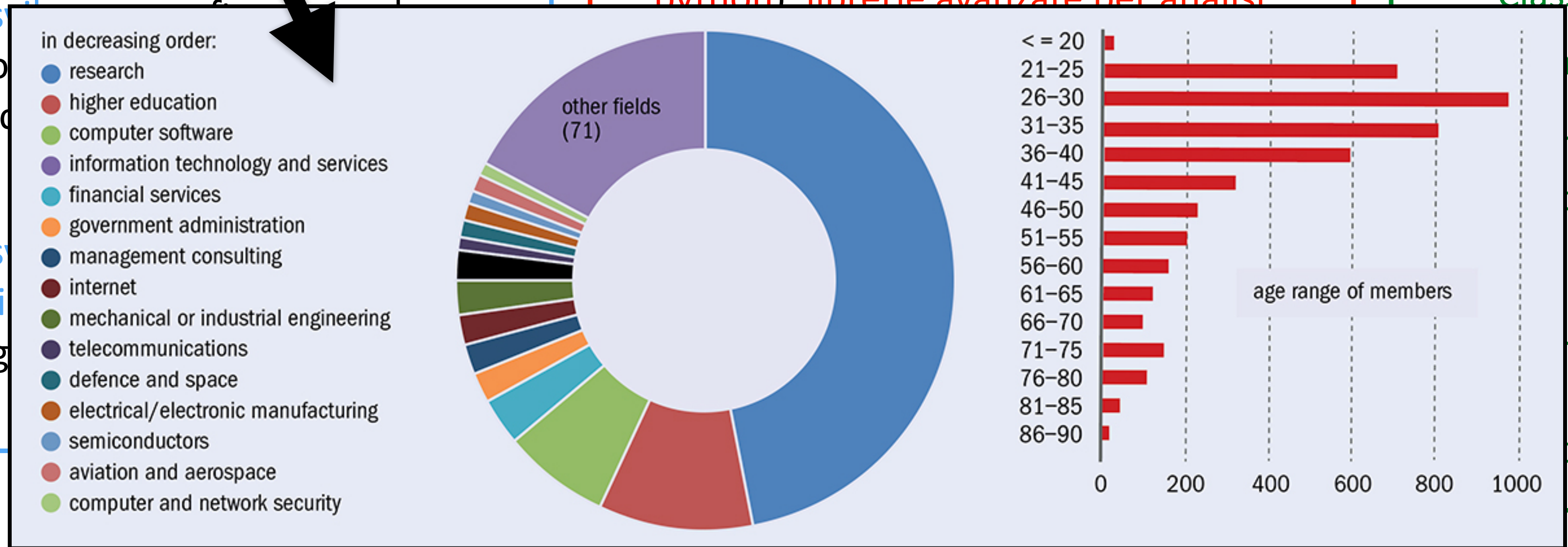
Lavorando sui un progetto di *tesi* legato a CM... analisi dati per una misura o per lo sviluppo di un detector (R&D), si acquisisce un valore di primaria importanza sia a livello accademico che nel private sector

**Le competenze acquisite lavorando per un esperimento di HEP hanno un valore di primaria importanza sia a livello accademico che nel private sector**



Computing e statistica

- Gestire e manipolare una grande quantità di dati (**big data**) attraverso linguaggi di programmazione moderni (C++, python), librerie avanzate per analisi...

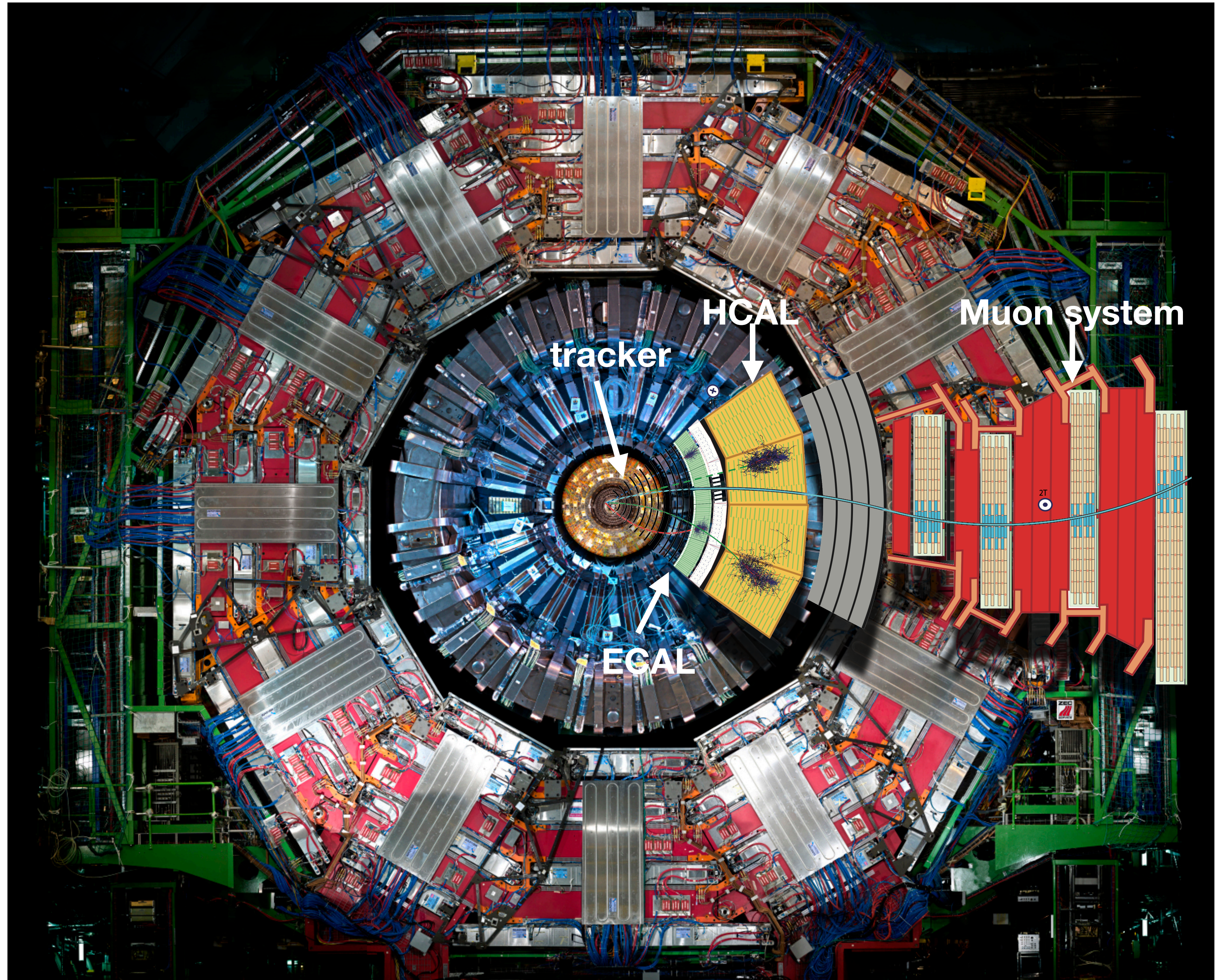


Algoritmi di simulazione e ricostruzione  
 Usare e sviluppare software per il calcolo di eventi di collisione e parton shower  
 Usare e sviluppare software per la simulazione e ricostruzione alla particella crossing  
 Usare e sviluppare software per la ricostruzione delle singole componenti del detector

(ML)  
 usare tipi  
 identificazione di particelle  
 sviluppo di nuovi algoritmi di trigger  
 ottimizzazione energetica  
 ricerca di segnali anomali  
 ottimizzazione veloce della risposta del trigger  
 fitting distribuzioni differenziali

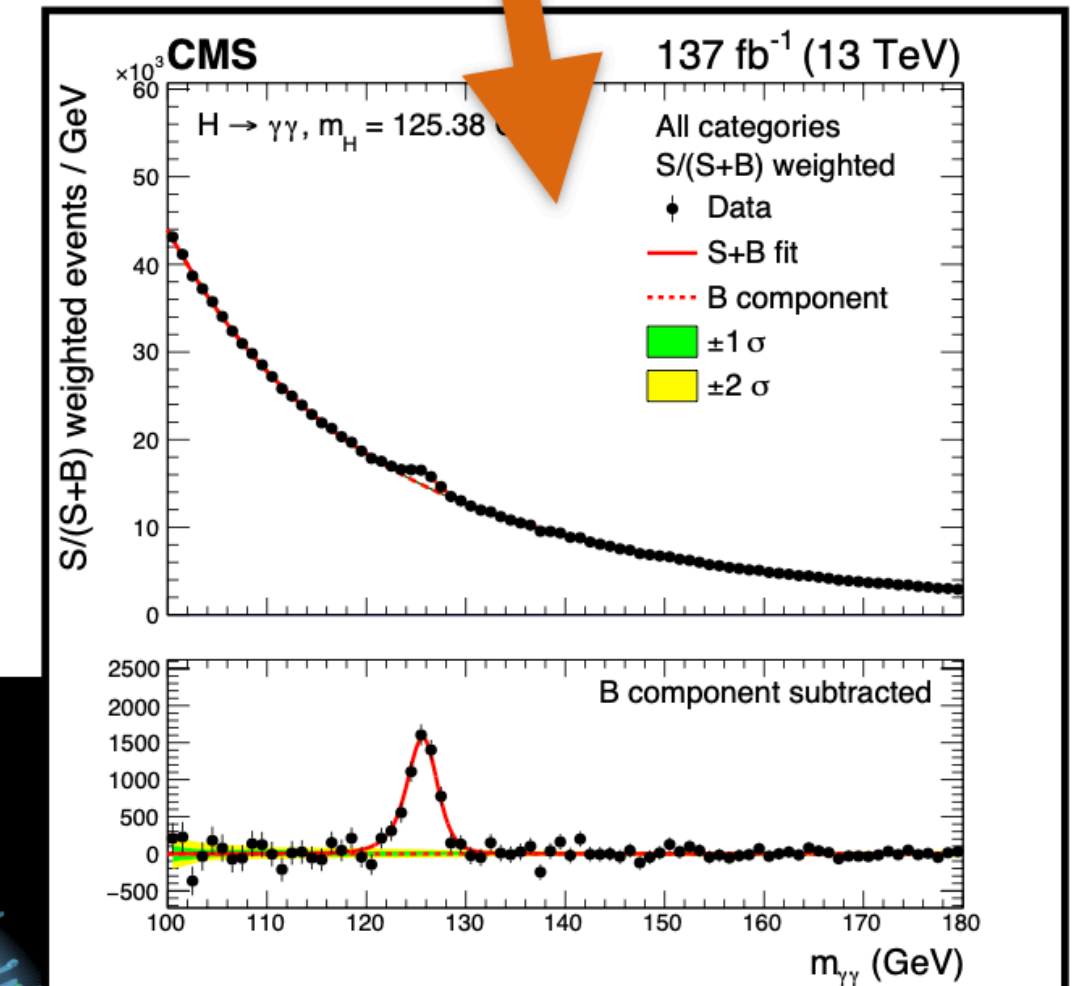
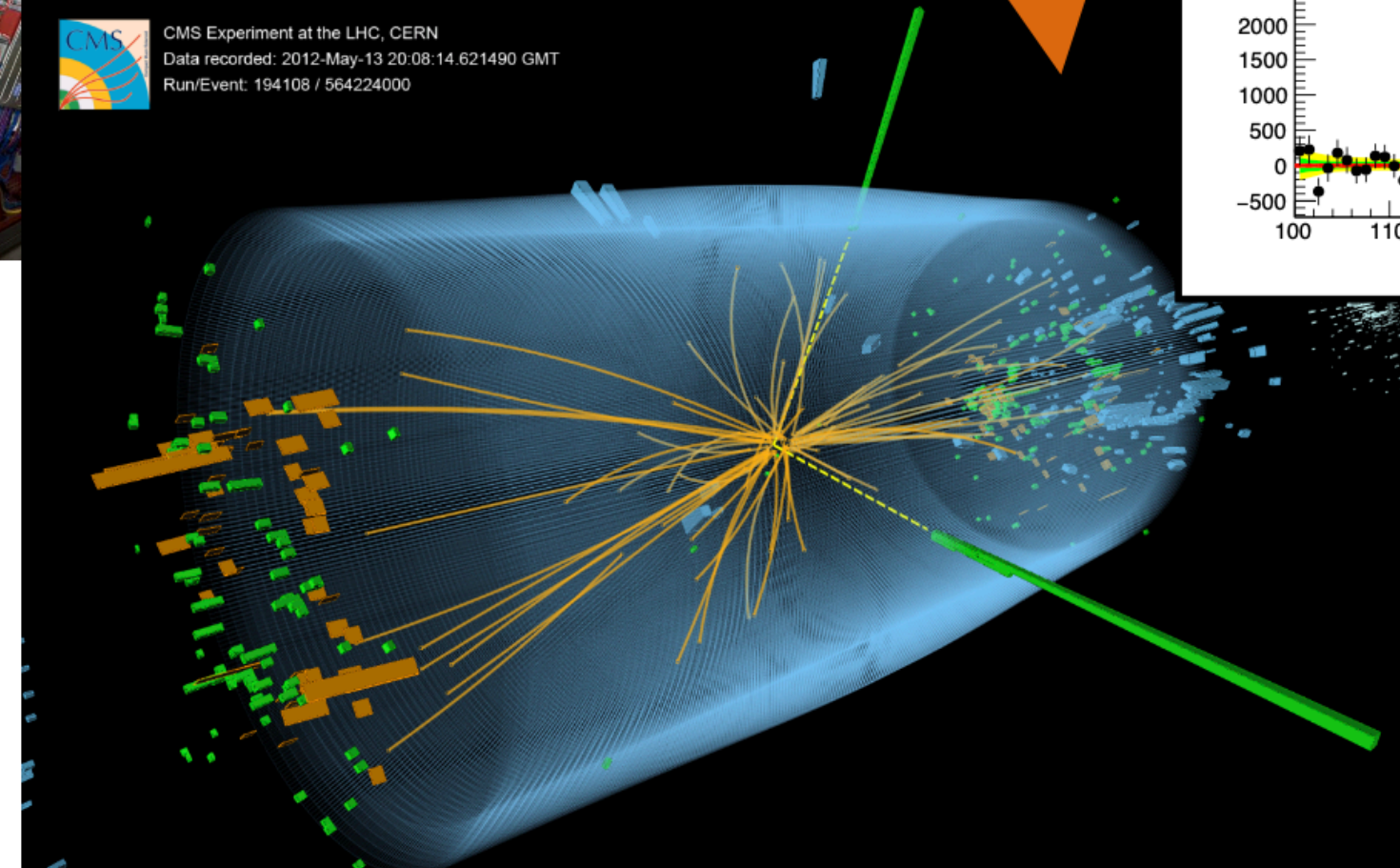
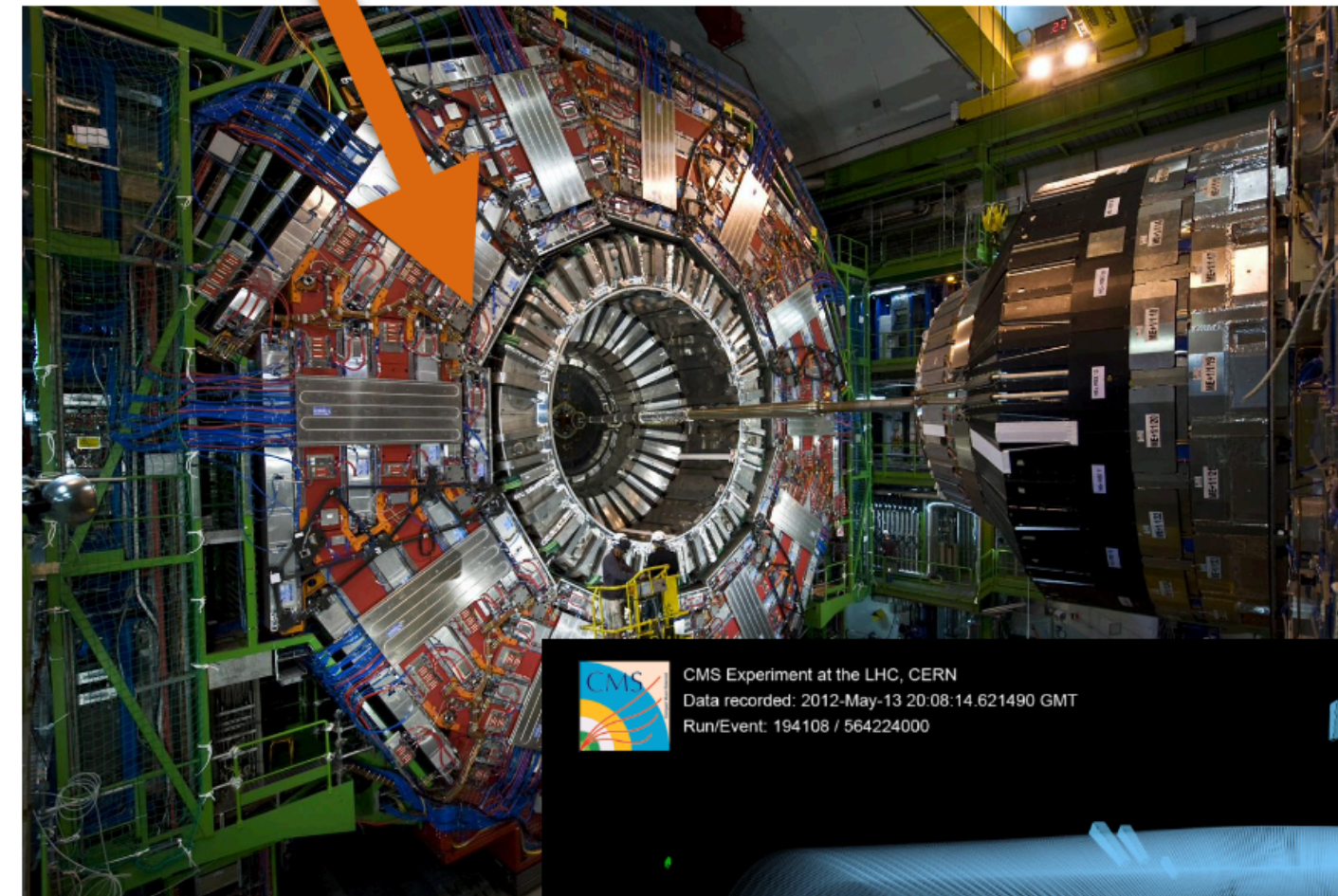
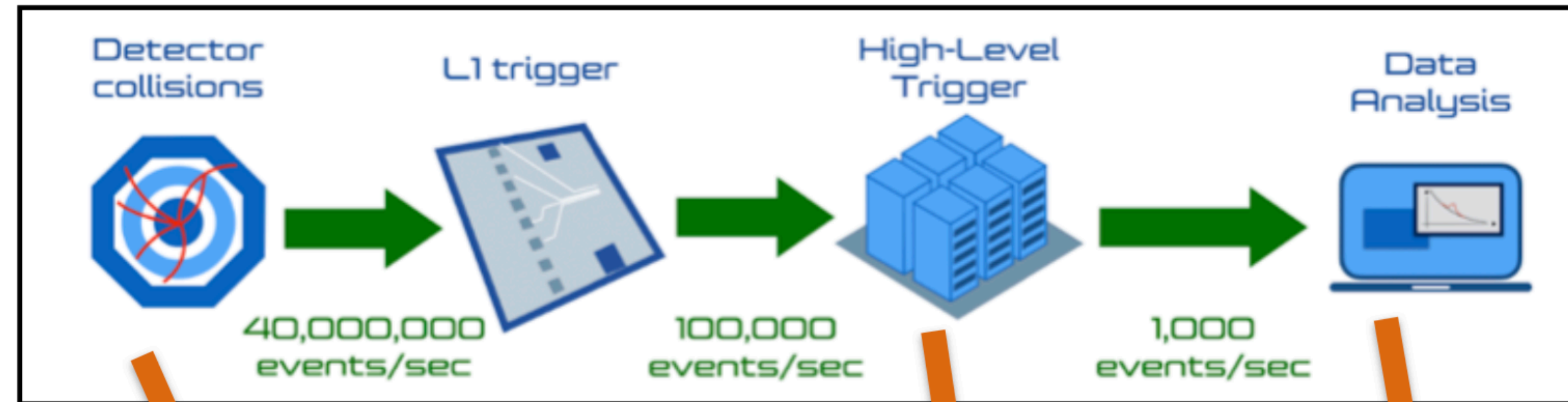
## Rivelatore CMS

