

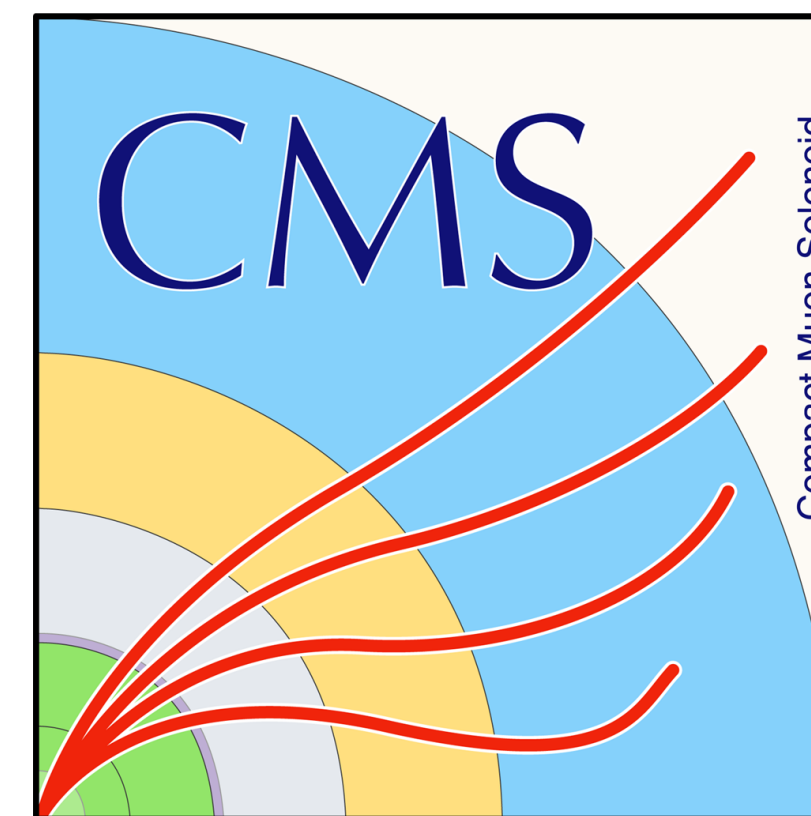
# Fisica ad LHC

---

## Misure del Modello Standard e ricerche di nuova fisica

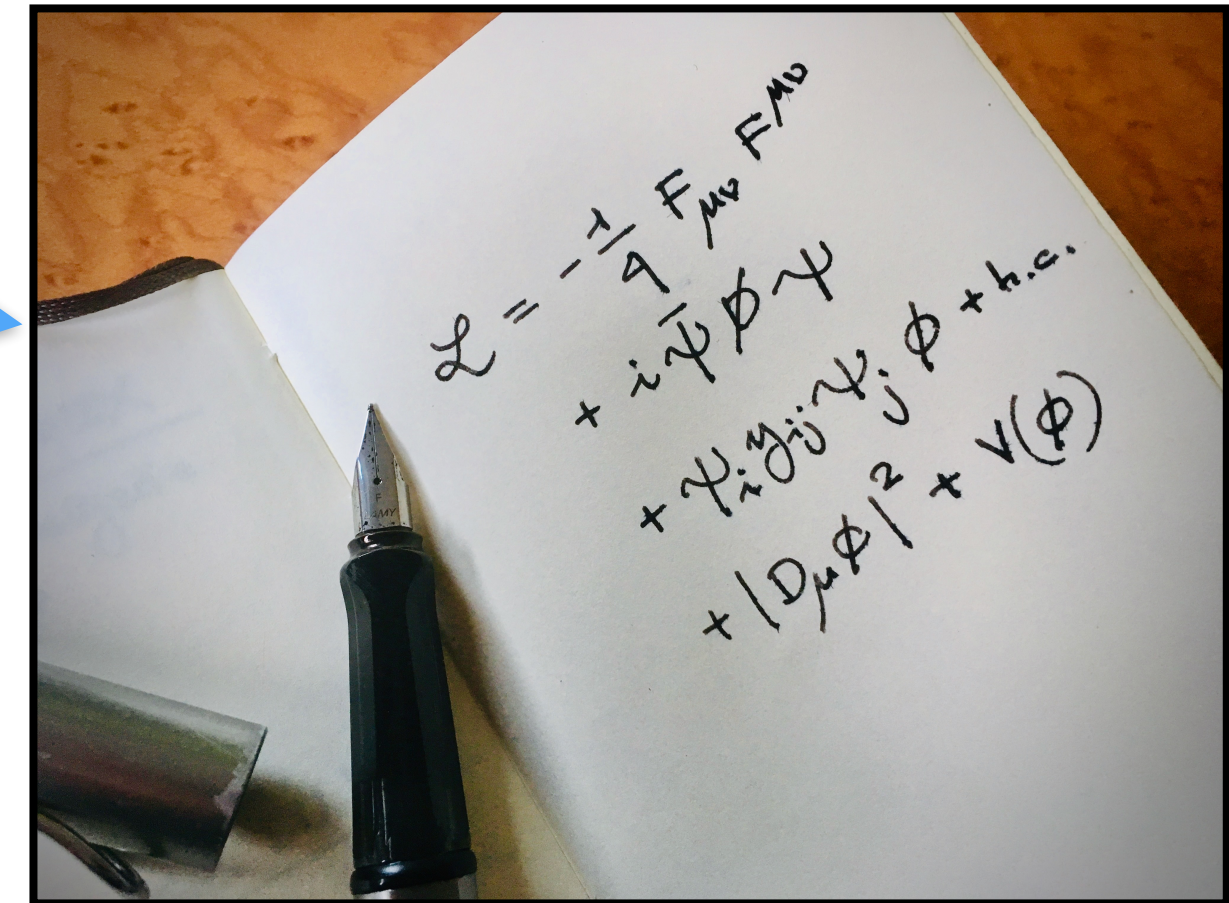
*Raffaele Gerosa*

Università degli Studi di Milano Bicocca e INFN (sezione MIB)



# Lo Standard Model e LHC

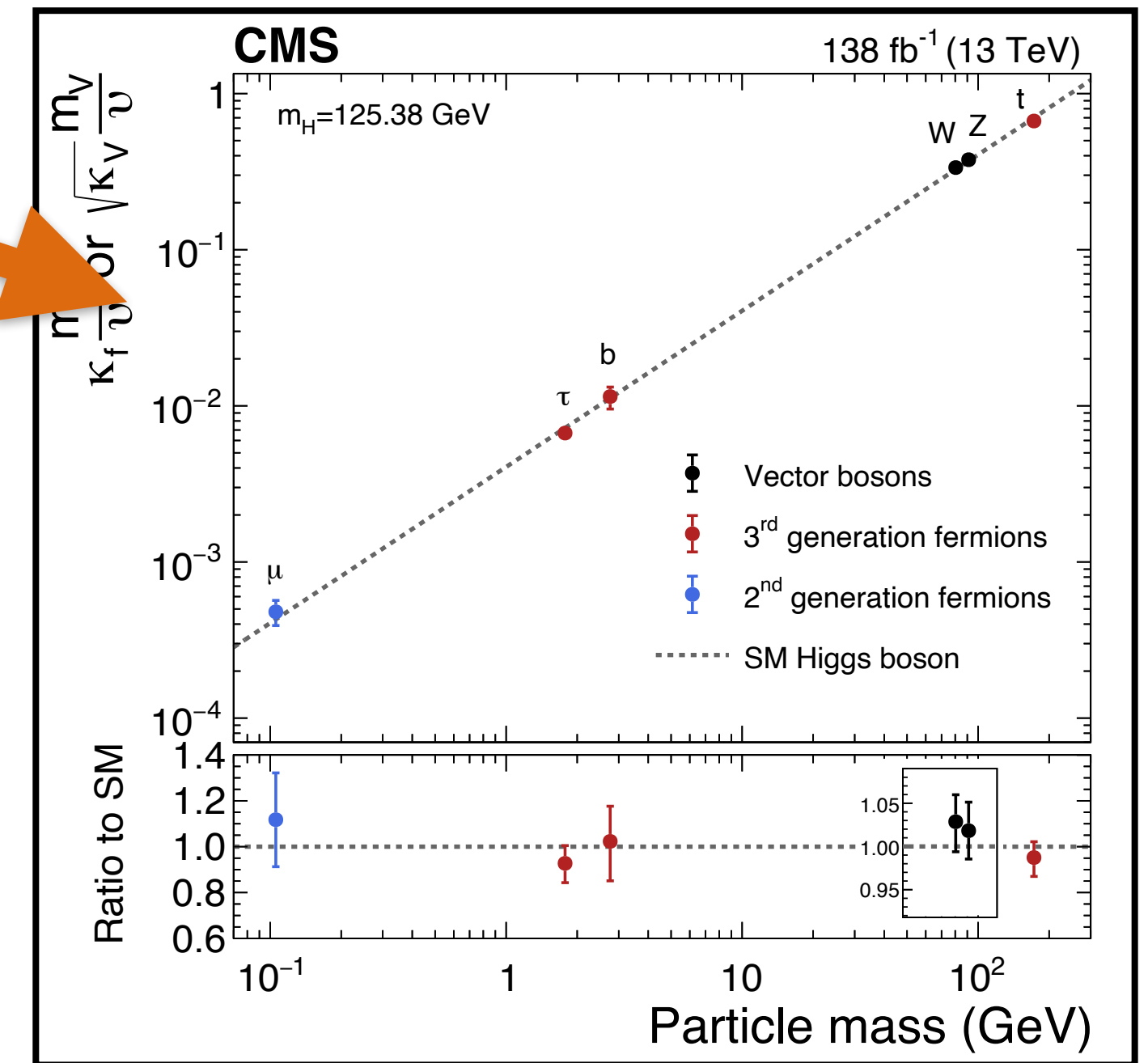
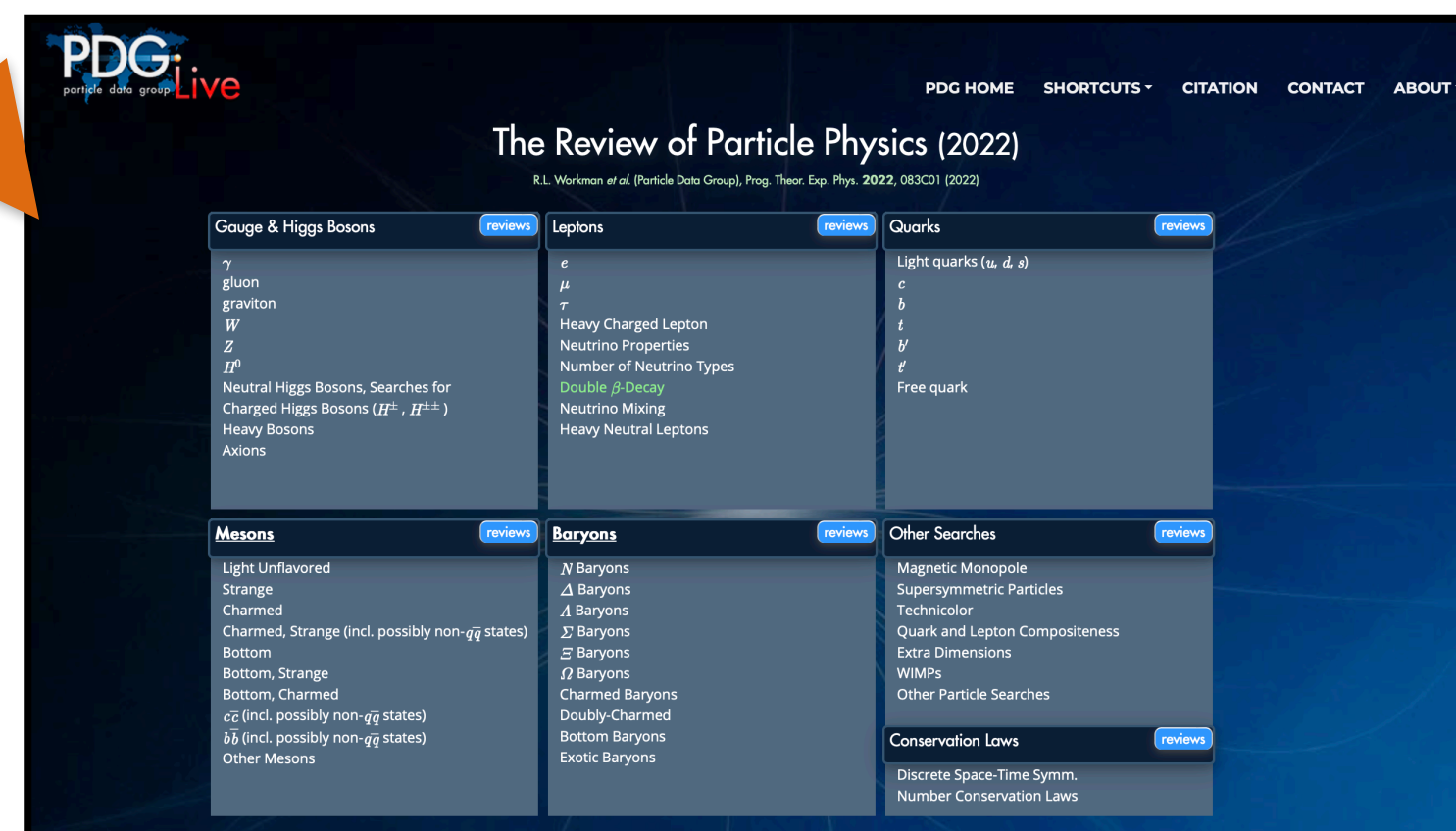
- Lo **Standard Model (SM)** é la **teoria** piú completa che spiega la **dinamica** dei **costituenti** ultimi **della materia**
  - **Costituenti:** particelle di spin semi-intero detti fermioni
  - **Interazioni:** mediate da particelle a spin intero detti bosoni



dominio teoria

- Lo **Standard Model** é **sperimentalmente verificato** fino alle scale di energia accessibili ad LHC O(TeV)
  - I **dati** osservati sono in **accordo** con le sue **previsioni** entro le **incertezze** teoriche e sperimentali
  - **ATLAS e CMS** hanno scoperto il **bosone di Higgs** → 2012
  - **Non** sono state **osservate** nuove particelle in s-channel

dominio sperimentale

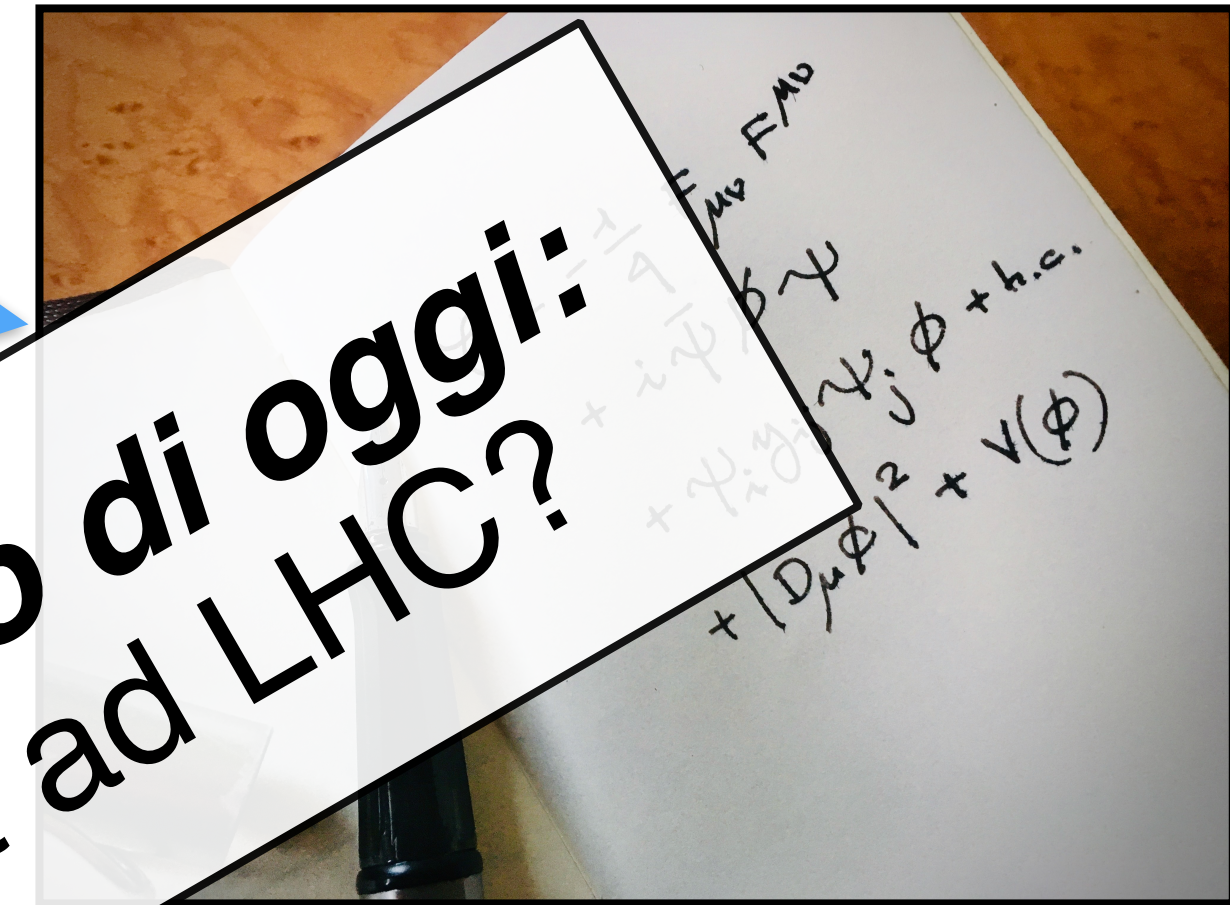


# Lo Standard Model e LHC

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

- Lo **Standard Model** é **sperimentalmente verificato** fino alle scale di energia accessibili ad LHC O(TeV)
  - I **dati** osservati sono in **accordo** con le sue **previsioni** entro le **incertezze** teoriche e sperimentali
  - **ATLAS e CMS** hanno scoperto il **bosone di Higgs**
  - **Non** sono state **osservate** nuove particelle o interazioni nel

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

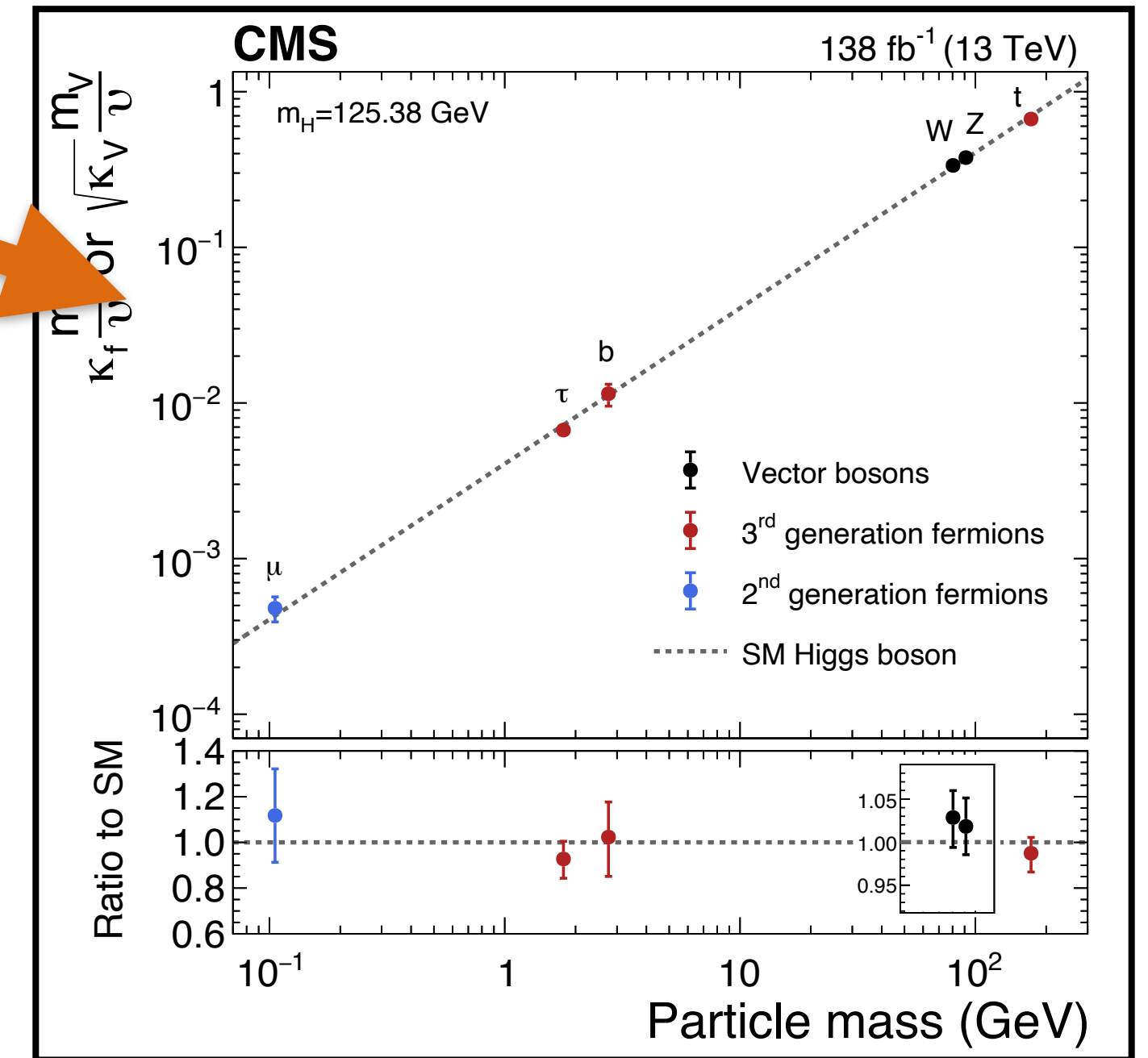


dominio teoria

dominio sperimentale

The Review of Particle Physics (2022)

<ul style="list-style-type: none"> <li>Charge &amp; Higgs Bosons</li> <li>Neutral Higgs Bosons, Searches for Charged Higgs Bosons (<math>H^\pm</math>, <math>H^{\pm\pm}</math>)</li> <li>Heavy Bosons</li> <li>Axions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leptons</li> <li><math>e</math></li> <li><math>\mu</math></li> <li><math>\tau</math></li> <li>Heavy Charged Lepton</li> <li>Neutrino Properties</li> <li>Number of Neutrino Types</li> <li>Double <math>\beta</math>-Decay</li> <li>Neutrino Mixing</li> <li>Heavy Neutral Leptons</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quarks</li> <li>Light quarks (<math>u, d, s</math>)</li> <li><math>c</math></li> <li><math>b</math></li> <li><math>t</math></li> <li><math>b'</math></li> <li><math>t'</math></li> <li>Free quark</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesons</li> <li>Light Unflavored</li> <li>Strange</li> <li>Charmed</li> <li>Charmed, Strange (incl. possibly non-<math>q\bar{q}</math> states)</li> <li>Bottom</li> <li>Bottom, Strange</li> <li>Bottom, Charmed</li> <li><math>cc</math> (incl. possibly non-<math>q\bar{q}</math> states)</li> <li><math>bb</math> (incl. possibly non-<math>q\bar{q}</math> states)</li> <li>Other Mesons</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baryons</li> <li><math>N</math> Baryons</li> <li><math>\Delta</math> Baryons</li> <li><math>\Lambda</math> Baryons</li> <li><math>\Sigma</math> Baryons</li> <li><math>\Xi</math> Baryons</li> <li><math>\Omega</math> Baryons</li> <li>Charmed Baryons</li> <li>Doubly Charmed</li> <li>Doubly Charmed</li> <li>Bottom Baryons</li> <li>Exotic Baryons</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Other Searches</li> <li>Magnetic Monopole</li> <li>Supersymmetric Particles</li> <li>Technicolor</li> <li>Quark and Lepton Compositeness</li> <li>Extra Dimensions</li> <li>WIMPs</li> <li>Other Particle Searches</li> <li>Conservation Laws</li> <li>Discrete Space-Time Symm.</li> <li>Number Conservation Laws</li> </ul>



