

# Fisica agli Acceleratori in Bicocca

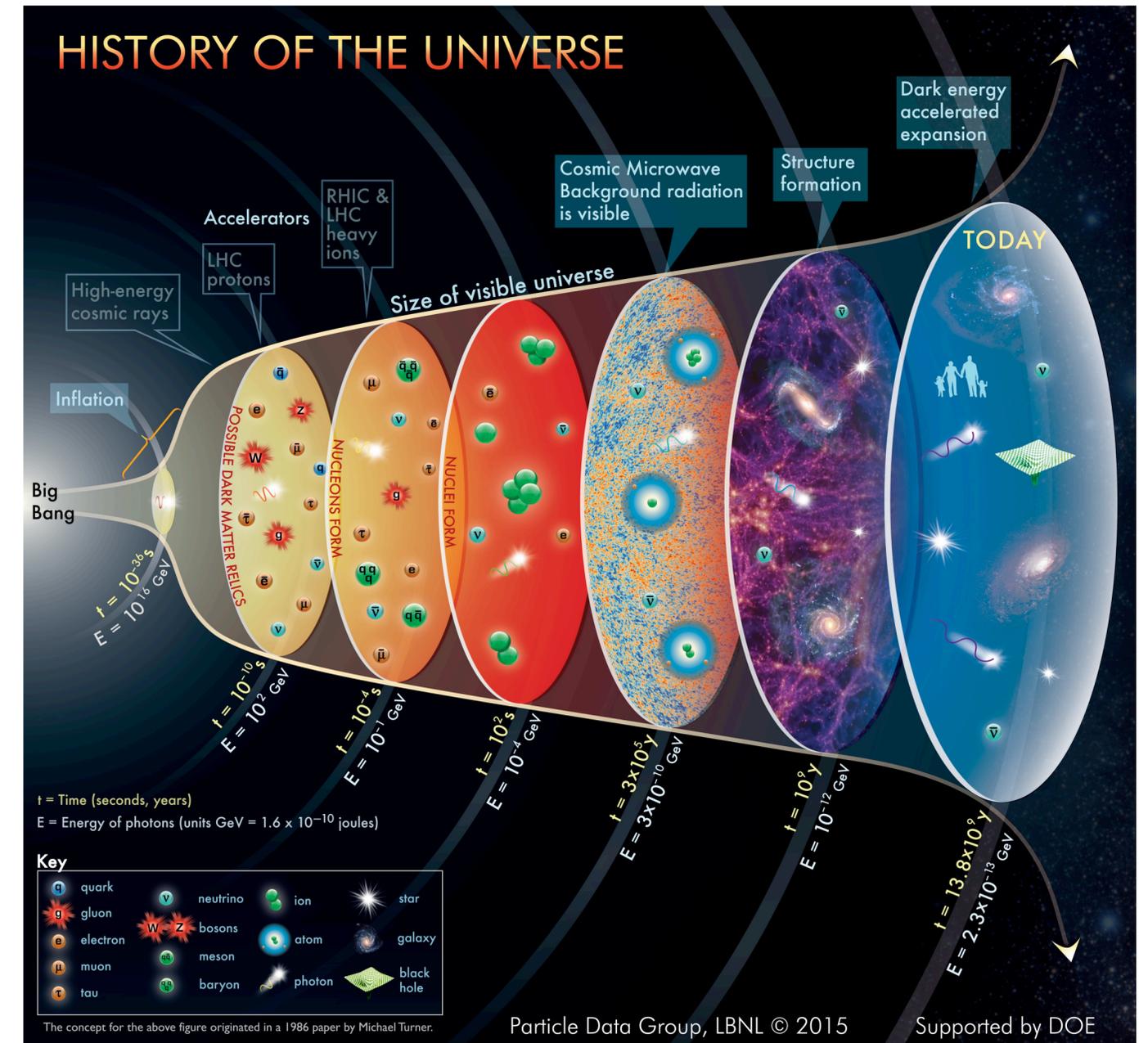
Maurizio Martinelli  
Università di Milano Bicocca e INFN

Università Bicocca  
24.03.2021

# Perché Studiare Fisica delle Particelle?

## Rispondere a queste domande

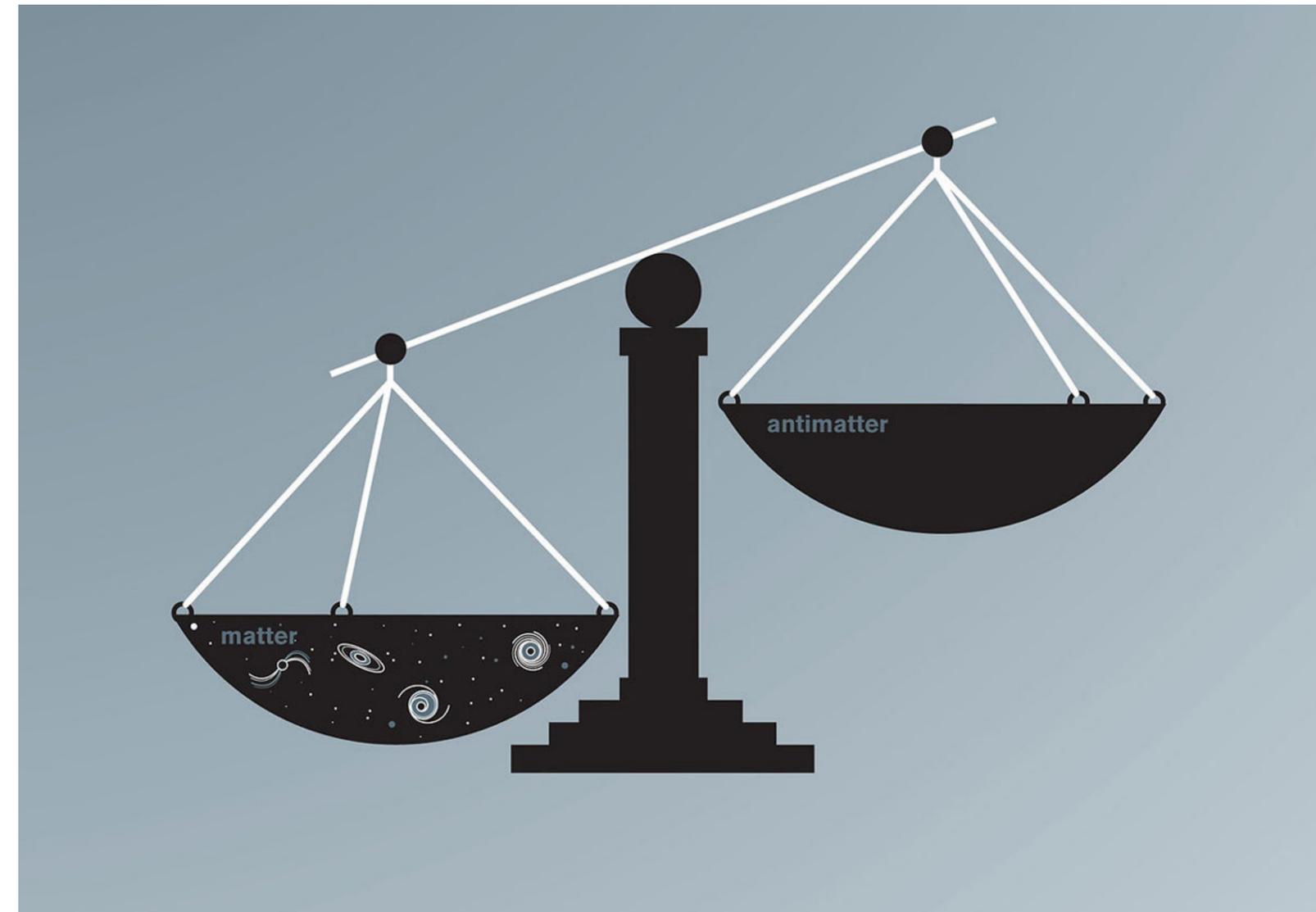
- Come è nato e come si è sviluppato l'Universo?



# Perché Studiare Fisica delle Particelle?

## Rispondere a queste domande

- Come è nato e come si è sviluppato l'Universo?
- Perché il rapporto materia / antimateria è circa  $10^{10}$ ?

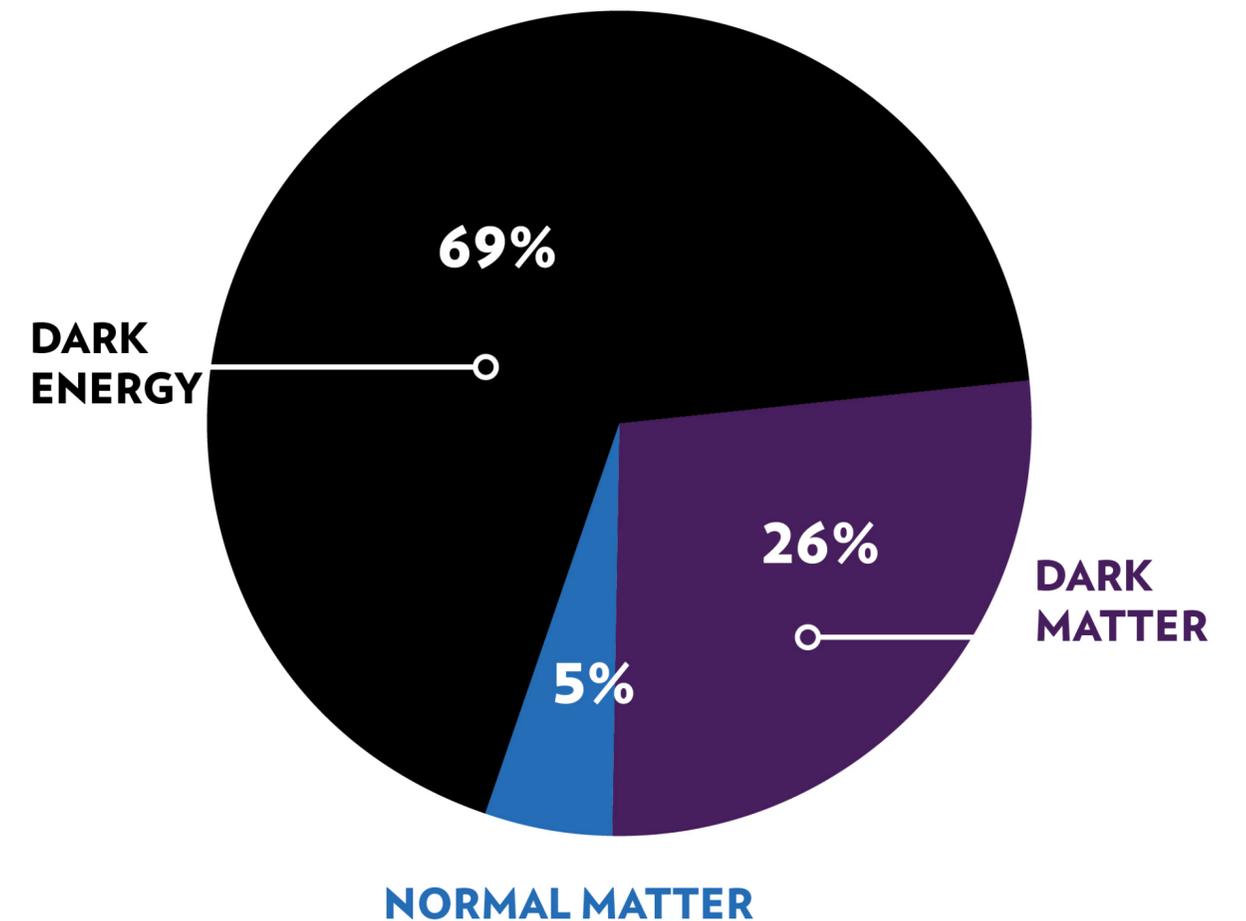


# Perché Studiare Fisica delle Particelle?

## Rispondere a queste domande

- Come è nato e come si è sviluppato l'Universo?
- Perché il rapporto materia / antimateria è circa  $10^{10}$ ?
- Cos'è la materia oscura?

ENERGY DISTRIBUTION  
OF THE UNIVERSE



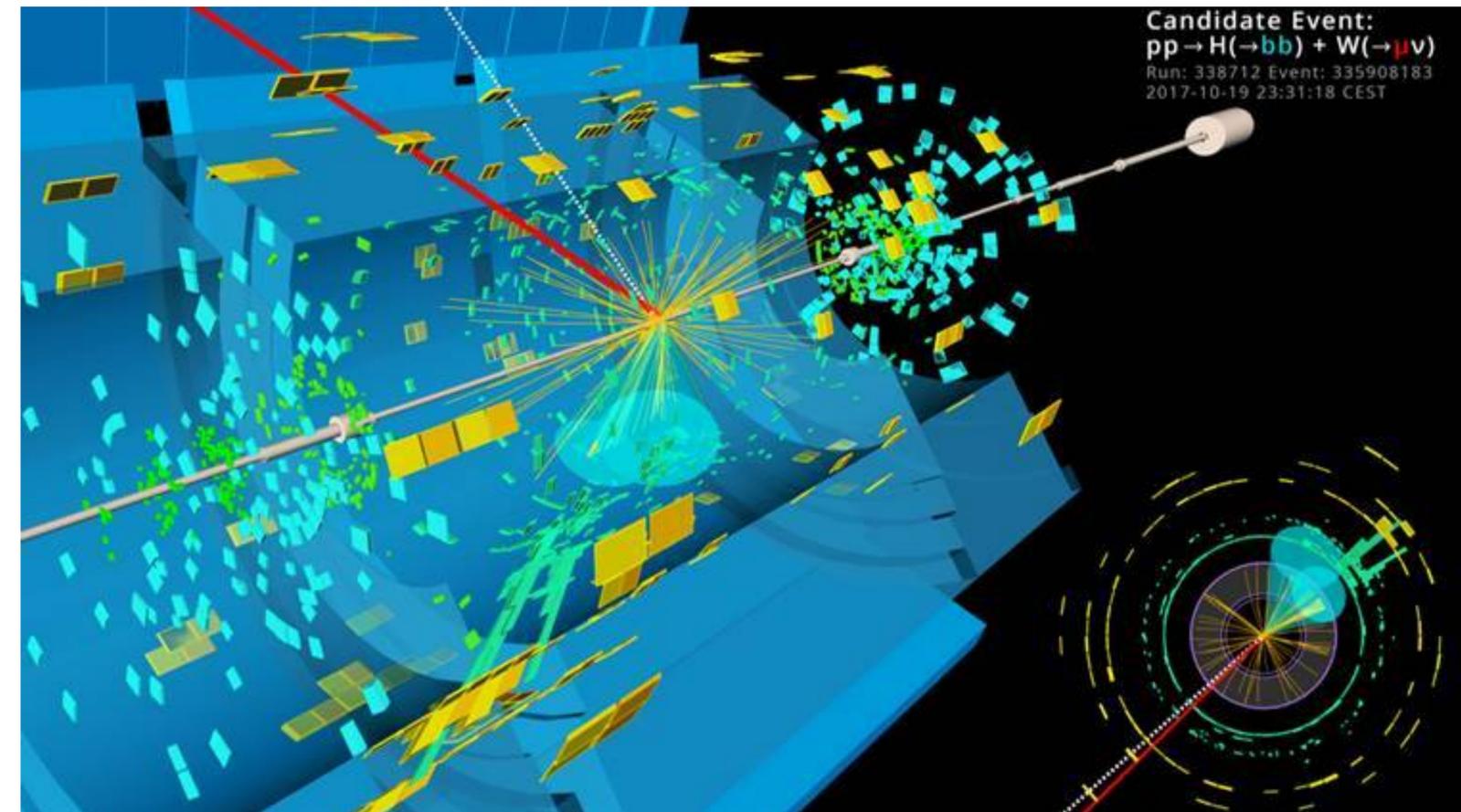
# Perché Studiare Fisica delle Particelle?

## Rispondere a queste domande

- Come è nato e come si è sviluppato l'Universo?
- Perché il rapporto materia / antimateria è circa  $10^{10}$ ?
- Cos'è la materia oscura?