- CMS è un detector di “**general purpose**” cioè copre ~ tutta la fisica di LHC
- Il cuore di CMS è un **potente magnete** superconduttore che sviluppa  $B = 3.8 \text{ T}$
- **Obiettivo:** misurare ermeticamente posizione, carica, ed energia di ogni particella prodotta
- **Struttura a strati** necessaria, sfruttando **tecnologie diverse**, per caratterizzare gli eventi di collisione
- CMS è in grado di misurare **40 MHz** di collisioni
- Salvare su disco **5 kHz** di eventi RAW
- **Eventi interessanti selezionati** con due triggers: uno hardware e l'altro software



## Rivelatore CMS

- CMS è un detector di “general purpose” cioè copre ~ tutta la fisica di LHC
- Il cuore di CMS è un **potente magnete** superconduttore che sviluppa  $B = 3.8 \text{ T}$
- **Obiettivo:** misurare ermeticamente posizione, carica, ed energia di ogni particella prodotta
- **Struttura a strati** necessaria, sfruttando **tecnologie diverse**, per caratterizzare gli eventi di collisione
- CMS è in grado di misurare **40 MHz** di collisioni
- Salvare su disco **5 kHz** di eventi RAW
- **Eventi interessanti selezionati** con due triggers: uno hardware e l'altro software



# Proposte di tesi sui dati di Run2 e Run3

---

- **ECAL** è composto da **75848 cristalli** scintillanti di  $\text{PbWO}_4$

Contatti: [andrea.massironi@mib.infn.it](mailto:andrea.massironi@mib.infn.it) [alessio.ghezzi@unimib.it](mailto:alessio.ghezzi@unimib.it) [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it)

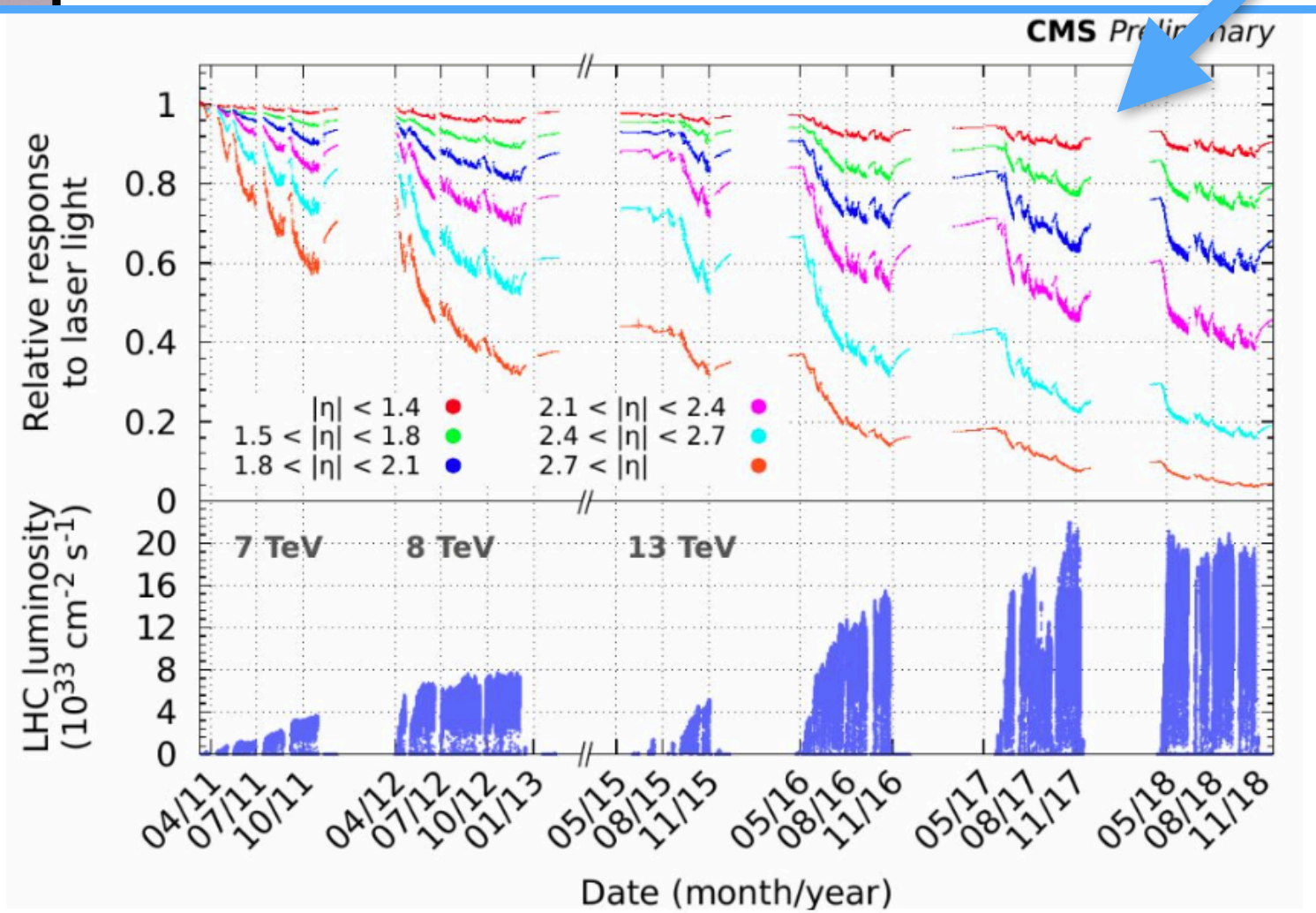
- è un calorimetro **omogeneo**
- è in grado di fermare **elettroni e fotoni**
- **converte** l'energia di elettroni e fotoni in **luce di scintillazione**
- **obiettivo:** misurare energia e posizione di  $e/\gamma$

Correzione della perdita di trasparenza

- L'esposizione alla radiazione **danneggia i cristalli**
- **Proposta:** predire perdita di trasparenza con ML per applicazioni al trigger di CMS durante il Run3
- Regressione basata su **feed-forward NN** o con **Long-Short-Term Memory (LSTM)**

Riduzione rumore e ricostruzione immagini

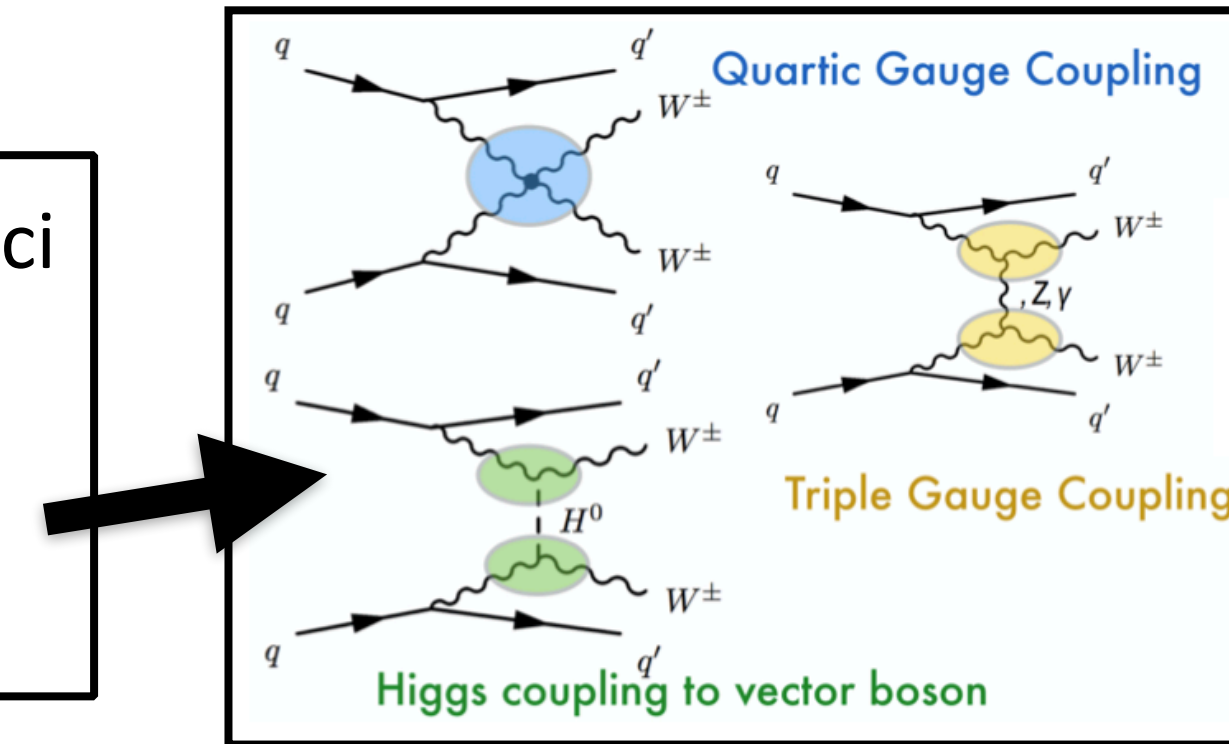
- Usare **Graph-Neural-Networks (GNN)** per raggruppare singoli depositi di energia del calorimetro (clustering)
- Stima e sottrazione del rumore intrinseco di ogni canale durante la procedura di clustering