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

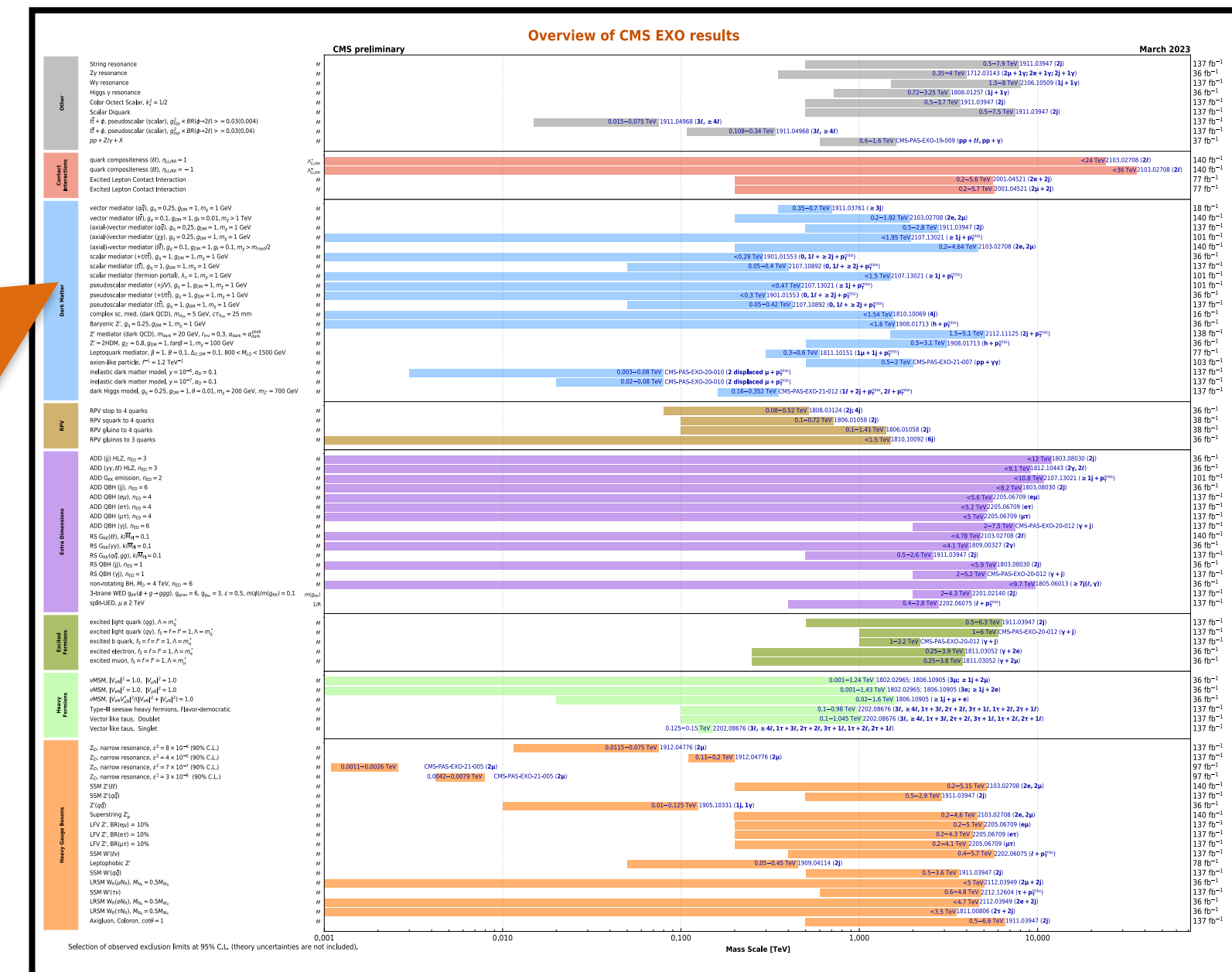
## Motivi “teorici”

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

## Limiti di esclusione per modelli 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 é del tutto soddisfacente

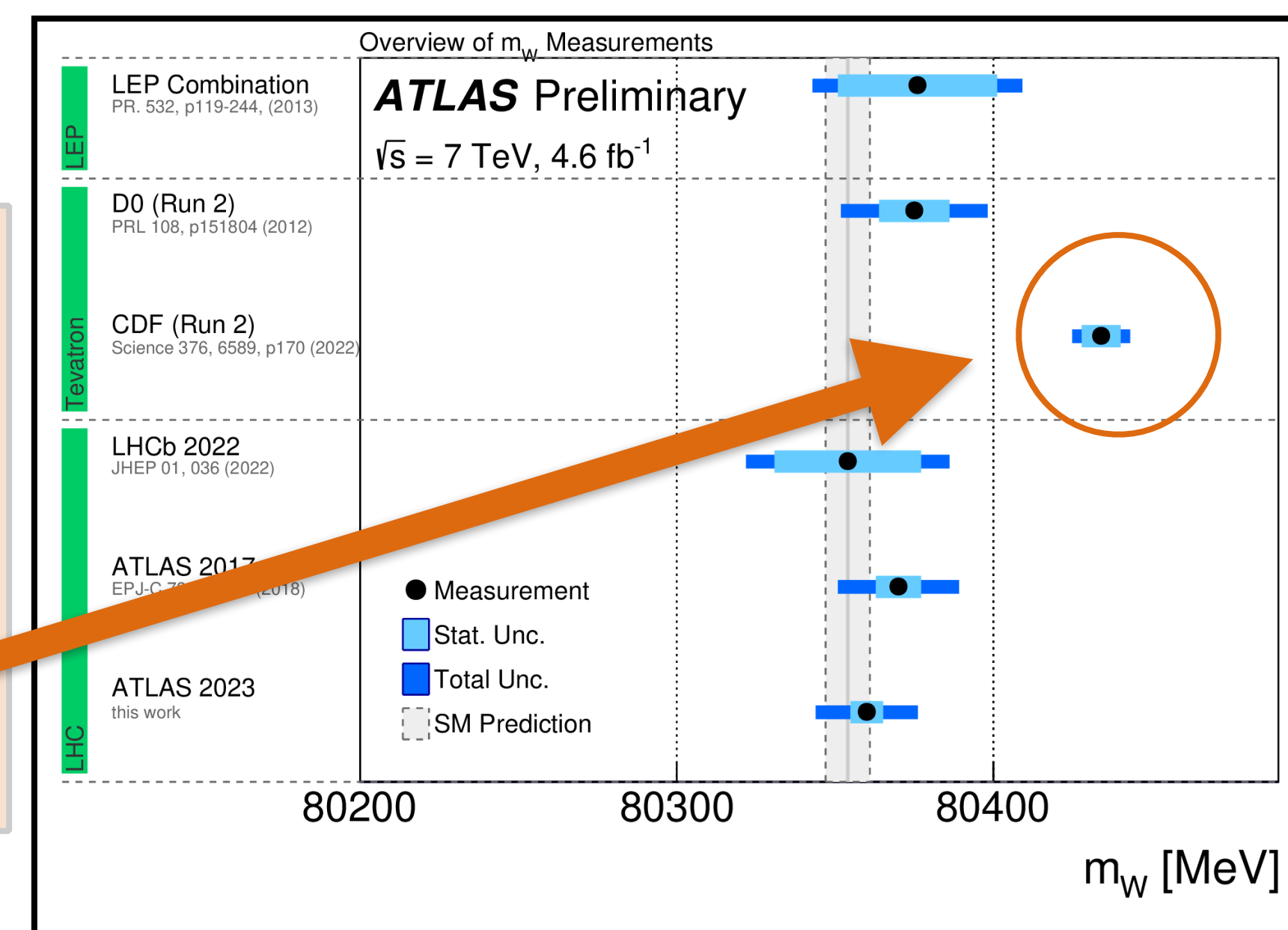
## Motivi “teorici”

- **Non spiega** la gerarchia di massa osservata nelle diverse famiglie di leptoni e quarks
- **Non spiega** dove sia finita anti-materia → violazione di CP é “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

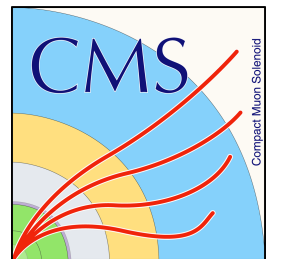
## Misura di $m_W$



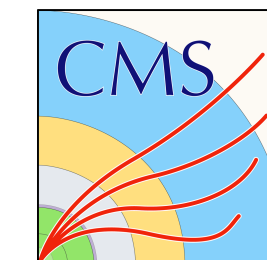
# Seconda risposta: la fisica di LHC é unica

## La fisica di LHC non ha competitors

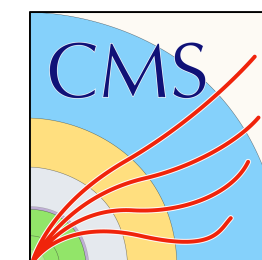
- **LHC è l'unica Higgs-factory**
  - **Misure sperimentali:** accoppiamenti, mass, spin e CP, larghezza, distribuzioni differenziali, self-coupling
  - Misure chiave per comprendere **fisica elettro-debole** e la sua **rottura spontanea di simmetria**



- **LHC è una weak boson (W,Z) e top-quark factory**
  - Studiare **interazioni multiple** (trilineari e quartiche) tra **bosoni vettori**
  - Studiare proprietà del top, produzione t + bosoni vettori, spin-polarization  $t \rightarrow Wb$ , etc ..

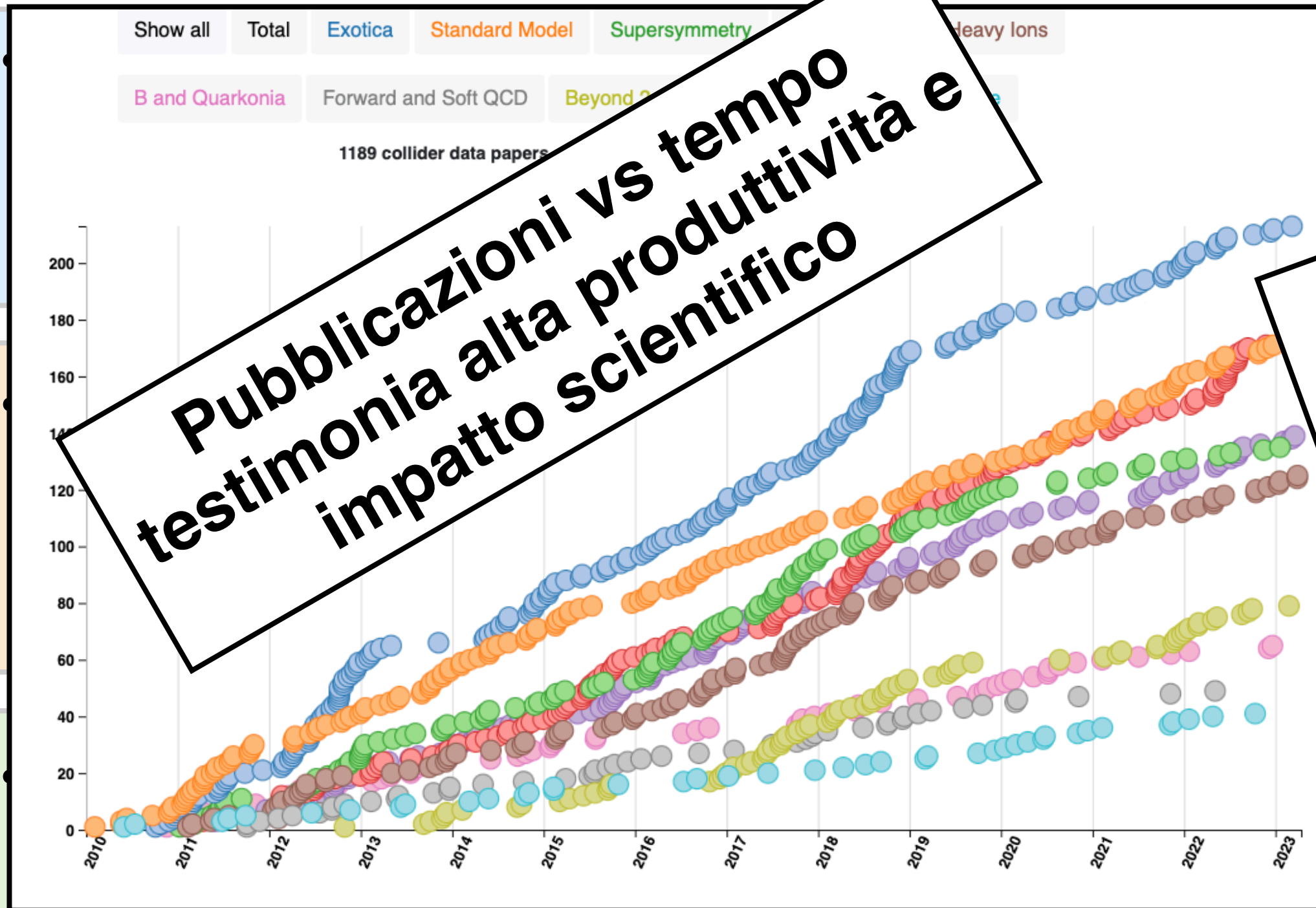


- **LHC è una meson e hadron factory**
  - Misure di precisione in **fisica di beauty e charm** quark
  - **Decadimenti rari** di mesoni B, D, K ..
  - **Violazione di simmetria CP**
  - **Spettroscopia** di adroni **esotici**



# Seconda risposta: la fisica di LHC é unica

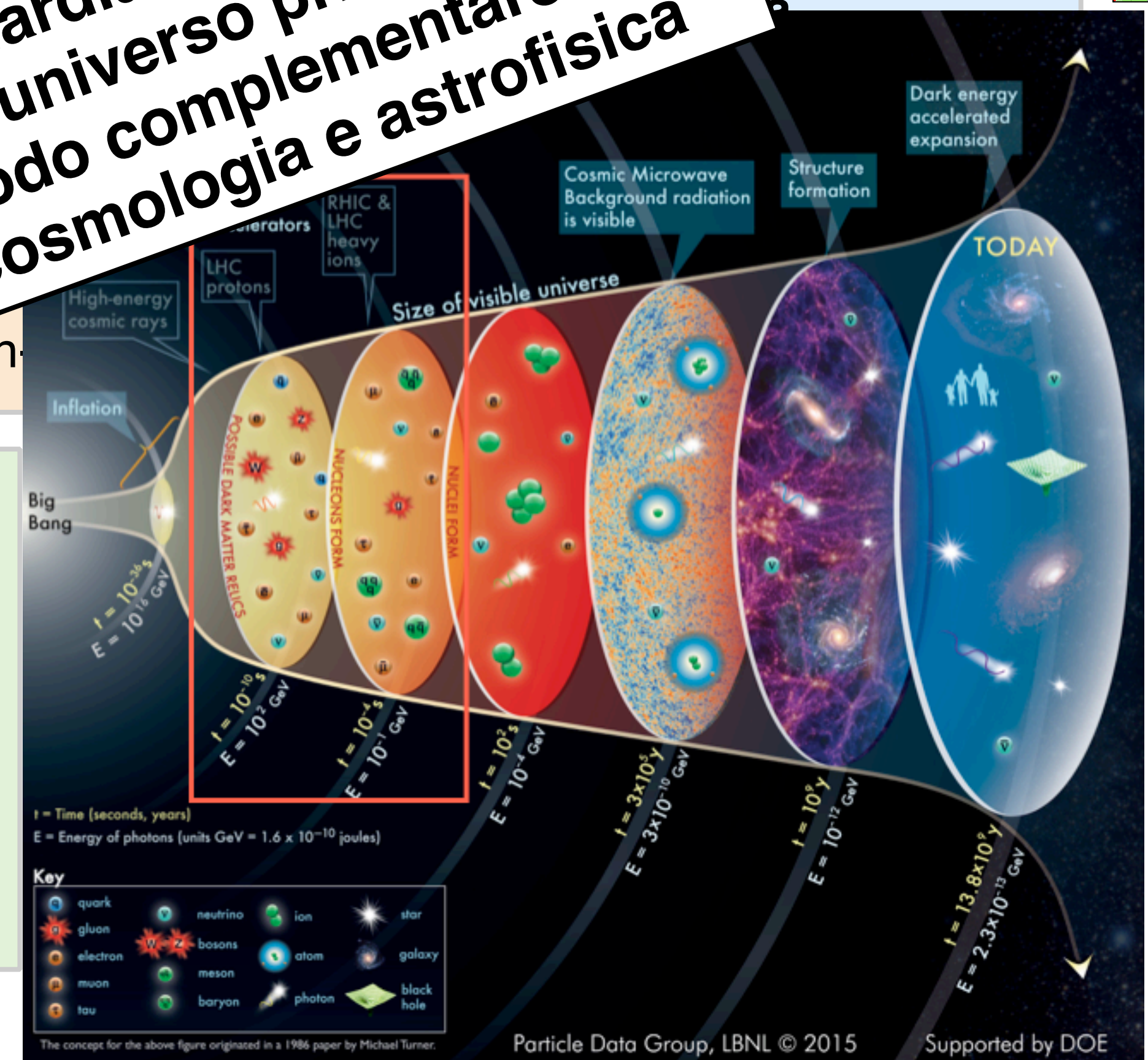
## La fisica di LHC non ha competitors



Publicazioni vs tempo testimonia alta produttività e impatto scientifico

Guardiamo la dinamica dell'universo primordiale in modo complementare alla cosmologia e astrofisica

- Decadimenti rari di mesoni B, D, K ..
- Violazione di simmetria CP
- Spettroscopia di adroni esotici



Lavorando in uno dei grandi esperimenti di LHC (**analisi dati o R&D di detector \*\***) si costruisce un curriculum scientifico di ricerca completo e si sviluppano competenze trasversali

## Simulazioni e ricostruzione

- Usare software per il **calcolo di elementi di matrice** e di **parton shower**
- Usare e/o sviluppare software per la simulazione della **risposta del rivelatore** alla particelle prodotte
- Usare e/o sviluppare di **algoritmi per la ricostruzione** dell'evento

## Computing e statistics

- **Gestire e manipolare** una grande mole di dati (**big data**) attraverso **linguaggi di programmazione moderni** (C++, python), **software avanzati** (ROOT, pandas, scipy ..etc) e utilizzo di **calcolo scientifico distribuito**
- **Metodi statistici avanzati** per stima di parametri, test d'ipotesi, unfolding .. etc ..

## Machine learning (ML)

- **Ampiamente usato** nelle misure compiute ad LHC per risolvere diversi tipi di problemi
  - **Classificazione di eventi**
  - **Identificazione di particelle**
  - **Sviluppo di trigger**
  - **Calibrazione di oggetti**
  - **Ricerca di segnali anomali**
  - **Simulazione risposta del detector**
  - **Unfolding**

\*\* **Presentazione di Martina Malberti:** [\[Link alle slide\]](#)



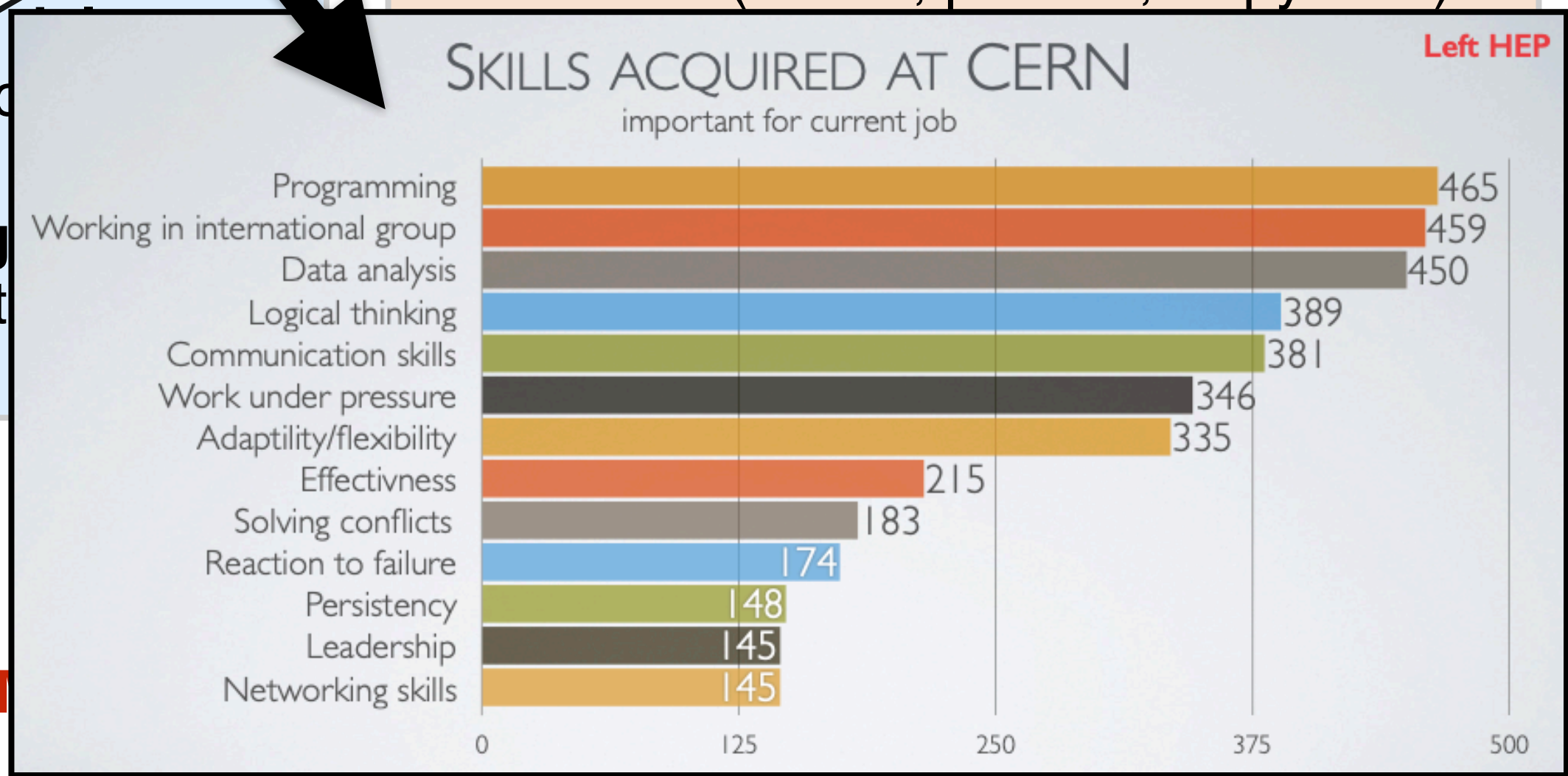
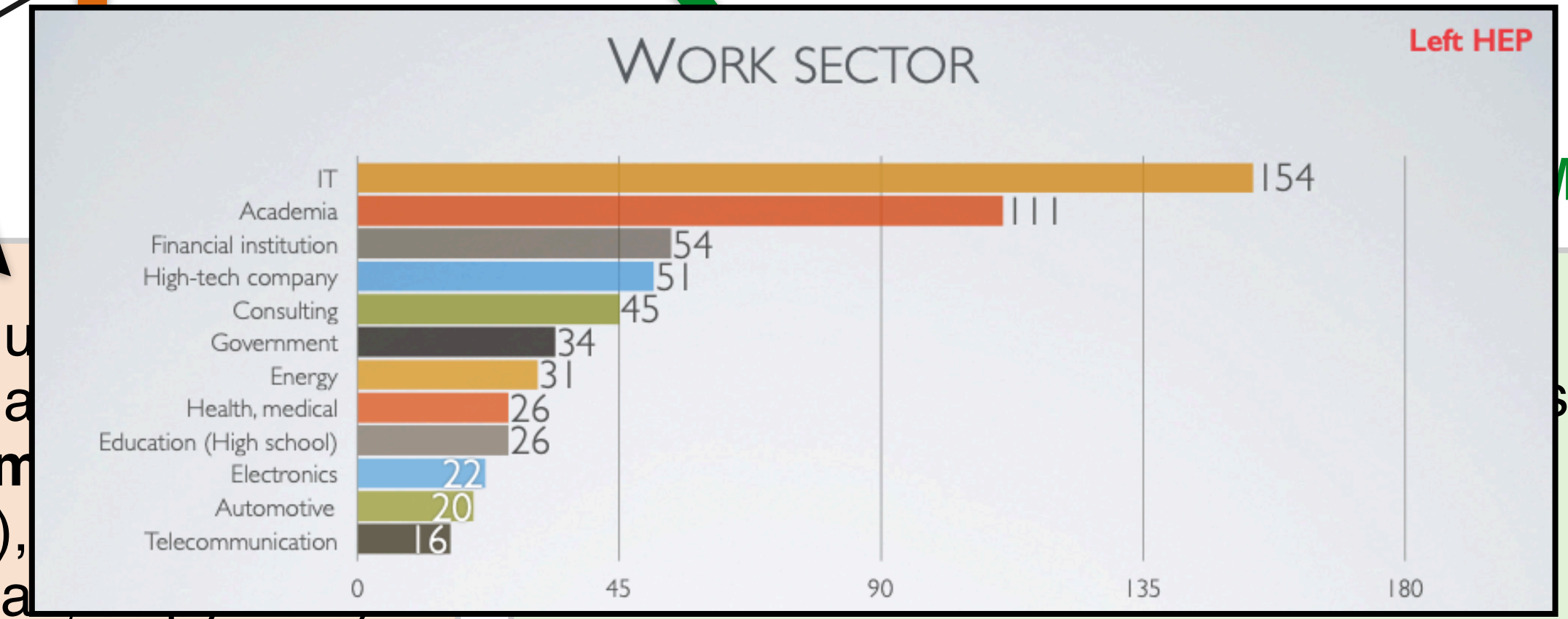
# Terza risposta: sviluppo di competenze “strategiche”

Lavorando in uno dei grandi esperimenti di fisica (analisi dati o R&D di detector \*\*) si costruisce un curriculum scientifico di ricerca comune e sviluppano competenze trasversali

## Simulazioni e ricostruzione

- Usare software per il calcolo di elementi di matrice di parone shower
- Usare e/o sviluppare di algoritmi per la ricostruzione dell'evento

Gestire e manipolare molecole di dati (big data) a linguaggi di programmazione moderni (C++, python), avanzati (ROOT, panda)