## Sviluppare Tecnologie Innovative

- Per raccogliere i dati



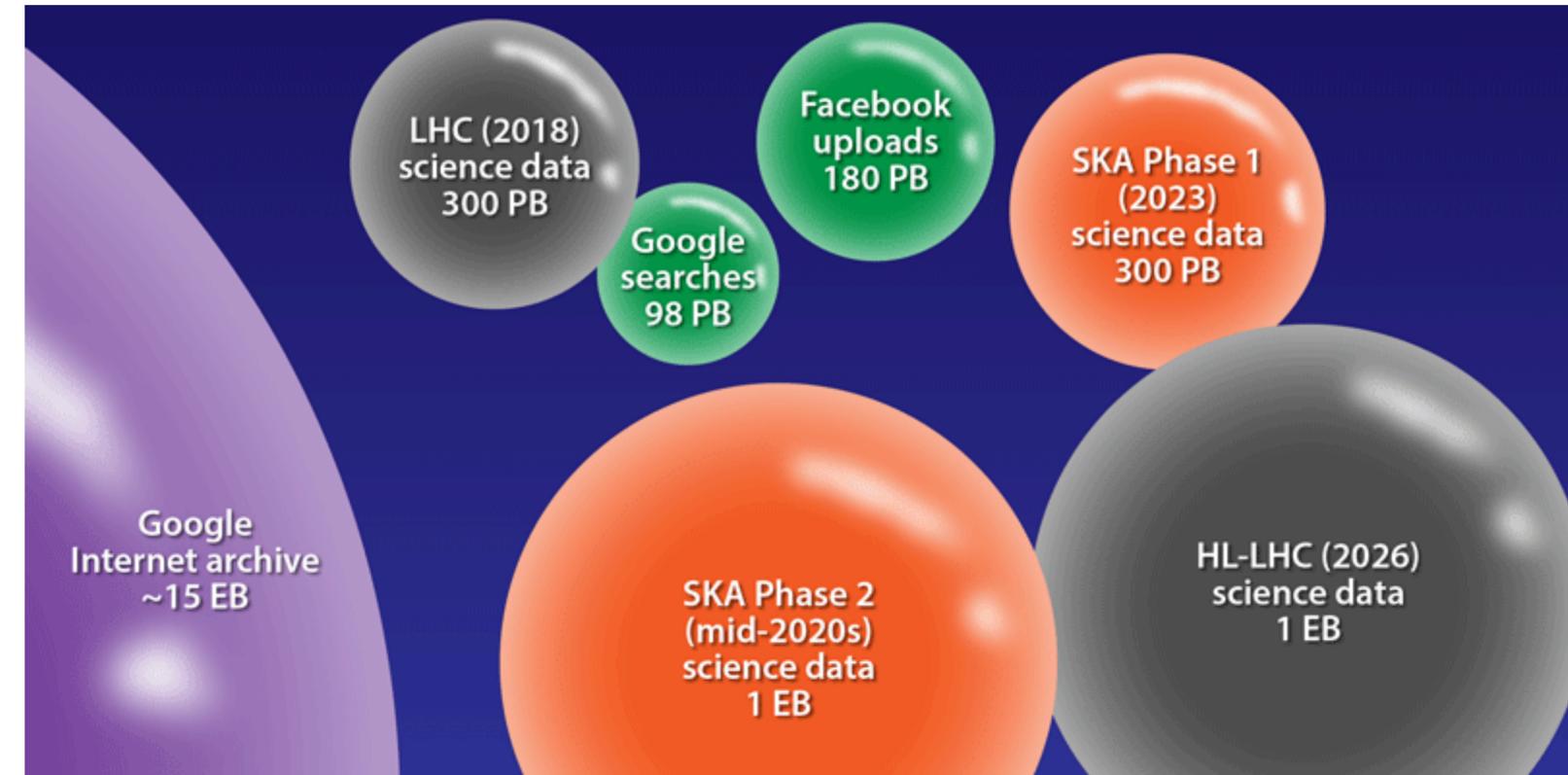
# Perché Studiare Fisica delle Particelle?

## Rispondere a queste domande

- Come è nato e come si è sviluppato l'Universo?
- Perché il rapporto materia / antimateria è circa  $10^{10}$ ?
- Cos'è la materia oscura?

## Sviluppare Tecnologie Innovative

- Per raccogliere i dati
- Per analizzare i dati (big data)



# Cosa si Impara da una tesi in Particelle?

...oltre ad approfondirne l'argomento

## Programmazione

C++  
Python  
GPU

## Metodo

Integrazione in una  
grande collaborazione  
internazionale

## Tecniche di Analisi

Big Data  
Machine Learning  
Calcolo parallelo

## Tecnologia

Sviluppo di sensori  
d'avanguardia

# LHC@CERN

pp 13 TeV  
(anche pPb e PbPb)

40 MHz  
collisioni

~1200 magneti  
superconduttori

4 esperimenti  
principali

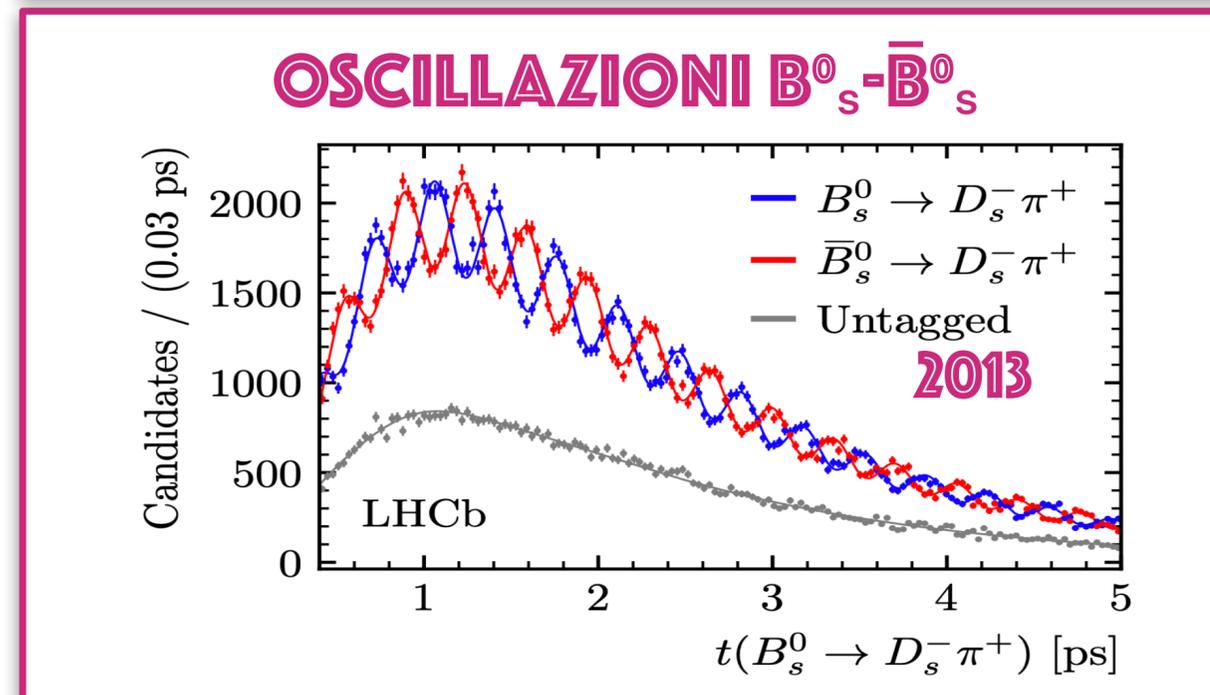
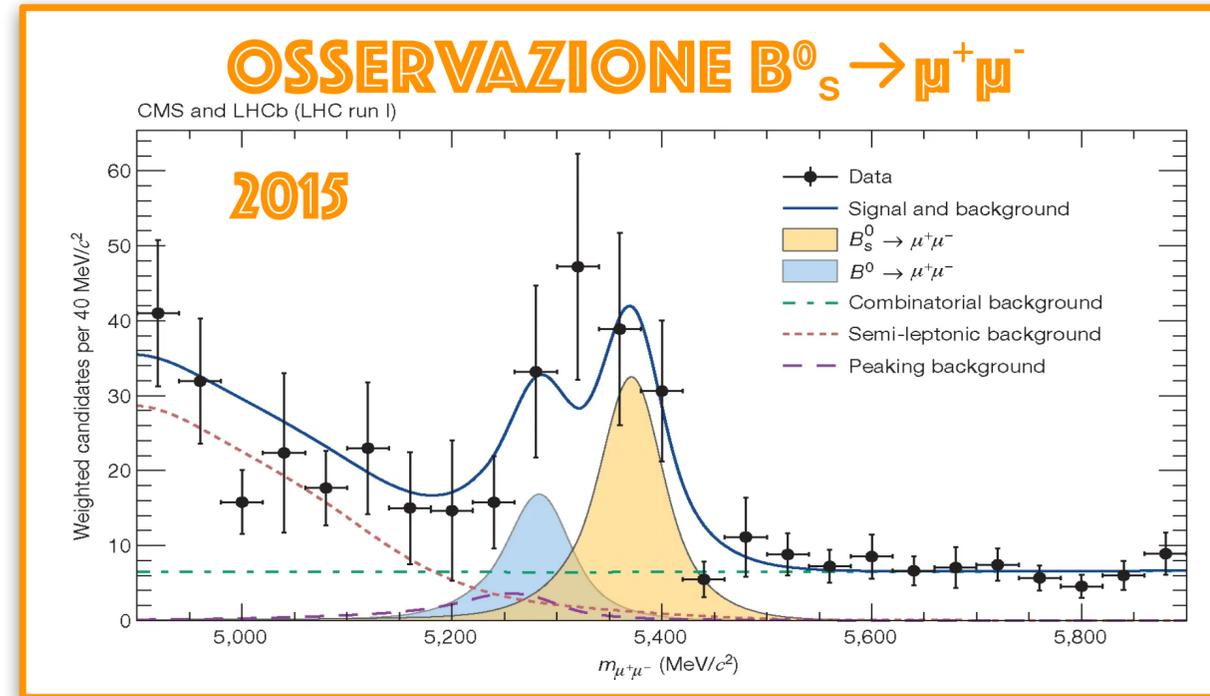
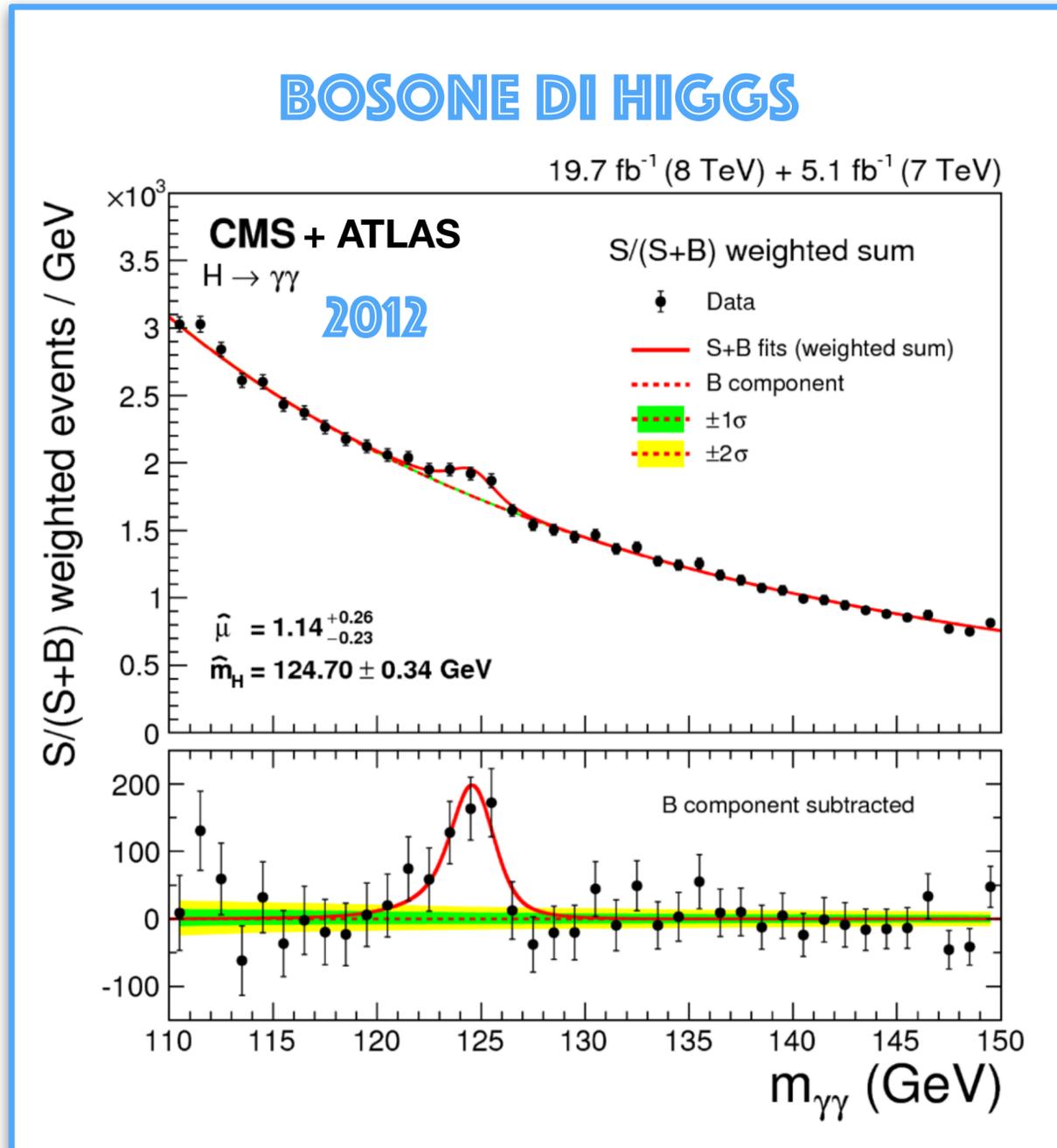


27km  
circonferenza

100m  
sottoterra

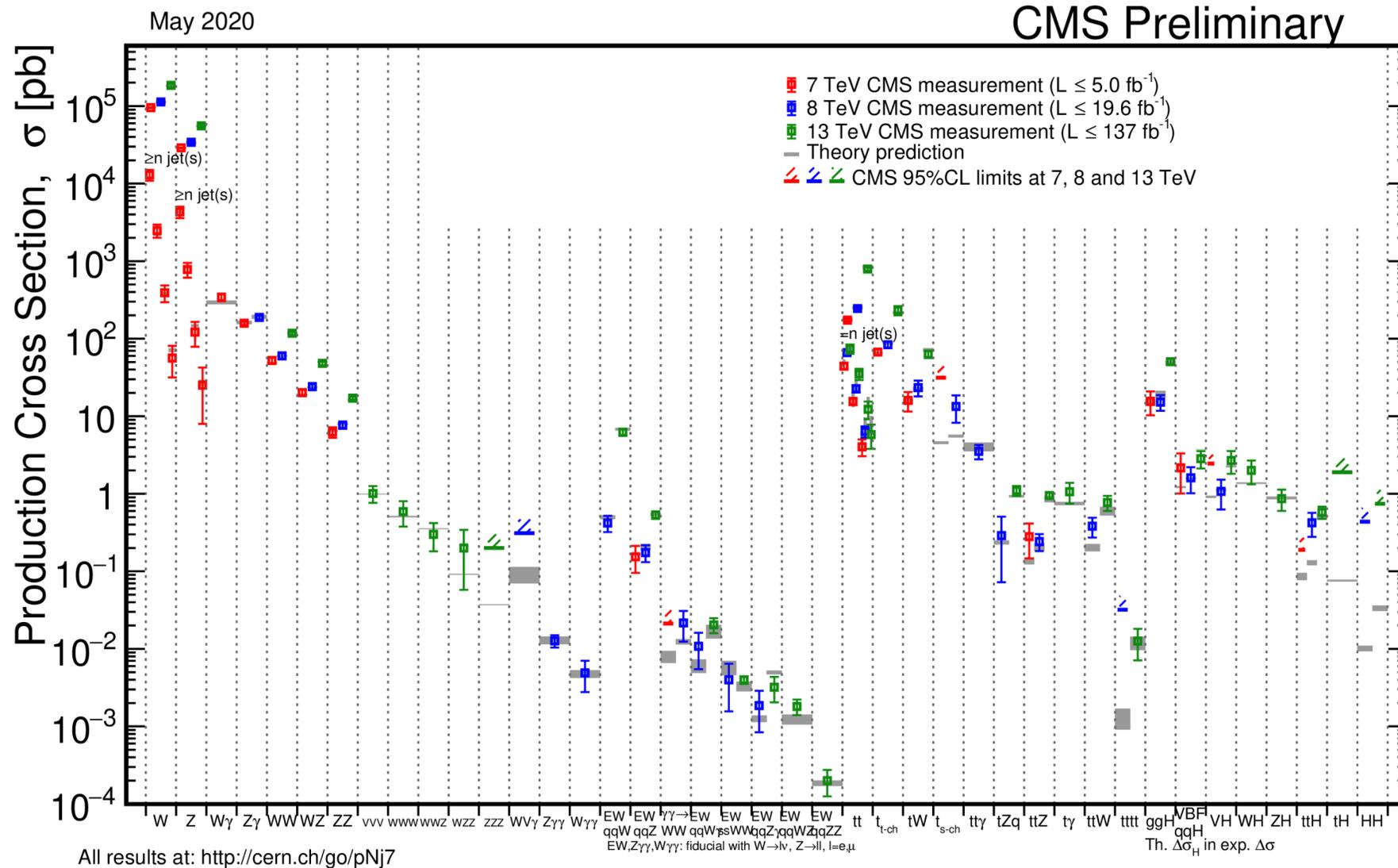
Punto più freddo  
dell'Universo  
(1.9K)