# Scattering elettro-debole di bosoni vettori

## Che cos'è il vector boson scattering (VBS) ?

- **Produzione elettro-debole** di coppie di bosoni vettori e 2-jet adronici
- **Unitarietà della sezione d'urto** garantita da mutua interferenza tra molteplici diagrammi coinvolti
- **Processi rari** osservati per la prima volta ad LHC



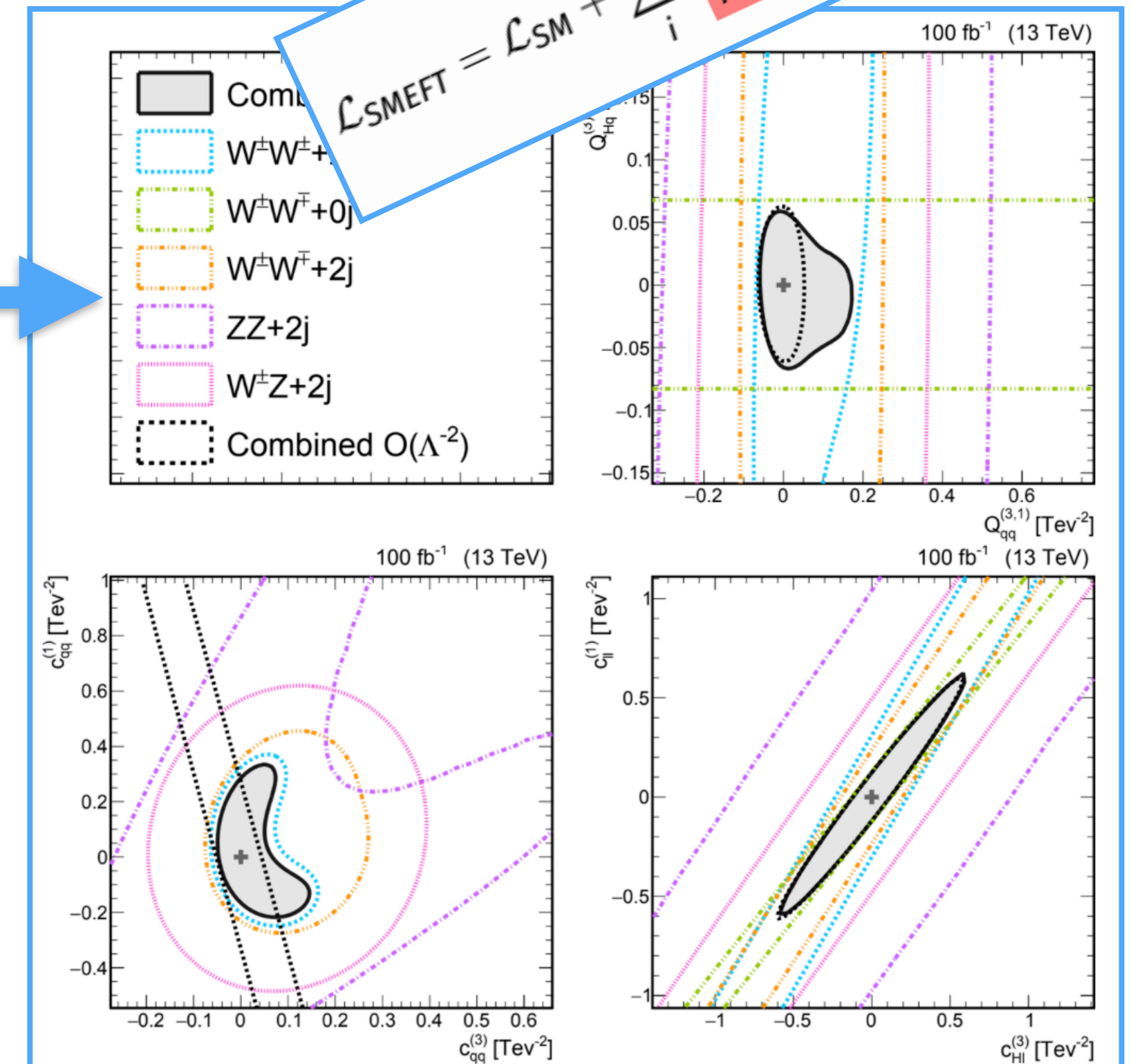
## Nuova fisica in VBS ?

- **Misure di precisione** in VBS sono **straordinaria sonda** del settore EW dello SM
- **Nuova fisica (BSM)** potrebbe manifestarsi **indirettamente** modificando la dinamica del VBS
- Nuova fisica in VBS descrivibile attraverso una **teoria efficace di campo (EFT)**

## Ambiti per un lavoro di tesi

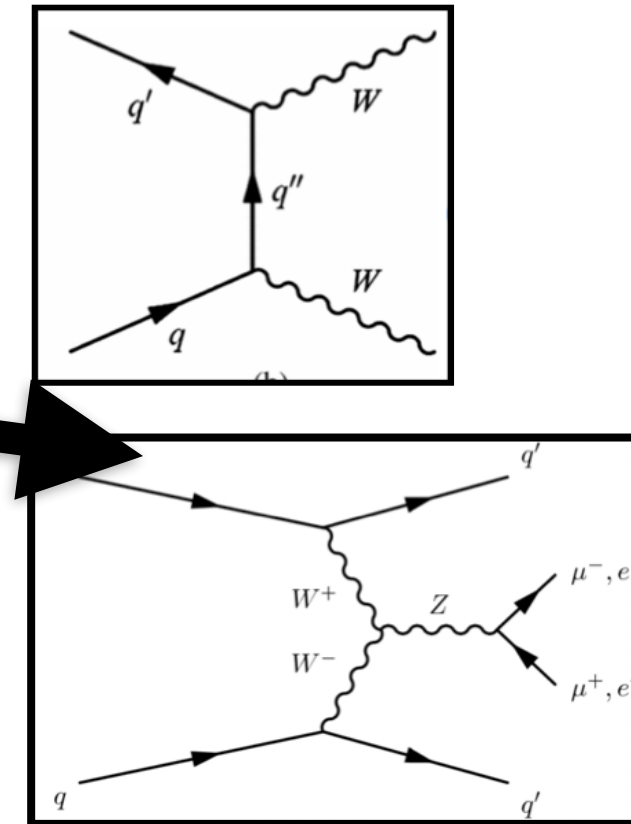
- Gruppo attivo nei canali  $W^\pm W^\pm$ ,  $W^\pm W^\mp$ ,  $WZ$
- **Ottimizzazione fit EFT dim-6** per operatori CP-odd
- **Sviluppo di ML** per distinguere operatori EFT dal continuo SM
- **Sviluppo di ML** per massimizzare sensibilità allo scattering longitudinale

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^2} O_i^{(6)} + \frac{c_i}{\Lambda^4} O_i^{(8)} + \dots$$



## Perchè sono interessanti ?

- Processi che possono essere isolati nei dati con **alta purezza**
- Sorgenti di fondo in importanti misure del bosone di Higgs
- **Sensibili** a operatori **EFT** che **non entrano** nei processi di **VBS**
- **Sensibili** a modellizzazione della **shower partonica**, **correzioni EW**, etc

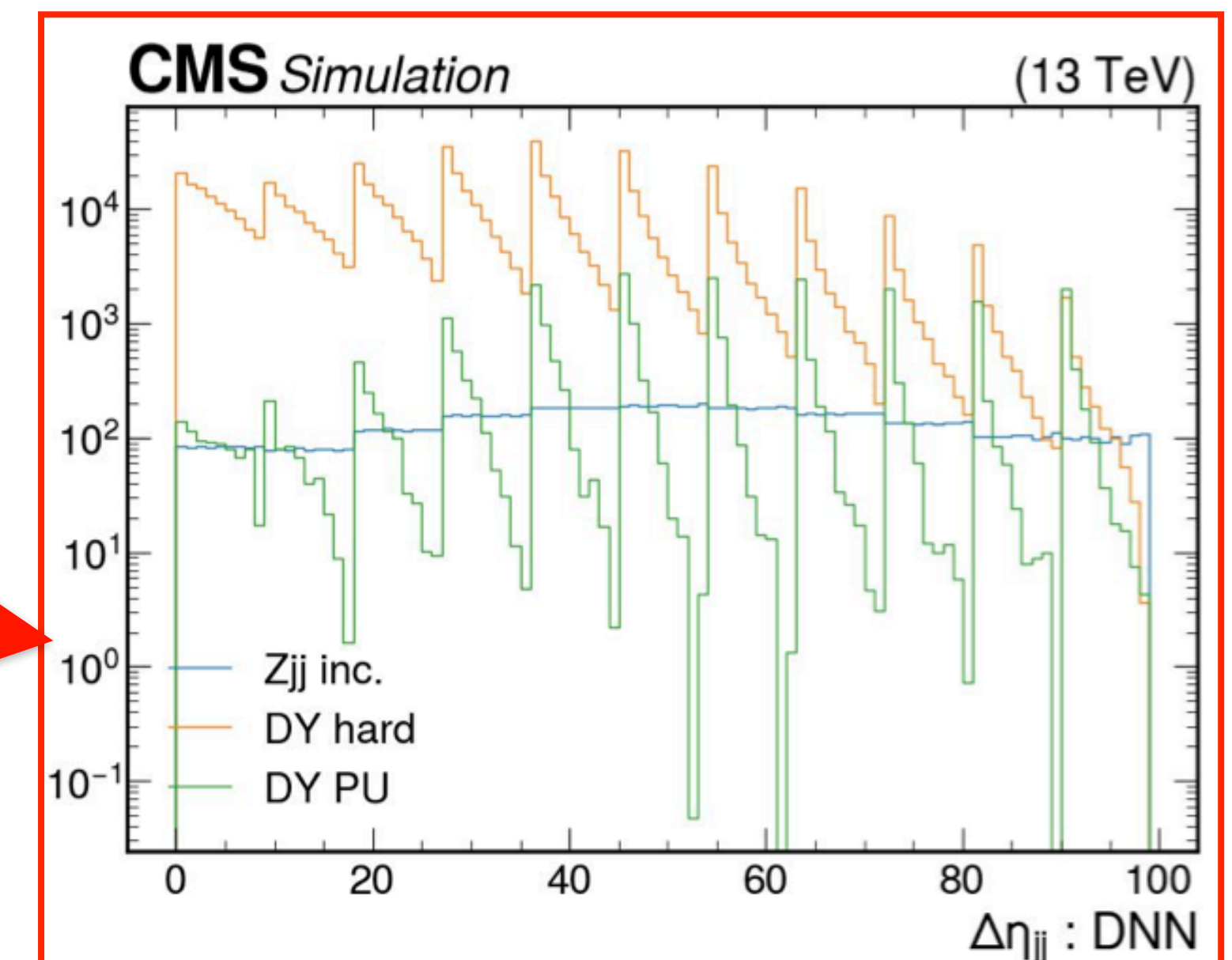
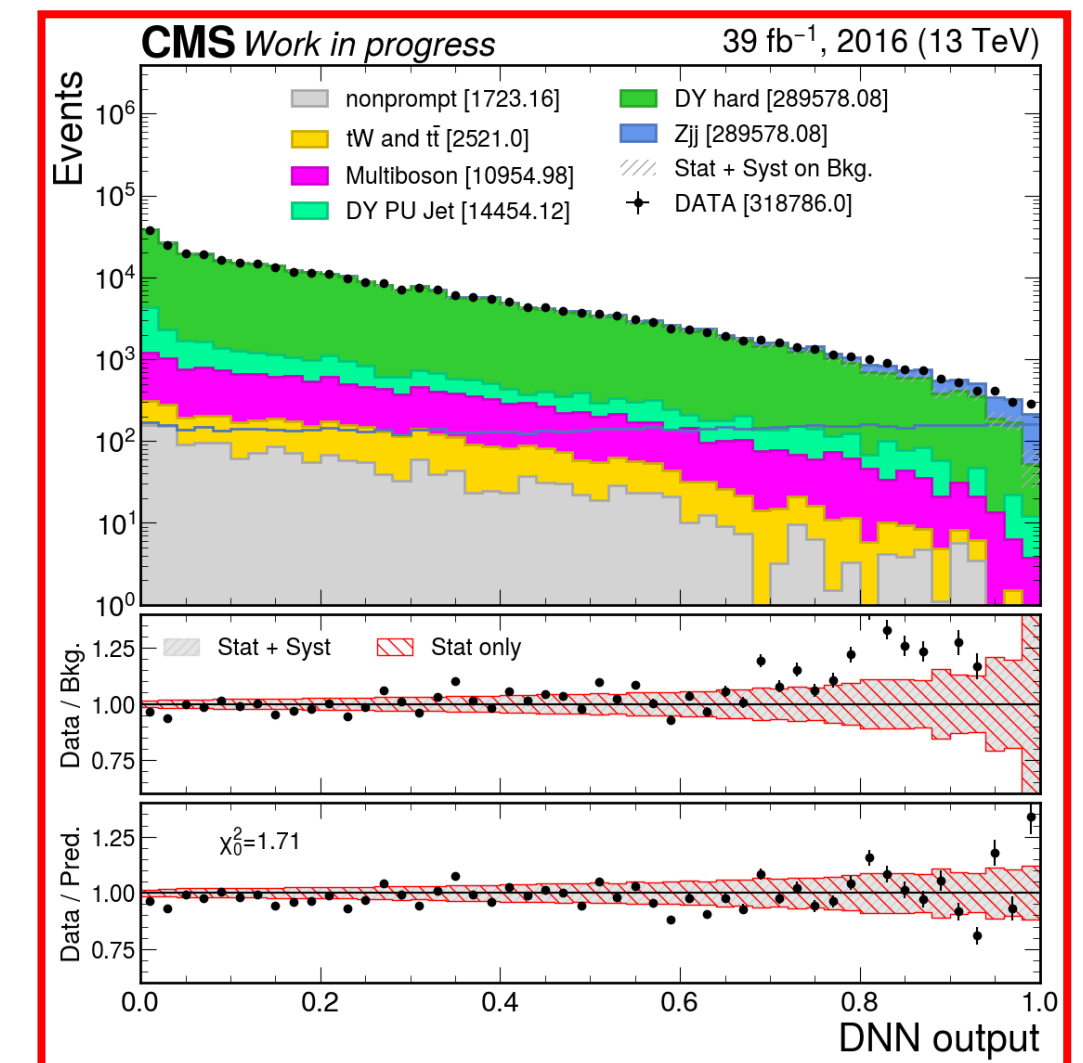