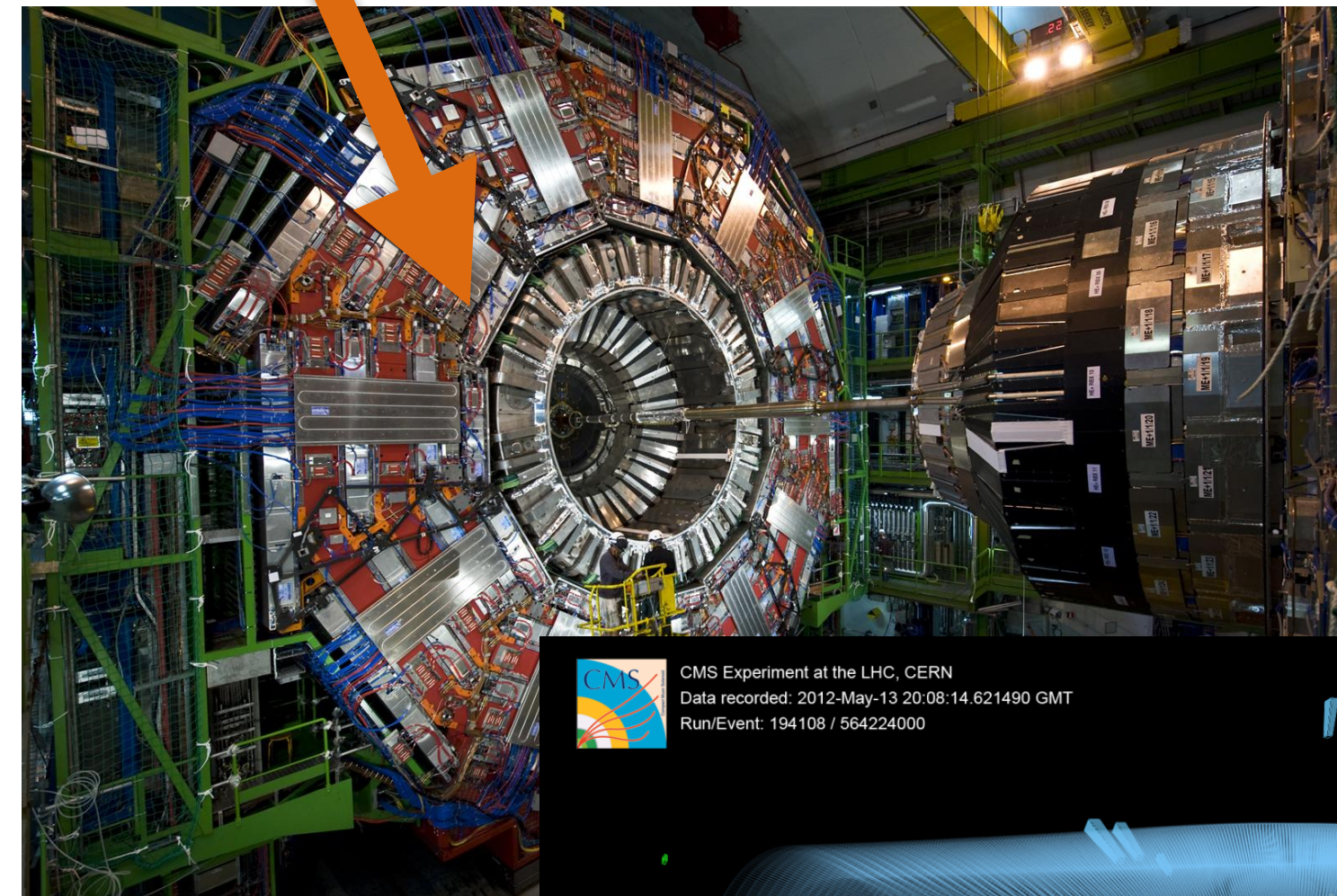
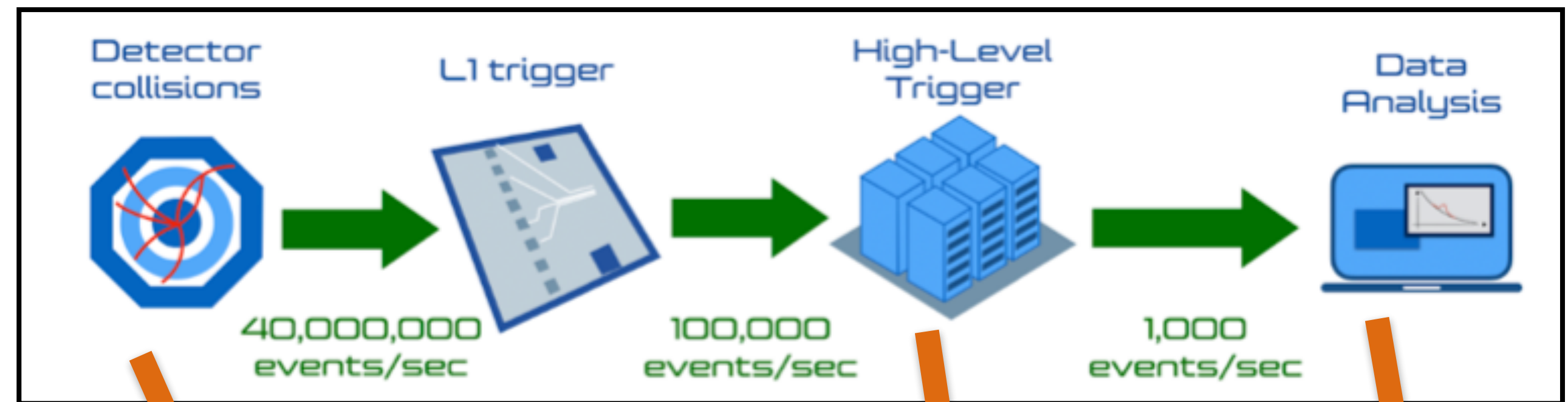
- Identificazione di particelle
- Sviluppo di trigger
- Calibrazione di oggetti
- Ricerca di segnali anomali
- Simulazione risposta del detector
- Unfolding

\*\* Presentazione di Martina I...

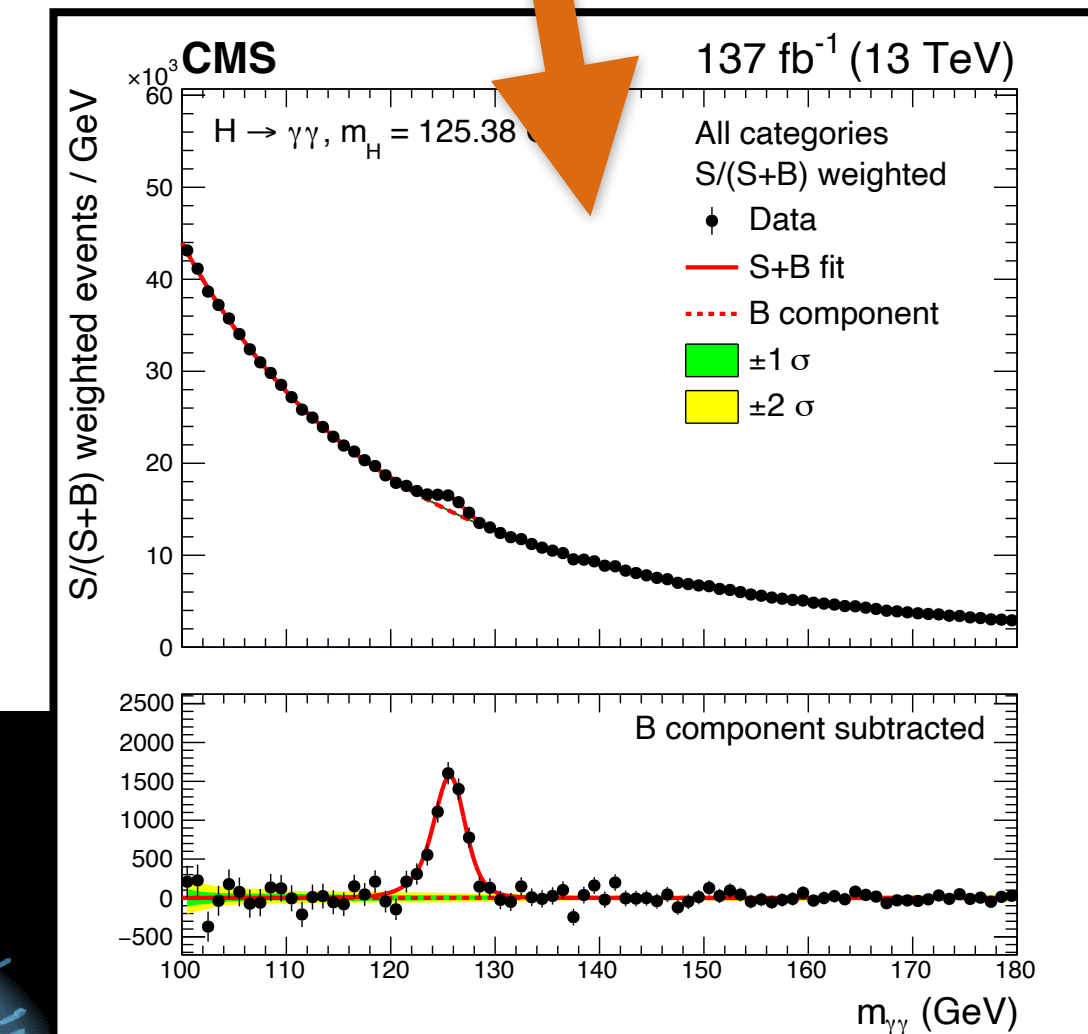
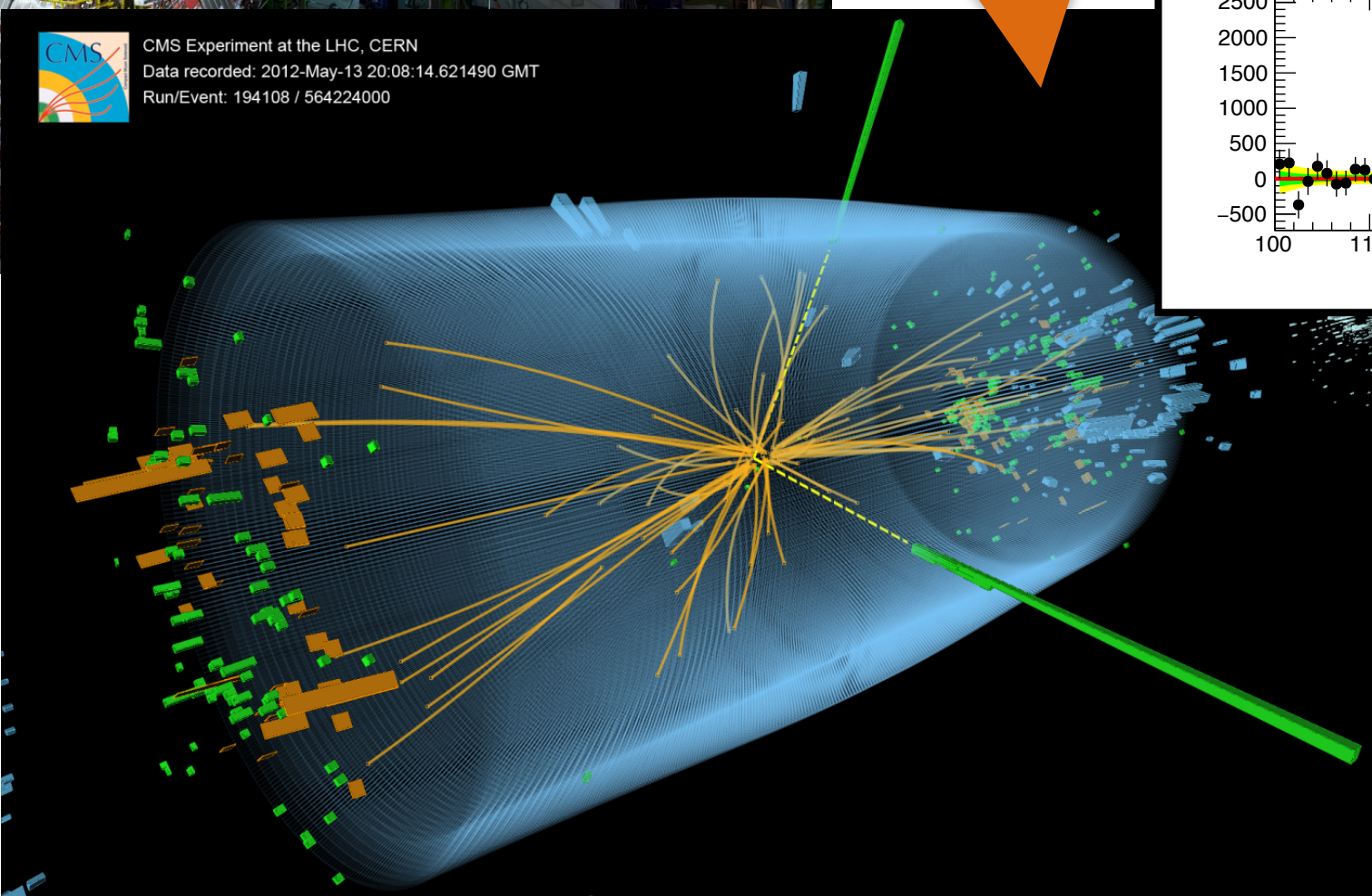
# Introduzione a CMS

## CMS in a nutshell

- **CMS** é un esperimento “general purpose”
- In grado di **misurare pressoché ermeticamente** tutte le particelle prodotte dalle collisioni di protoni
- **Composto da 4 rivelatori**: tracciatore pixel+strip, calorimetro elettromagnetico omogeneo, calorimetro adronico a “sampling” e camere a muoni
- **Cuore centrale** é un magnete superconduttore in grado di sviluppare  $B = 3.8\text{ T}$
- In grado di **misurare 40 MHz di collisioni**
- In grado di **salvare su disco 5 kHz di eventi RAW**



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000



# Overview dei progetti di tesi

## Produzione di coppie di bosoni di Higgs

- Simone Gennai: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it)
- Raffaele Gerosa: [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it)
- Mauro Dinardo: [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it)
- Martina Malberti: [martina.malberti@mib.infn.it](mailto:martina.malberti@mib.infn.it)

## Misure differenziali processi EW: WW e VBF-Z

- Pietro Govoni: [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it)
- Raffaele Gerosa: [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it)
- Marco Paganoni: [marco.paganoni@unimib.it](mailto:marco.paganoni@unimib.it)
- Andrea Massironi: [andrea.massironi@mib.infn.it](mailto:andrea.massironi@mib.infn.it)
- Simone Gennai: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it)

## Vector Boson Scattering

- Pietro Govoni: [pietro.govoni@unimib.it](mailto:pietro.govoni@unimib.it)
- Raffaele Gerosa: [raffaele.gerosa@unimib.it](mailto:raffaele.gerosa@unimib.it)
- Marco Paganoni: [marco.paganoni@unimib.it](mailto:marco.paganoni@unimib.it)
- Andrea Massironi: [andrea.massironi@mib.infn.it](mailto:andrea.massironi@mib.infn.it)
- Simone Gennai: [simone.gennai@mib.infn.it](mailto:simone.gennai@mib.infn.it)

## B-physics

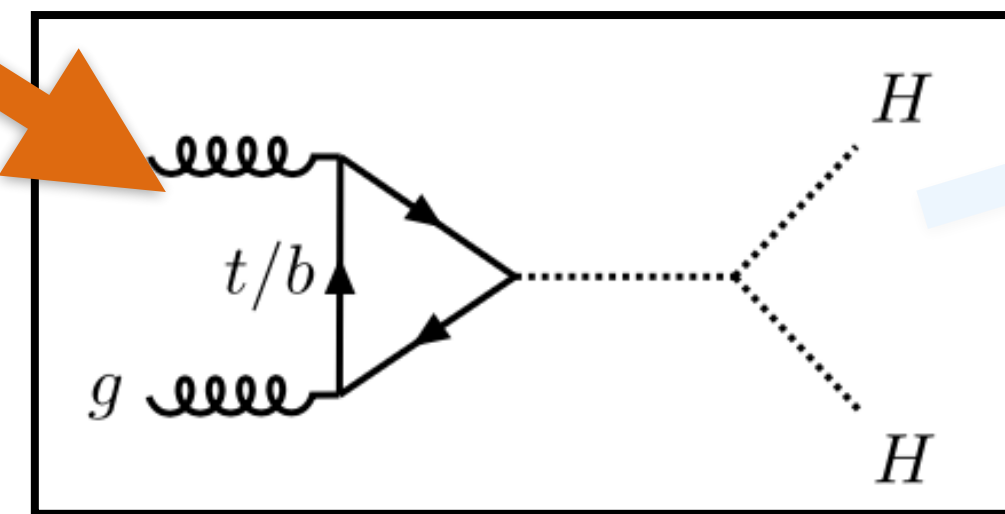
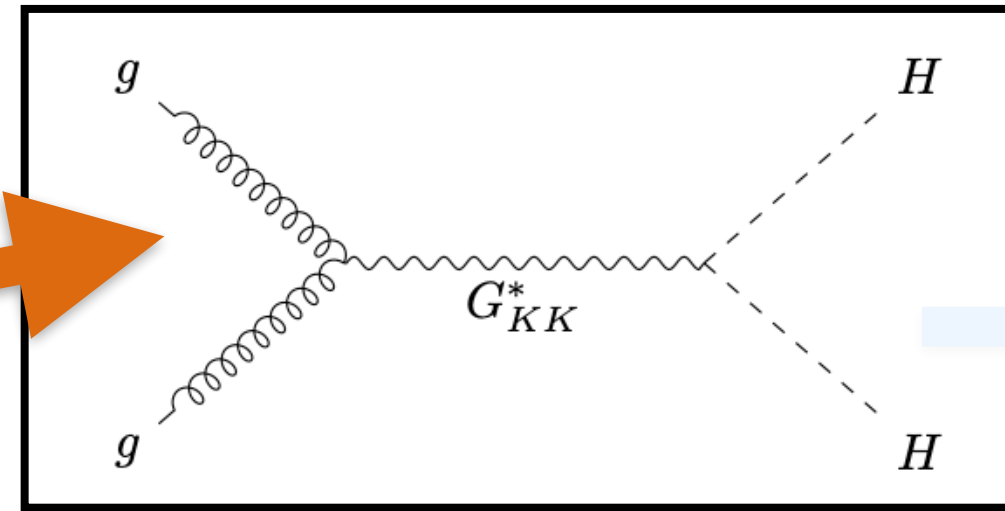
- Mauro Dinardo: [mauro.dinardo@unimib.it](mailto:mauro.dinardo@unimib.it)
- Paolo Dini: [paolo.dini@mib.infn.it](mailto:paolo.dini@mib.infn.it)
- Sandra Malvezzi: [sandra.malvezzi@mib.infn.it](mailto:sandra.malvezzi@mib.infn.it)

# Produzione di coppie di Higgs: $HH \rightarrow bb\tau^+\tau^-$

Simone Gennai  
Mauro Dinardo  
Raffaele Gerosa  
Martina Malberti

## Analisi condotte

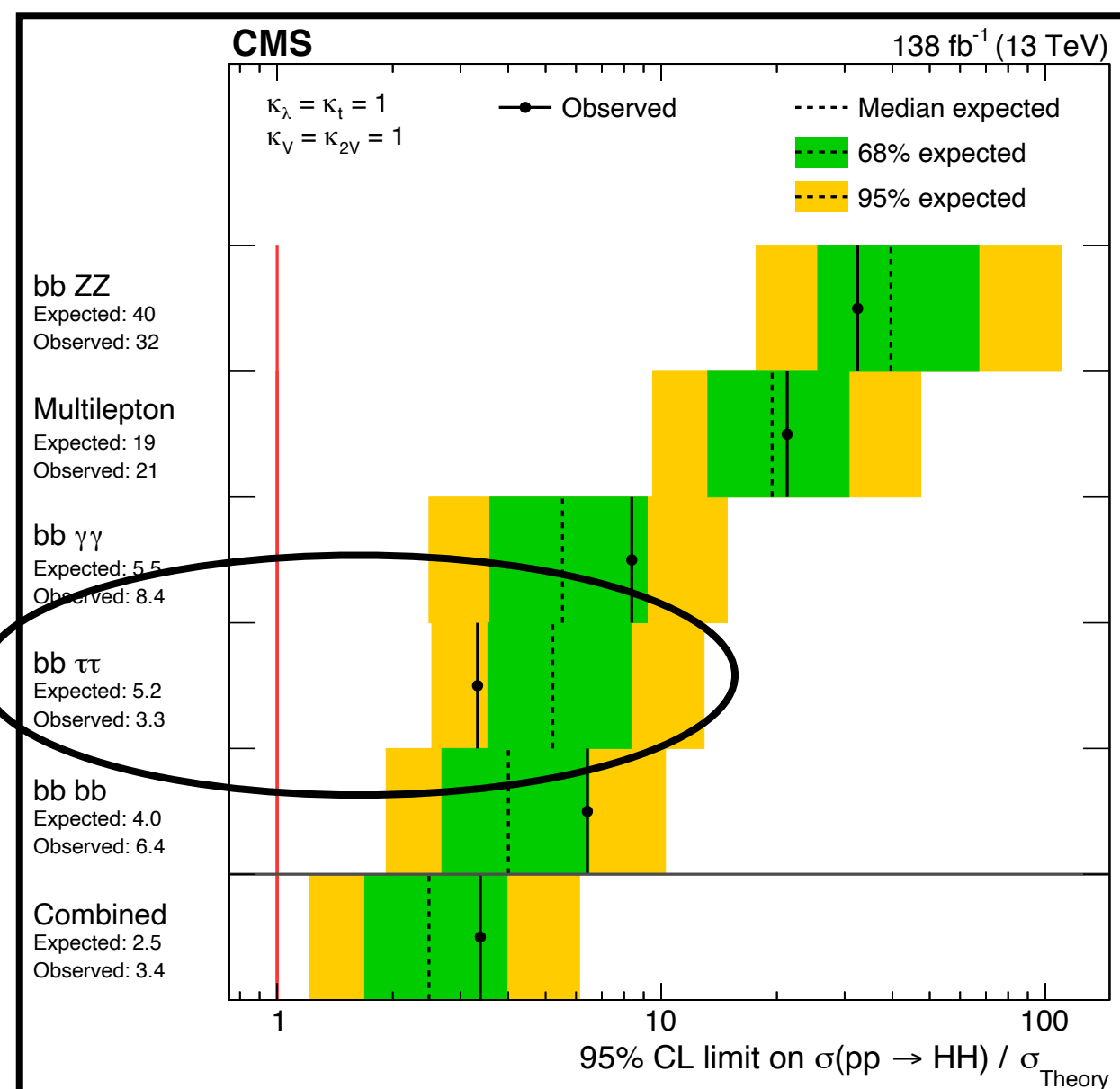
- Lavoriamo su **due analisi indipendenti**
- Produzione risonante di coppie di Higgs**
- Produzione non-risonante di coppie di Higgs**
- Il **canale di decadimento  $H \rightarrow bb$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$**  miglior compromesso per avere **alto S/B**



## Interessanti perché?

- Nuove particelle ad alta massa **strongly coupled** con bosoni di Higgs boson
- Unico processo** che permette la misura dell'**Higgs self coupling  $k(\lambda)$**

\*\* Accesso alla forma del potenziale di Higgs e dunque alla natura dell'EWBS



## Tesi proposte

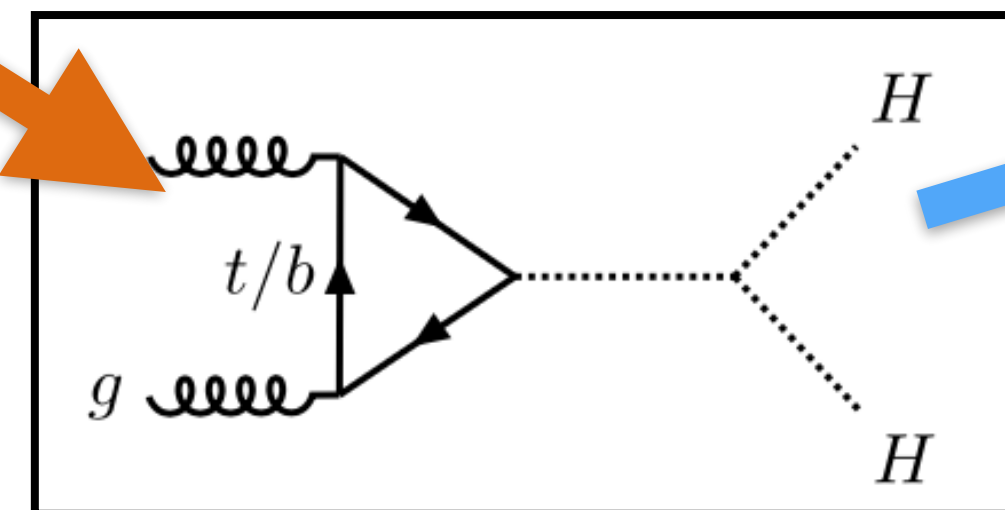
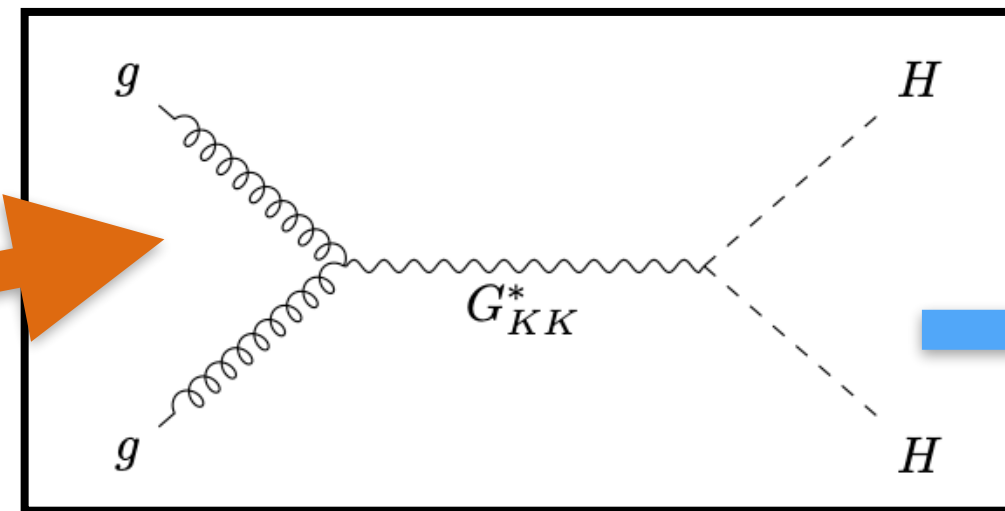
- HH risonante:** uso di ML per classificazione di eventi e ricostruzione di  $m_{HH}$  (stima 4V dei neutrini da  $\tau$ -decay)
- HH non-risonante:** sviluppo analisi esclusiva per eventi in cui almeno uno dei due Higgs ha alto  $p_T \rightarrow$  aumentare sensibilità per  $k(\lambda) \sim 1$
- HH non-risonante:** sviluppo di nuova strategia di trigger per Run3 per migliorare efficienza nel canale con due  $\tau$ -adronici