# Alcuni Risultati di LHC

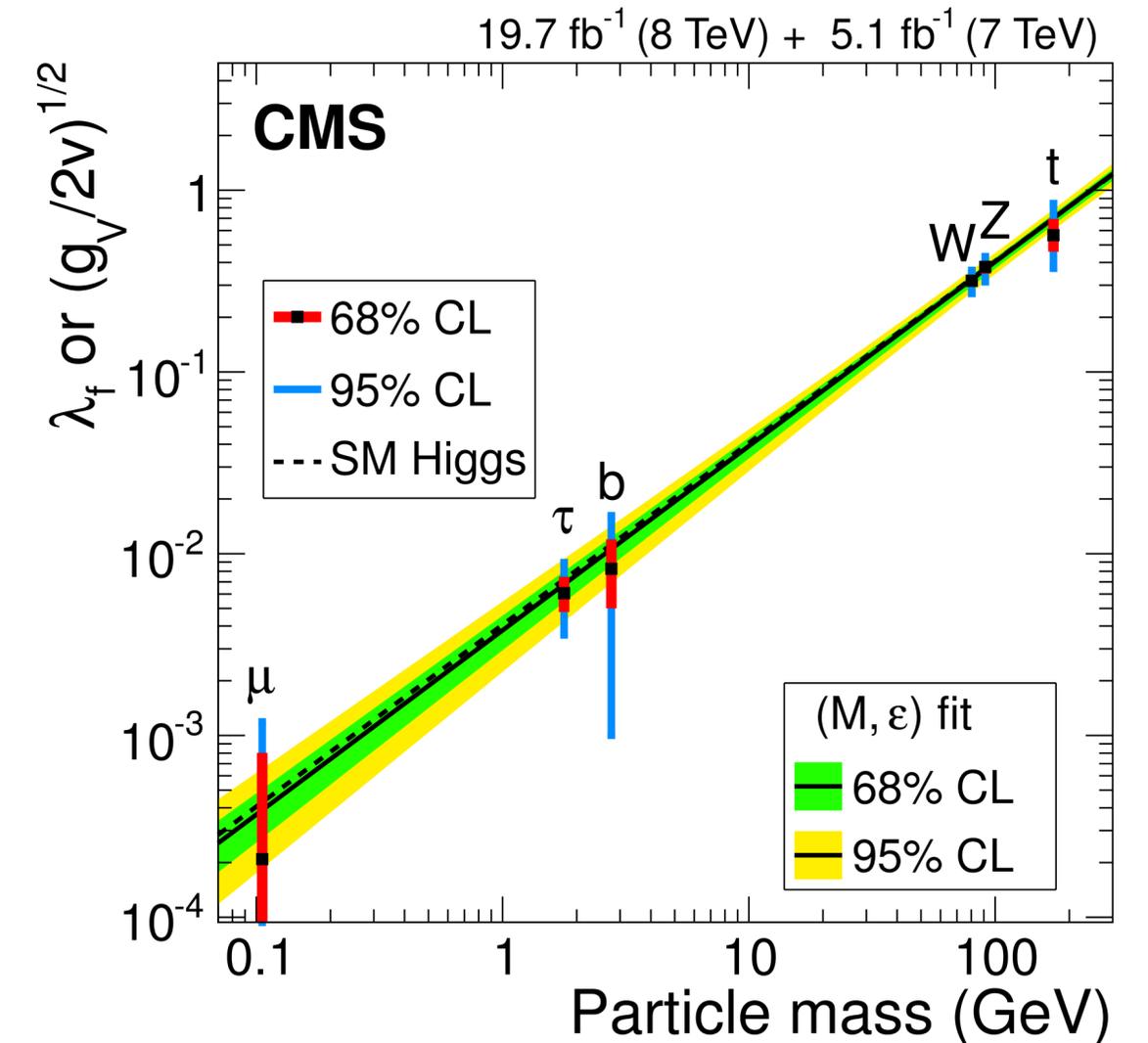


# Alcuni Risultati di LHC - Rassicuranti Conferme

## VERIFICHE MODELLO STANDARD

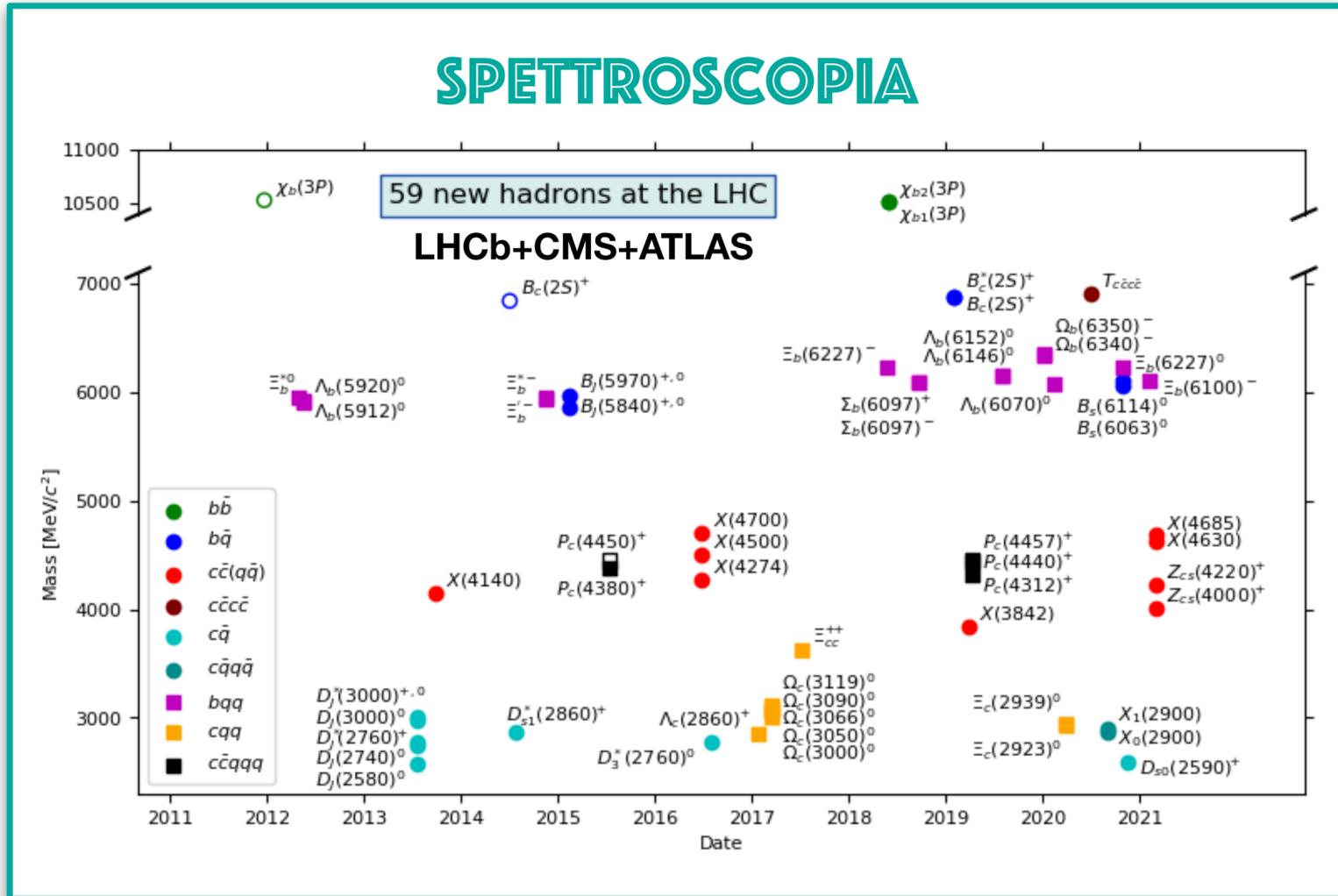


## ACCOPPIAMENTI HIGGS



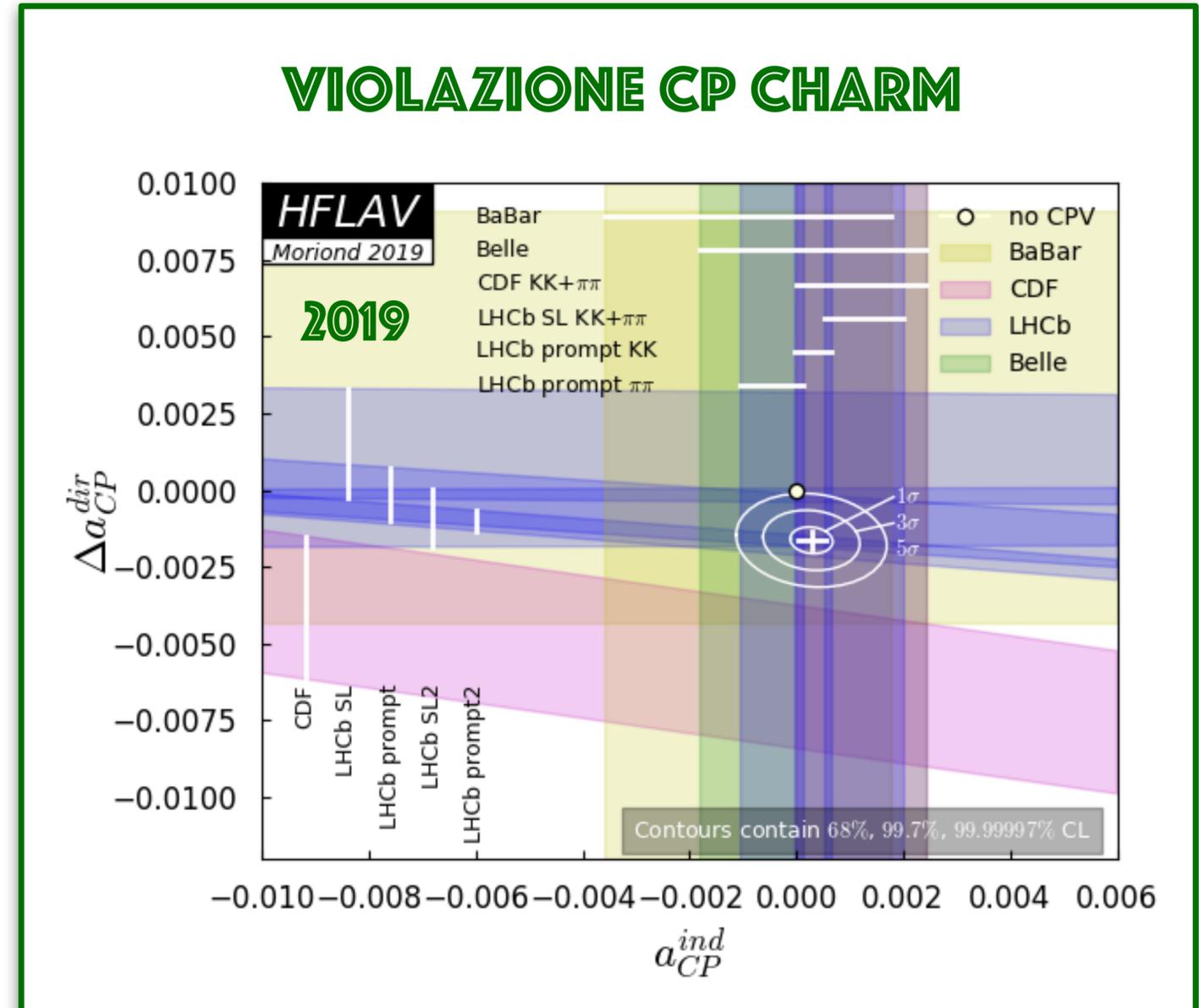
# Alcuni Risultati di LHC - Piacevoli Sorprese

## SPETTROSCOPIA



Seminario M. Pappagallo - 7.4.2021

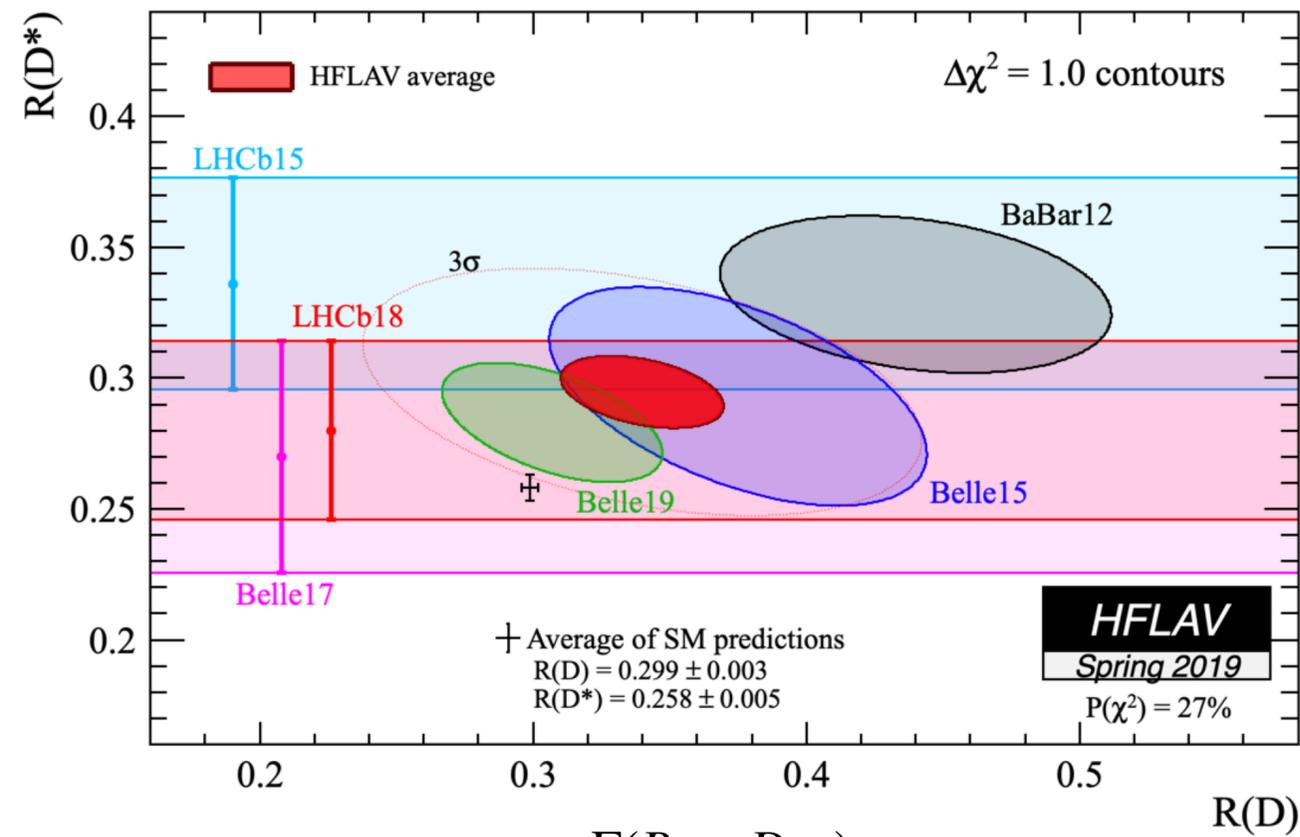
## VIOLAZIONE CP CHARM



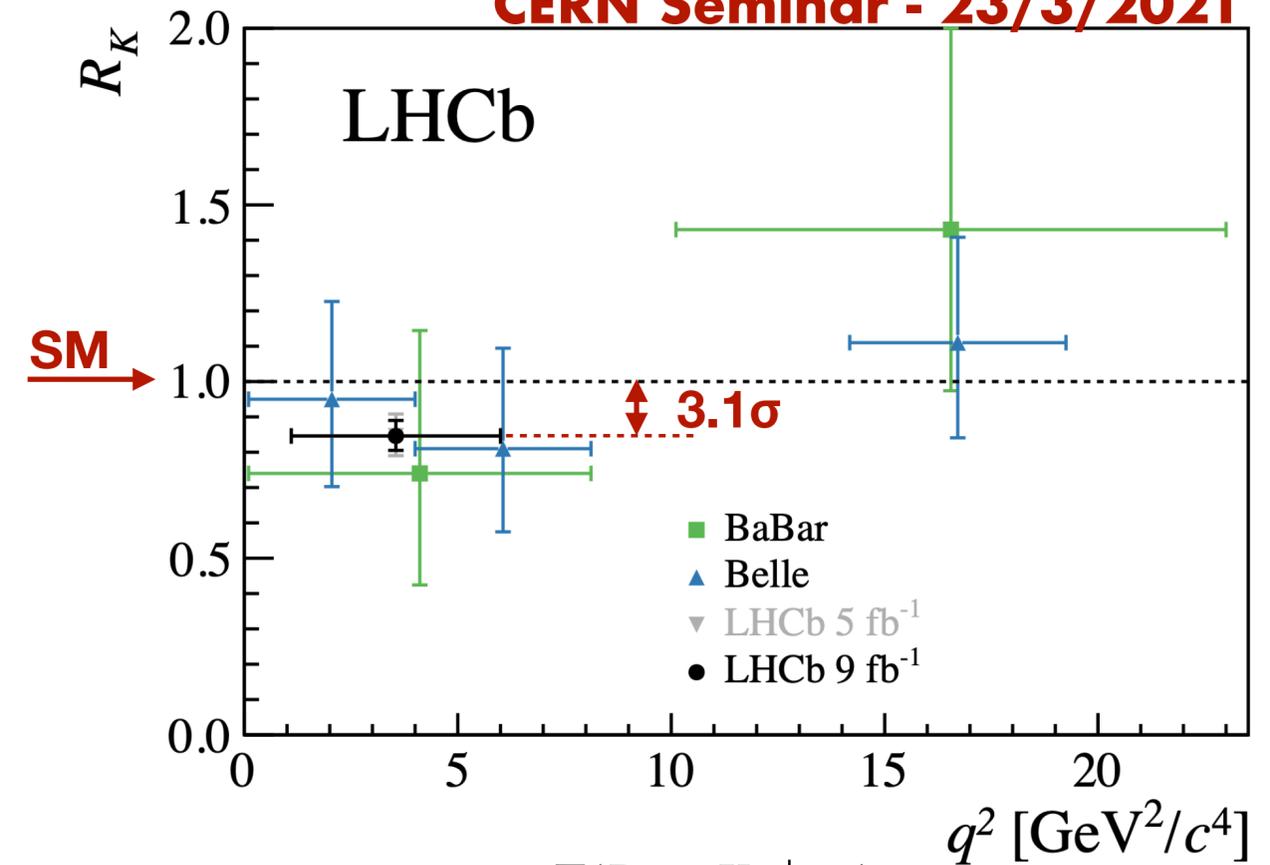
# Alcuni Risultati di LHC - Grandi Sorprese