## Proposte per $W^{\pm}W^{\pm}$

- **Sviluppare analisi EFT**: selezioni, stima delle sistematiche, interpretazione statistica
- **Stima del fondo da lepton non-prompt** (jet adronici identificati come leptoni) con tecniche di ML reweight

## Proposte per VBF-Z

- **Completare analisi EFT**: ottimizzazione del fit finale, estensione a operatori CP-odd
- **Usare ML classifier** per ottimizzare simultaneamente la separazione segnale vs fondo e diagonalizzare la matrice di risposta del rivelatore  $\rightarrow$  **migliorare unfolding**

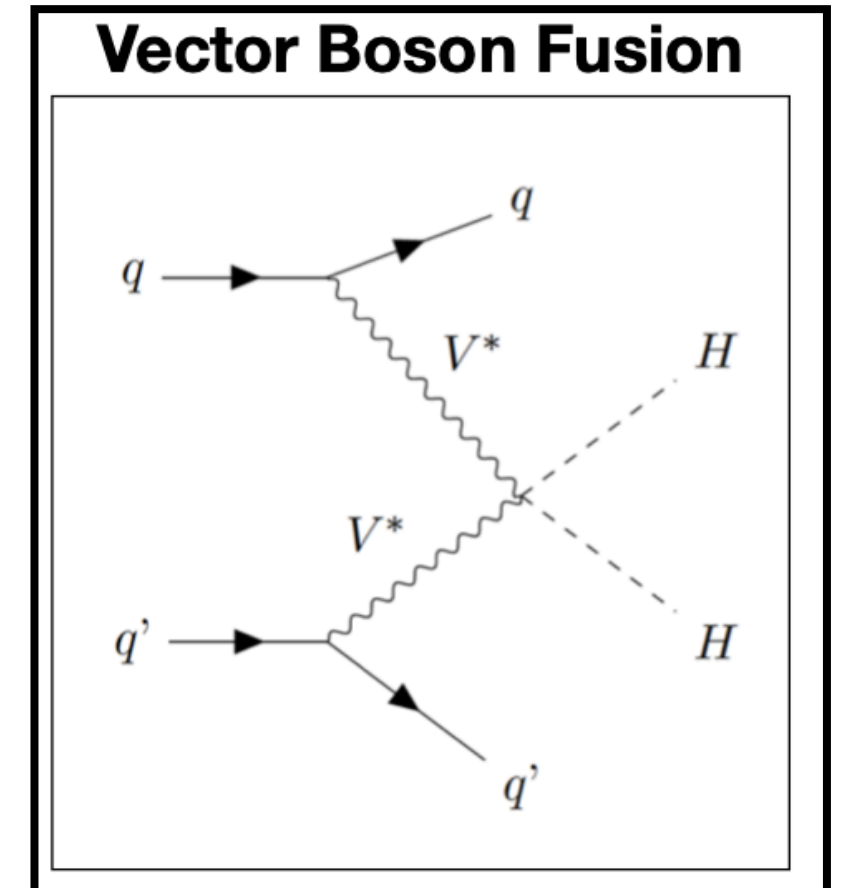
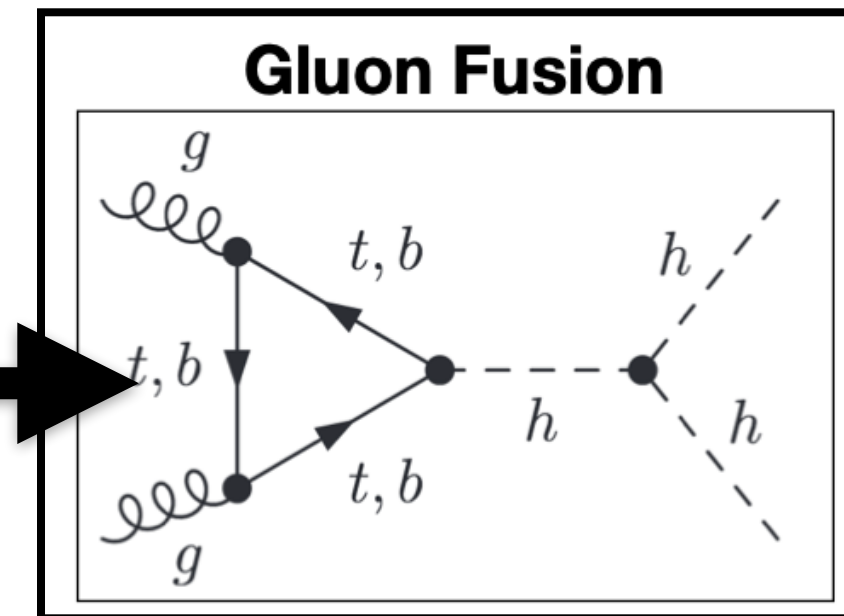


Contatti: [andrea.massironi@mib.infn.it](mailto:andrea.massironi@mib.infn.it) [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it) [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it) [marco.paganoni@unimib.it](mailto:marco.paganoni@unimib.it)



## Che processo studiamo?

- **Scopo:** osservare un'interazione ancora ignota nello SM
- Possibili **anomalie** in questa interazione → accesso diretto a **nuova fisica**
- **Higgs self-coupling** ad LHC  $\Leftrightarrow$  produzione **non-risonante** di **coppie di bosoni di Higgs (HH)**



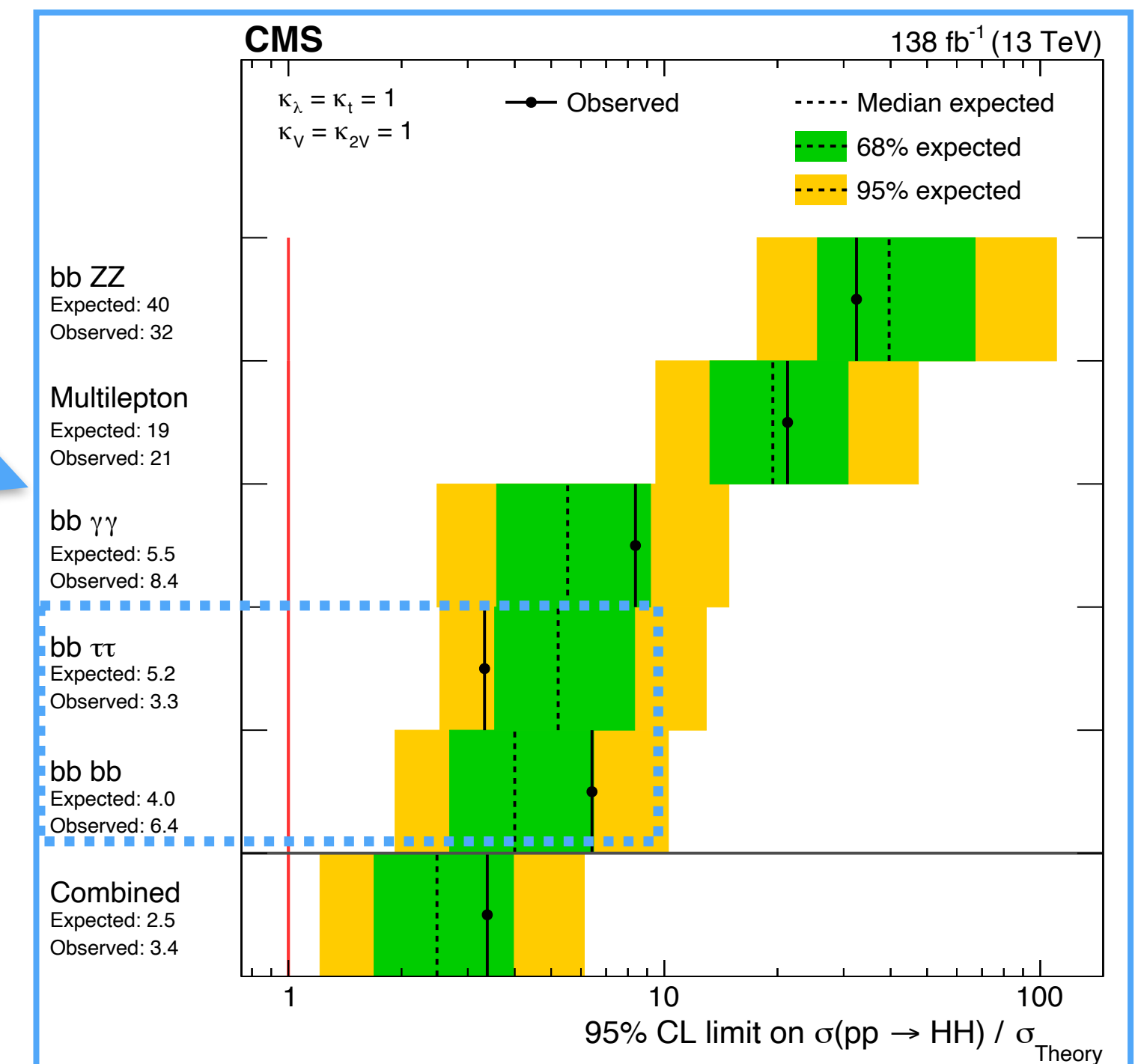
## Stati finali d'interesse ?

- Processo HH **estremamente raro**
- Maggiore **sensibilità**  $\Leftrightarrow$  **decadimenti più probabili**
- MIB attiva in  $HH \rightarrow 4b$  e  $HH \rightarrow bb\tau^+\tau^-$

## 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** e **data-stream** sviluppati per Run3

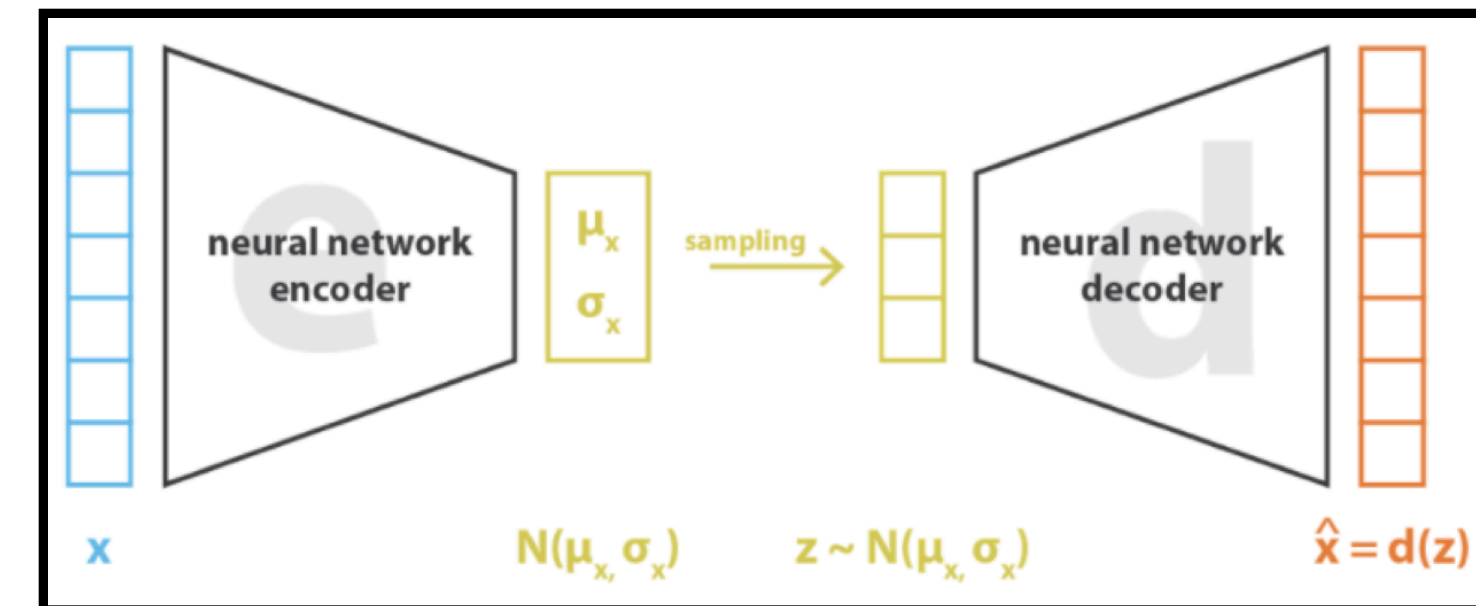
Contatti: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it) [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it) [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it)