# Produzione di coppie di Higgs: $HH \rightarrow bb\tau^+\tau^-$

Simone Gennai  
Mauro Dinardo  
Raffaele Gerosa  
Martina Malberti

## Analisi condotte

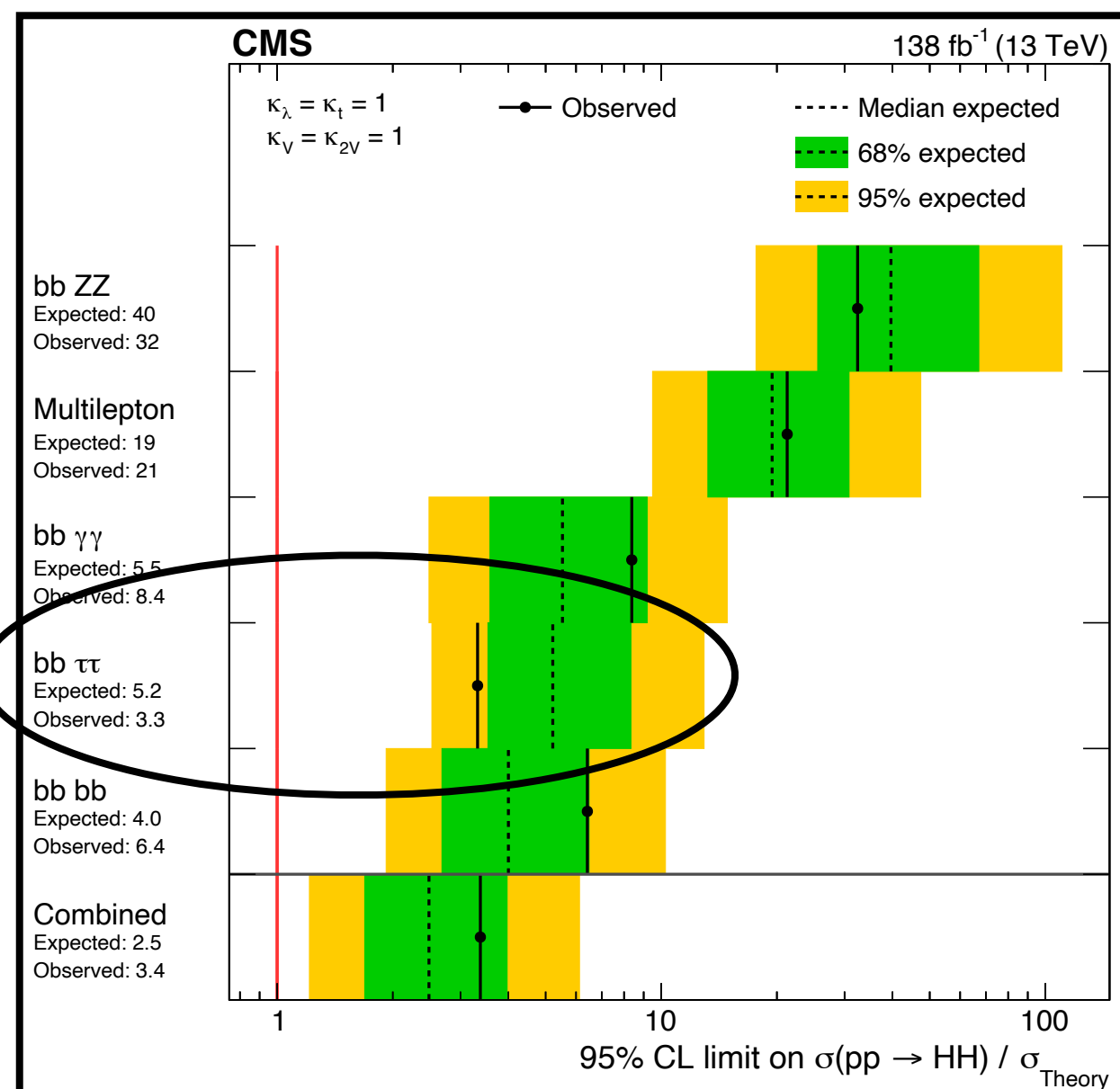
- Lavoriamo su **due analisi indipendenti**
- **Produzione risonante di coppie di Higgs**
- **Produzione non-risonante di coppie di Higgs**
- Il **canale di decadimento  $H \rightarrow bb$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$**  miglior compromesso per avere **alto S/B**



## Interessanti perché?

- **Nuove particelle** ad alta massa **strongly coupled** con bosoni di Higgs boson
- **Unico processo** che permette la misura dell'**Higgs self coupling  $k(\lambda)$**

\*\* Accesso alla forma del potenziale di Higgs e dunque alla natura dell'EWSB



## Tesi proposte

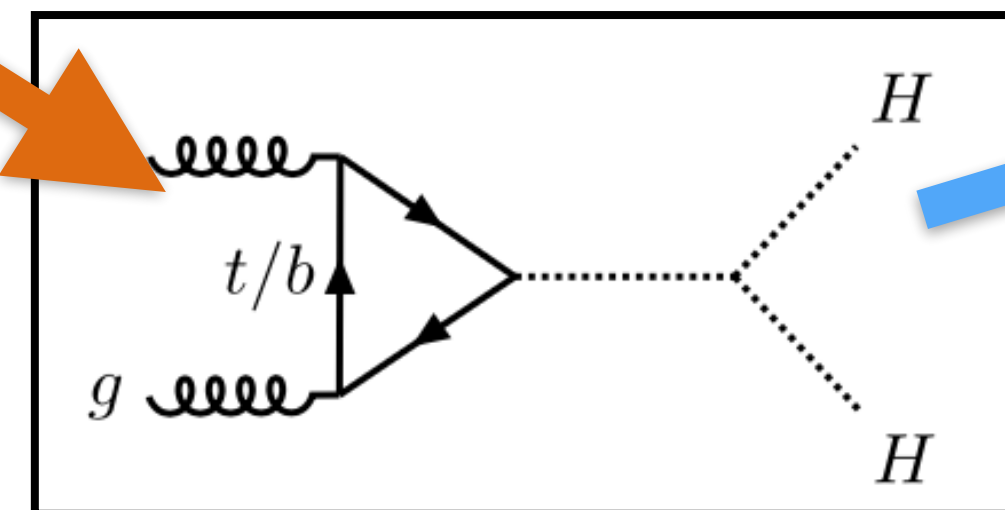
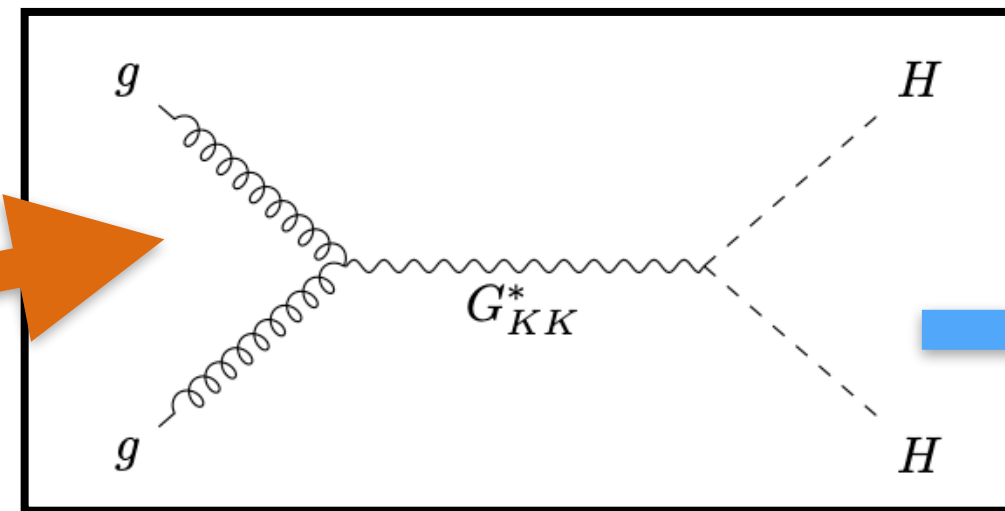
- **HH risonante:** uso di ML per classificazione di eventi e ricostruzione di  $m_{HH}$  (stima 4V dei neutrini da  $\tau$ -decay)
- **HH non-risonante:** sviluppo analisi esclusiva per eventi in cui almeno uno dei due Higgs ha alto  $p_T \rightarrow$  aumentare sensibilità per  $k(\lambda) \sim 1$
- **HH non-risonante:** sviluppo di nuova strategia di trigger per Run3 per migliorare efficienza nel canale con due  $\tau$ -adronici

# Produzione di coppie di Higgs: $HH \rightarrow bb\tau^+\tau^-$

Simone Gennai  
Mauro Dinardo  
Raffaele Gerosa  
Martina Malberti

## Analisi condotte

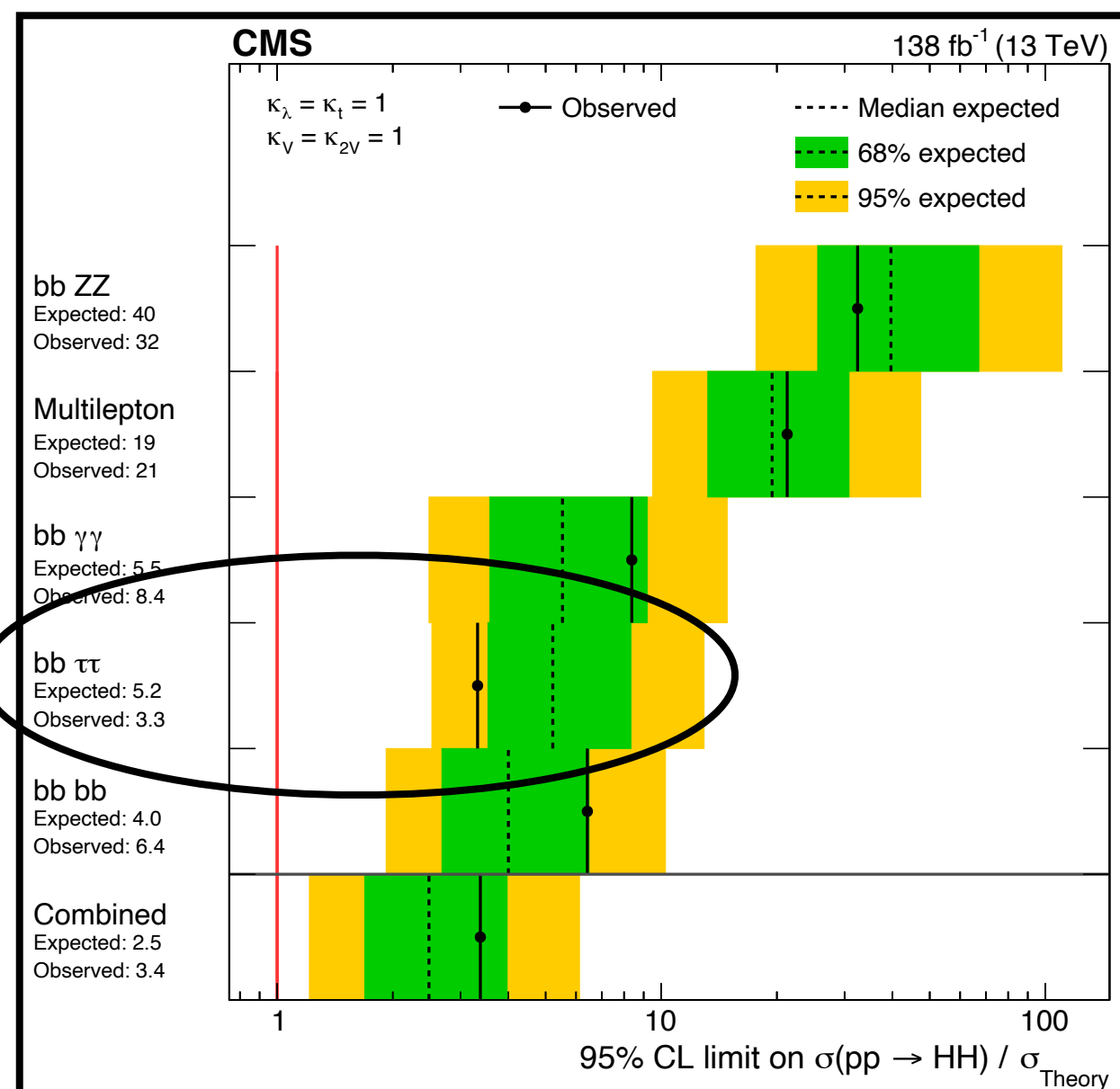
- Lavoriamo su **due analisi indipendenti**
- **Produzione risonante di coppie di Higgs**
- **Produzione non-risonante di coppie di Higgs**
- Il **canale di decadimento  $H \rightarrow bb$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$**  miglior compromesso per avere **alto S/B**



## Interessanti perché?

- **Nuove particelle** ad alta massa **strongly coupled** con bosoni di Higgs boson
- **Unico processo** che permette la misura dell'**Higgs self coupling  $k(\lambda)$**

\*\* Accesso alla forma del potenziale di Higgs e dunque alla natura dell'EWSB



## Tesi proposte

- **HH risonante:** uso di ML per classificazione di eventi e ricostruzione di  $m_{HH}$  (stima 4V dei neutrini da  $\tau$ -decay)
- **HH non-risonante:** sviluppo analisi esclusiva per eventi in cui almeno uno dei due Higgs ha alto  $p_T \rightarrow$  aumentare sensibilità per  $k(\lambda) \sim 1$
- **HH non-risonante:** sviluppo di nuova strategia di trigger per Run3 per migliorare efficienza nel canale con due  $\tau$ -adronici

# Scattering di bosoni vettori

<https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi>

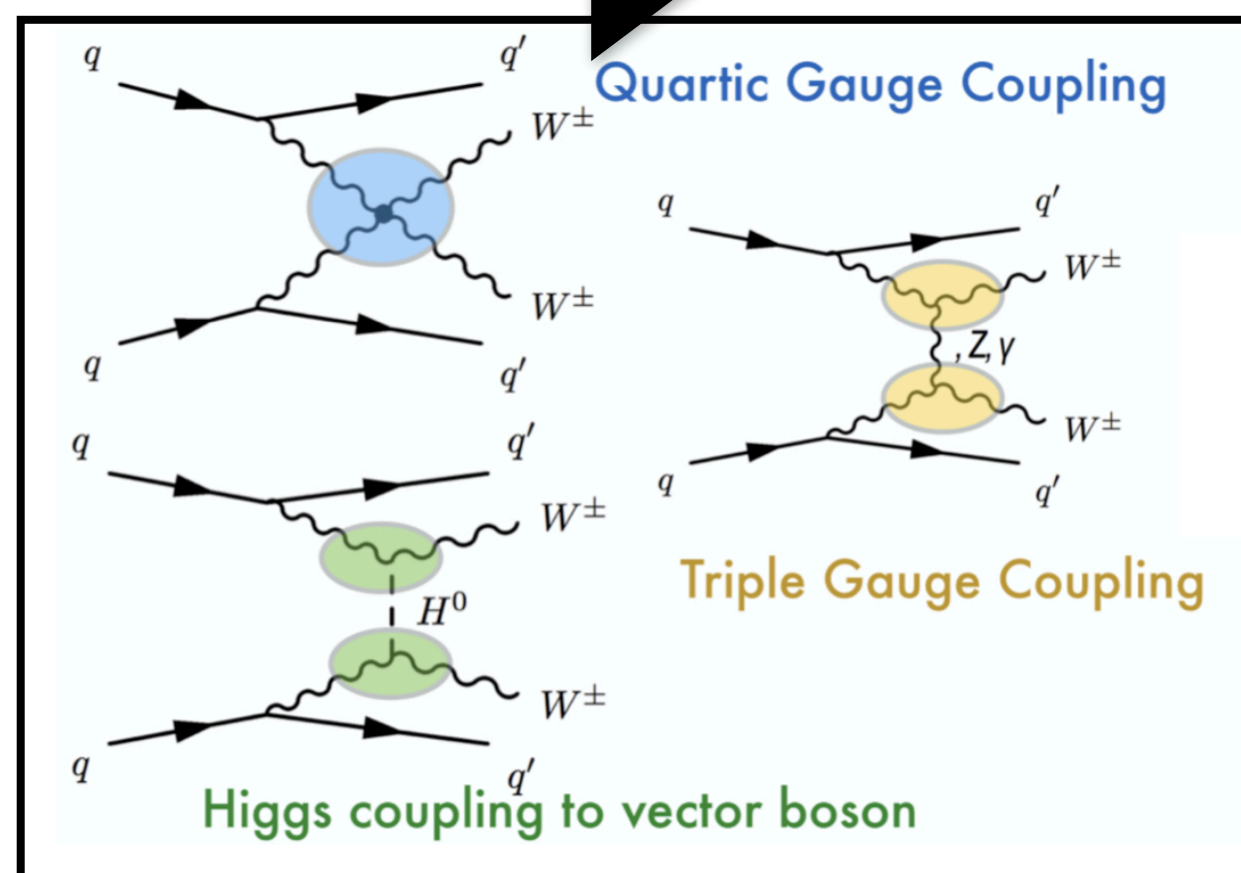
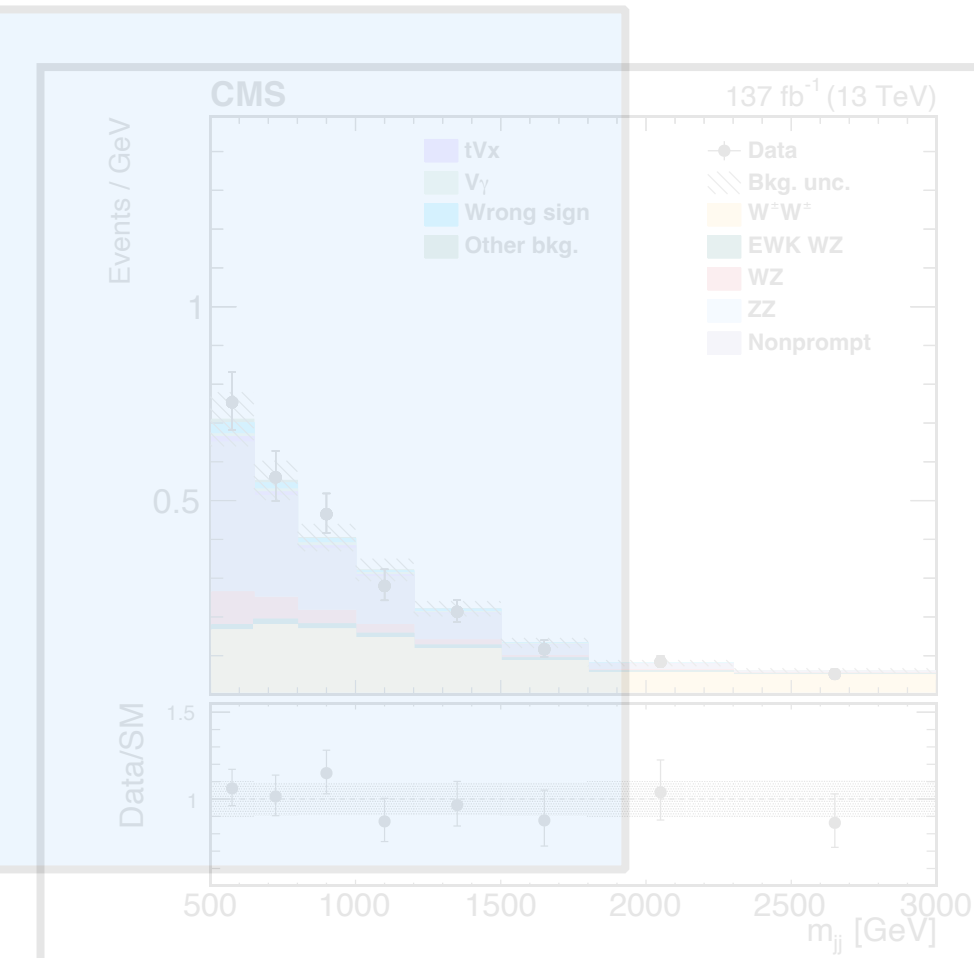
Pietro Govoni  
Marco Paganoni  
Andrea Massironi  
Raffaele Gerosa  
Simone Gennai

## Cosa è il vector boson scattering (VBS) ?

- **Produzione elettrodebole** di coppie di bosoni vettori (W,Z) + 2 jet adronici
- Molti diagrammi contribuiscono a questi processi
- **Unitarietà della sezione d'urto differenziale** garantita da mutua interferenza tra diagrammi
- **Processi rari osservati per la prima volta ad LHC**

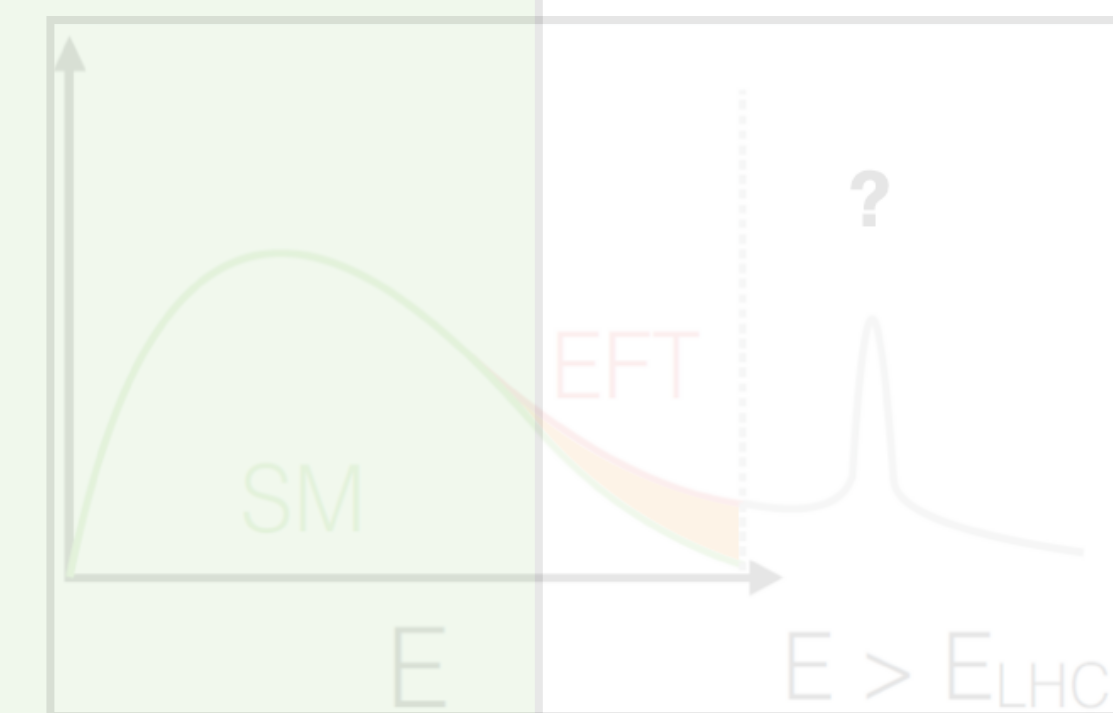
## Nuova fisica in VBS

- **Misure di precisione in VBS** costituiscono straordinaria sonda del settore EW dello SM
- **Nuova fisica (BSM)** potrebbe manifestarsi indirettamente modificando processi di VBS
- **BSM in VBS** descrivibile in teorie effettive di campo (EFT) dove nuovi operatori efficaci vengono introdotti



## Proposte di tesi

- Gruppo attivo negli studi di scattering  $W^\pm W^\pm$ ,  $W^\pm W^\mp$ ,  $WZ$
- **Proposta 1:** ottimizzazione fit EFT dim-6 per i principali operatori
- **Proposta 2:** sviluppo di ML per distinguere i contributi degli operatori EFT dal continuo SM
- **Proposta 3:** sviluppo di ML per massimizzare la sensibilità allo scattering longitudinale tra bosoni vettori