## NON CONSERVAZIONE UNIVERSALITÀ LEPTONICA

CERN Seminar - 23/3/2021



$$R_D = \frac{\Gamma(B \rightarrow D\tau\nu)}{\Gamma(B \rightarrow D\mu\nu)}$$



$$R_K = \frac{\Gamma(B \rightarrow K\mu^+\mu^-)}{\Gamma(B \rightarrow Ke^+e^-)}$$

# Priorità della Fisica delle Particelle nei Prossimi Anni

## European Strategy for Particle Physics 2020

- Studio dell'Higgs
- Studio delle Interazioni Forti (QCD)
- CP nelle interazioni forti (ricerca Assione)
- Fisica del Flavour
- Fisica del Neutrino
- Materia Oscura
- Ricerca di particelle a lunga vita media
- Cosmo
- Gravità

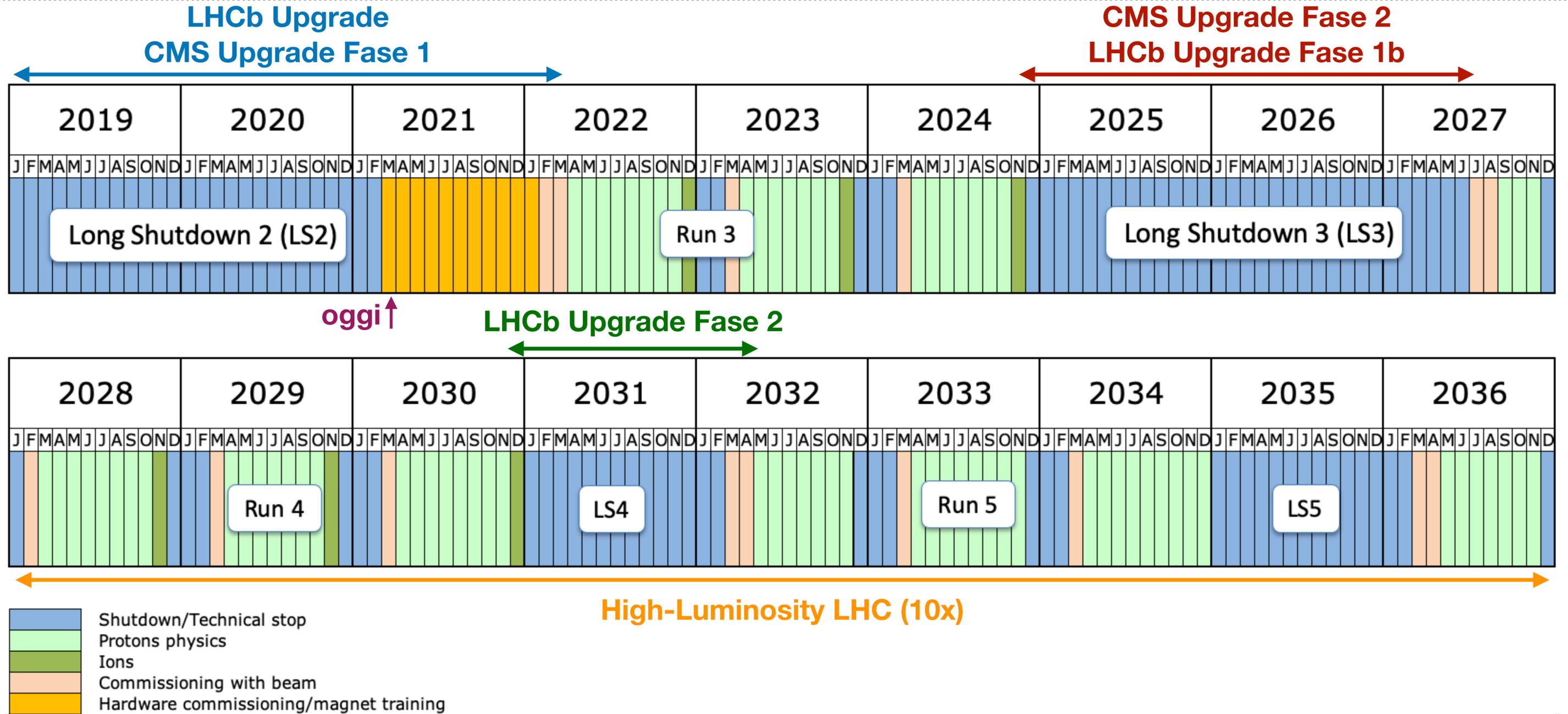
# Priorità della Fisica delle Particelle nei Prossimi Anni

## European Strategy for Particle Physics 2020

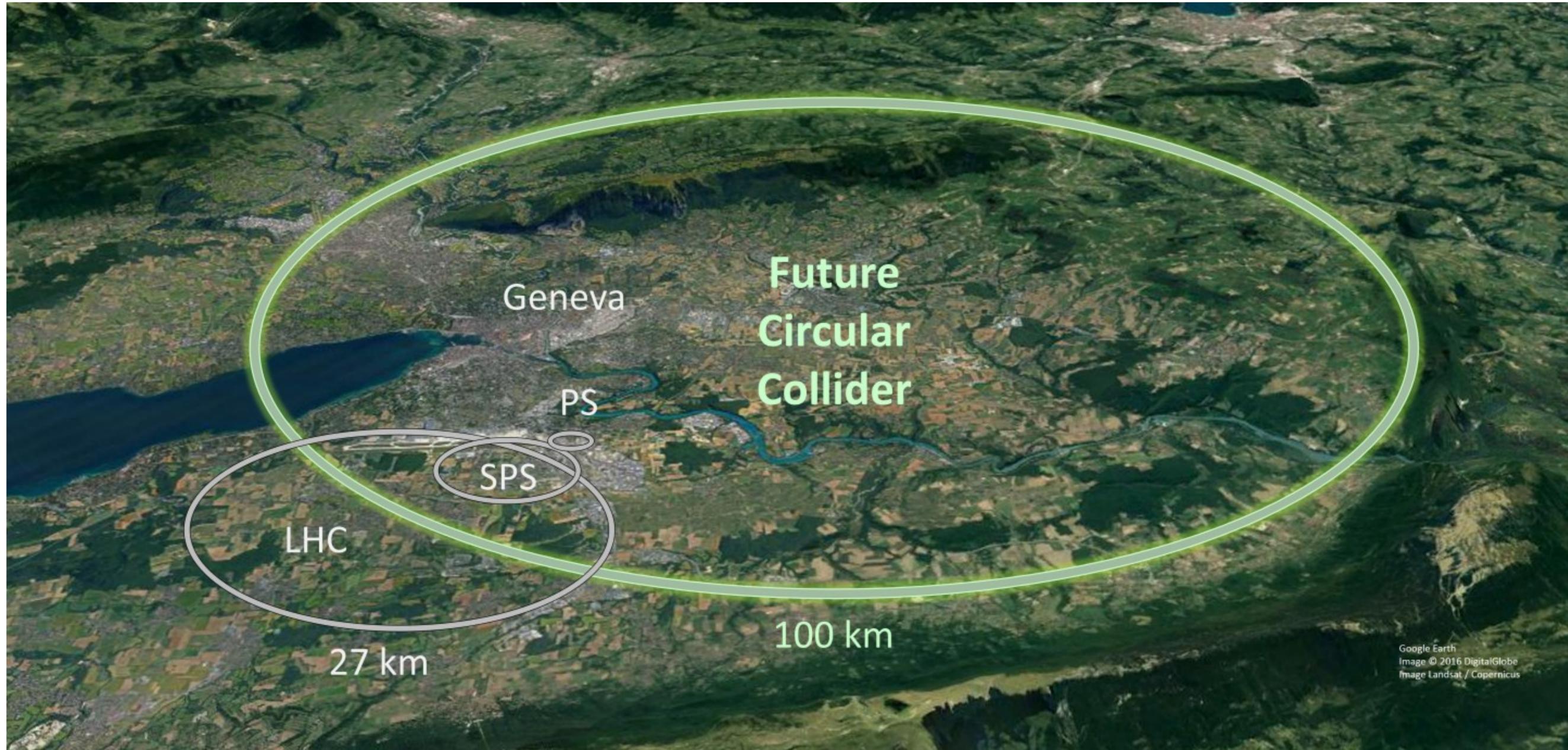
- Studio dell'Higgs
- Studio delle Interazioni Forti (QCD)
- CP nelle interazioni forti (ricerca Assione)
- Fisica del Flavour
- Fisica del Neutrino
- Materia Oscura
- Ricerca di particelle a lunga vita media
- Cosmo
- Gravità

Alte Energie fondamentali per dare risposta a gran parte di queste domande

# Futuro di LHC



# Futuro del CERN (2035-...)



# Attività in Bicocca



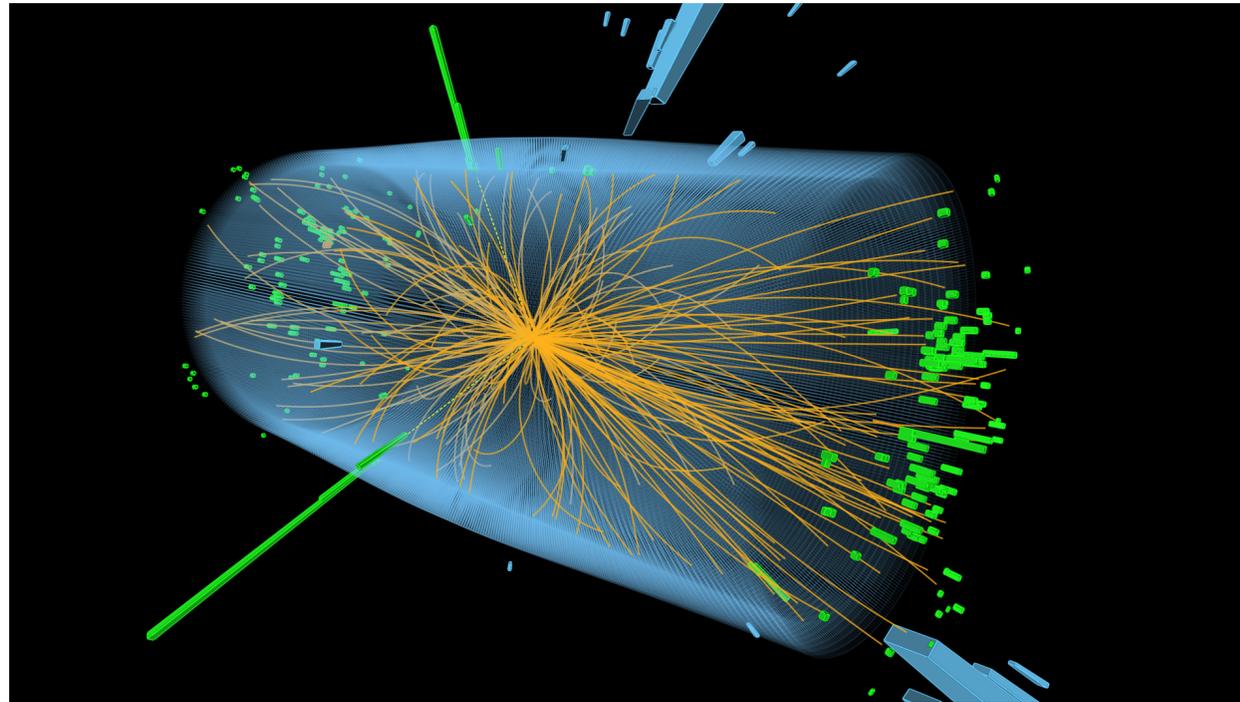
4000 ricercatori  
200 istituti e università  
40 nazioni



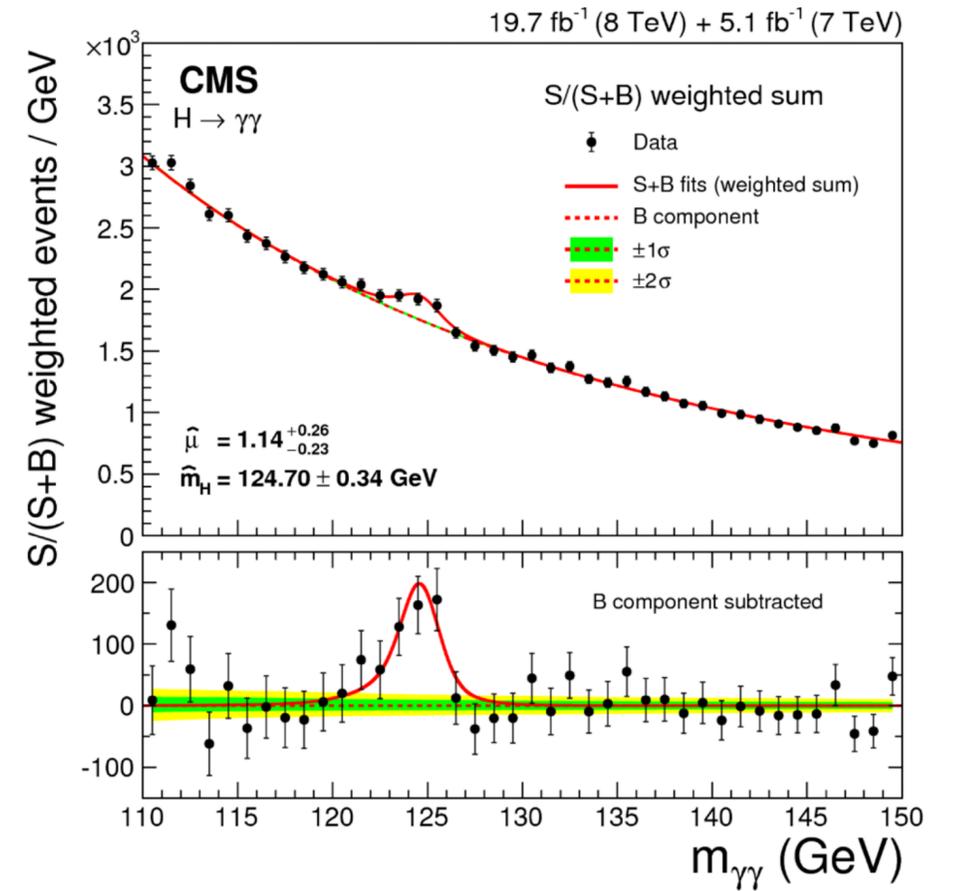
1400 ricercatori  
86 istituti e università  
18 nazioni

# Ambiti

Analisi dei Dati



1. Trigger
2. Selezione Offline
3. Misura
4. Calcolo Sistemati



Sviluppo Rivelatori

Obiettivi

Scelta  
Tecnologia

Disegno

Prototipo

Installazione

# LHCb in Bicocca

## Analisi Dati

Decadimenti Rari  
 $\tau^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+$

Test Universalità  
Leptonica  
 $R_D = \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow D^- \tau^+ \nu)}{\Gamma(B^0 \rightarrow D^- \mu^+ \nu)}$

Fisica del Charm  
CPV+Mixing  
 $D^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$   
 $D^0 \rightarrow h^+ h^- \pi^+ \pi^-$