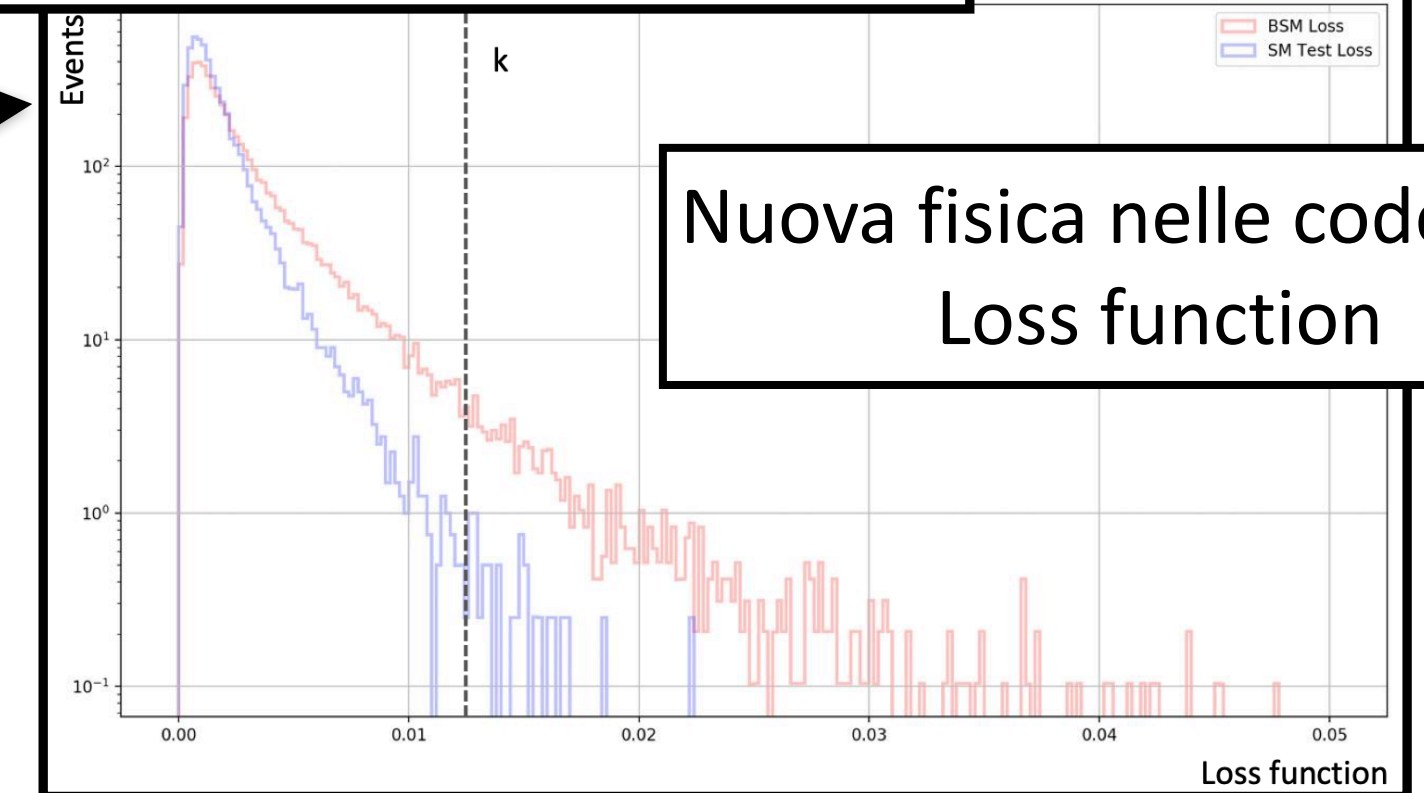
Contatti: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it) [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it) [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it)

## Ricerca di segnali anomali

- Nuova fisica può essere parametrizzata ad LHC in **effective field theory (EFT)**
- Operatori EFT modificano la cinematica di un processo
- **Cercare EFT**  $\Leftrightarrow$  cercare **anomalie** nei dati ad **alta energia**

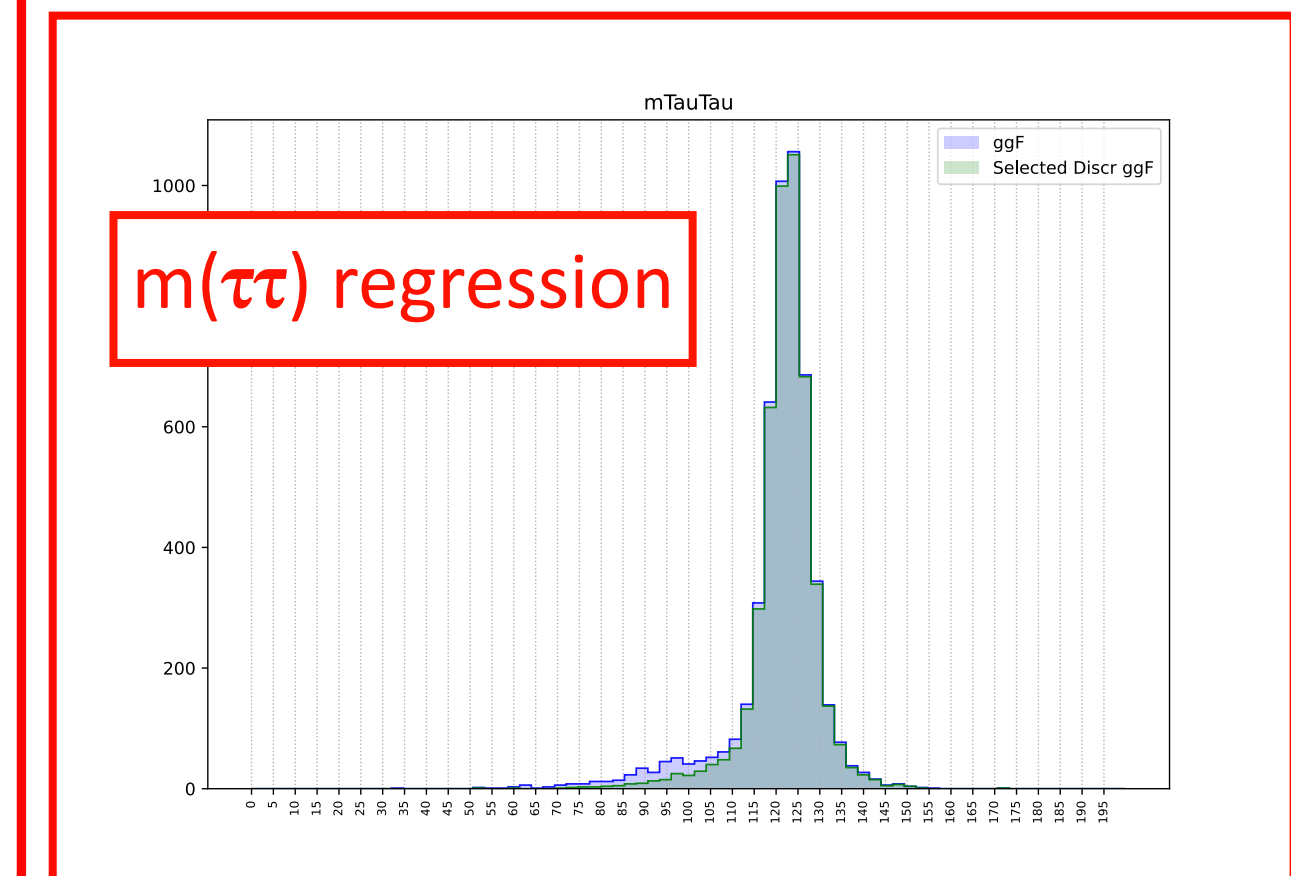
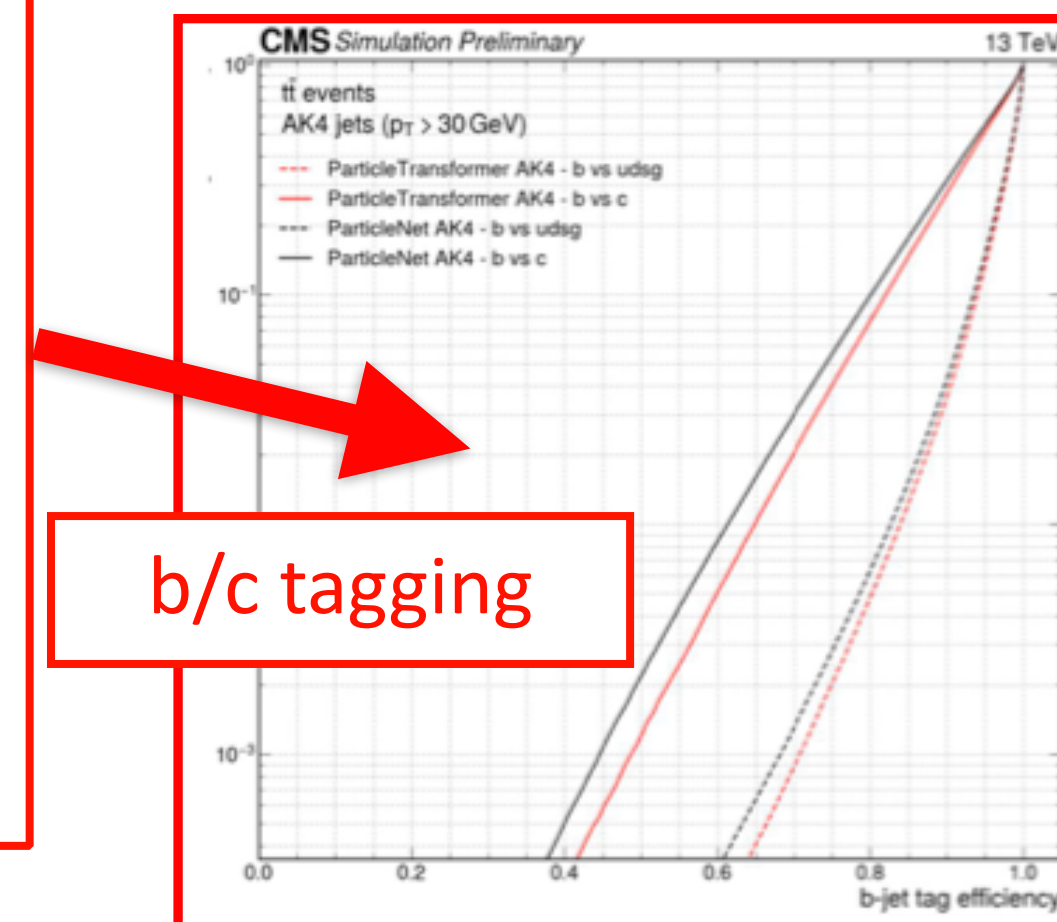


variational auto-encoders



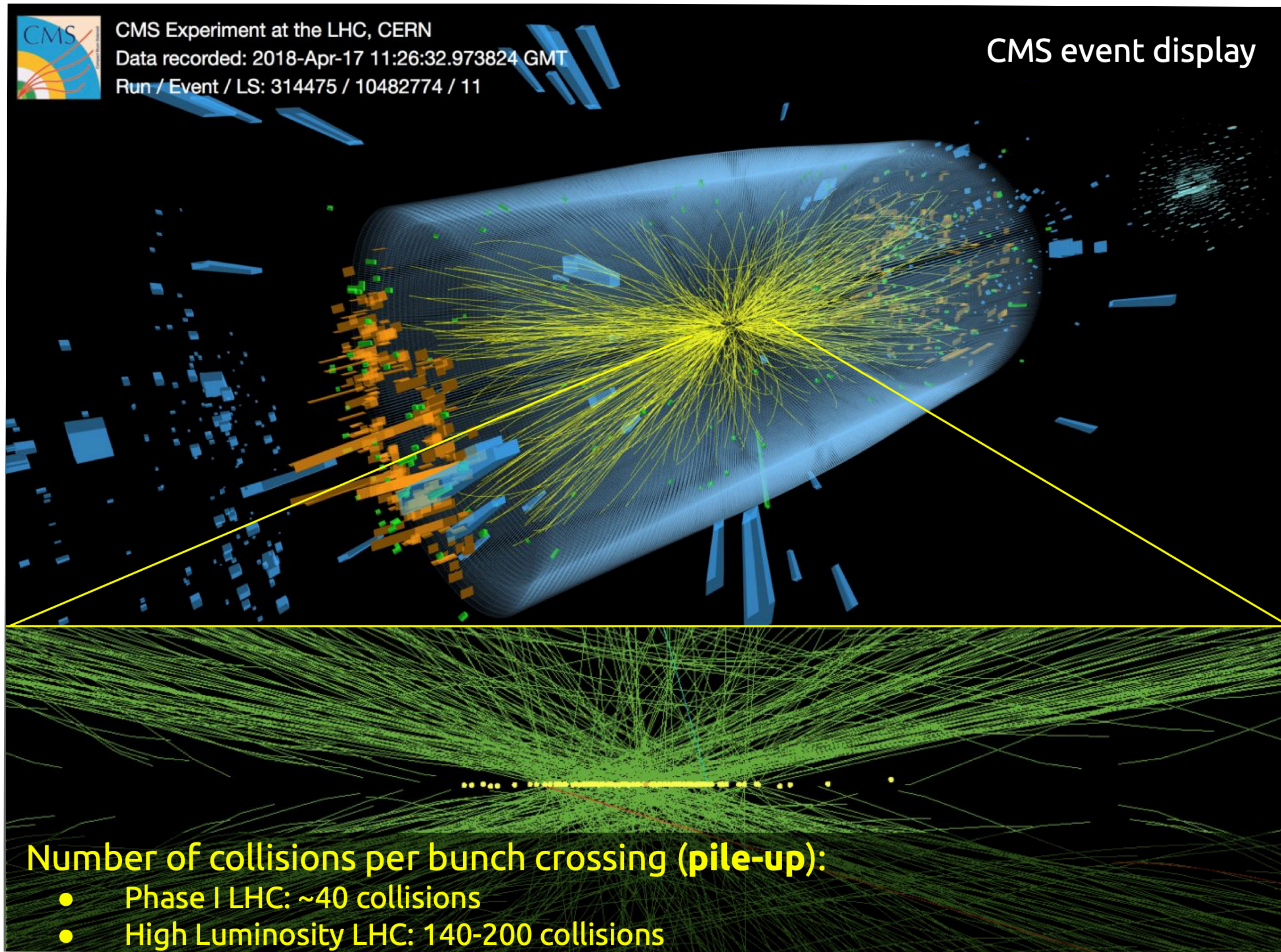
## Identificazione e calibrazione di particelle e jet adronici