# Scattering di bosoni vettori

<https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi>

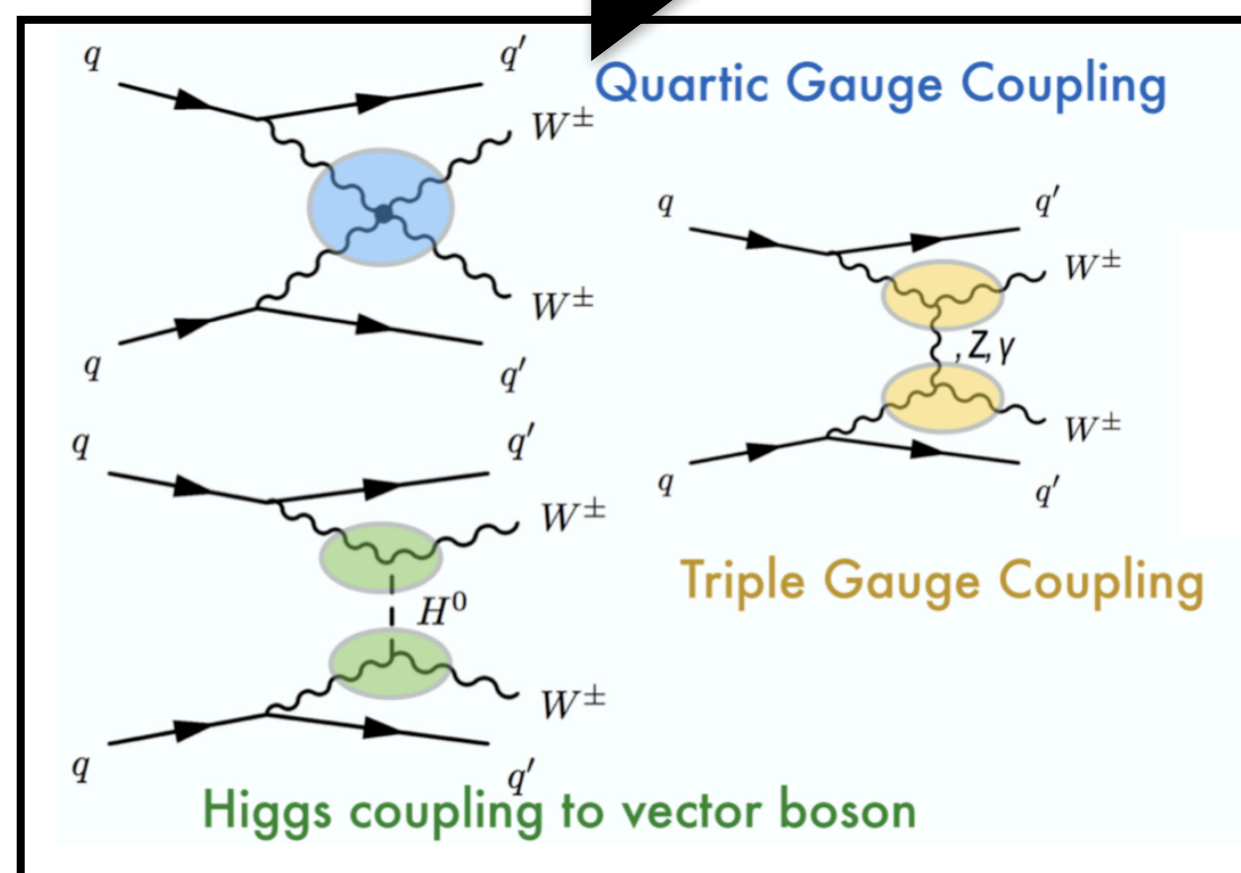
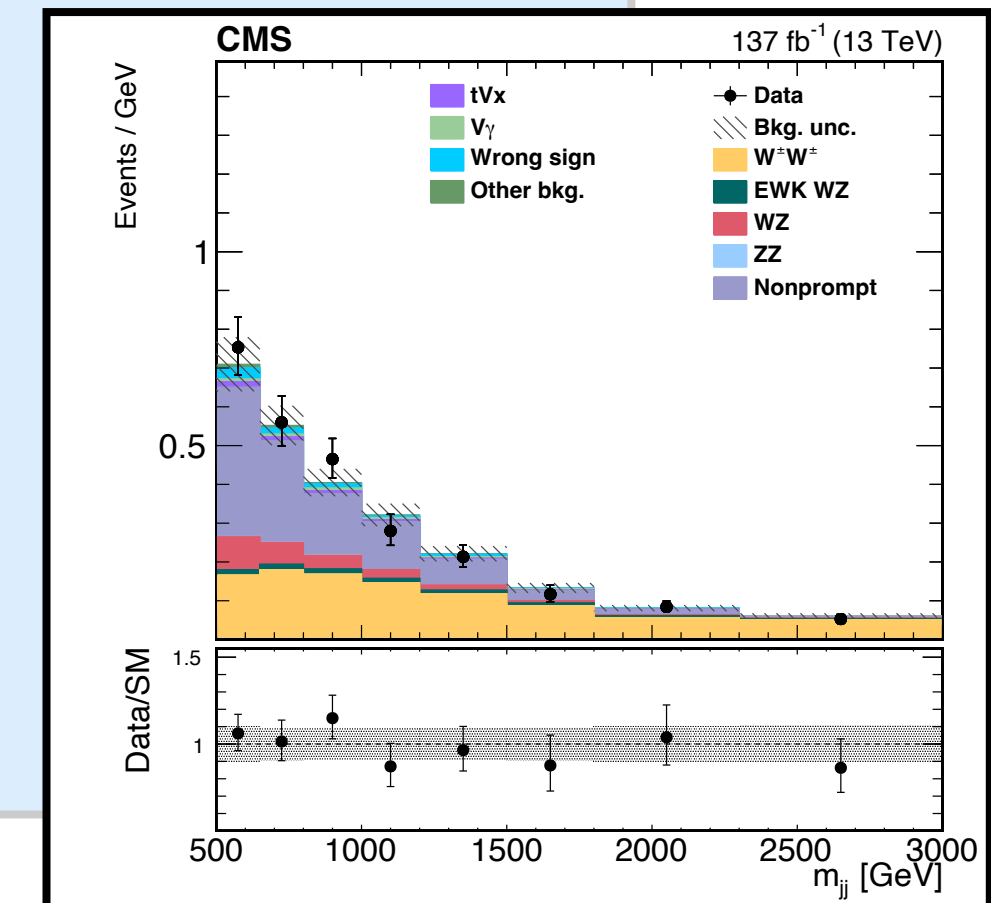
Pietro Govoni  
Marco Paganoni  
Andrea Massironi  
Raffaele Gerosa  
Simone Gennai

## Cosa è il vector boson scattering (VBS) ?

- **Produzione elettrodebole** di coppie di bosoni vettori (W,Z) + 2 jet adronici
- Molti diagrammi contribuiscono a questi processi
- **Unitarietà della sezione d'urto differenziale** garantita da mutua interferenza tra diagrammi
- **Processi rari osservati per la prima volta ad LHC**

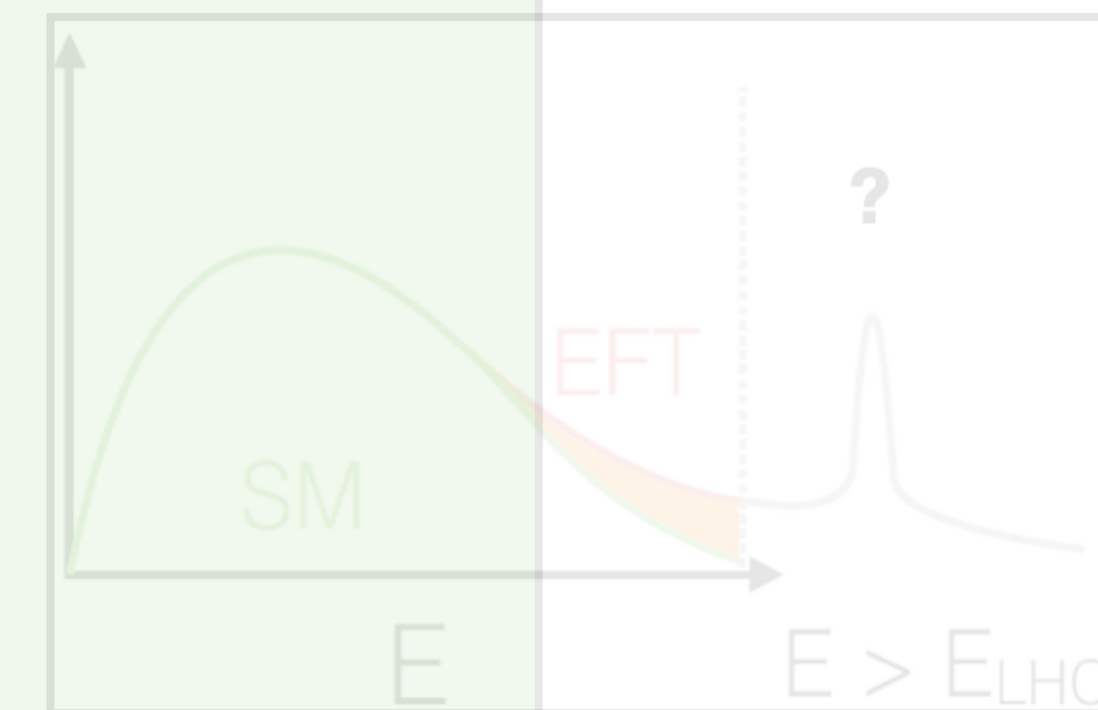
## Nuova fisica in VBS

- **Misure di precisione in VBS** costituiscono **straordinaria sonda** del settore EW dello SM
- **Nuova fisica (BSM)** potrebbe manifestarsi **indirettamente** modificando **processi di VBS**
- **BSM in VBS** descrivibile in **teorie effettive di campo (EFT)** dove nuovi operatori efficaci vengono introdotti



## Proposte di tesi

- Gruppo attivo negli studi di scattering  $W^\pm W^\pm$ ,  $W^\pm W^\mp$ , WZ
- **Proposta 1:** ottimizzazione fit EFT dim-6 per i principali operatori
- **Proposta 2:** sviluppo di ML per distinguere i contributi degli operatori EFT dal continuo SM
- **Proposta 3:** sviluppo di ML per massimizzare la sensibilità allo scattering longitudinale tra bosoni vettori





# Scattering di bosoni vettori

<https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi>

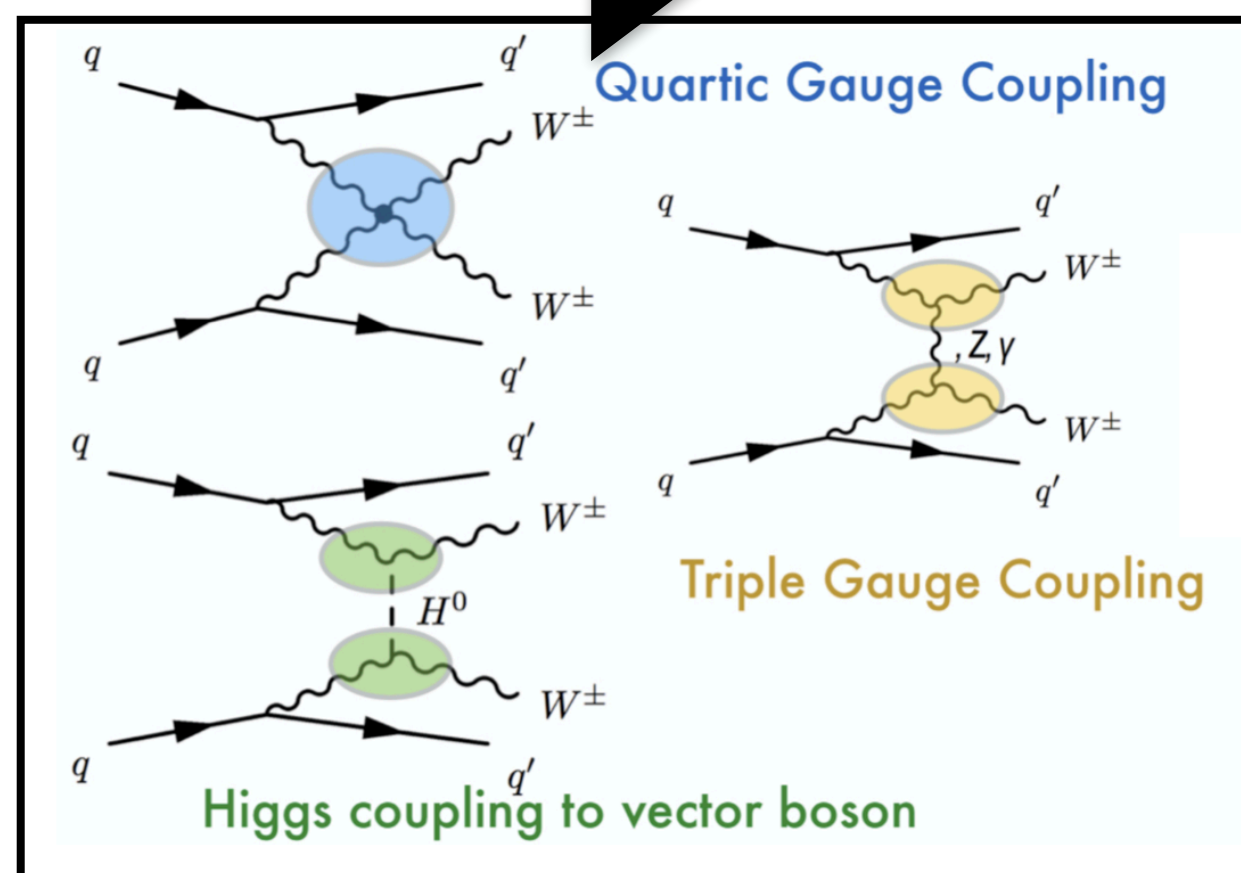
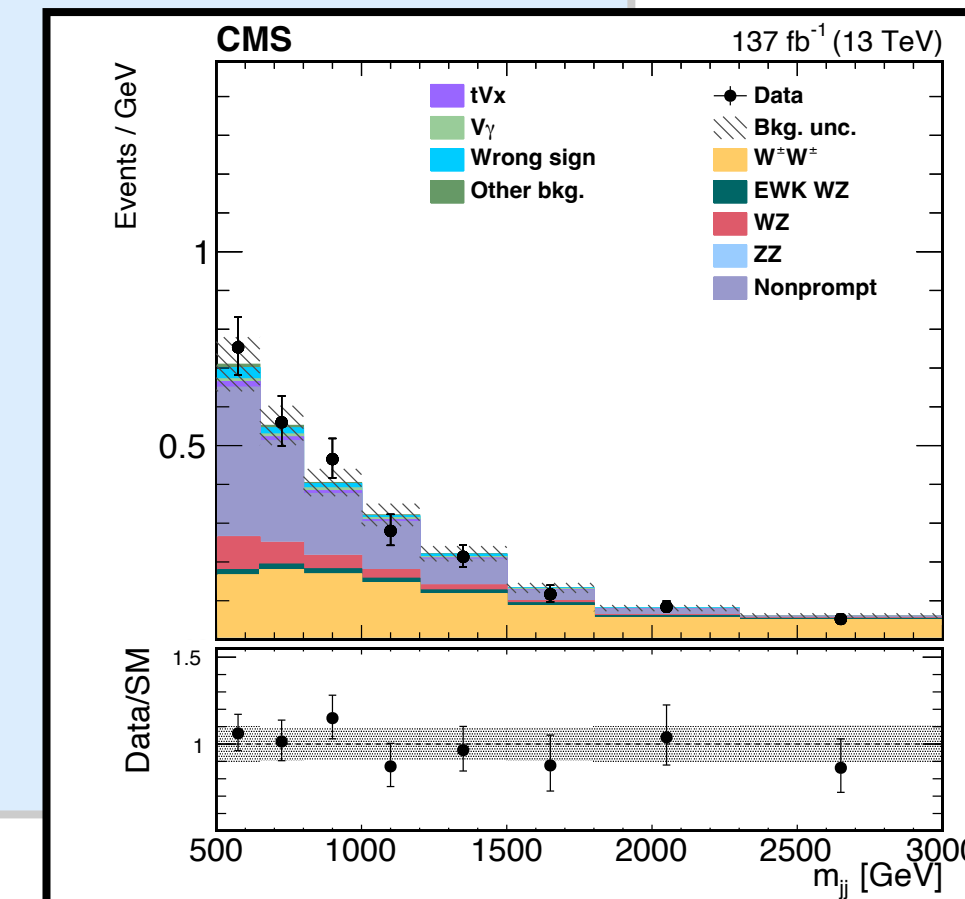
Pietro Govoni  
Marco Paganoni  
Andrea Massironi  
Raffaele Gerosa  
Simone Gennai

## Cosa è il vector boson scattering (VBS) ?

- **Produzione elettrodebole** di coppie di bosoni vettori (W,Z) + 2 jet adronici
- Molti diagrammi contribuiscono a questi processi
- **Unitarietà della sezione d'urto differenziale** garantita da mutua interferenza tra diagrammi
- **Processi rari osservati per la prima volta ad LHC**

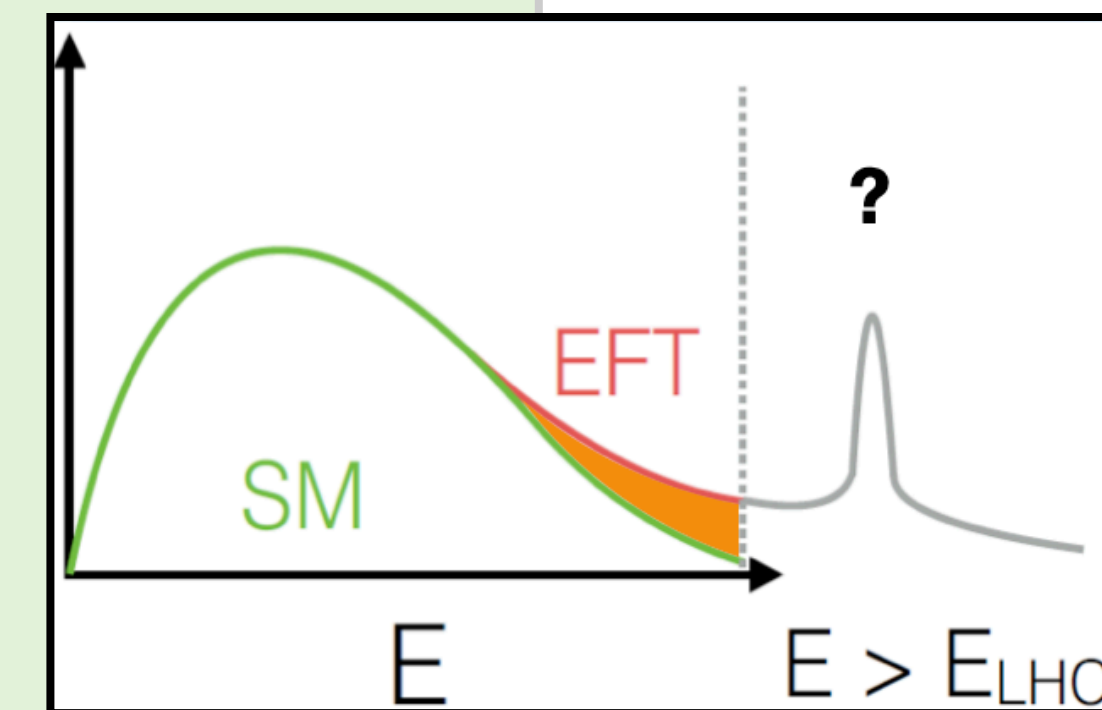
## Nuova fisica in VBS

- **Misure di precisione in VBS** costituiscono **straordinaria sonda** del settore EW dello SM
- **Nuova fisica (BSM)** potrebbe manifestarsi **indirettamente** modificando **processi di VBS**
- **BSM in VBS** descrivibile in **teorie effettive di campo (EFT)** dove nuovi operatori efficaci vengono introdotti



## Proposte di tesi

- Gruppo attivo negli studi di scattering  $W^\pm W^\pm$ ,  $W^\pm W^\mp$ , WZ
- **Proposta 1:** ottimizzazione fit EFT dim-6 per i principali operatori
- **Proposta 2:** sviluppo di ML per distinguere i contributi degli operatori EFT dal continuo SM
- **Proposta 3:** sviluppo di ML per massimizzare la sensibilità allo scattering longitudinale tra bosoni vettori



# Produzione $W^+W^-$ e VBF-Z

Pietro Govoni  
Marco Paganoni  
Andrea Massironi  
Raffaele Gerosa  
Simone Gennai

<https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi>

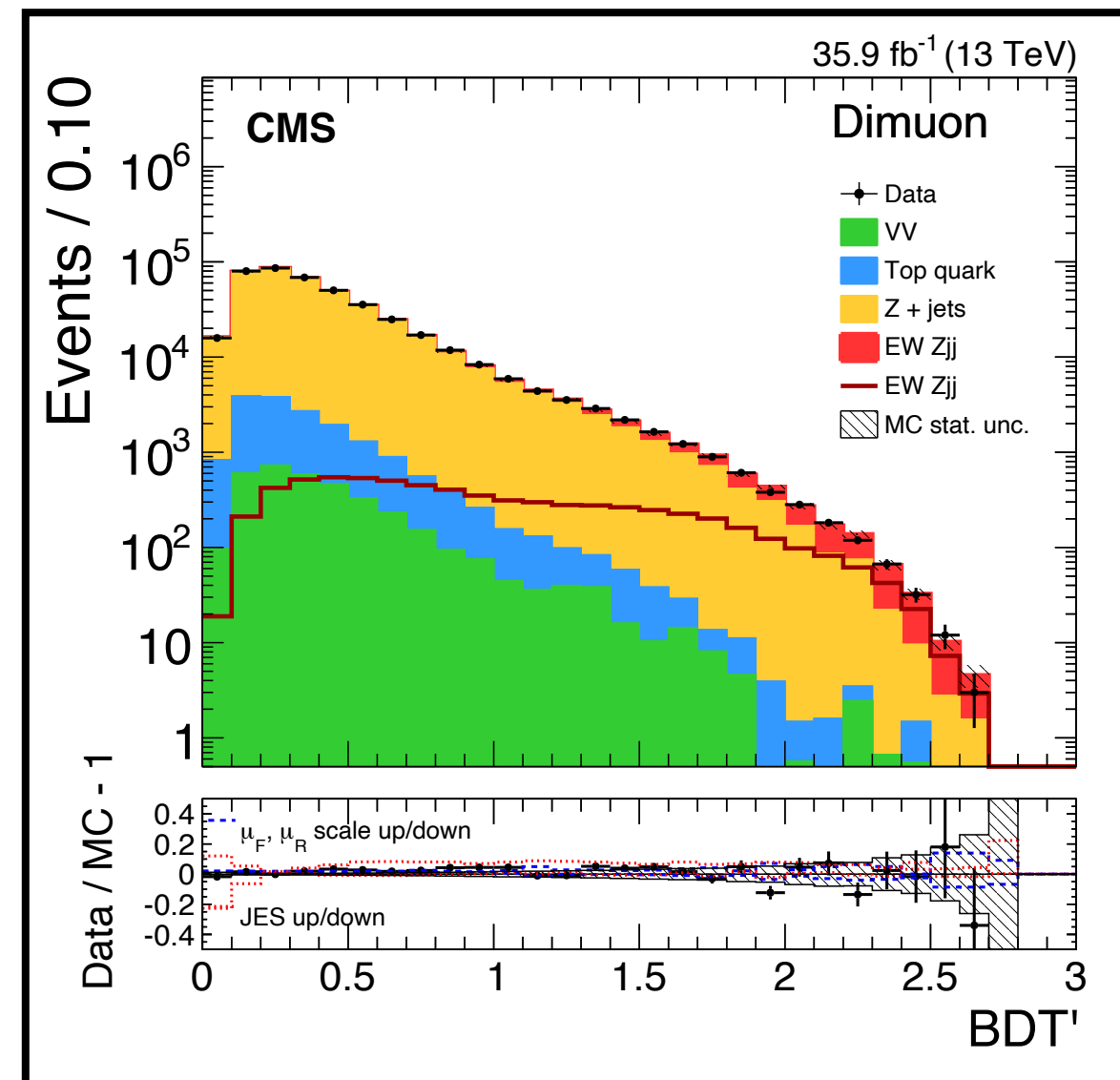
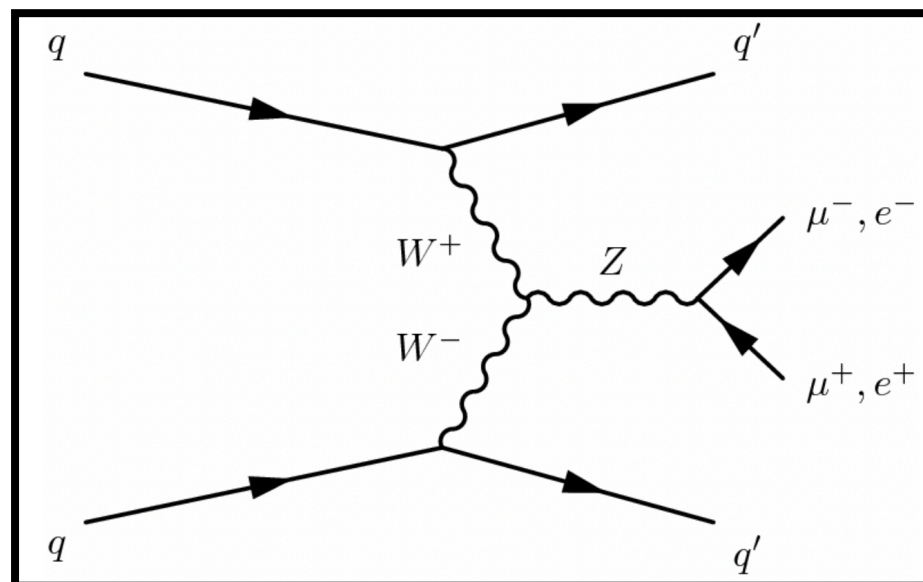
## Perché sono interessanti?