## R&D

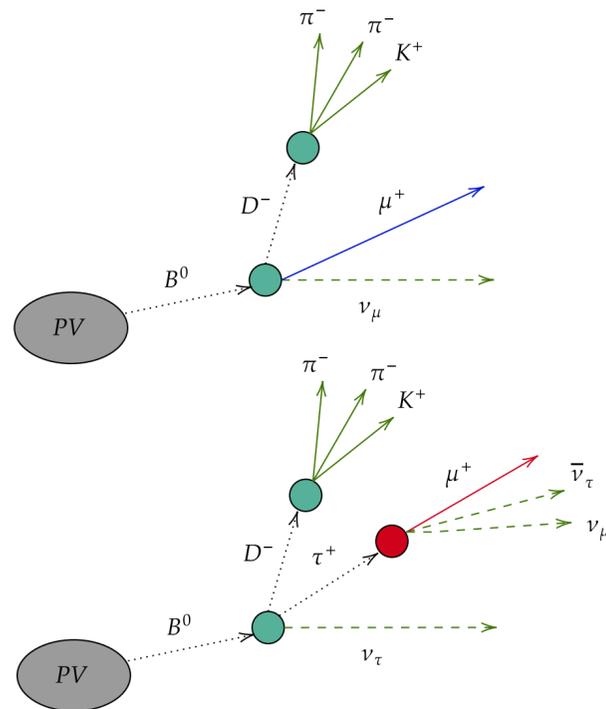
Elettronica  
Fotomoltiplicatori

Tecniche ML per  
la ricostruzione  
degli eventi

# Possibilità di Tesi con Analisi Dati di LHCb

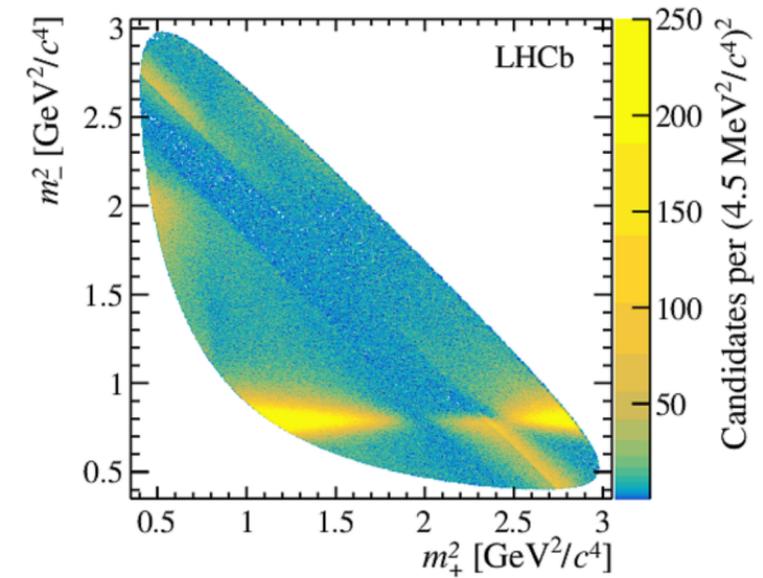
M. Calvi, M. Martinelli, D. Fazzini, J. Pardinias, S. Meloni, S. Capelli, E. Shields

## UNIVERSALITÀ LEPTONICA



**Analisi Distribuzioni Angolari**  
**Confronto Data/MC**  
**Machine Learning**

## CHARM

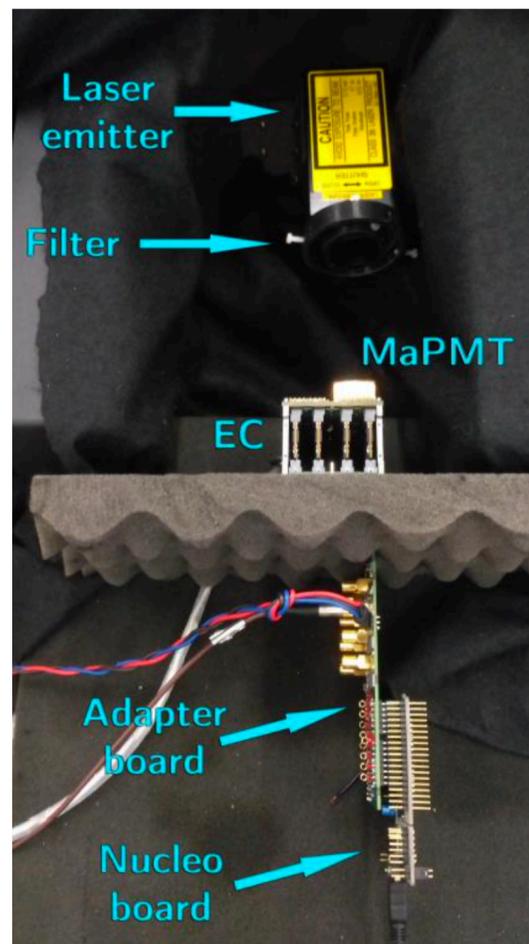


**CPV ( $\sim 10^{-4}$ )**  
**Analisi (Big) Data**

**Impatto diretto sulle analisi di LHCb**  
**Competenze sviluppate: Python/C++; ML**

# Possibilità di Tesi con R&D in LHCb

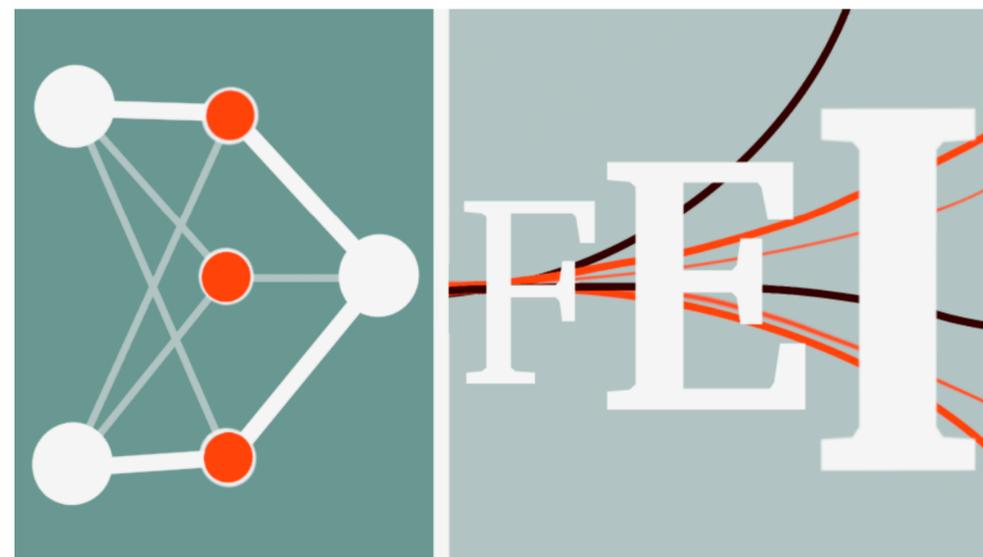
## FOTOMOLTIPLICATORI



**Caratterizzazione Rivelatore  
Preparazione Upgrade 1b (HL-LHC)  
Risoluzione temporale**

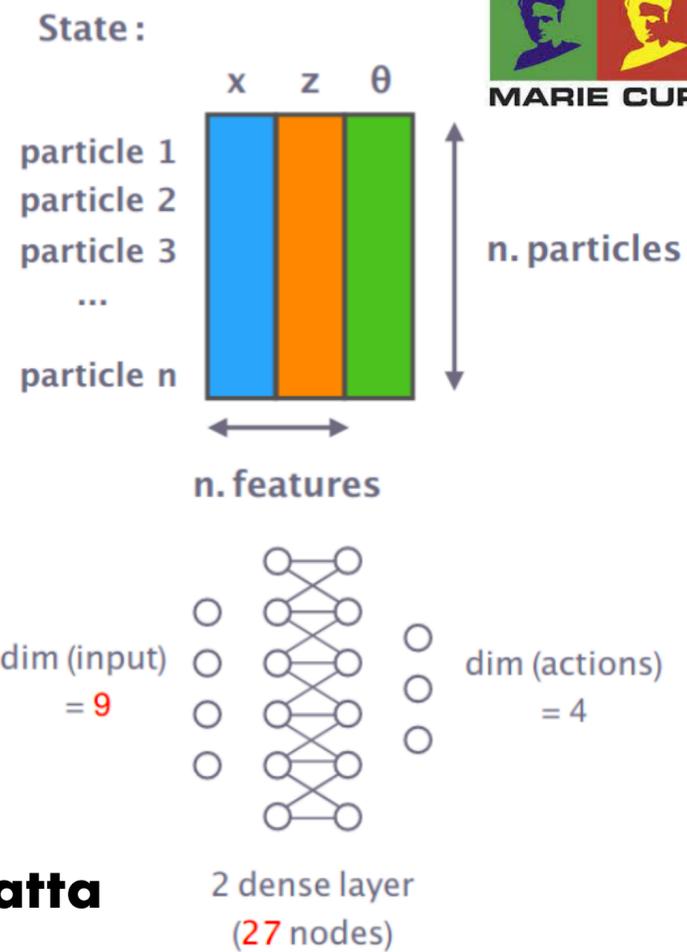
M. Calvi, G. Pessina, C. Gotti, P. Carniti, S. Capelli

## DEEP FULL EVENT INTERPRETATION

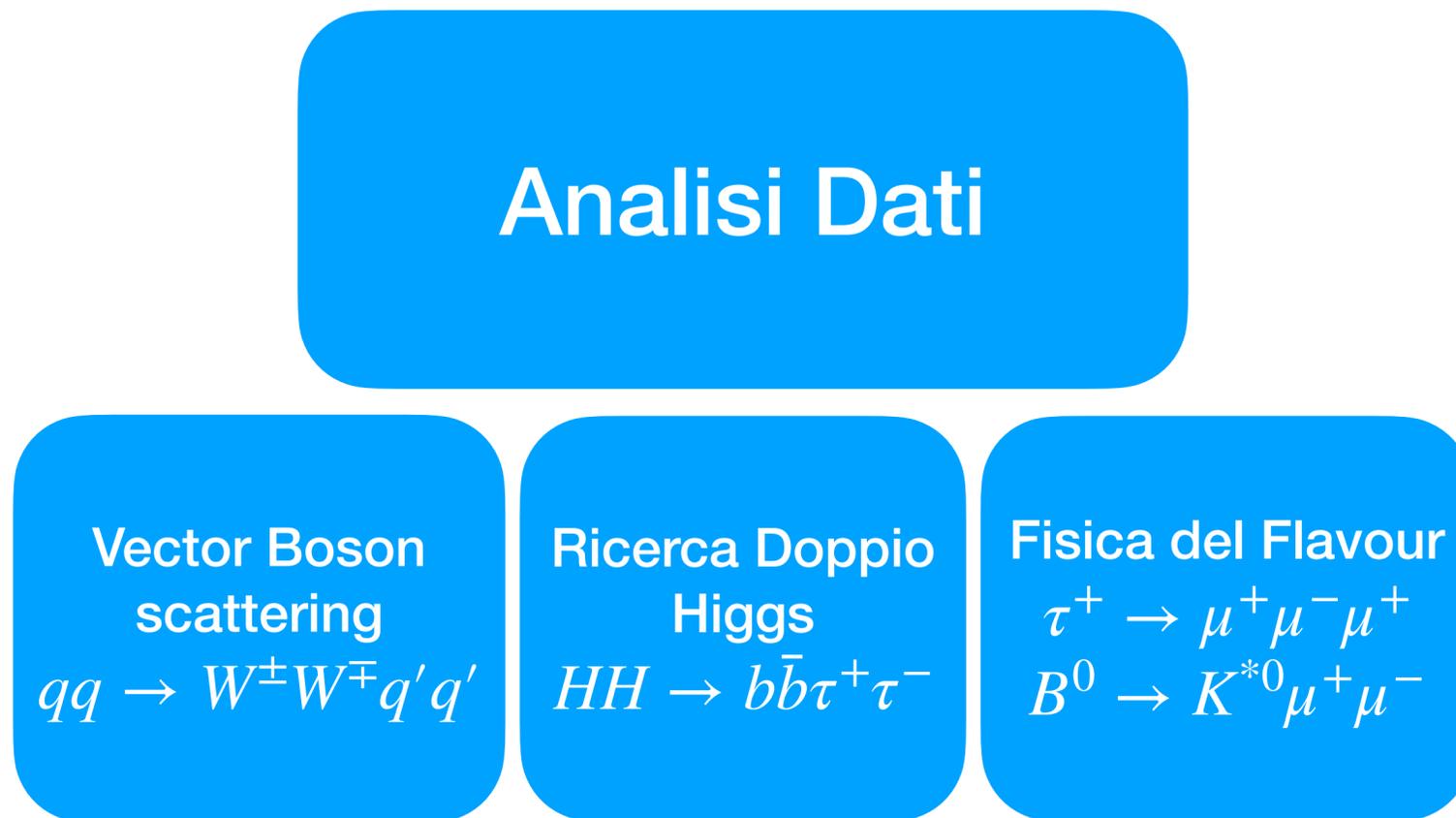


~~Signal-like Trigger~~ → **Full Event  
Deep Learning con Reinforcement**  
**Ricerca della struttura delle rete più adatta  
Preparazione Upgrade 1b-2**

M. Calvi, J. Pardinias, S. Meloni

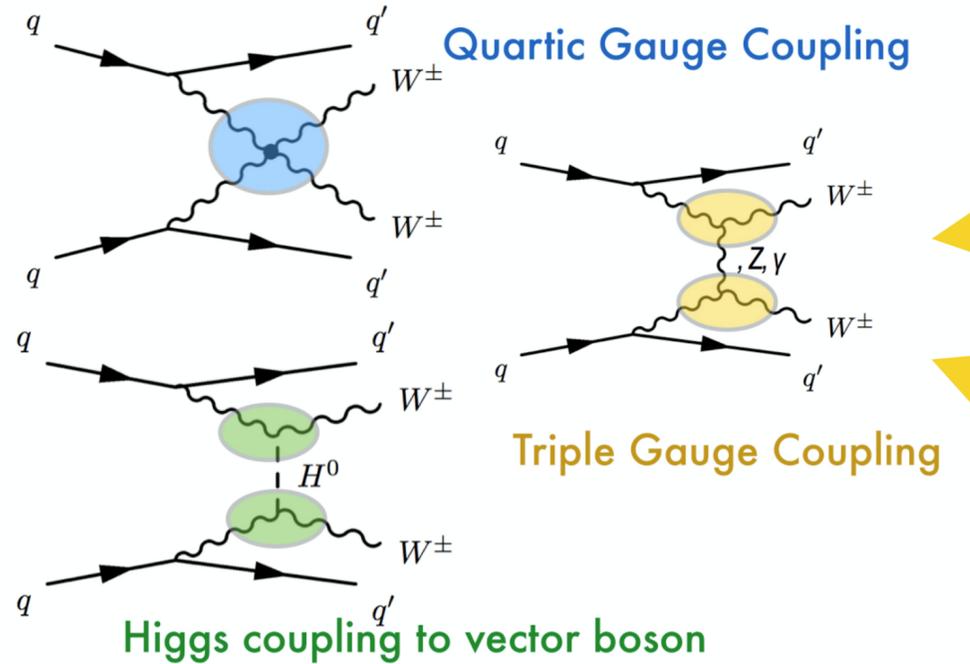


# CMS in Bicocca



# Possibilità di Tesi con Analisi Dati di CMS

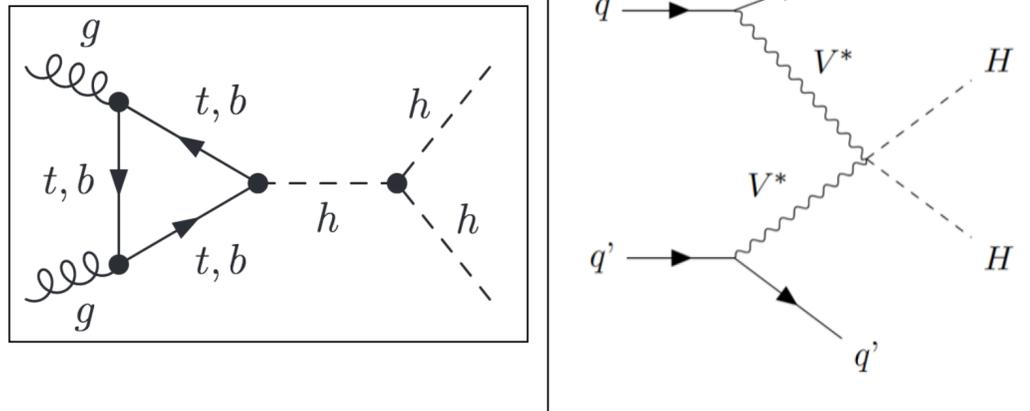
## VECTOR BOSON SCATTERING



**Processo Raro**  
**Sensibile a Nuova Fisica**  
**Machine Learning**

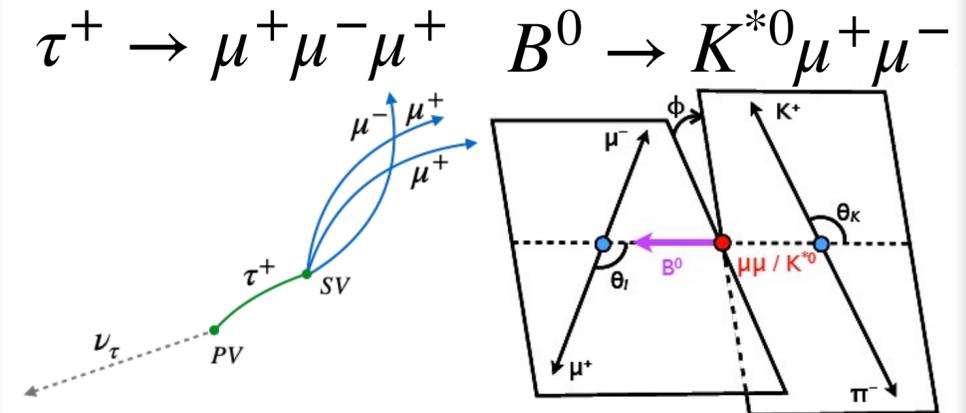
## PRODUZIONE DOPPIO HIGGS

$$HH \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$$



**Tassello Mancante SM**  
**Portale Accesso Nuova Fisica**  
**Deep Neural Network**  
**Simulazioni Monte Carlo**

## FLAVOUR



**Estrazione Segnale**

**Analisi Angolare**  
**GPU**

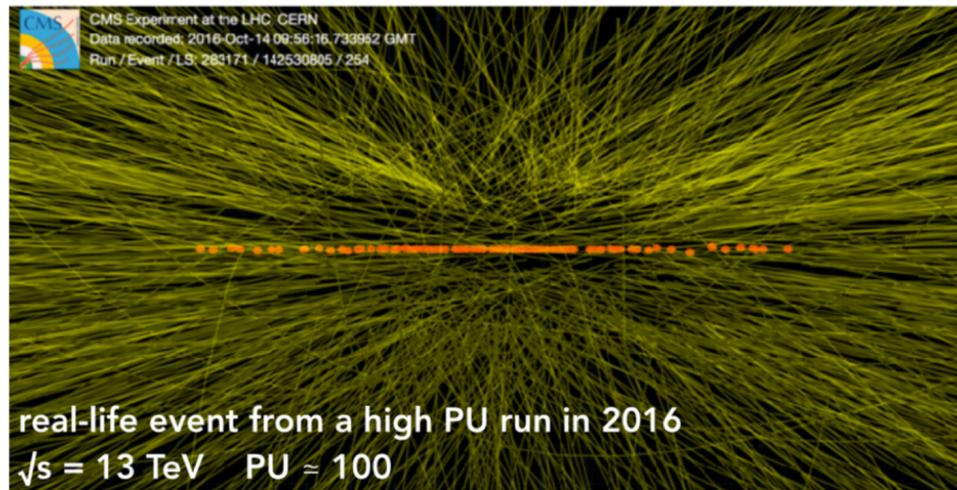
**Machine Learning**

<http://govoni.web.cern.ch/govoni/tesi/#>  
**P. Govoni, A. Massironi, M. Paganoni**