- **Scopo:** identificare sapore dei jet, ricostruire  $\tau$ -adronici, calibrazione energetica di leptoni  $\tau$  e jet adronici, etc ..
- **Implementazione:** permutation invariant transformer network
- **Nuovi sviluppi:**
  - Usare i dati per minimizzare il bias legato all'uso di eventi simulati nella fase di training
  - Stimare dai dati correzioni per **efficienza** ed **risoluzione**
  - Migliorare la **risoluzione in massa**  $H \rightarrow \tau\tau$  con regression dedicata



# Proposte di tesi legate agli sviluppi per HL-LHC

---

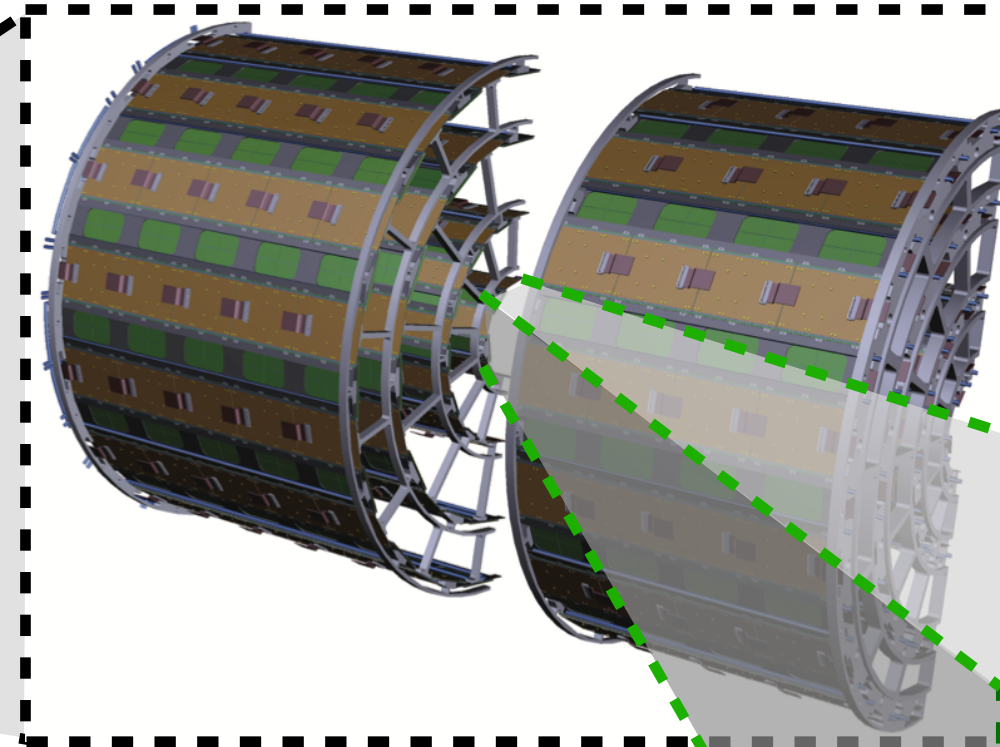
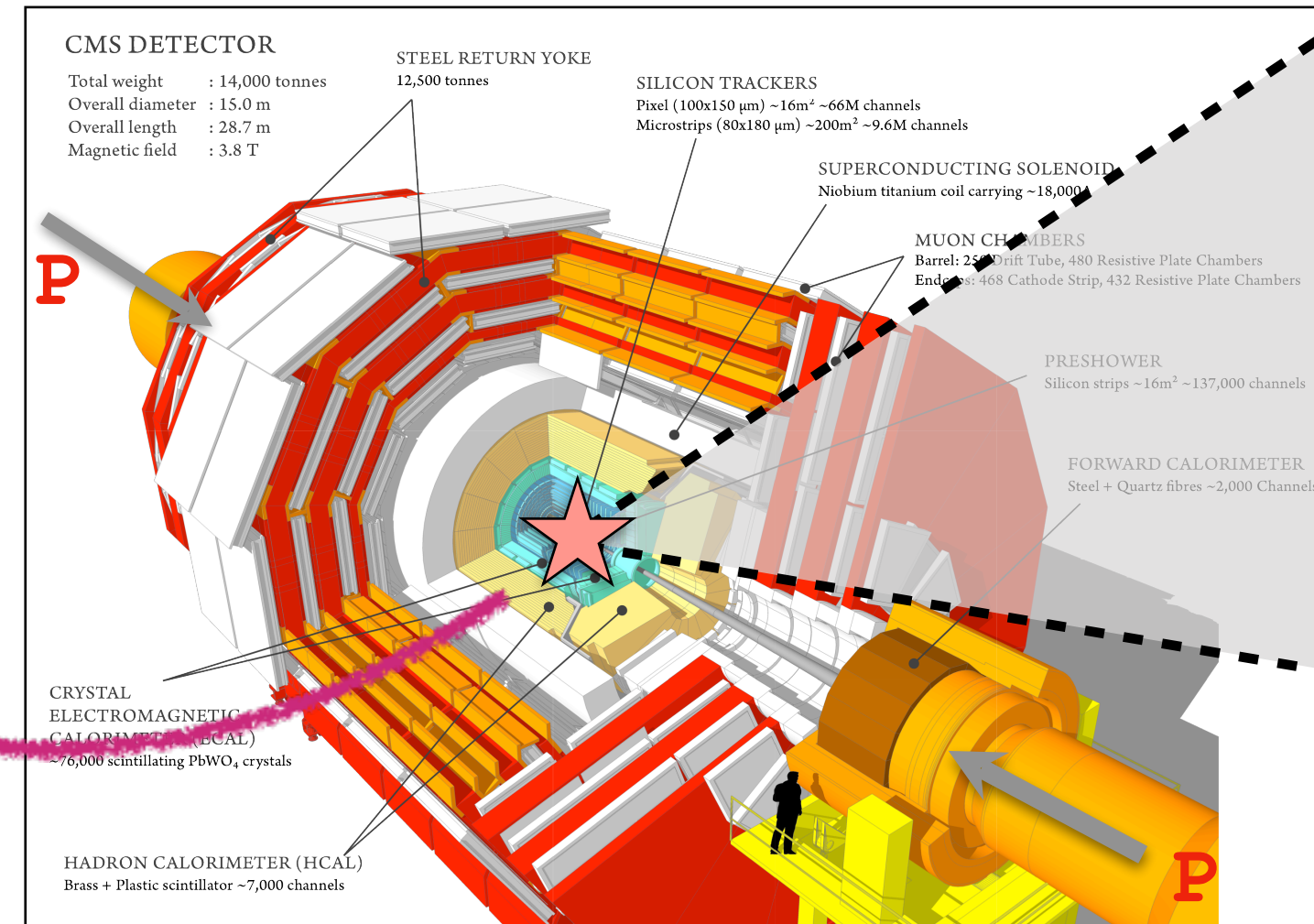
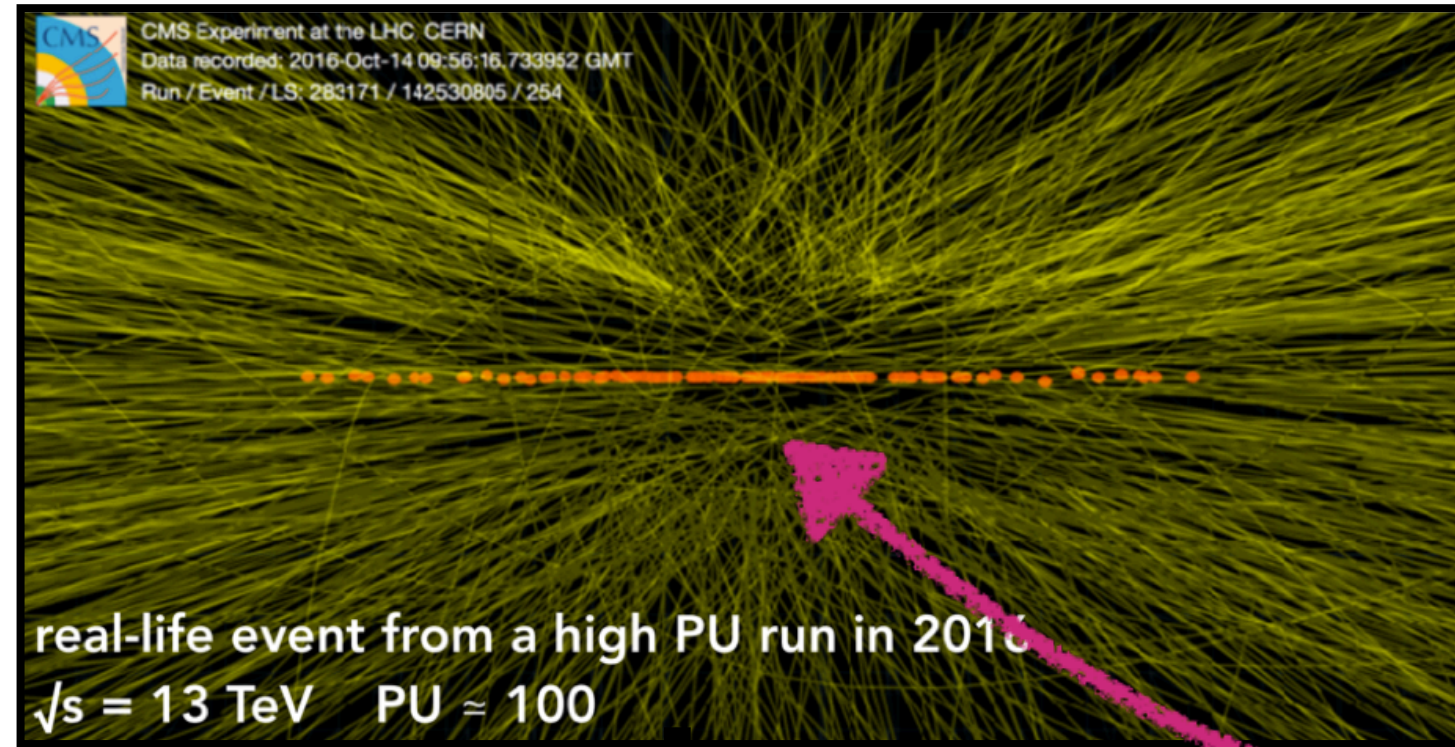


- **HL-LHC:** 3x intensità (luminosità) dell collisioni
- **In-time pileup:**  $N_{\text{protoni}}$  che collidono in un medesimo bunch crossing
- **Intensità delle collisioni**  $\Leftrightarrow$  **in-time pileup**
- Pileup @ HL-LHC: 150-200
- Alto pileup  $\Leftrightarrow$  **alta radiazione**

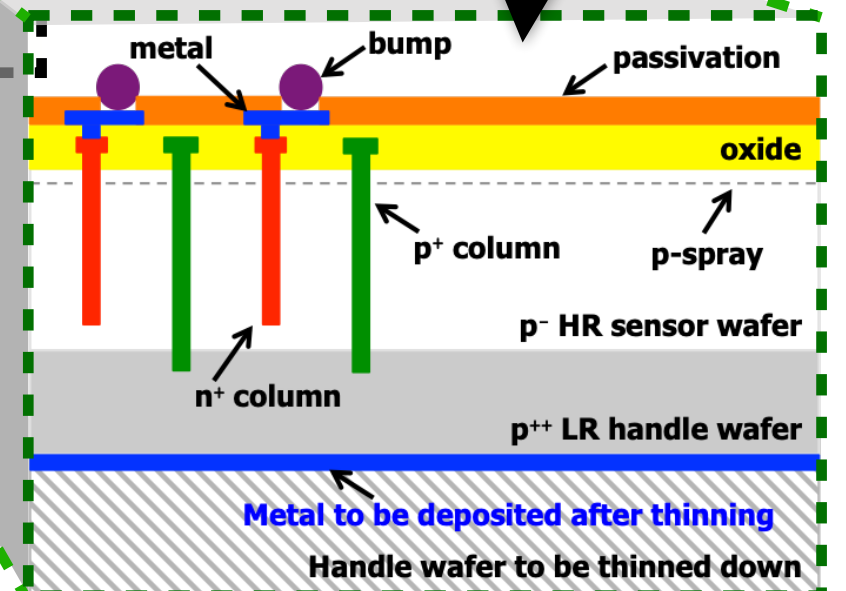


Necessità di nuovi detector più robusti e performanti !!