- Possono essere **isolati** nei dati con **buona purezza**
- Sono sorgenti di fondo in molte importanti misure ( $H \rightarrow WW$ ,  $H \rightarrow \mu\mu$ ,  $H \rightarrow \text{inv}$ , etc)
- **Sensibili** a operatori **EFT** che **non entrano** nei processi **VBS**
- **Sensibili** a modelli di **parton shower**, **correzioni EW** .. etc



## Proposte WW

- **Sviluppare analisi EFT:** selezioni, stima delle sistematiche, sviluppo fit EFT principali operatori in previsione di una combinazione con VBS
- **Sviluppare una stima più precisa** del fondo da **leptoni non-prompt** (jet identificati come  $\mu$  o  $e$ ) basata su **ML**



## Proposte VBF-Z

- **Sviluppare analisi EFT:** selezioni, stima delle sistematiche, sviluppo fit EFT principali operatori in previsione di una combinazione con VBS
- **Uso di ML** per **separare segnale dal fondo** e, simultaneamente, **diagonalizzare la matrice di risposta** per unfolding di misure differenziali

# Produzione $W^+W^-$ e VBF-Z

Pietro Govoni  
Marco Paganoni  
Andrea Massironi  
Raffaele Gerosa  
Simone Gennai

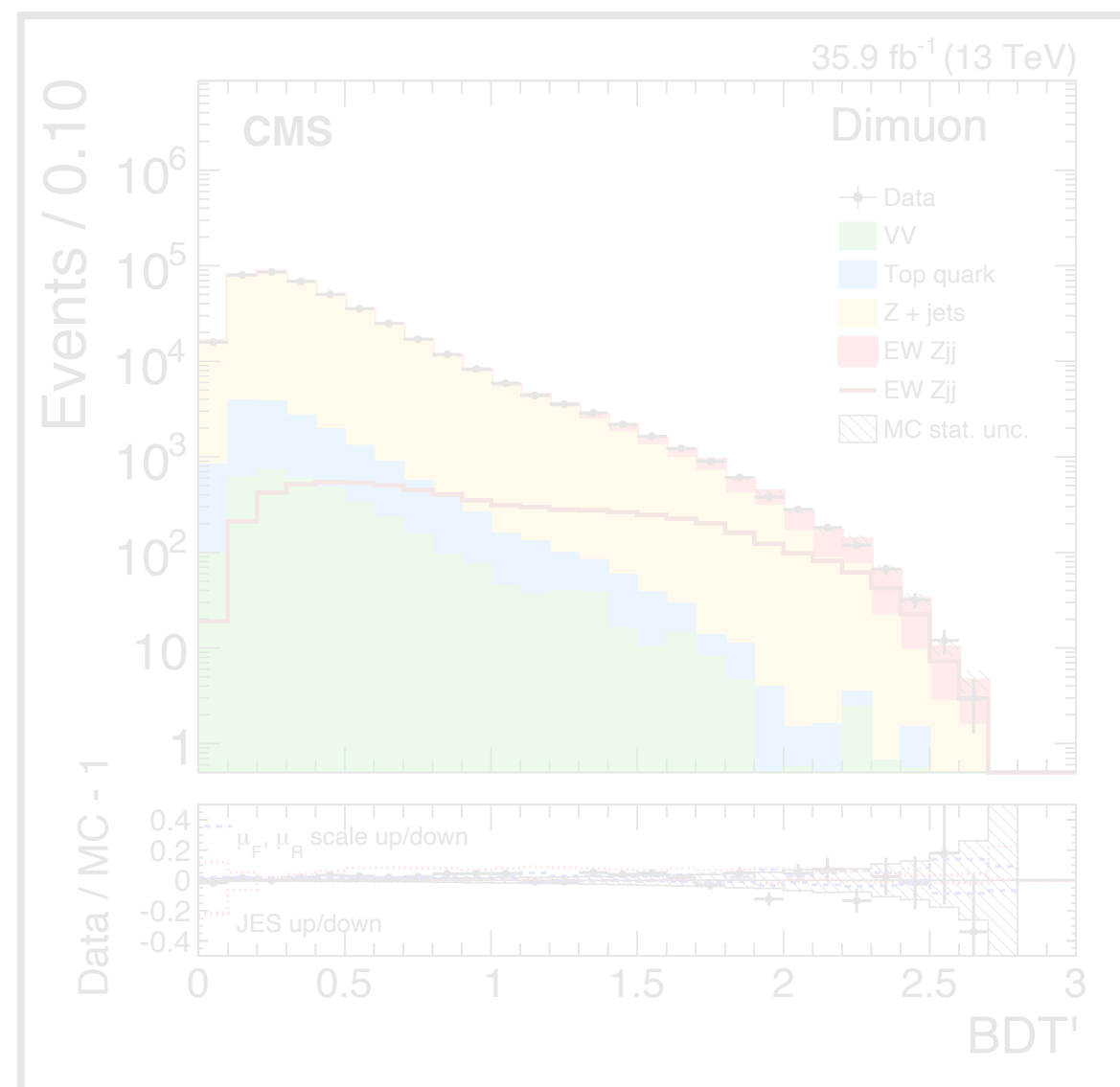
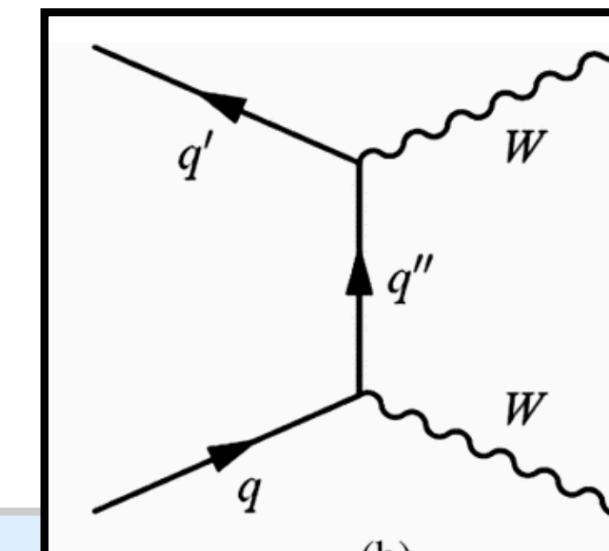
<https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi>

## Perché sono interessanti?

- Possono essere **isolati** nei dati con **buona purezza**
- Sono sorgenti di fondo in molte importanti misure ( $H \rightarrow WW$ ,  $H \rightarrow \mu\mu$ ,  $H \rightarrow \text{inv}$ , etc)
- **Sensibili** a operatori **EFT** che **non entrano** nei processi **VBS**
- **Sensibili** a modelli di **parton shower**, **correzioni EW** .. etc

## Proposte WW

- **Sviluppare analisi EFT:** selezioni, stima delle sistematiche, sviluppo fit EFT principali operatori in previsione di una combinazione con VBS
- **Sviluppare una stima più precisa** del fondo da **leptoni non-prompt** (jet identificati come  $\mu$  o  $e$ ) basata su **ML**



## Proposte VBF-Z

- **Sviluppare analisi EFT:** selezioni, stima delle sistematiche, sviluppo fit EFT principali operatori in previsione di una combinazione con VBS
- **Uso di ML per separare segnale dal fondo** e, simultaneamente, **diagonalizzare la matrice di risposta** per unfolding di misure differenziali

# Produzione $W^+W^-$ e VBF-Z

Pietro Govoni  
Marco Paganoni  
Andrea Massironi  
Raffaele Gerosa  
Simone Gennai

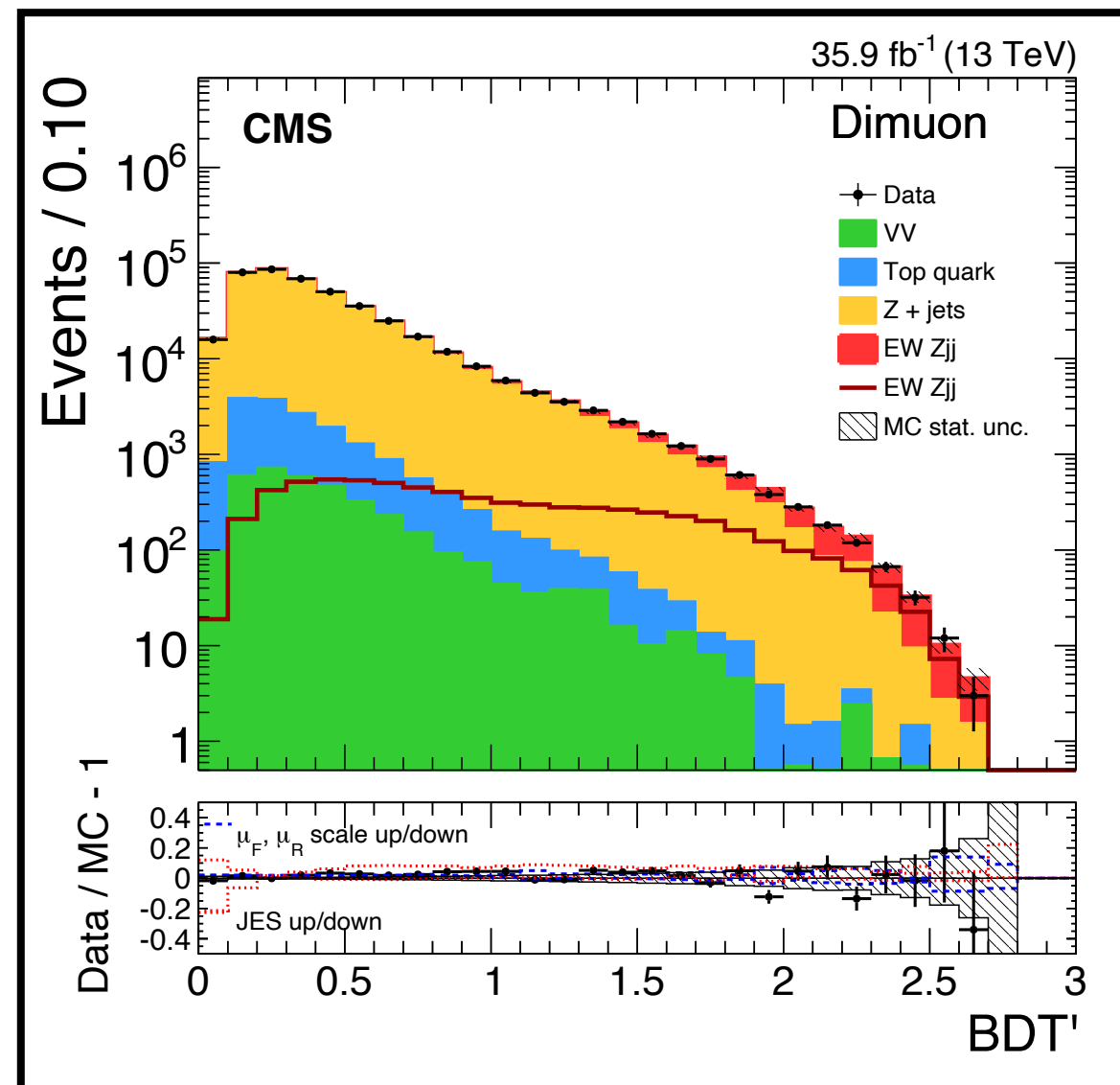
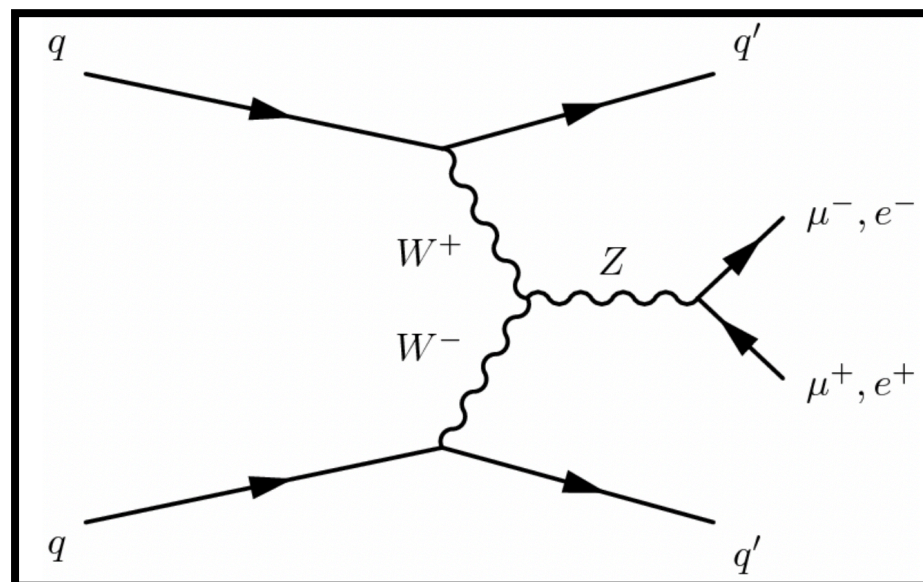
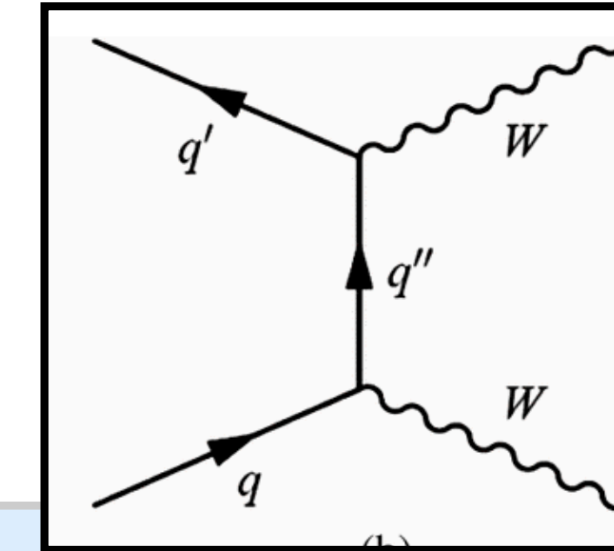
<https://sites.google.com/unimib.it/govoni-tesi>

## Perché sono interessanti?

- Possono essere **isolati** nei dati con **buona purezza**
- Sono sorgenti di fondo in molte importanti misure ( $H \rightarrow WW$ ,  $H \rightarrow \mu\mu$ ,  $H \rightarrow \text{inv}$ , etc)
- **Sensibili** a operatori **EFT** che **non entrano** nei processi **VBS**
- **Sensibili** a modelli di **parton shower**, **correzioni EW** .. etc

## Proposte WW

- **Sviluppare analisi EFT:** selezioni, stima delle sistematiche, sviluppo fit EFT principali operatori in previsione di una combinazione con VBS
- **Sviluppare una stima più precisa** del fondo da **leptoni non-prompt** (jet identificati come  $\mu$  o  $e$ ) basata su **ML**



## Proposte VBF-Z

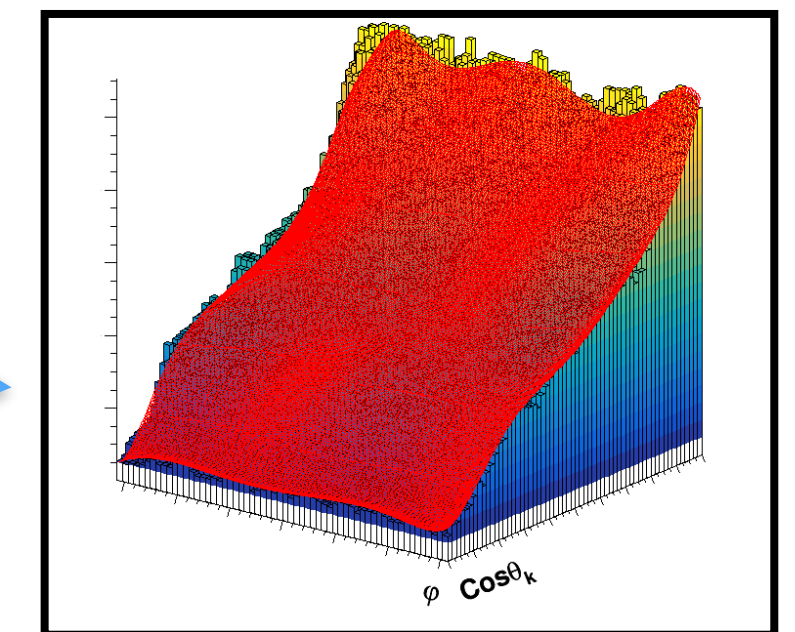
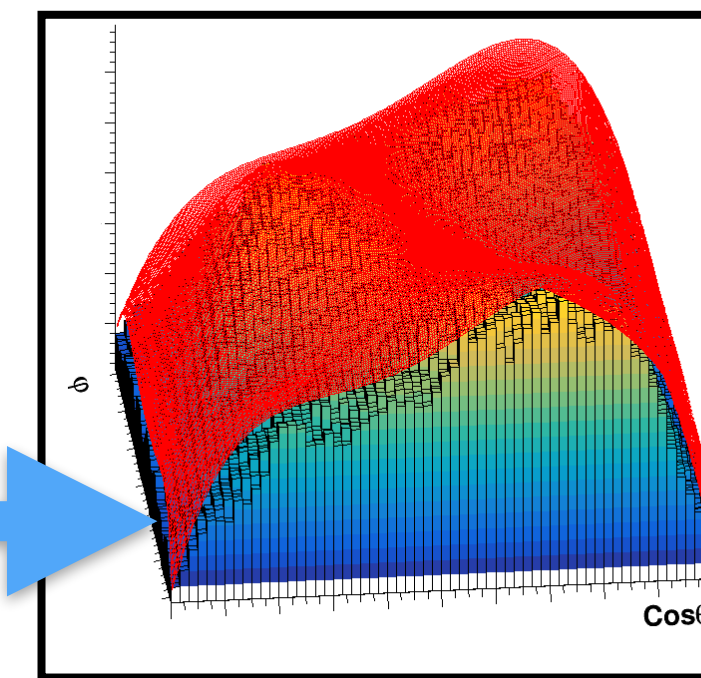
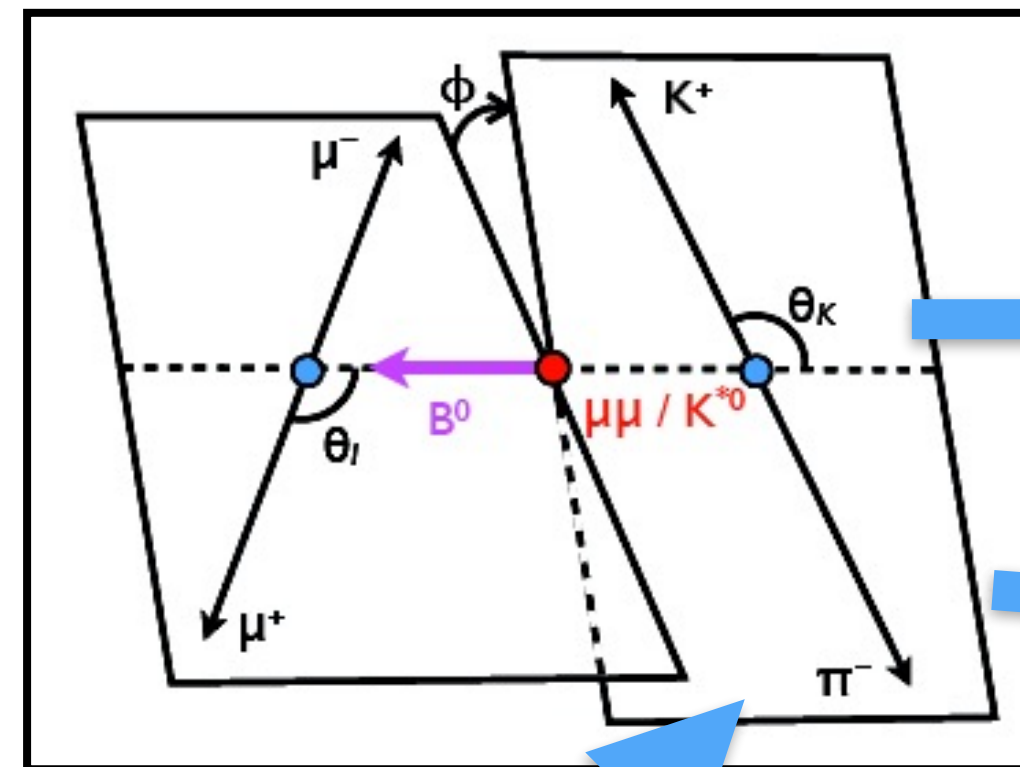
- **Sviluppare analisi EFT:** selezioni, stima delle sistematiche, sviluppo fit EFT principali operatori in previsione di una combinazione con VBS
- **Uso di ML** per **separare segnale dal fondo** e, simultaneamente, **diagonalizzare la matrice di risposta** per unfolding di misure differenziali

# Decadimento debole $B_0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$

Mauro Dinardo  
Paolo Dini  
Sandra Malvezzi

## Perché é interessante?

- Il decadimento  $b \rightarrow s \mu^+ \mu^-$  é un esempio di **flavour changing neutral current (FCNC)**
- Processo **soppresso a tree-level** nello SM
- Processo raro  $\rightarrow$  terreno ideale per **ricerca indiretta di nuova fisica**

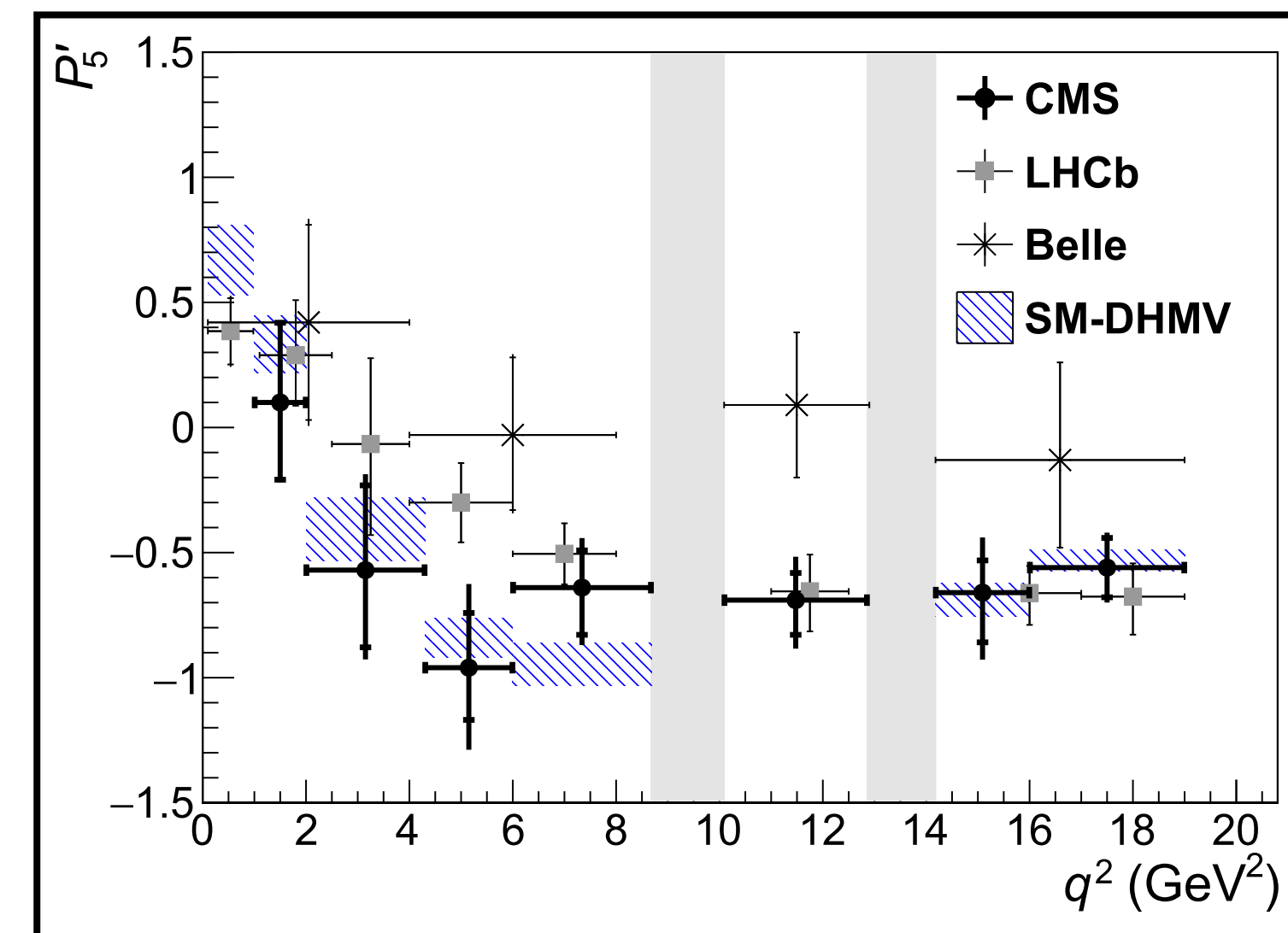


## Metodo di analisi

- **Analisi angolare** sui prodotti di decadimento ricostruiti in CMS
- Misurare **osservabili** con **ridotte incertezze teoriche**

## Proposte di tesi

- **Finalizzare** analisi con tutti i **dati** del Run2 di LHC
- **Sviluppare tecniche** di **ML** per **studio angolare** eventi di **fondo** ed **efficienza** di ricostruzione del **segnale**