**M. Dinardo, P. Dini, S. Gennai, S. Malvezzi, D. Menasce, L. Moroni, D. Pedrini,**  
**F. Brivio, L. Guzzi, D. Zuolo**

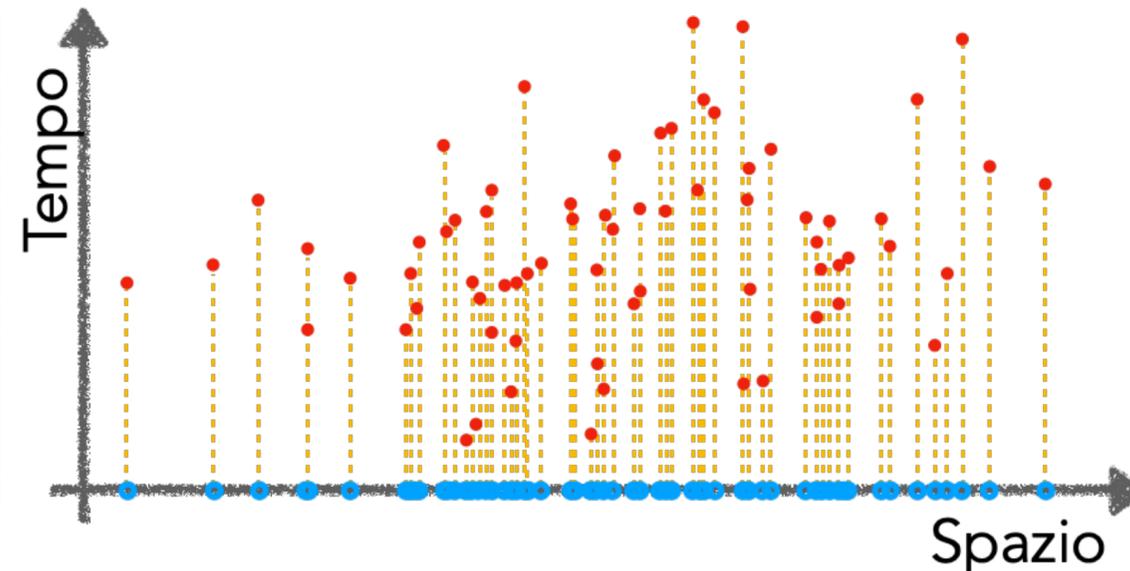
# Possibilità di Tesi con R&D in CMS

## MIP TIMING DETECTOR



**HL-LHC: 140-200 collisioni per incrocio dei fasci (LHC: 30-50)**

## Cristalli scintillanti (LYSO) letti con fotomoltiplicatori SiPM



**Cambio di paradigma: aggiungere la coordinata temporale per separare le collisioni**



**Partecipazione allo sviluppo e messa in opera di un nuovo rivelatore**

A. Benaglia, F. De Guio, A. Ghezzi, M. Malberti, T. Tabarelli

# Possibilità di Tesi con R&D in CMS

**PIXEL**

The diagram shows the CMS detector with various components labeled: STEEL RETURN YOKE (12,500 tonnes), SILICON TRACKERS (Pixel 100x150 μm, 16x46M channels, Microstrips 80x180 μm, 200n², 9.6M channels), SUPERCONDUCTING SOLENOID (Niobium titanium coil carrying ~18,000 A), MUON CHAMBERS (Barrel: 120 Cathode Strip Tubes, 480 Resistive Plate Chambers; Endcap: 468 Cathode Strip Tubes, 432 Resistive Plate Chambers), FRESHOWER (Silicon strips ~16m², 137,000 channels), FORWARD CALORIMETER (Steel + Quartz fibres ~2,000 channels), CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL) (~76,000 scintillating PbWO₄ crystals), and HADRON CALORIMETER (HCAL) (Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels). A detailed view of the 3D silicon sensor shows layers: metal, bump, passivation, oxide, p-spray, p⁺ HR sensor wafer, n⁺ column, p⁺ LR handle wafer, and a note: Metal to be deposited after thinning, Handle wafer to be thinned down.

**Alta Luminosità richiede Upgrade:**

- Resistenza alla radiazione 10x
- Granularità 6x

**Lavoro di caratterizzazione prototipi planari e 3D:**

**Test su fascio e simulazioni**

Sensori 3D al Silicio

**TRIGGER**

The graph shows proton-(anti)proton cross sections  $\sigma$  (nb) vs energy  $E$  (TeV) on a log-log scale. The x-axis ranges from 0.1 to 10 TeV, and the y-axis ranges from  $10^{-7}$  to  $10^9$  nb. Key curves include  $\sigma_{tot}$ ,  $\sigma_{bottom}$ ,  $\sigma_{jet}(E_T^{jet} > E/20)$ ,  $\sigma_w$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{jet}(E_T^{jet} > 100 \text{ GeV})$ ,  $\sigma_{WW}$ ,  $\sigma_{top}$ ,  $\sigma_{ZZ}$ ,  $\sigma_{ggH}$ ,  $\sigma_{WH}$ , and  $\sigma_{VBF}$ . Vertical lines indicate the energy ranges for Tevatron and LHC. Two red circles highlight  $10^9$  and  $10^{-3}$  on the y-axis, with a label "events / sec for  $\mathcal{L} = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ".

**40MHz → 1kHz**

**Model-independent**

**Machine Learning**

M. Dinardo, P. Dini, S. Gennai, S. Malvezzi, D. Menasce, L. Moroni, D. Pedrini,  
F. Brivio, L. Guzzi, D. Zuolo

# Conclusioni

---

## Note

- Tutte le proposte di tesi del gruppo di particelle corrispondono allo stato dell'arte nei rispettivi ambiti
- I referenti in Bicocca ricoprono ruoli principali a livello internazionale nelle rispettive proposte
- Se qualcosa vi interessa, non esitate a contattarci per fare una chiaccherata!

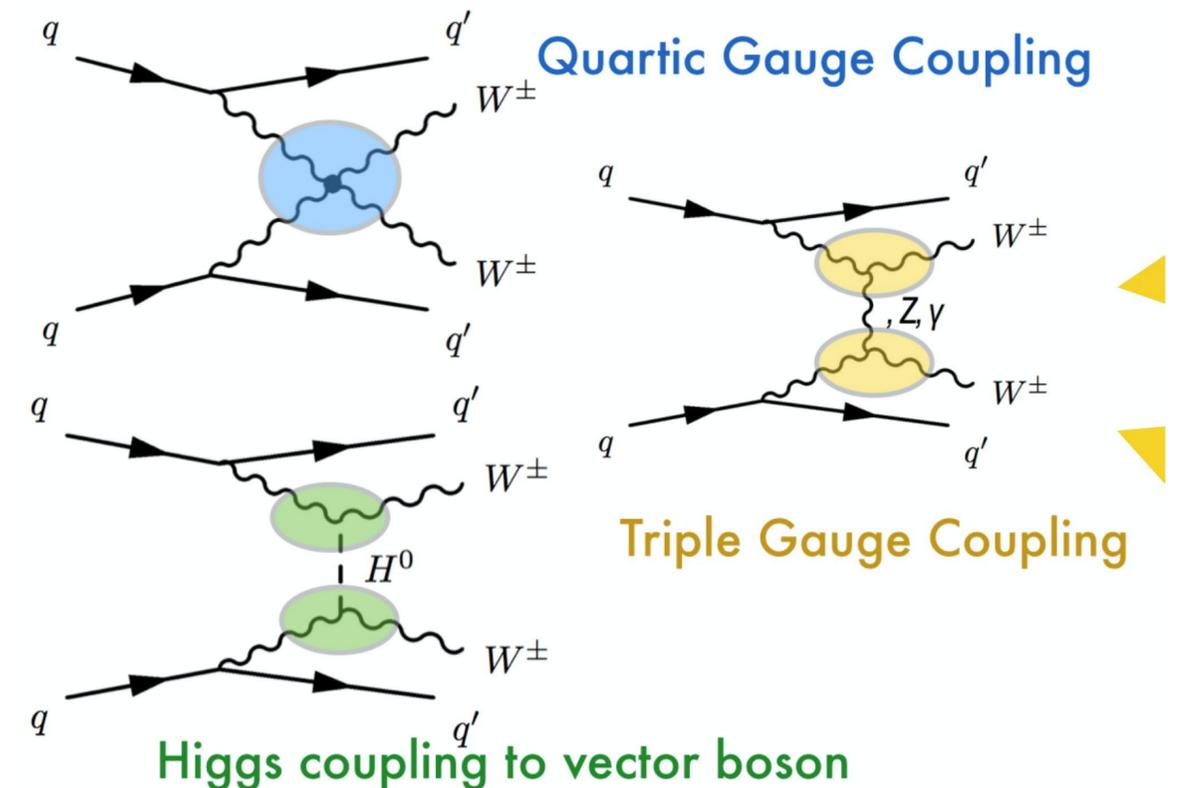
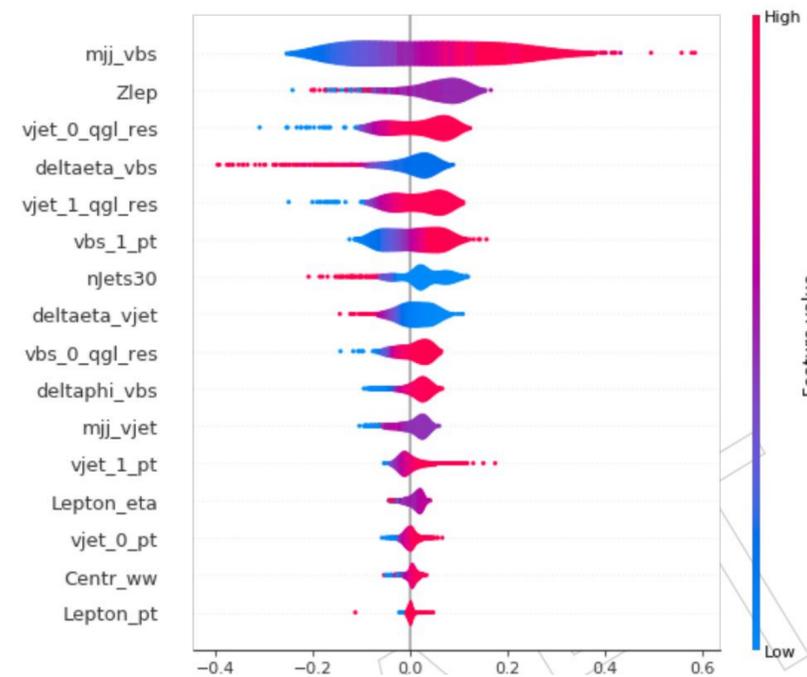
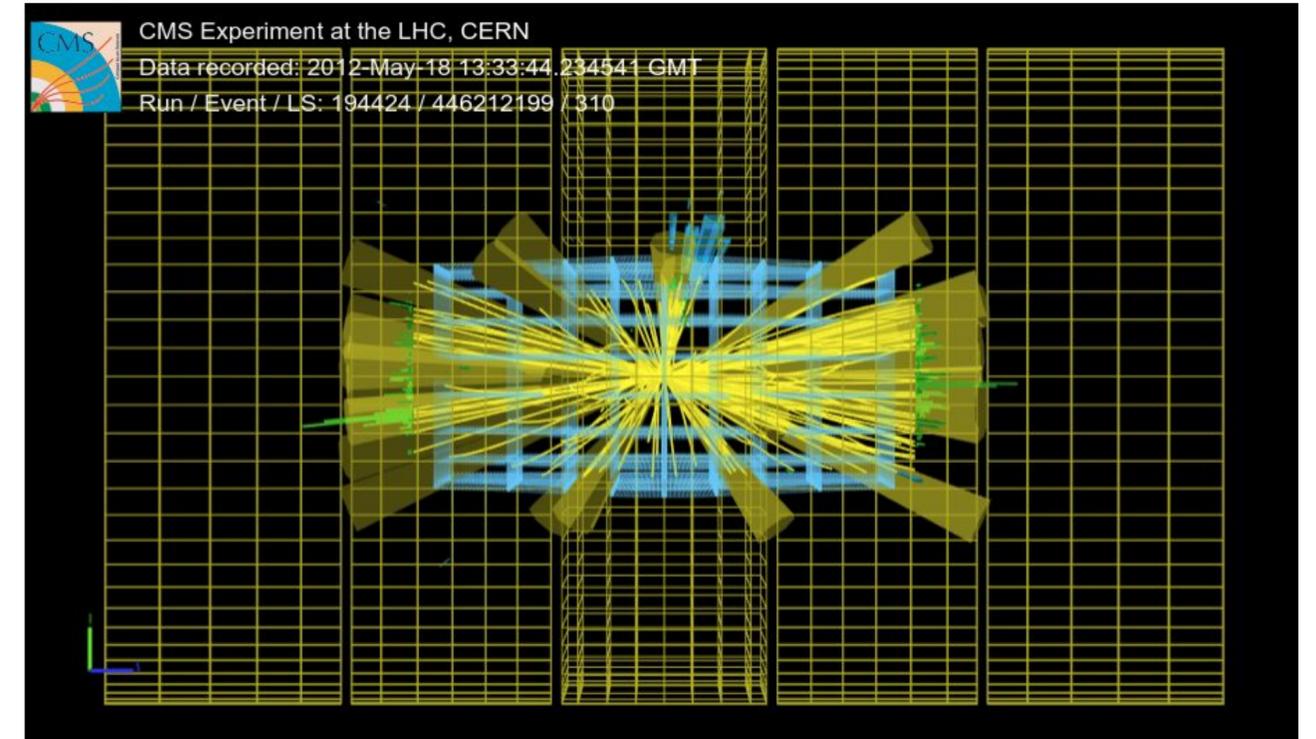
<https://www.fisica.unimib.it/it/ricerca/fisica-delle-particelle-e-delle-astroparticelle>

# *Approfondimenti*

# Scattering di bosoni vettori (VBS)

Misura della sezione d'urto **electroweak**

- uno dei processi più rari ad LHC
- sensibile a nuova fisica nel settore di **Higgs**
- qualunque deviazione dalle attese potrebbe essere indicazione di **Nuova Fisica**
- 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!
- molte tesi sperimentali o fenomenologiche assegnate in passato sull'argomento: <http://govoni.web.cern.ch/govoni/tesi/#>



Per informazioni più dettagliate : [andrea.massironi@mib.infn.it](mailto:andrea.massironi@mib.infn.it) ,  
[pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it), [marco.paganoni@unimib.it](mailto:marco.paganoni@unimib.it)