# L'upgrade del tracciatore a pixel di silicio



Futuro rivelatore a *pixel* con sensori 3D al silicio



HL-LHC: fino a 200 protoni interagenti per evento

## Obiettivo del progetto di upgrade

- Sostituire il rivelatore a pixel, situato nel cuore dell'esperimento, con uno a granularità più fine (x6) e più resistente alle radiazioni (x10)

## Progetti di tesi disponibili

- R&D dei sensori e nello sviluppo del software per pilotare e calibrare il rivelatore
- Caratterizzazione dei prototipi con test su fascio e uso dei dati del test beam per migliorare le simulazioni

Contatti: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it) [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it) [paolo.dini@mib.infn.it](mailto:paolo.dini@mib.infn.it) [sandra.malvezzi@mib.infn.it](mailto:sandra.malvezzi@mib.infn.it)

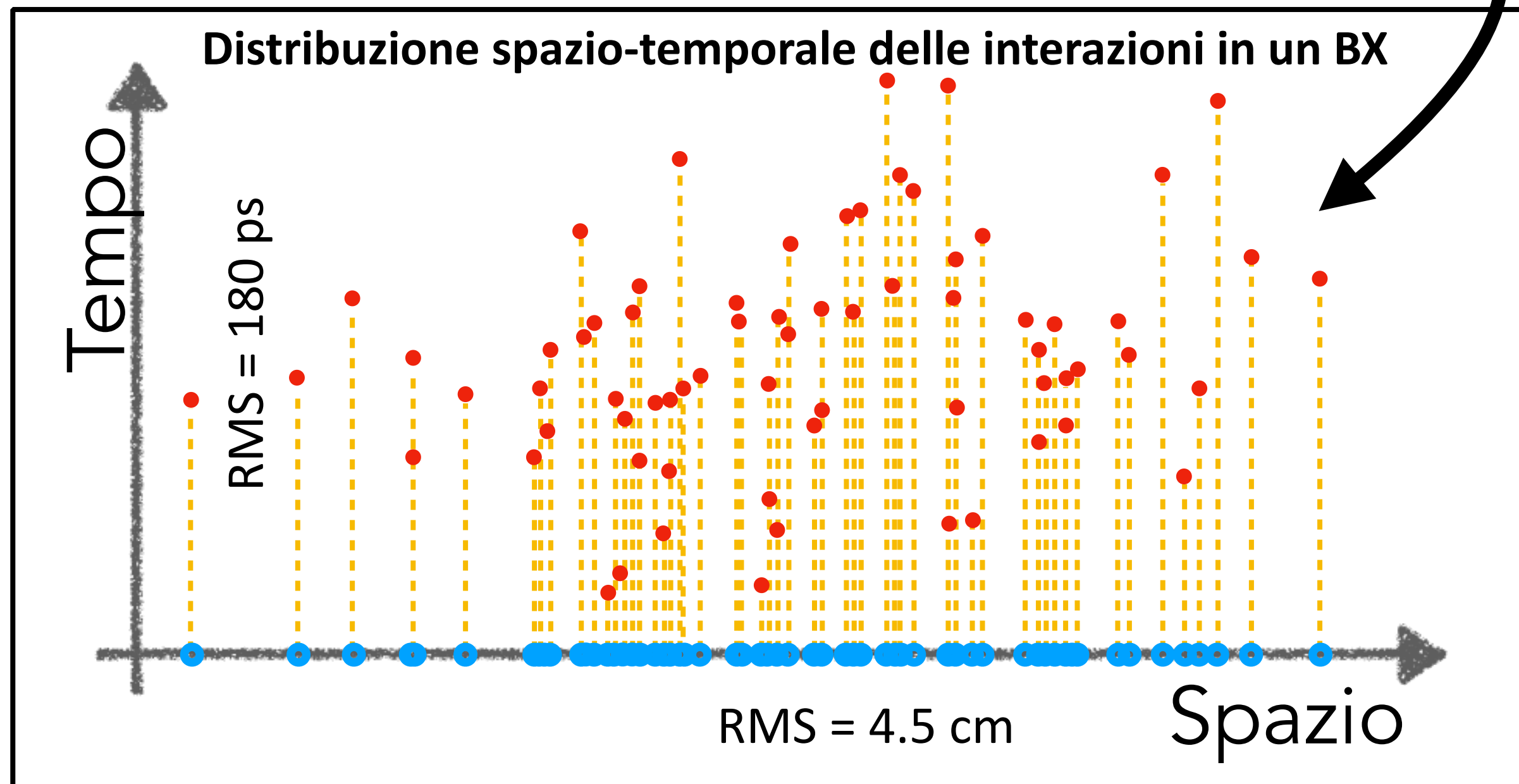
Contatti: [tommaso.tabarelli@unimib.it](mailto:tommaso.tabarelli@unimib.it) [federico.deguio@unimib.it](mailto:federico.deguio@unimib.it) [alessio.ghezzi@unimib.it](mailto:alessio.ghezzi@unimib.it) [andrea.benaglia@mib.infn.it](mailto:andrea.benaglia@mib.infn.it)  
[martina.malberty@mib.infn.it](mailto:martina.malberty@mib.infn.it) [marco.paganoni@unimib.it](mailto:marco.paganoni@unimib.it) [marco.lucchini@unimib.it](mailto:marco.lucchini@unimib.it)

## MTD è un rivelatore completamente nuovo

- **Scopo:** attribuire un tempo ad ogni particelle carica con una precisione  $\sigma_t \sim 30\text{-}40\text{ ps}$
- **Conseguenze:** ricostruzione 4D dei vertici usando la dimensione temporale per mitigare effetti di pileup
- **MTD** rappresenta **intrigante sfida** per esperimenti di HEP

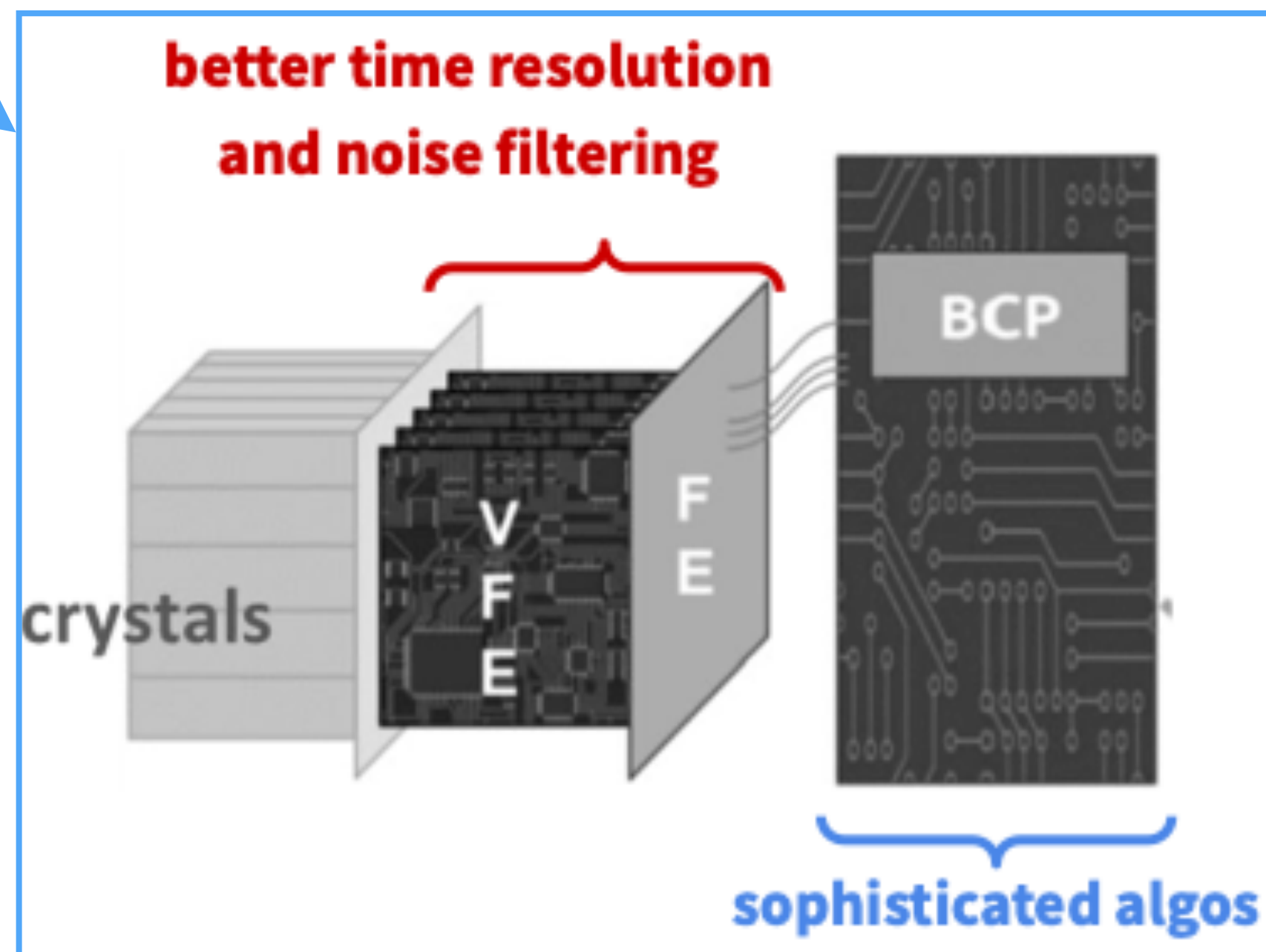
## Attività in Bicocca e al CERN

- **Assemblaggio, caratterizzazione, e system-test** (con raggi cosmici, laser, sorgenti radioattive) dei moduli di MTD in U2!
- Sviluppo delle interfacce software per **detector control** e **data acquisition**
- Simulazione del detector e uso del timing per **ottimizzare** la **ricostruzione di eventi** in CMS



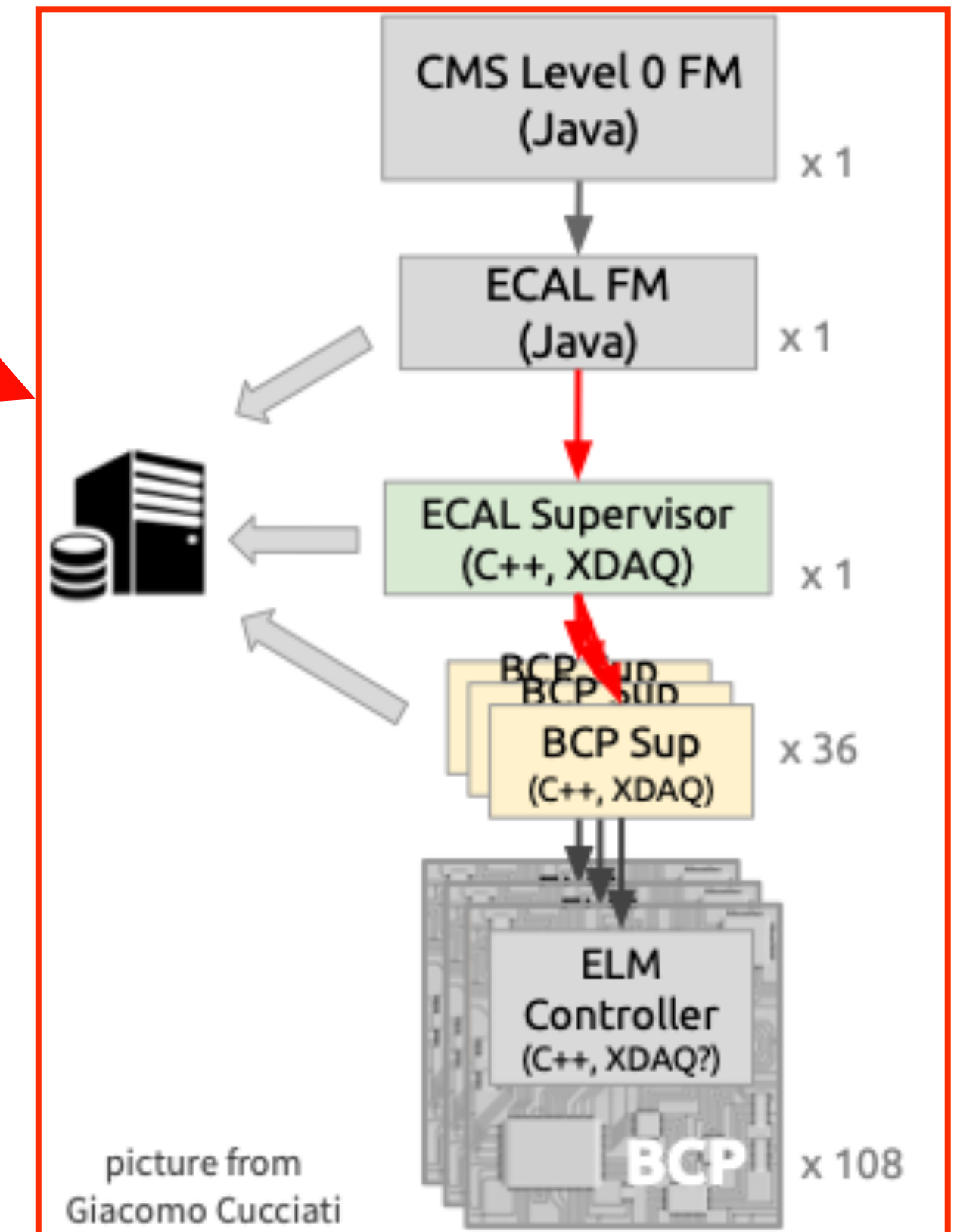
- Durante HL-LHC ci sarà **più radiazione** e la necessità di **aumentare la frequenza di trigger**
- **L'elettronica di ECAL** verrà totalmente **sostituita**
- Il **software di DAQ** verrà **riscritto**

Nuova elettronica di front-end



- **DAQ** verrà riscritto nel 2024-25
- Ad **oggi** solo le **classi base** fornite dal team di XDAQ sono pronte
- Biennio cruciale per il progetto

Layout nuovo software DAQ



- **Prototipi finali** verranno testati prossimamente al CERN sia in **laboratorio** che su **test beam**

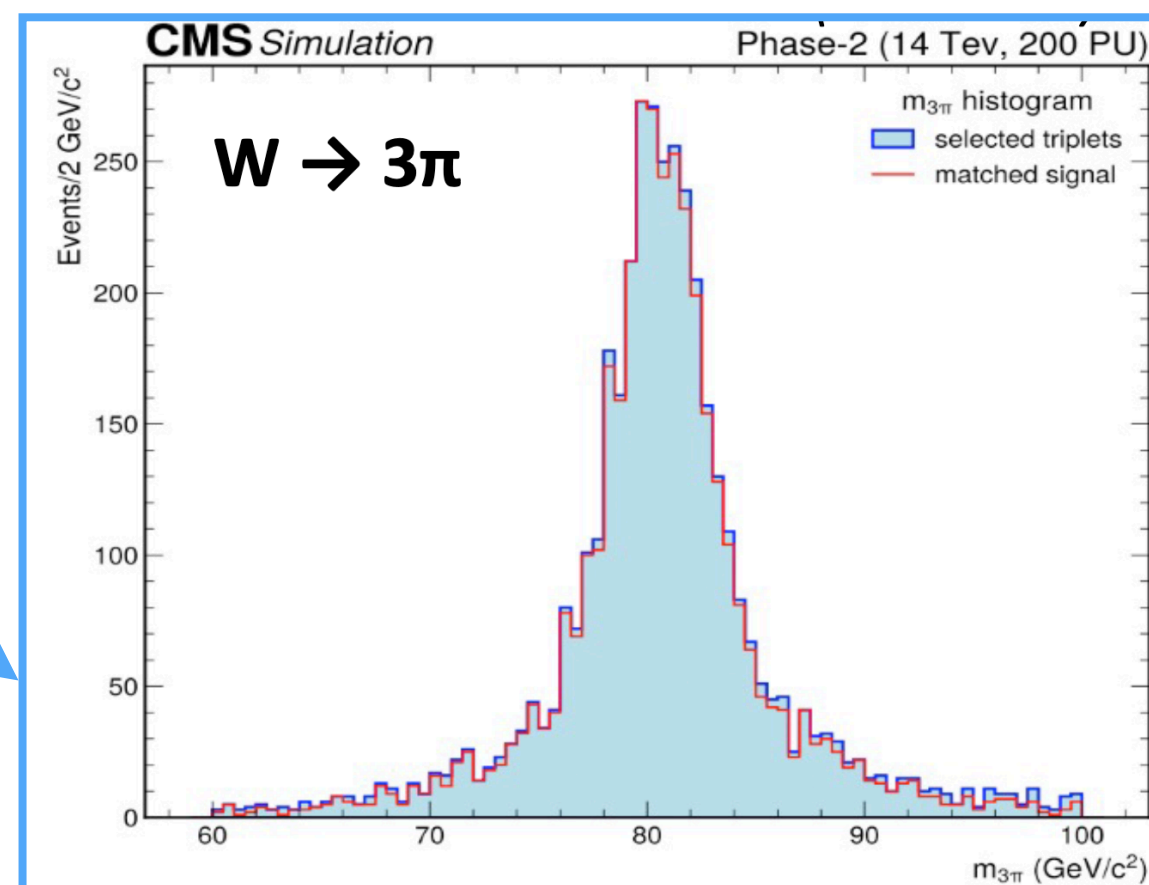
Contatti: [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it) [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it)