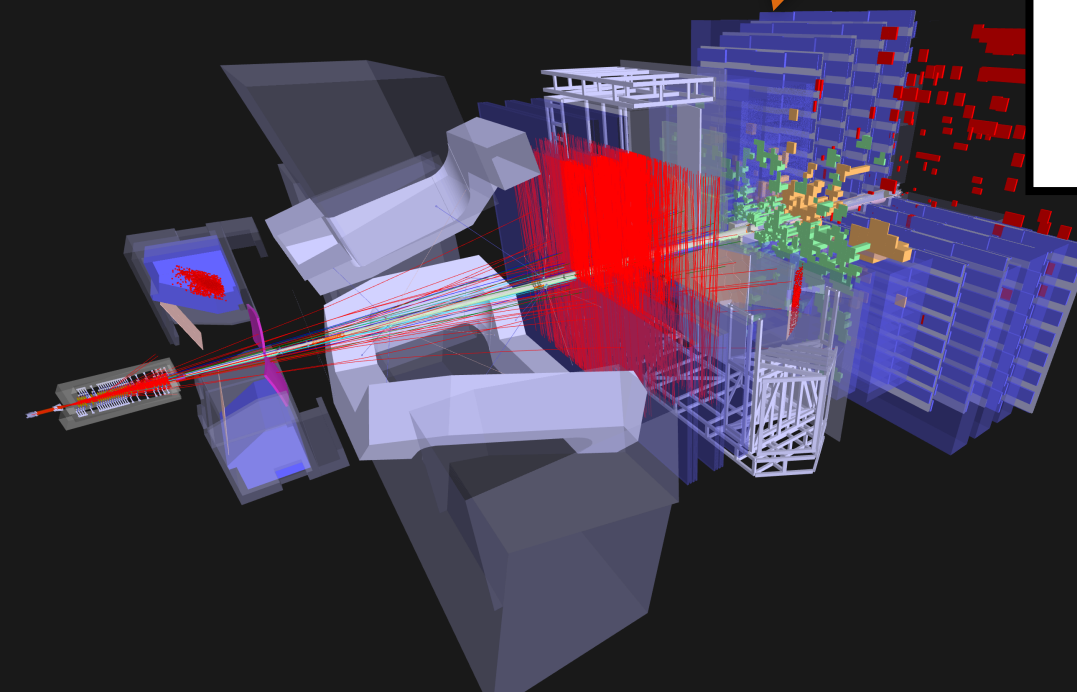
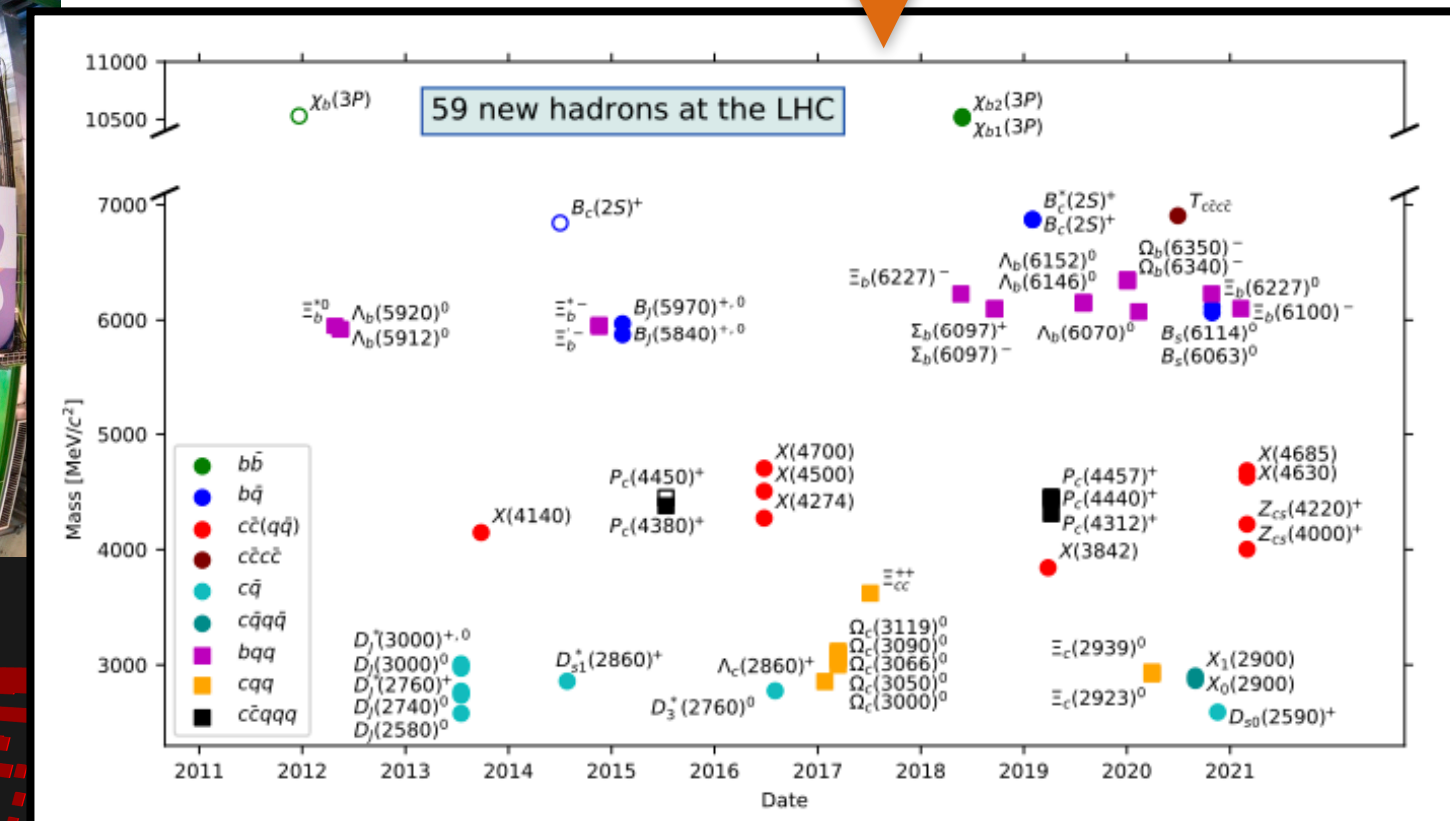
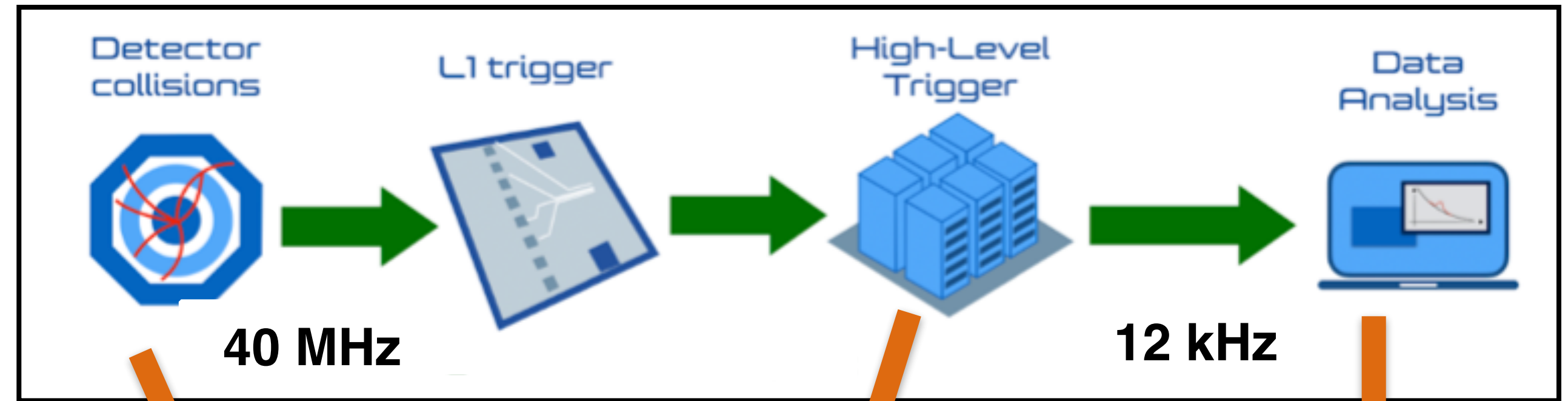


# Introduzione a LHCb

## LHCb in a nutshell

- **LHCb** é un esperimento specializzato in B e C physics e misure di violazione di simmetria CP
- Non é un detector ermetico **ma uno spettrometro in avanti** → adroni con (b,c) prodotti ad alta rapidità
- **Dipolo magnetico (4 T/m)** usato per curvare le particelle cariche all'interno del tracciatore
- **Punti di forza:** elevata efficienza di traccia (>98%), elevata risoluzione in  $p_T$  (0.5%) e di identificazione (>90%) di  $K/\mu/\pi/p/e$ , elevata risoluzione sul tempo di volo (45 fs)
- In grado di **salvare su disco 12 kHz** di eventi pronti per essere analizzati (**trigger puramente software**)

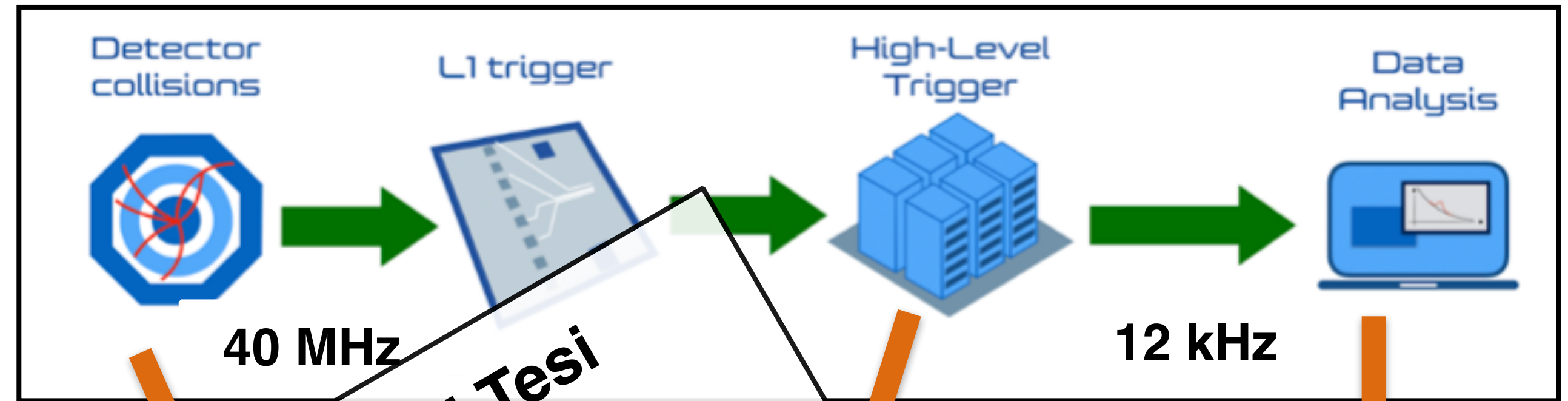
<https://sites.google.com/unimib.it/lhcbbicocca/home>



# Introduzione a LHCb

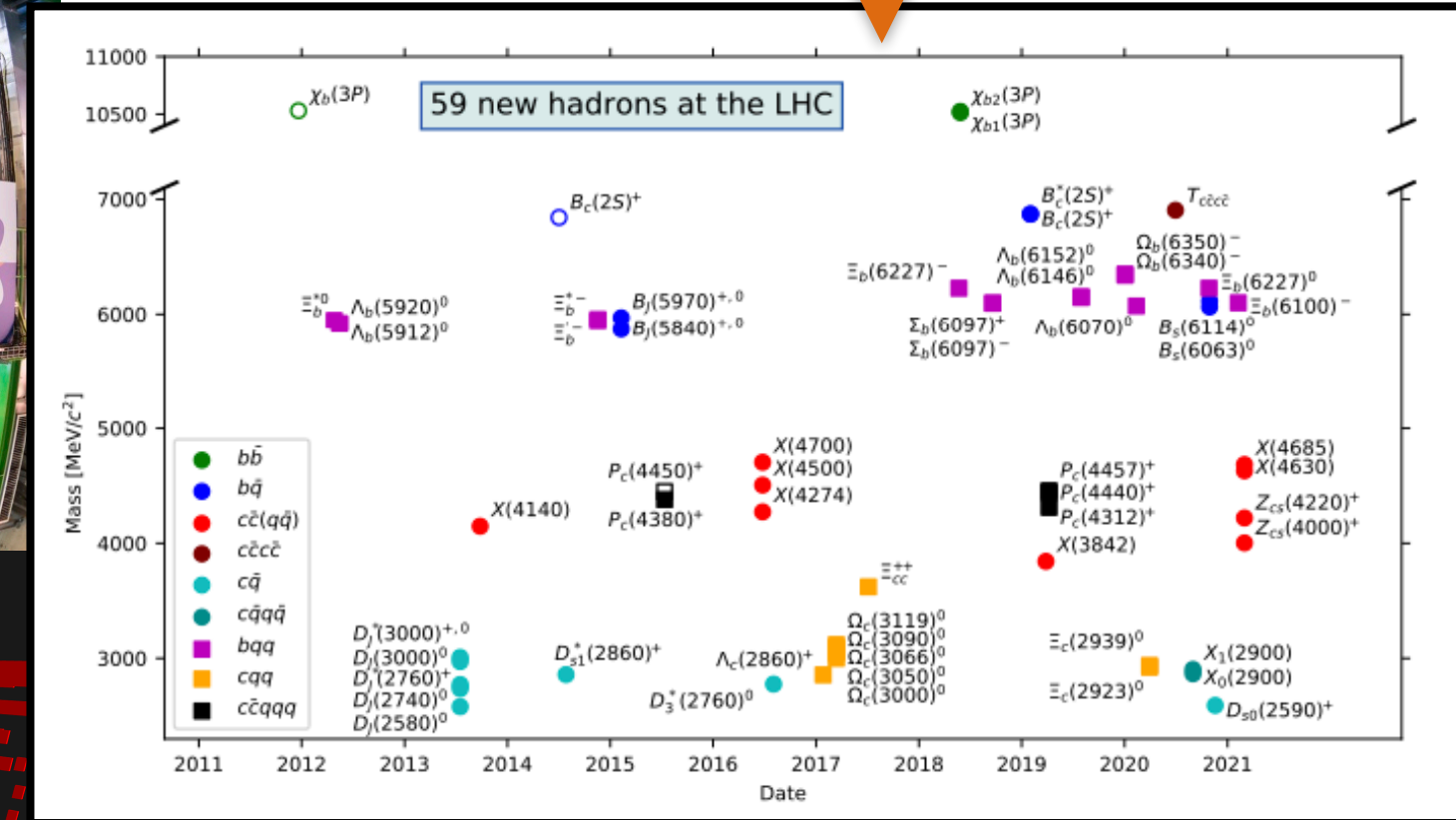
## LHCb in a nutshell

- **LHCb** é un esperimento specializzato in B e C physics e misure di violazione di simmetria CP
- Non é un detector ermetico **ma uno spettrometro in avanti** → adroni con (b,c) prodotti ad alta rapidità
- **Dipolo magnetico (4 T/m)** usato per curvare le particelle cariche all'interno del tracciatore
- **Punti di forza:** elevata efficienza di traccia (>98%), elevata risoluzione in  $p_T$  (0.5%), elevata identificazione (>90%) di  $K/\mu/\pi/p/e$ , elevata risoluzione sul tempo di volo (45 fs)
- In grado di **salvare su disco 12 kHz** di eventi pronti per essere analizzati (**trigger puramente software**)



**Referenti per i Progetti di Tesi**

- Marta Calvi: [marta.calvi@unimib.it](mailto:marta.calvi@unimib.it)
- Maurizio Martinelli: [maurizio.martinelli@unimib.it](mailto:maurizio.martinelli@unimib.it)



<https://sites.google.com/unimib.it/lhcbbicocca/home>

# Misura di $V_{ub}$ in $B_s \rightarrow K^\pm \mu^\mp \nu_\mu$

Marta Calvi

Maurizio Martinelli

Martino Borsato

## Perché è importante?

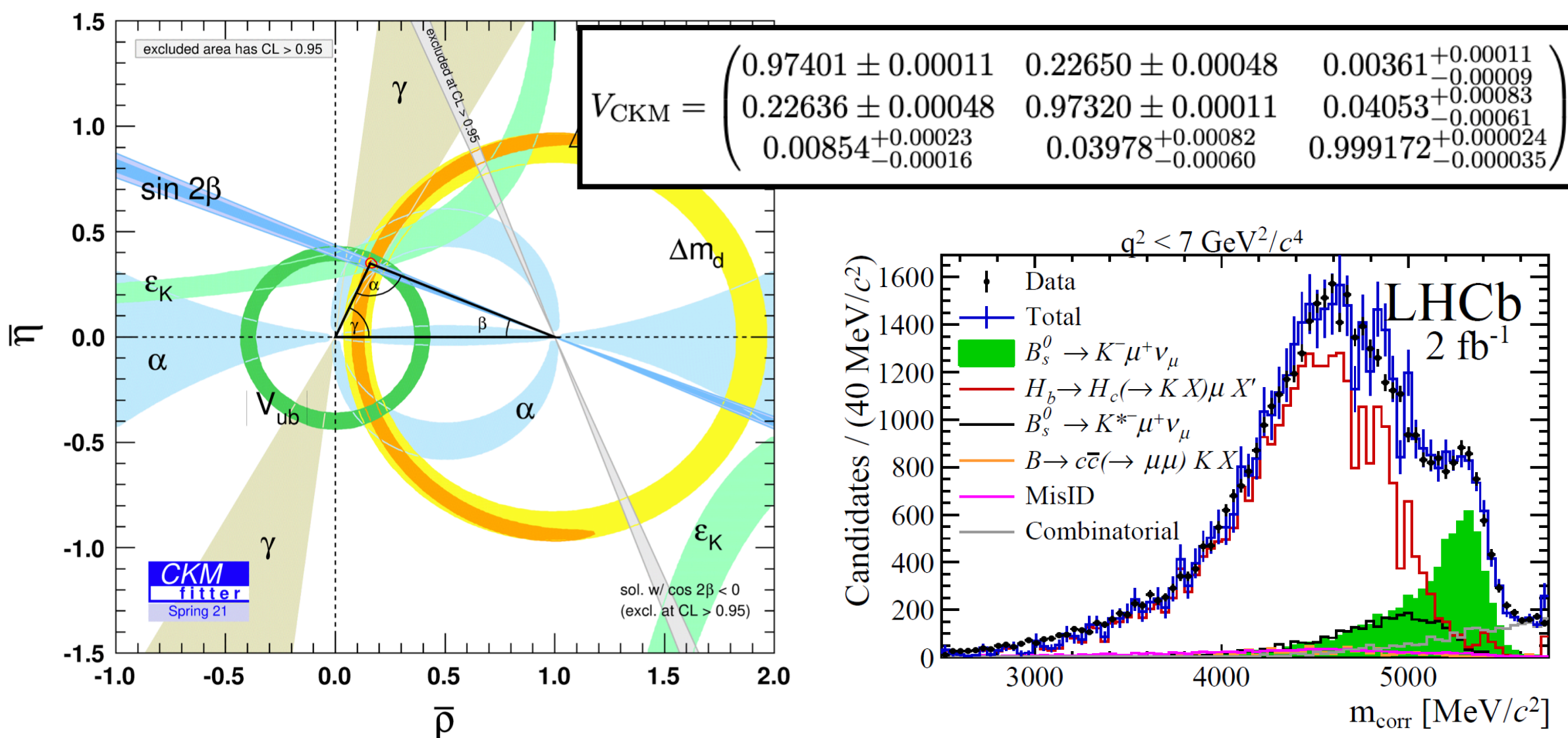
- Interazioni deboli “violano” la simmetria di flavour dello SM  $\rightarrow$  matrice di mixing CKM
- Termini off-diagonali sono tanto più piccoli tanto ci si allontana dalla diagonale
- $V_{ub}$  è il termine meno conosciuto
- $V_{ub}$  si misura ad LHCb con elevata precisione grazie all'enorme sample di mesoni B collezionato

## Come lo si misura

- Canale sensibile è il decadimento debole di  $B_s \rightarrow K^\pm \mu^\mp \nu_\mu$
- Da questo canale si può estrarre  $|V_{ub}/V_{cb}|$  utilizzando  $B_s \rightarrow D_s \mu^\mp \nu_\mu$  come canale di normalizzazione

## Proposta di tesi

- Misura di  $V_{ub}$  utilizzando tutti i dati raccolti nel Run2 di LHC
- Aggiornare e misurare selezione dei candidati
- Reiezione del fondo attraverso uso di ML
- Fit di estrazione del segnale in bins di  $q^2$  per determinare fattori di forma legati a QCD non-perturbativa





# Test universalità leptonica: misura di $R(D^*)$

Marta Calvi

Maurizio Martinelli

Martino Borsato

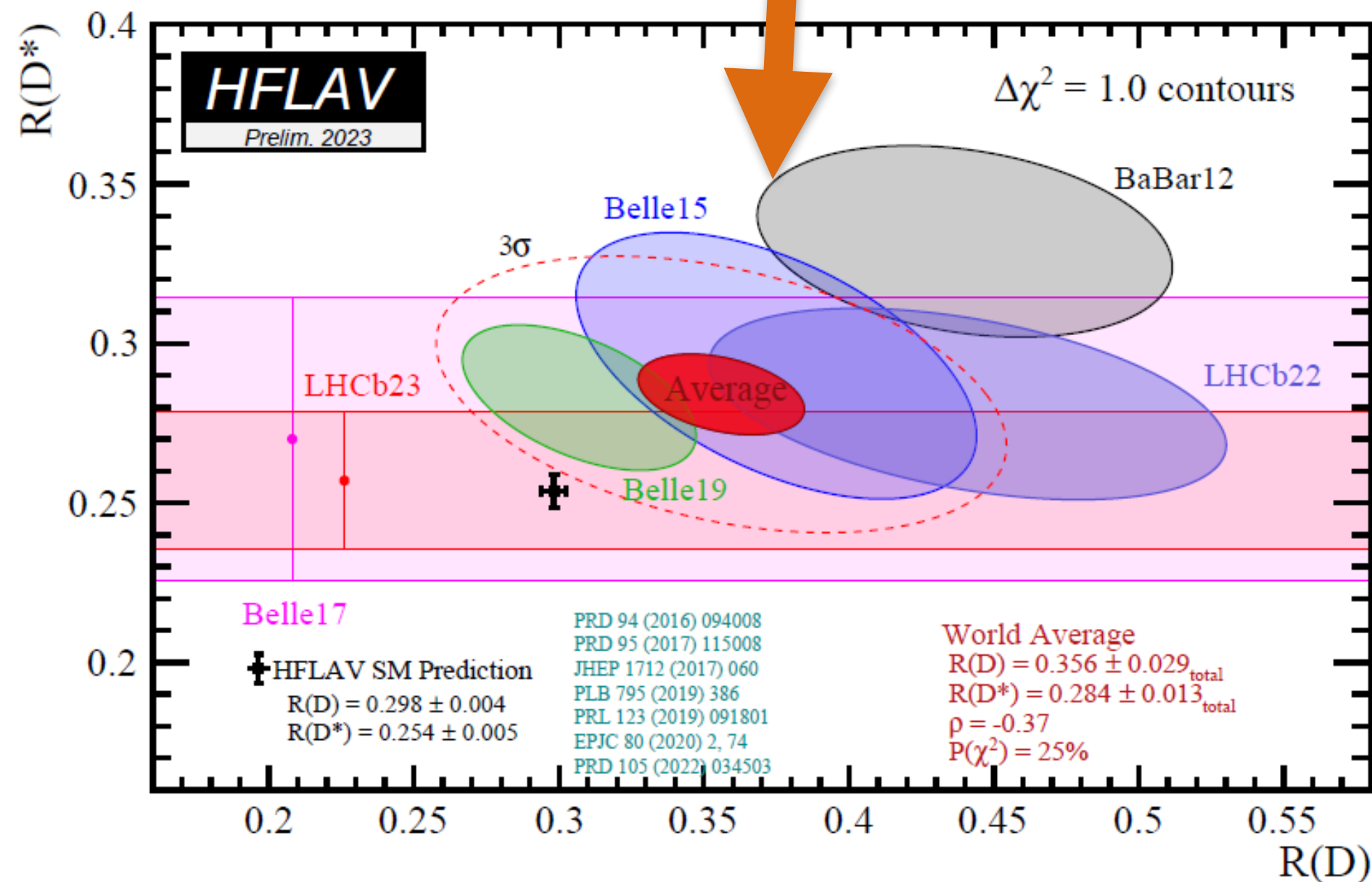
## Perché è importante?