# Ricerca di eventi $HH \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$

Analisi dati

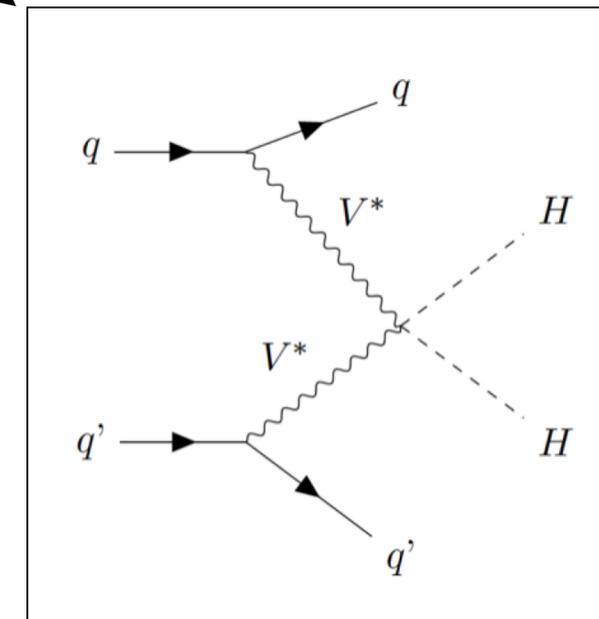
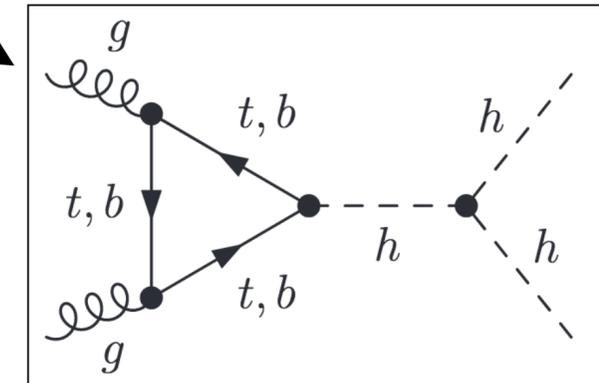
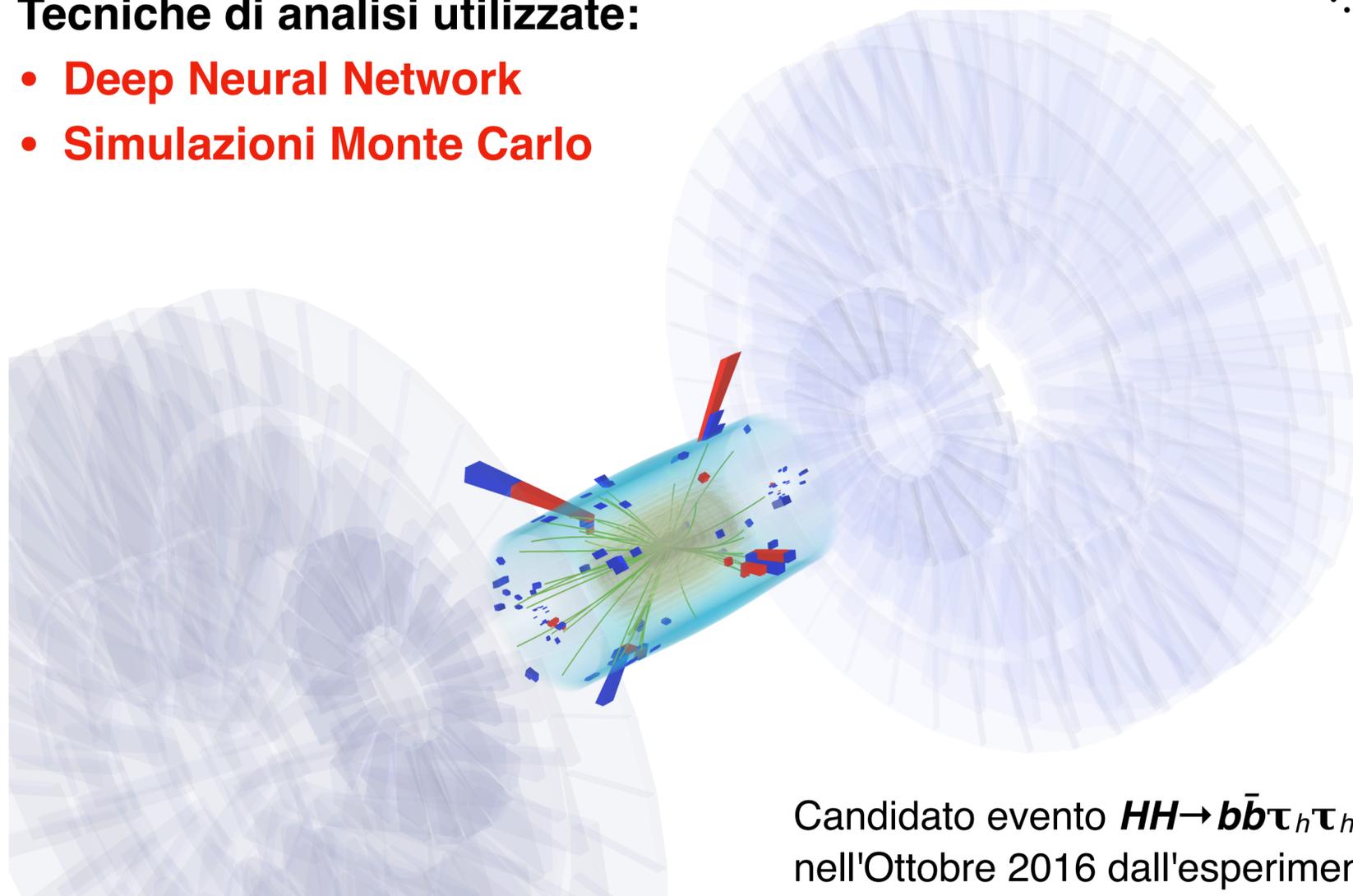
- Ricerca di eventi con produzione di **coppie di bosoni di Higgs** che decadono in due *leptoni tau* e due *quark b*
- Studio di produzione HH attraverso Gluon Fusion e Vector Boson Fusion

## Perchè studiare eventi HH?

- Misura del tassello mancante del Modello Standard
- Portale di accesso a eventi di Nuova Fisica

## Tecniche di analisi utilizzate:

- **Deep Neural Network**
- **Simulazioni Monte Carlo**



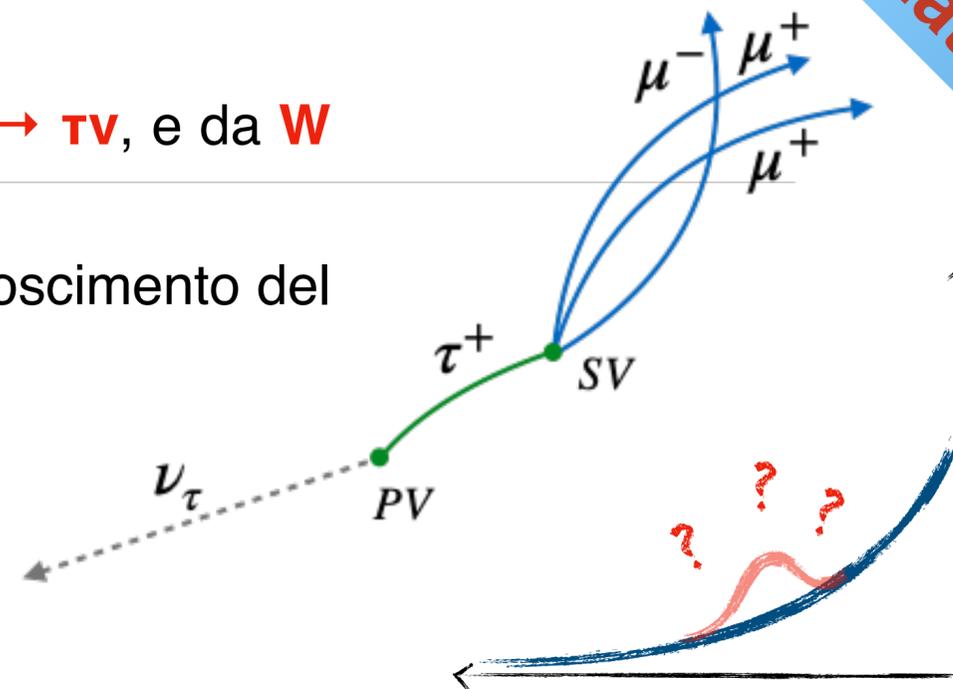
Candidato evento  $HH \rightarrow b\bar{b}\tau_h\tau_h$  registrato nell'Ottobre 2016 dall'esperimento CMS

# Fisica del sapore in CMS

Analisi dati

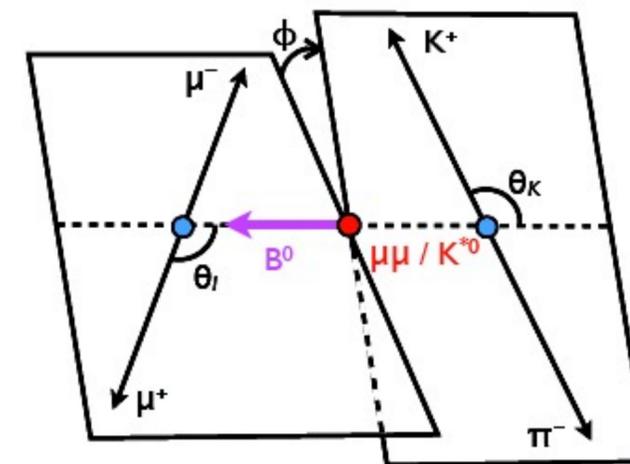
Ricerca di fisica oltre il Modello Standard attraverso decadimenti rari a violazione di sapore leptonic

- Ricerca del segnale  $\tau \rightarrow 3\mu$  da Heavy Flavour, e.g  $Ds \rightarrow \tau\nu$ , e da  $W \rightarrow \tau\nu$
- Impiego di **tecniche di analisi multivariate** per il riconoscimento del segnale



Analisi angolare del decadimento  $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$

- $b \rightarrow sll$  e` un esempio di **Flavour Changing Neutral Current**: transizione tra quark con la stessa carica elettrica
- Nel Modello Standard (SM) e` soppresso a tree-level
- Predizioni teoriche "beyond SM" disponibili  $\rightarrow$  ideale per indagine indiretta di nuova fisica
- Analisi angolare permette di misurare grande numero di osservabili con incertezze teoriche ridotte



Usiamo una **GPU Nvidia Tesla** per:

- Studio angolare degli eventi di fondo (3D)
- Studio angolare dell'efficienza di ricostruzione

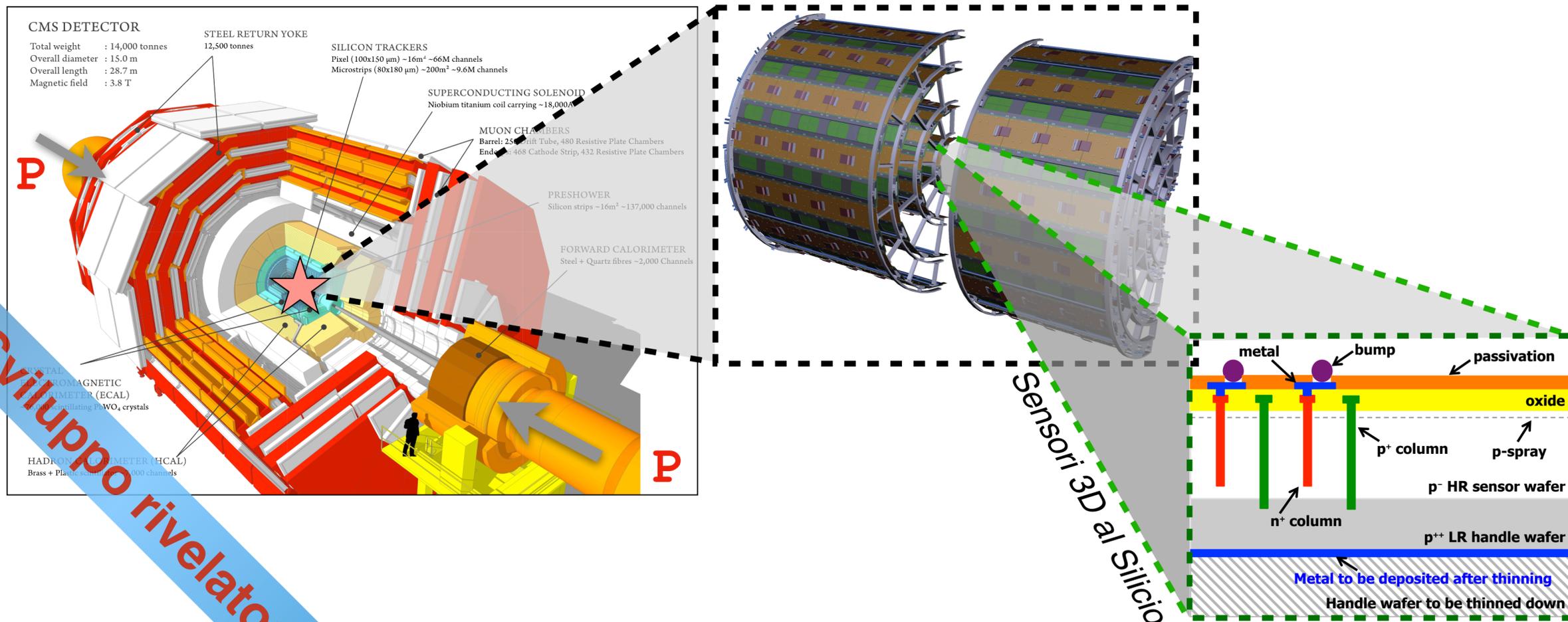


# Sviluppo di nuovi rivelatori a pixel ultrasensibili alla radiazione per la fase ad alta luminosità di CMS

Upgrade ad alta luminosità di LHC → intero rivelatore a pixel di Silicio di CMS deve essere sostituito con uno nuovo:

- **resistenza alla radiazione: x10** superiore
- **granularità: x6** maggiore

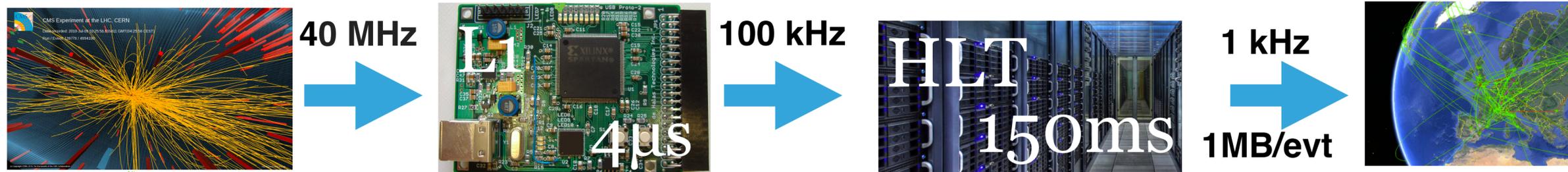
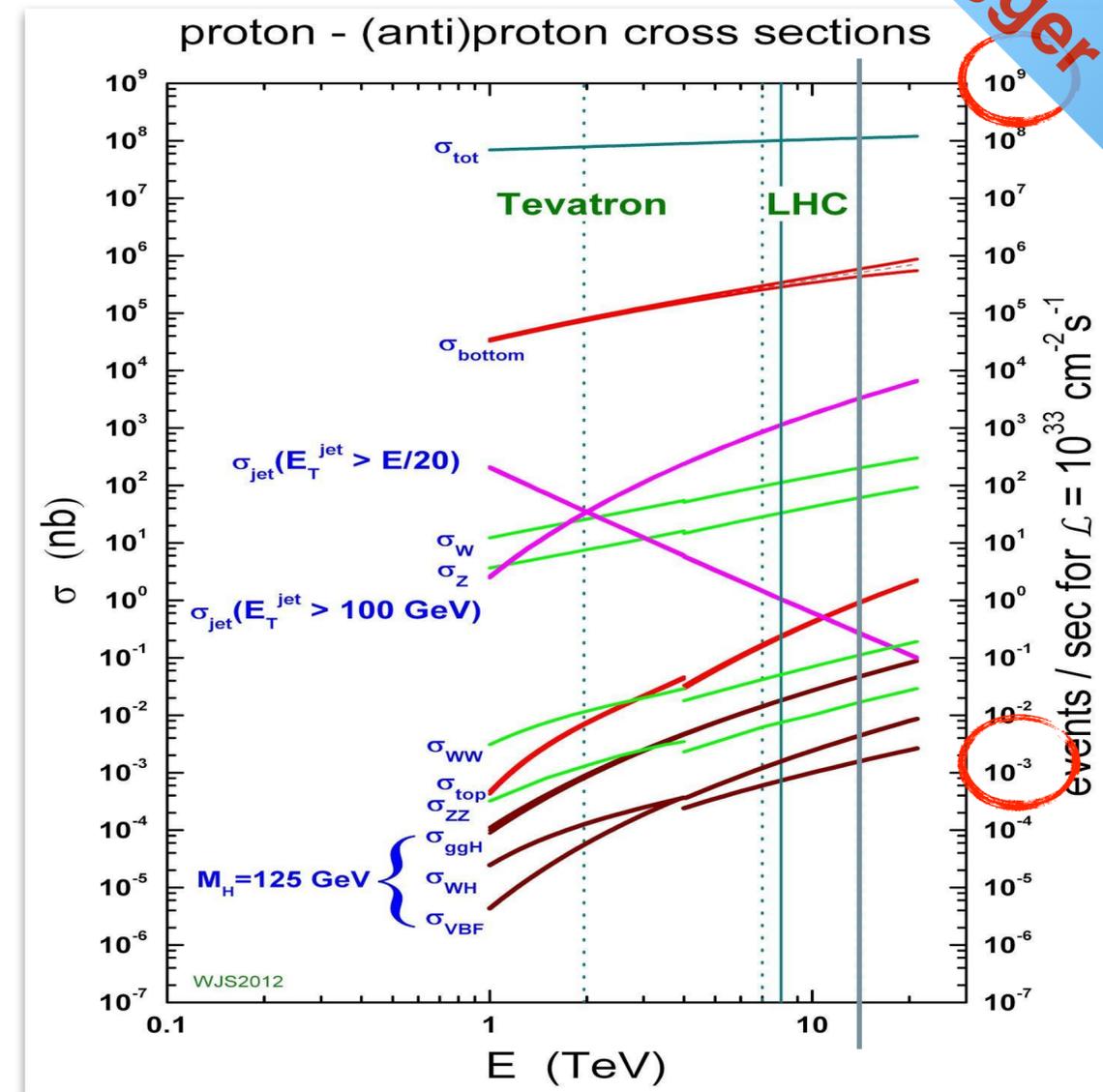
I nuovi prototipi sviluppati, sia di tipo **planare** che **3D**, sono estremamente promettenti → dobbiamo caratterizzarli completamente nella loro versione finale tramite test su fascio e simulazioni per la scelta della tipologia da usare nell'esperimento