Contatti: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it) [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it) [paolo.dini@mib.infn.it](mailto:paolo.dini@mib.infn.it) [francesco.brivio@mib.infn.it](mailto:francesco.brivio@mib.infn.it)

**Un cluster di FPGA sarà installato a Milano nel corso del 2024!**

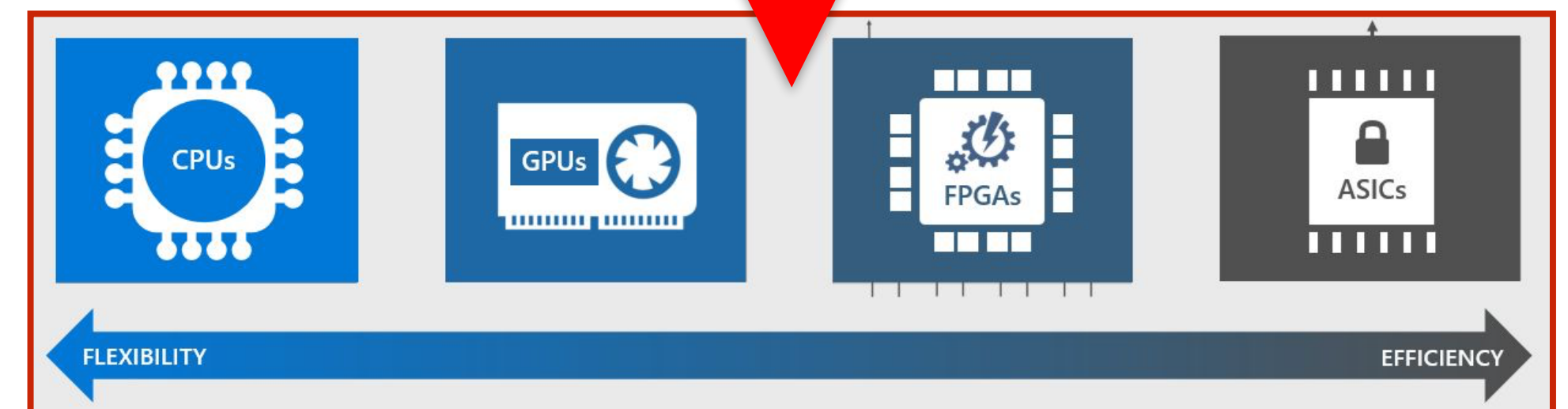
## Sviluppo e test di algoritmi di trigger su FPGA per HL-LHC

- Progetti di lavoro:
  - **Trigger** di level-1 dedicati per topologie con  $H \rightarrow \tau\tau$ 
    - Sviluppo di mass regression per  $H(\tau\tau)$
    - Identificazione di  $\tau$  adronici con CNN
  - Ricerca del decadimento raro  $W^\pm \rightarrow 3\pi$   $\rightarrow$  analisi fatta online



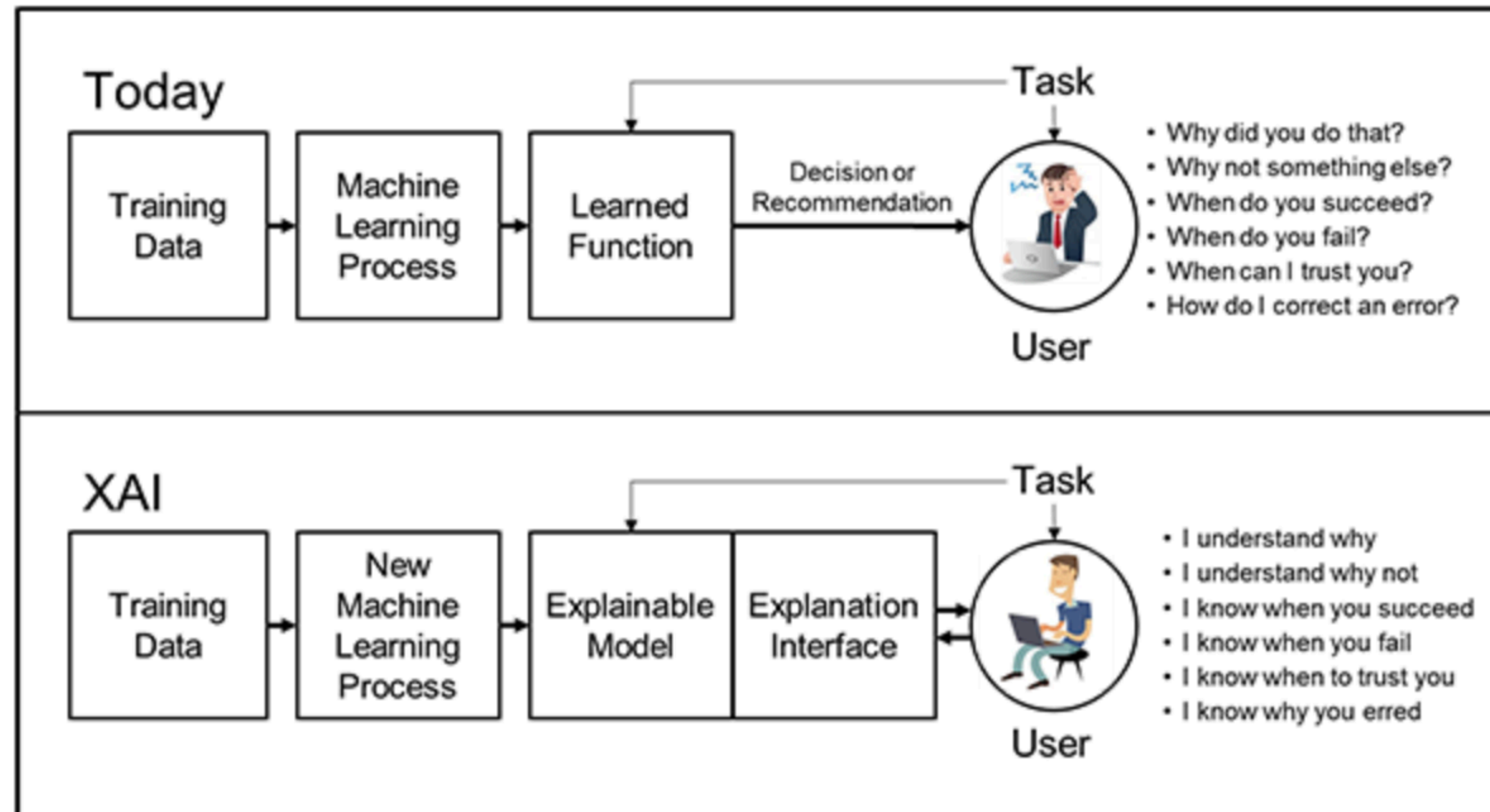
## Simulazione ultra-veloce per fisica delle alte energie

- **ML** può essere utilizzato per generare eventi simulati  $\rightarrow$  Generative Adversarial Networks (**GANs**)
- Avere a disposizione un grande quantità di eventi simulati è cruciale per la fisica di HL-LHC
- **FPGA** sono device **costosi** ma **molto veloci**
- **Possono essere usate per ultra-fast simulation di eventi**





- Sinergia tra **diagnostica medica** e **HEP** per sviluppare **modelli AI** 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 ...



Contatti: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it) [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it)

# Proposte di tesi legate al post-LHC

---

# A maximum information crystal calorimeter for future e+e- colliders

## Cosa ci sarà dopo LHC?

- **Obiettivo-1:** aprire una nuova frontiera sulle misure di precisione dello SM
- **Obiettivo-2:** raggiungere energie più alte di quelle di LHC

## Opzioni possibili

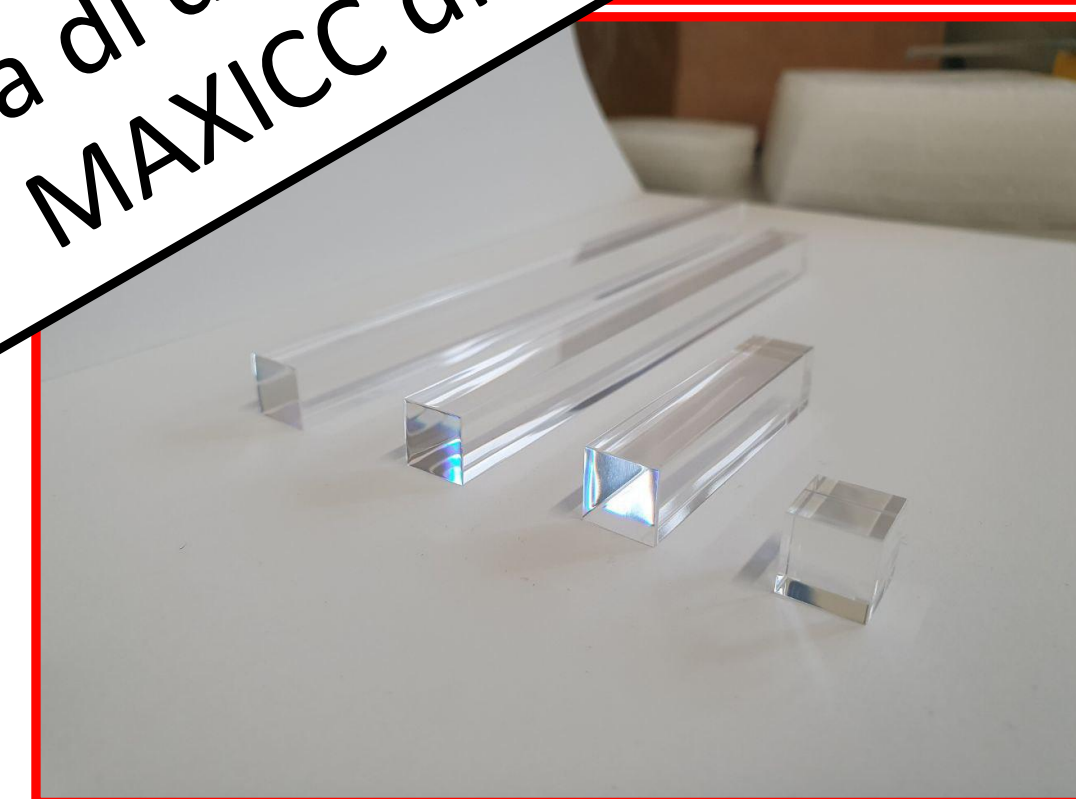
- Collider  $e^+e^-$  con  $E_{CM} \sim 250$  GeV e  $L = 100$  km
- Collider  $pp$  con  $E_{CM} \leq 100$  TeV e  $L = 100$  km

## Milano Bicocca → Maximum information crystal calorimetry for FCCee (MAXICC)

- La costruzione di un **collisore  $e^+e^-$**  per misure di precisione del bosone di Higgs sarà il **progetto prioritario (ESPPU 2020)**
- Milano Bicocca è leader nello **sviluppo** di un **calorimetro ad alta precisione 6D** (posizione, energia, tempo, tipo di shower adronica) per ampliare il potenziale di fisica dei futuri esperimenti
- **Opportunità di tesi** per contribuire allo sviluppo di cristalli e fotomoltiplicatori al silicio (SiPM) attraverso:
  - Misure in laboratorio
  - Caratterizzazione su fascio (test beam) al CERN, DESY, Fermilab
  - Simulazioni dedicate



Borsa di dottorato a tema su  
MAXICC disponibile!



Contatti: [marco.lucchini@unimib.it](mailto:marco.lucchini@unimib.it) [andrea.benaglia@mib.infn.it](mailto:andrea.benaglia@mib.infn.it)

# Perchè fare una tesi in CMS / Future Collider ?

- Una tesi in CMS permette di sviluppare “**competenze strategiche e specifiche**”

- Conoscenza e uso di **avanzati sistemi di misura**
- **Approfondire conoscenza** in fisica delle interazioni fondamentali
- **Manipolazione di “Big Data”** e loro **interpretazione** statistica
- **Simulazione e modellizzazione** dei fenomeni
- Applicazioni di **machine learning** per risolvere problemi
- Possibilità di lavoro in una grande **collaborazione internazionale**

- **Proposte** del gruppo **CMS** di **Bicocca** sono all’**avanguardia** in CMS
- **Referenti** di Bicocca ricoprono ruoli di **leadership** nei rispettivi **progetti**

**Se vi interessa qualche progetto scriveteci così da potervi dare più informazioni!**

<https://www.fisica.unimib.it/it/ricerca/fisica-delle-particelle-e-delle-astroparticelle>

## Dottorato di ricerca in fisica

- Milano Bicocca
- Ecole Polytechnique de Paris (LLR)
- ETH di Zurigo
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- University of Bristol
- Austrian institute of technology
- Université de Lion
- Doctoral student program (CERN)
- University of Lisbon
- University of Santander

## Post-doctoral researcher

- Milano Bicocca
- Ecole Polytechnique de Paris (LLR)
- California San Diego (UCSD)
- MIT
- Fermi National Laboratory (FNAL)
- CERN fellowship
- IHEP of Chinese Academy of Science
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- Northwestern University of Boston
- Princeton

## Settore privato

- Consulenza finanziaria
- IT e AI startups
- Banche di investimento
- Società di trasporti e logistica
- Elettronica e telecomunicazioni
- Assicurazioni