- Lo SM prevede **accoppiamenti di gauge EW identici** per le diverse **famiglie leptoniche (LFU)**
- **LFU** può essere **violata** in modelli di **nuova fisica**: accoppiamenti dipendenti dalla massa, nuove particelle dette leptoquarks, etc
- **Misure di LFU con D-mesons deviano dallo SM a  $3\sigma$**

## Come lo si misura

- Si studiano le **transizioni  $b \rightarrow c l \nu$**
- Si misurano i **rapporto  $R(D)$  e  $R(D^*)$**  che ci si aspetta essere  $\sim 0.25$  nello SM
- **Analisi complessa**: ricostruzione del sistema decadine to dei  $\tau$ , fit simultanei multi-dimensionali per stimare diverse sorgenti di fondo dai dati

$$R(D) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D \mu \nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D \tau \nu)}$$



## Proposte di tesi

- **Misura simultanea di  $R(D)$  e  $R(D^*)$**  usando i dati del Run2, aggiornando **selezioni del campione** e fit di **estrazione del segnale** usando nuove variabili (output di neural-networks)
- **Misura dei coupling di operatori effettivi (EFT)** di dimensione 6 che potrebbero alterare il rapporto  $R(D)$  o  $R(D^*)$

$$H_{EFT} = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{cb} \sum_i c_i O_i$$

# Violazione di simmetria CP in mesoni D

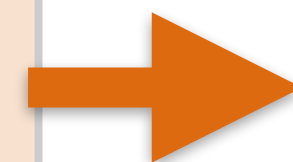
Marta Calvi

Maurizio Martinelli

Martino Borsato

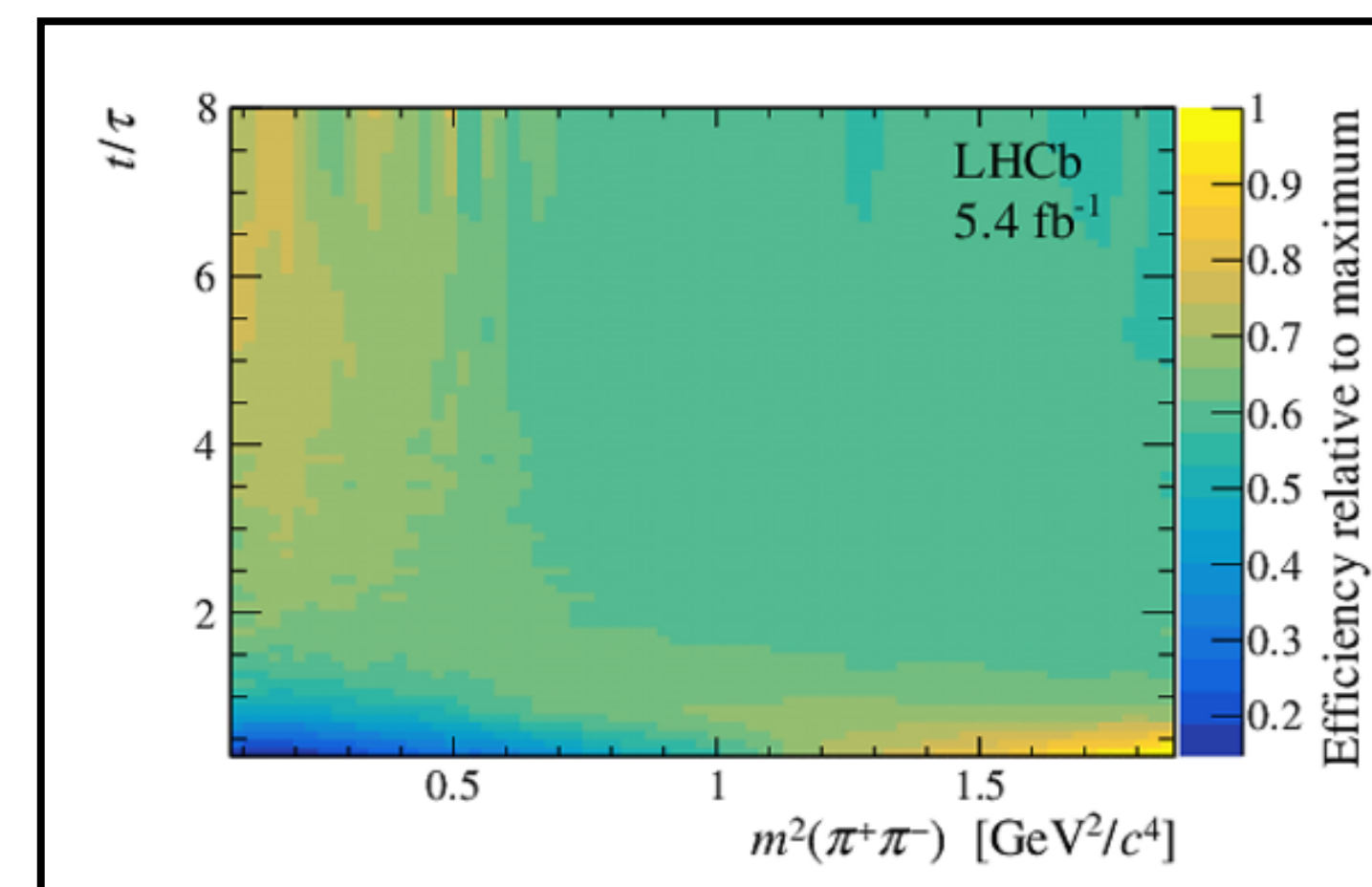
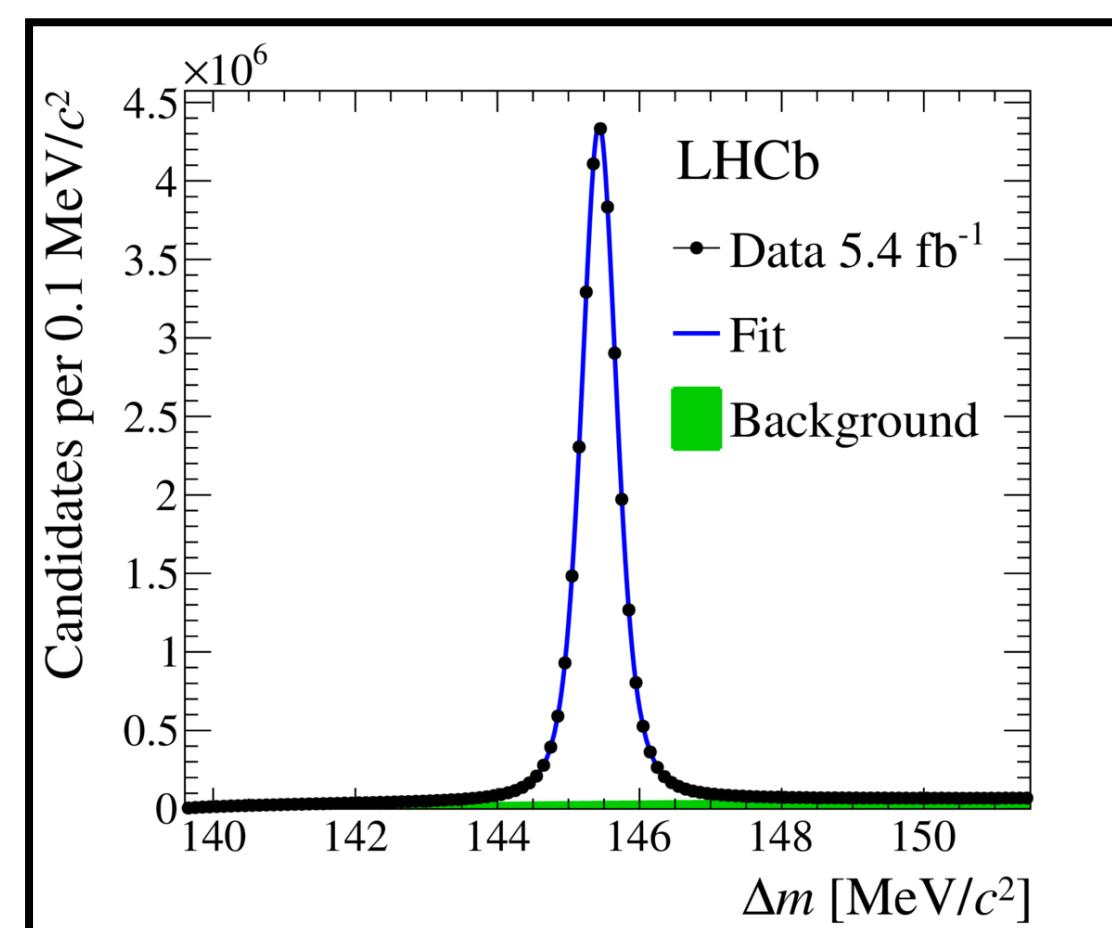
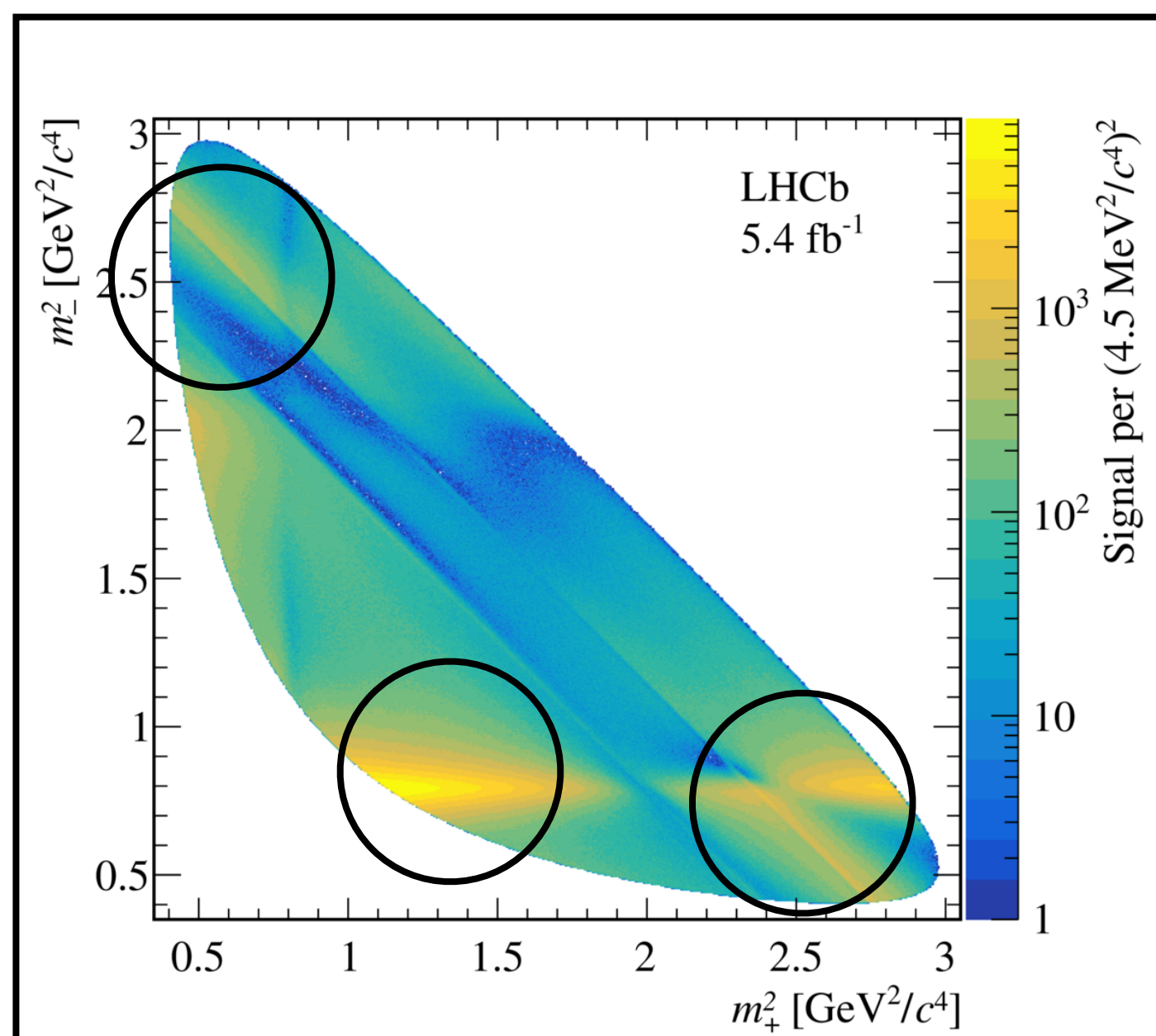
## Perché fisica del charm e CP-violation?

- **LHCb ha osservato per la prima volta** mixing  $D^0-\bar{D}^0$ , violazione CP in  $D^0$  decays, differenza tra autostati di massa di  $D^0$
- **Studi di mixing e violazione CP** in mesoni D rappresenta **una nuova frontiera ancora poco esplorata**



## Proposta di tesi: CP-violation in $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$

- Sviluppo tecnica per **correggere accettazione** dello spazio fasi **al variare del tempo di decadimento** usando ML allenato sia sui dati ( $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ) che su eventi simulati
- Il **ML** fornisce un set di **pesi usati per correggere la simulazione** in modo che rispecchi i dati
- **Validazione:** si ripete la misura di differenza tra gli autostati di massa del mesone  $D^0$  con i dati del Run2
- **Se validata**, la tecnica potrà essere usata come metodo di base per **l'analisi coi dati del Run3**



# Violazione di simmetria CP in mesoni D

Marta Calvi

Maurizio Martinelli

Martino Borsato

## Perché fisica del charm e CP-violation?

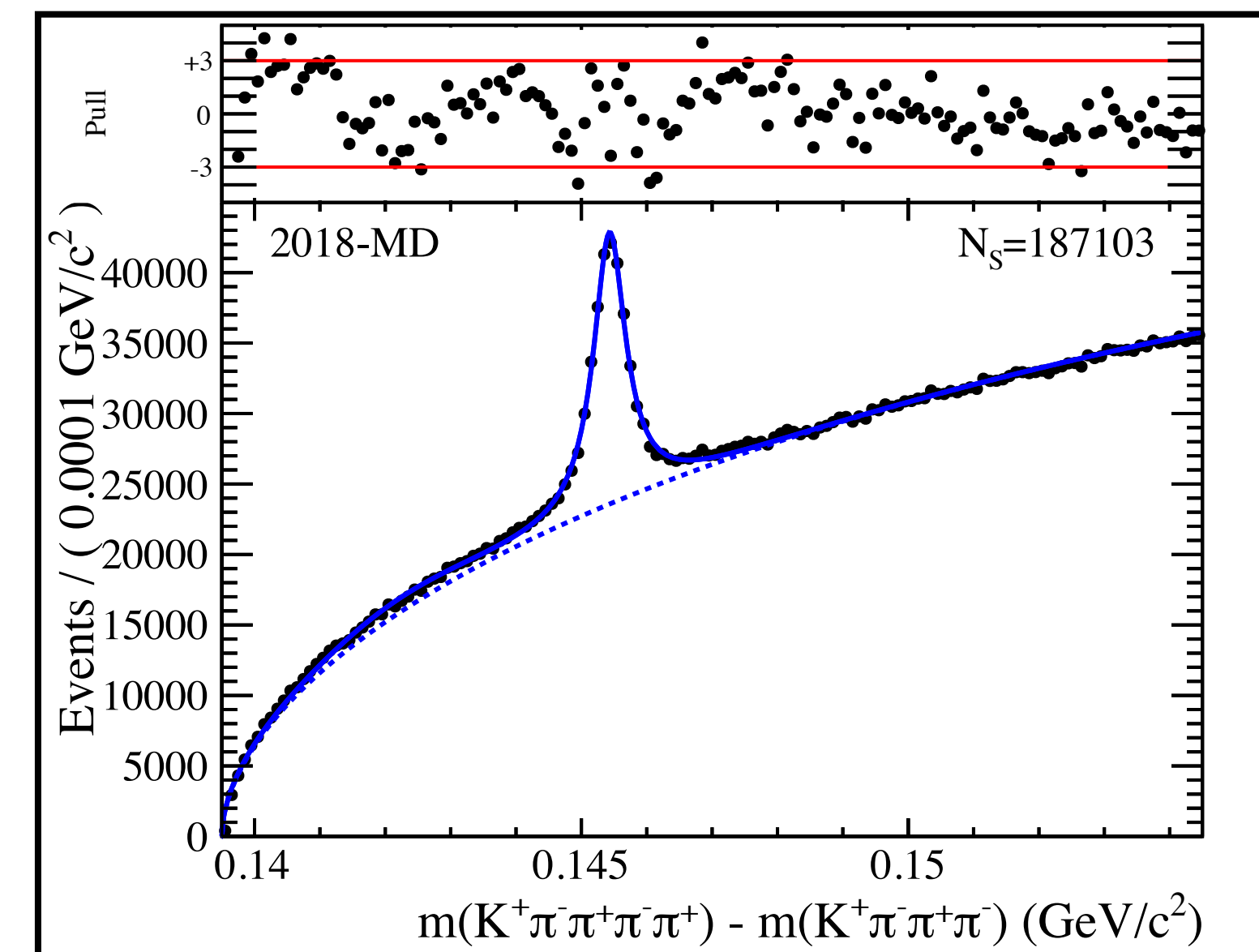
- **LHCb ha osservato per la prima volta** mixing  $D^0-\bar{D}^0$ , violazione CP in  $D^0$  decays, differenza tra autostati di massa di  $D^0$
- **Studi di mixing e violazione CP** in mesoni D rappresenta **una nuova frontiera ancora poco esplorata**

## Proposta di tesi: CP-violation in $D^0 \rightarrow K^\pm \mu^\mp \nu$

- **Complessità:** non si può ricostruire il sistema di decadimento del  $D^0$  causa dell'energia mancante del neutrino (sfugge)
- Usare **ML (GAN)** per **ricostruire il momento del  $D^0$**
- Studiare i fondi dovuti a mesoni  $K^*$
- **Risultato finale:** misurare del mixing integrato nel tempo e misura di CP separando  $D^0$  da  $\bar{D}^0$

## Proposta di tesi: CP-violation in $D^0 \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm \pi^\mp$

- **Complessità:** il segnale è doppio Cabibbo soppresso (DCS) e la contaminazione dal processo Cabibbo favorito (x400) può introdurre bias nella misura
- Usare **tecnica dei tripli prodotti** sviluppata a Milano
- Tecniche di analisi pronte  $\rightarrow$  **vantaggio** è che permetterebbe di **completare l'intera analisi** nell'arco di **tempo della tesi**
- Misura non ancora effettuata ed è anche **ricerca di nuova fisica** (CPV = 0 nei DCS del  $D^0$  nello SM)



# Decadimenti radiativi del Charm

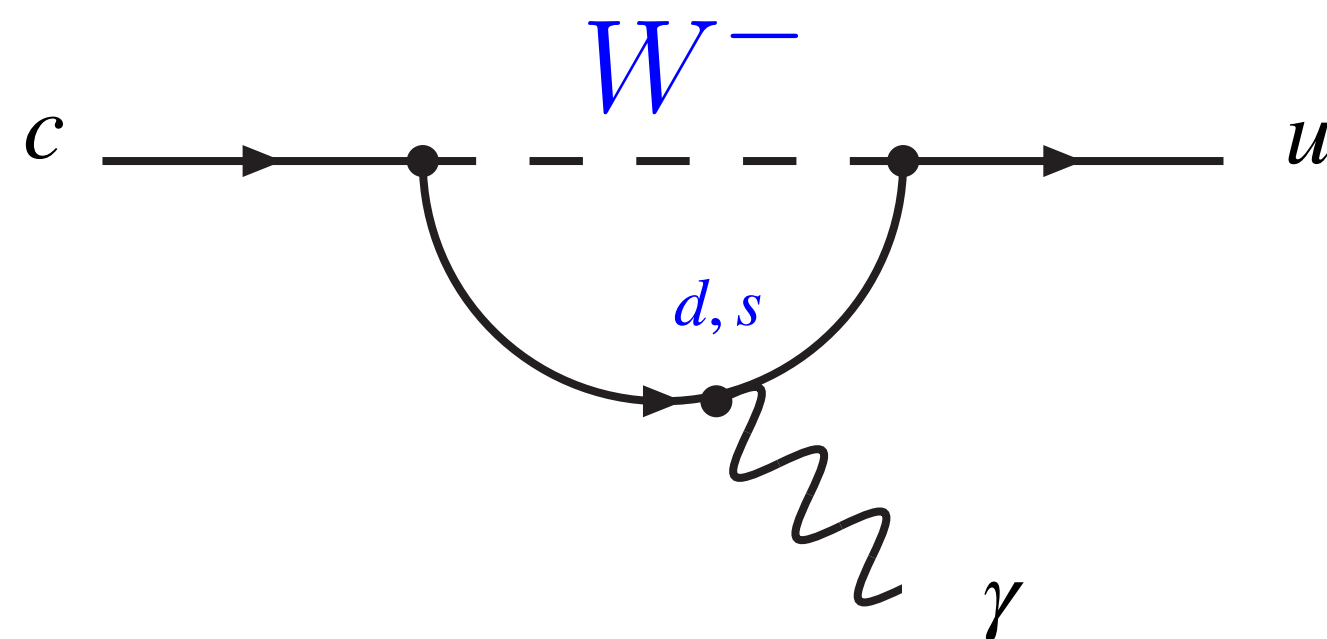
Marta Calvi  
Maurizio Martinelli  
Martino Borsato

## Perché sono interessanti?

- **Decadimento radiativo  $c \rightarrow u\gamma$**  è concesso a loop-level ma soppresso dal meccanismo GIM
- Essendo processi a one-loop sono **sensibili a nuova fisica** oltre allo SM

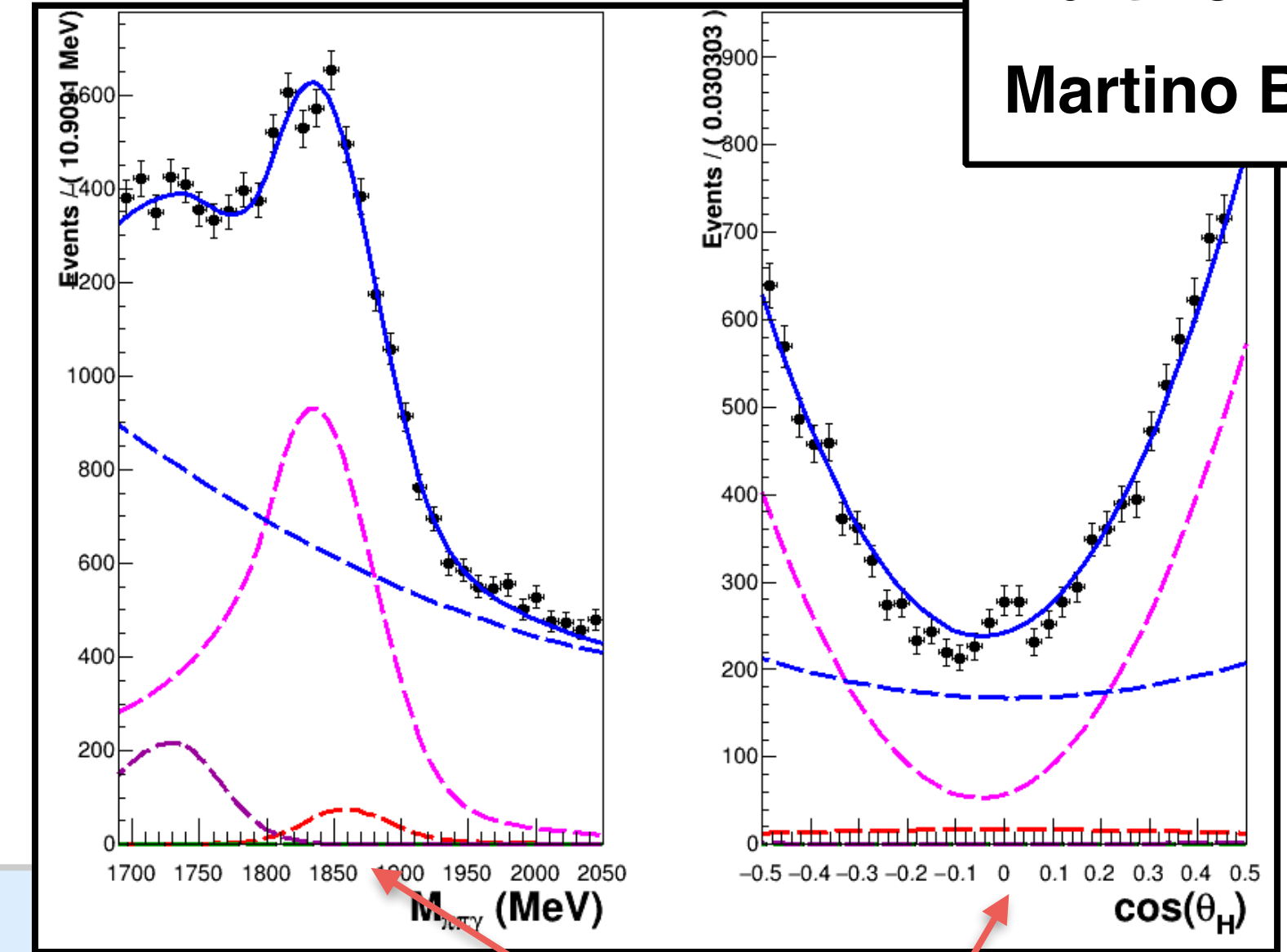
Suppressed by GIM  

$$V_{cd}^* V_{ud} + V_{cs}^* V_{us} \approx 0$$



## Caratteristiche della misura

- **Ricerca di  $D^0 \rightarrow V^0\gamma$ :**
  - Alto numero di mesoni D prodotti
  - Piccolo branching ratio
  - Grande fondo da  $V^0\pi^0$  con  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$



Basso S/B

Segnale

## Proposta di tesi

- Modificare analisi utilizzando anche le **conversioni  $\gamma \rightarrow ee$**
- Sviluppare **ML supervised** per **sopprimere** il fondo da  $\pi^0$
- Sviluppare nuovo fit per sottrarre fondo residuo

# Conclusioni

- **Riassunto e spiegazione più dettagliata** delle proposte di tesi disponibile sul *sito d'ateneo*

<https://www.fisica.unimib.it/it/didattica/corsi-studio/corso-laurea-magistrale-fisica/tesi-fisica-delle-particelle>

**Domanda finale:**  
chi ha fatto tesi magistrale nel gruppo CMS/LHCb cosa fa ora?

## Dottorato di ricerca

- Milano Bicocca
- Ecole Polytechnique Parigi (LLR)
- Doctoral student (CERN)
- ETH e UZH a Zurigo
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- University of Bristol
- Austrian Institute of Technology (AIT)

## Ricercatore Post-DoC

- Milano Bicocca
- ETH Zurigo
- Princeton
- California San Diego (UCSD)
- MIT
- Fermi National Laboratory (FNAL)
- CERN
- Tel Aviv University
- IHEP of Chinese Academy of Science

## Settore privato

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