Sviluppo rivelatori

# Perché ci serve un trigger?

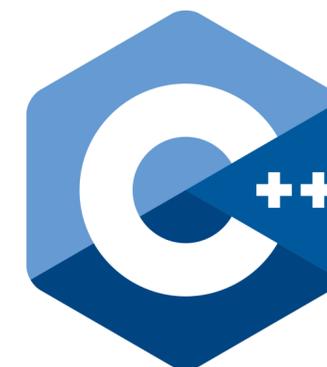
- Ad LHC i fasci di protoni si scontrano  $40 \times 10^6$  di volte ogni secondo
- Le sezioni d'urto di processi interessanti sono ordini di grandezza più piccole di quella di diffusione protone-protone
- Alla fine della selezione di trigger possiamo salvare in media circa 1000 eventi al secondo
- Dobbiamo quindi andare a trovare il famoso ago nel pagliaio ...
- E' necessario quindi sviluppare selezioni il più inclusive possibili



# Capacità richieste e acquisite

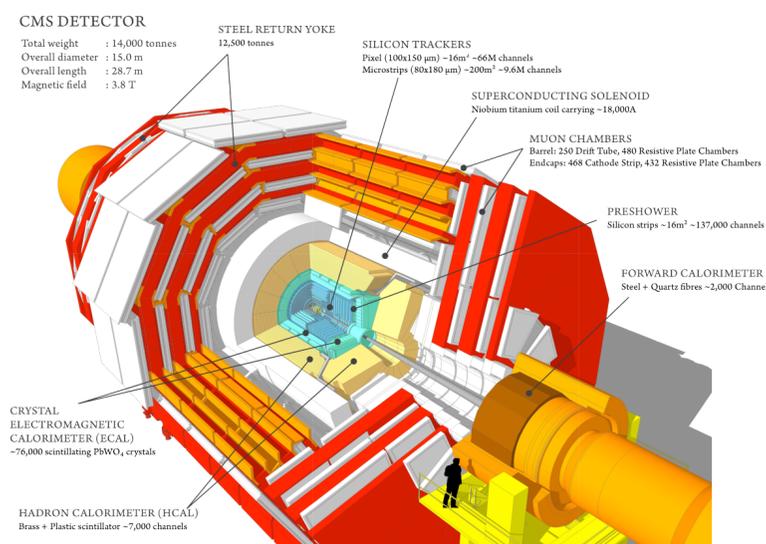
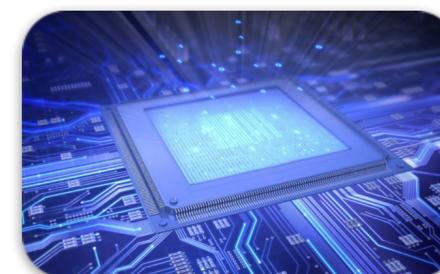
## Capacità richieste

- Discreta conoscenza di C++ e del pacchetto ROOT (corso del terzo anno)
  - Conoscenze di base di Machine Learning (ML) e Python rappresentano un *asset* in più
- Conoscenza base della fisica delle particelle (corso del terzo anno)



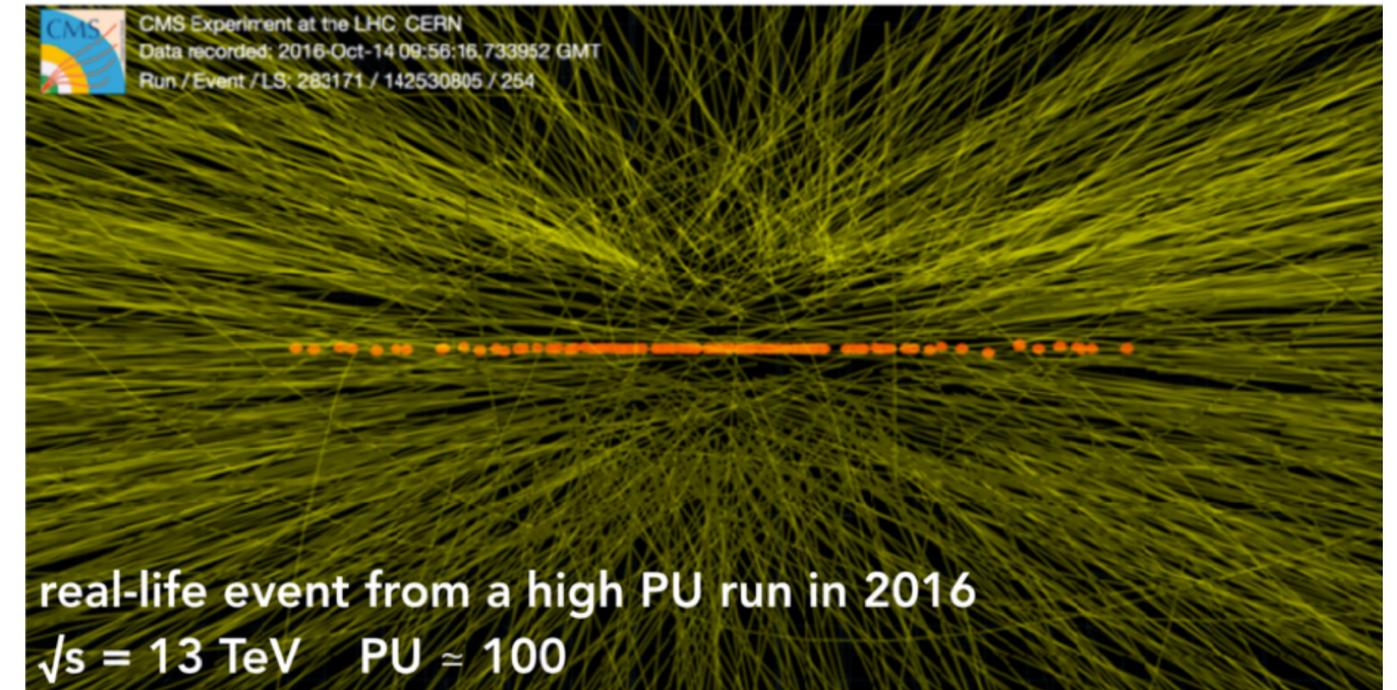
## Capacità acquisite

- Programmazione avanzata in C++ e Python
- Uso di varie tecniche di ML
  - Sia unsupervised che semi-supervised
- Introduzione all'analisi dei dati
- Introduzione all'esperimento CMS



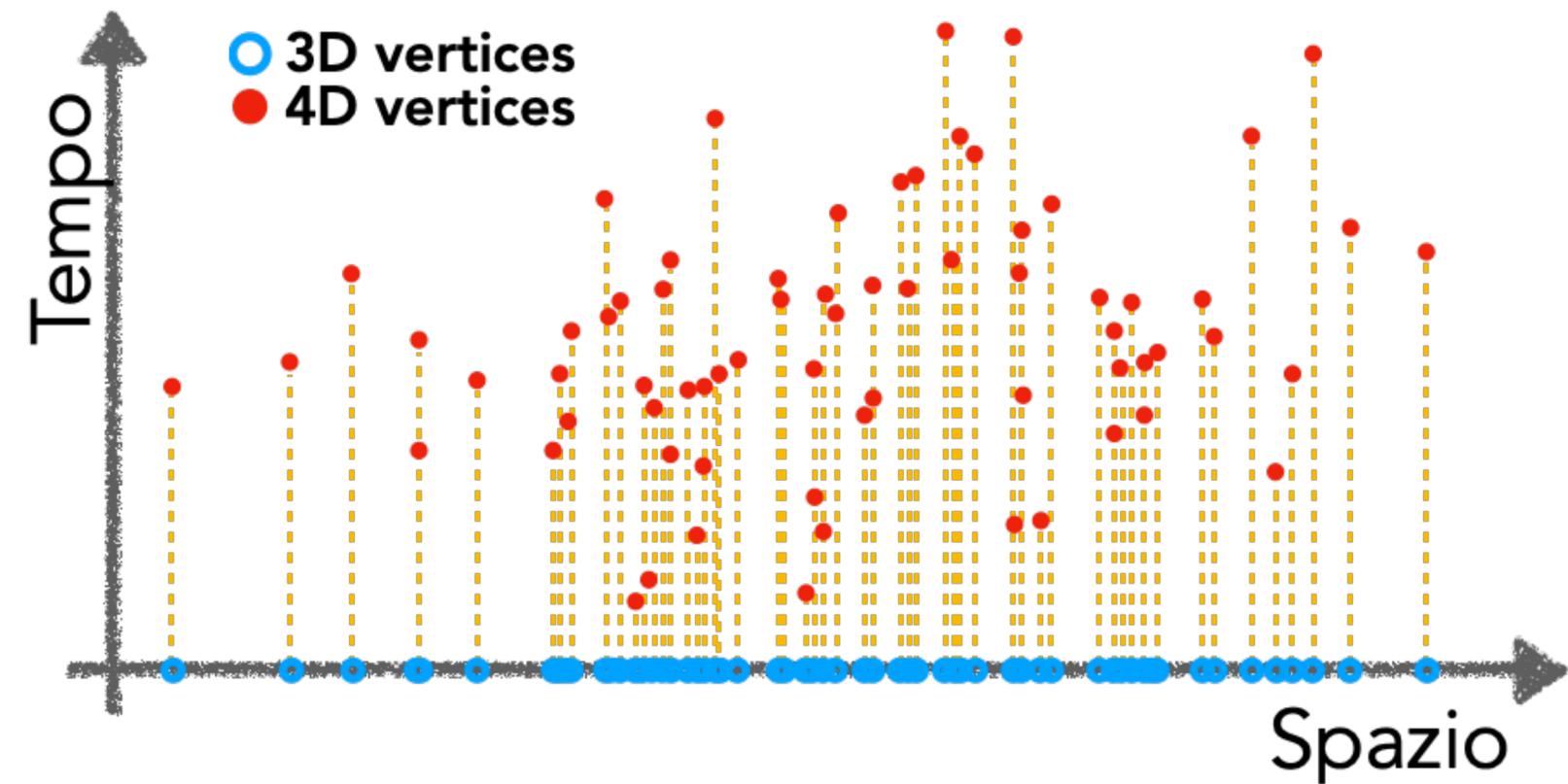
# Upgrade del rivelatore CMS: un nuovo rivelatore per misure temporali (MTD)

**High-Lumi LHC:**  $L_{\text{inst}} = 7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$   
140-200 collisioni, quasi simultanee, per ogni incrocio dei fasci (pileup),  
**sovrapposte nel rivelatore**

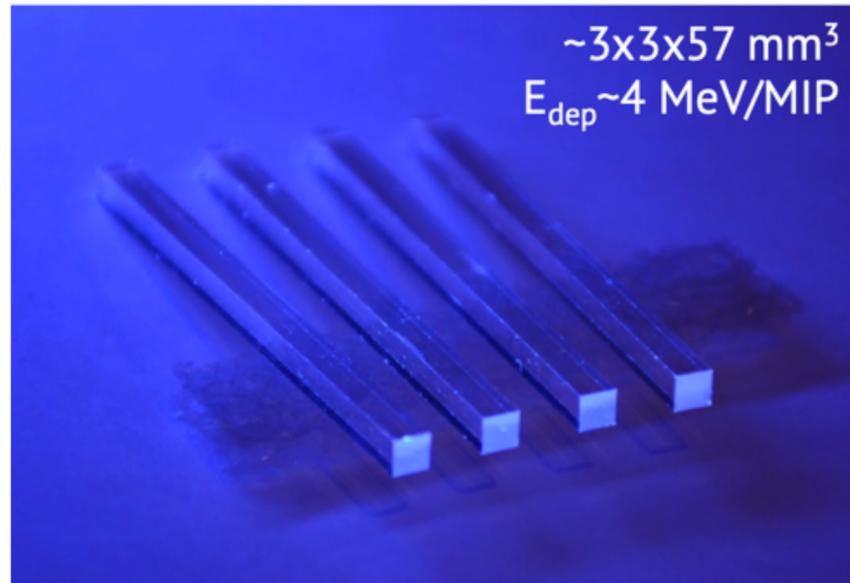


Nuovo paradigma: distinguere le diverse collisioni **misurando con estrema accuratezza il tempo** di produzione delle particelle

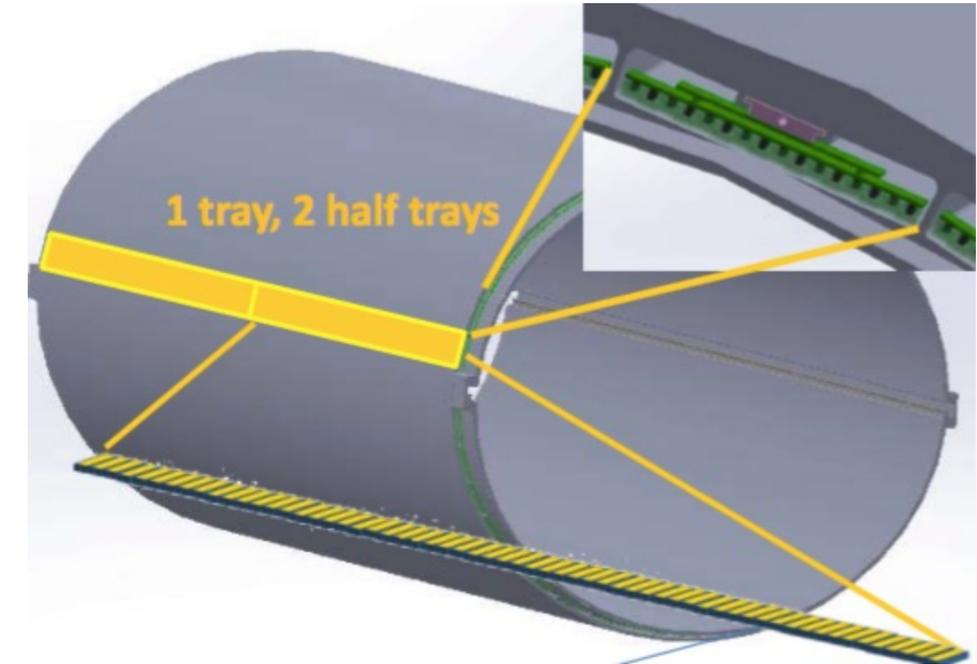
Utilizzare l'informazione temporale per una **ricostruzione 4D** delle collisioni, riducendo le sovrapposizioni nella ricostruzione 3D



# Rivelatore MTD: cristalli scintillatori (LYSO) letti con fotorivelatori al silicio (SiPM)



166k cristalli, area ~ 40 m<sup>2</sup>



Ruolo centrale di Milano-Bicocca nell'ideazione e nella costruzione del rivelatore

Test e allestimento del rivelatore MTD presso i laboratori in U2

Occasione per partecipare allo sviluppo e messa in opera di un **nuovo rivelatore** per CMS, dopo un decennio di funzionamento a LHC!

Possibilità di tesi strumentali presso i laboratori in U2 e analisi dati di test su fascio

Per informazioni più dettagliate : [andrea.benaglia@mib.infn.it](mailto:andrea.benaglia@mib.infn.it), [federico.deguio@unimib.it](mailto:federico.deguio@unimib.it), [alessio.ghezzi@unimib.it](mailto:alessio.ghezzi@unimib.it), [martina.malberty@mib.infn.it](mailto:martina.malberty@mib.infn.it), [tommaso.tabarelli@unimib.it](mailto:tommaso.tabarelli@unimib.it)

