

Il corso di Laurea Magistrale in SCIENZE FISICHE

Curriculum di
Fisica Nucleare e Subnucleare
a.a. 2019-2020

A. Braghieri e A. Negri

Gli Insegnamenti - 1

TOTALE

**72 CFU
12 CORSI**

Nome insegnamento	Settore	CFU	Semestre	Laurea
Laboratorio di fisica nucleare e subnucleare I	FIS/04	6	II	M
Fisica delle particelle elementari	FIS/04	6	I	M
Fisica nucleare I	FIS/04	6	II	M
Fisica nucleare II	FIS/04	6	I	M
Laboratorio di fisica nucleare subnucleare II	FIS/04	6	I	M
Radioattività I	FIS/04	6	I	M
Acceleratori e reattori nucleari	FIS/04	6	I	M
Radioattività II	FIS/04	6	II	M
Laboratorio di radiazioni ionizzanti (new)	FIS/04	6	II	M

**24 CFU
4 CORSI**

Nome insegnamento	Settore	CFU	Semestre	Laurea
Elettrodinamica e relatività	FIS/02	6	I	T
Complementi di fisica teorica	FIS/02	6	I	M
Elettrodinamica quantistica	FIS/02	6	I	M
Metodi Computazionali della Fisica	FIS/02	6	II	M
Teoria delle interazioni fondamentali	FIS/02	6	I	M
Teoria quantistica dei campi	FIS/02	6	II	M
Gruppi e simmetrie fisiche (new)	FIS/02	6	II	M
Relatività generale (new)	FIS/02	6	II	M

**12 CFU
2 CORSI**

Gli Insegnamenti - 2

Nome insegnamento	Settore	CFU	Semestre	Laurea
Rivelatori di particelle	FIS/01	6	II	M
Tecnologie fisiche e beni culturali	FIS/07	6	II	T
Procedimenti informatici di simulazione	FIS/01	6	I	M
Metodi statistici della fisica	FIS/01	6	I	M
Tecniche digitali di acquisizione dati (new)	FIS/01	6	I	T

**12 CFU
2 CORSI**

Possibilità di corsi a scelta in altri settori	FIS/05, MAT/05, MAT/06, MAT/07, MAT/08, ING-INF/01, ING-INF/07, MED/36
	Comprendono corsi in Astronomia, Astrofisica, Analisi Matematica, Probabilità e Statistica Matematica, Sistemi per Energia e Ambiente, Elettronica, Sistemi di Elaborazione Dati, Diagnostica per immagini e Radioterapia, ...

**12 CFU
2 CORSI**

INSEGNAMENTI LIBERI E A SCELTA

**12 CFU
2 CORSI**

TOTALE

**72 CFU
12 CORSI**

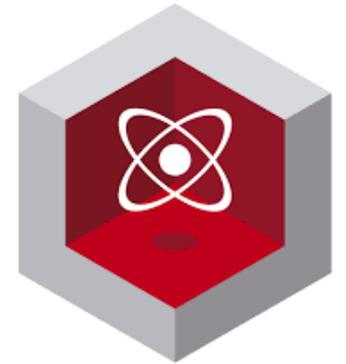
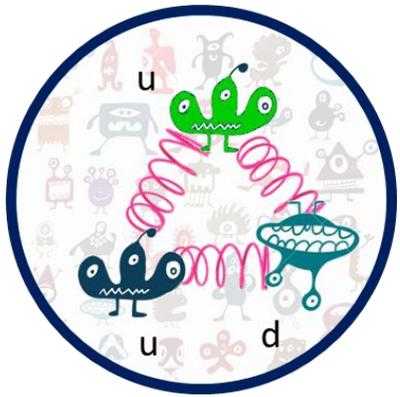
Percorsi parziali suggeriti

- Nella guida dello studente saranno suggeriti **percorsi** parziali
 - Saranno **suggeriti** 6 corsi caratterizzanti per ogni percorso
- Fisica nucleare sperimentale
 - Fis. Nucleare I, Fis. Nucleare II, ecc ...
- Fisica sperimentale delle alte energie
 - Rivelatori di particelle, Elettrodinamica quantistica, ecc ...
- Fisica astroparticellare sperimentale
 - Astroparticelle, metodi statistici della fisica
- Fisica nucleare e subnucleare applicata
 - Acceleratori e reattori nucleari, tecnologie fisiche e beni culturali, ecc ...
- ...
-

L'attività di Ricerca nel Dipartimento

Il Dipartimento di Fisica e l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) svolgono un'intensa e diversificata attività di ricerca scientifica nel settore delle **Interazioni Fondamentali** (gravitazionale, debole, elettromagnetica e forte) dal punto di vista sperimentale

Dal punto di vista sperimentale si studiano le proprietà dei nuclei atomici (**Fisica Nucleare**) e delle particelle elementari (**Fisica Subnucleare**), nonché le loro interazioni.



Inoltre, sono svolte anche ricerche in **Astrofisica, Fisica Spaziale**

e **Fisica Applicata**



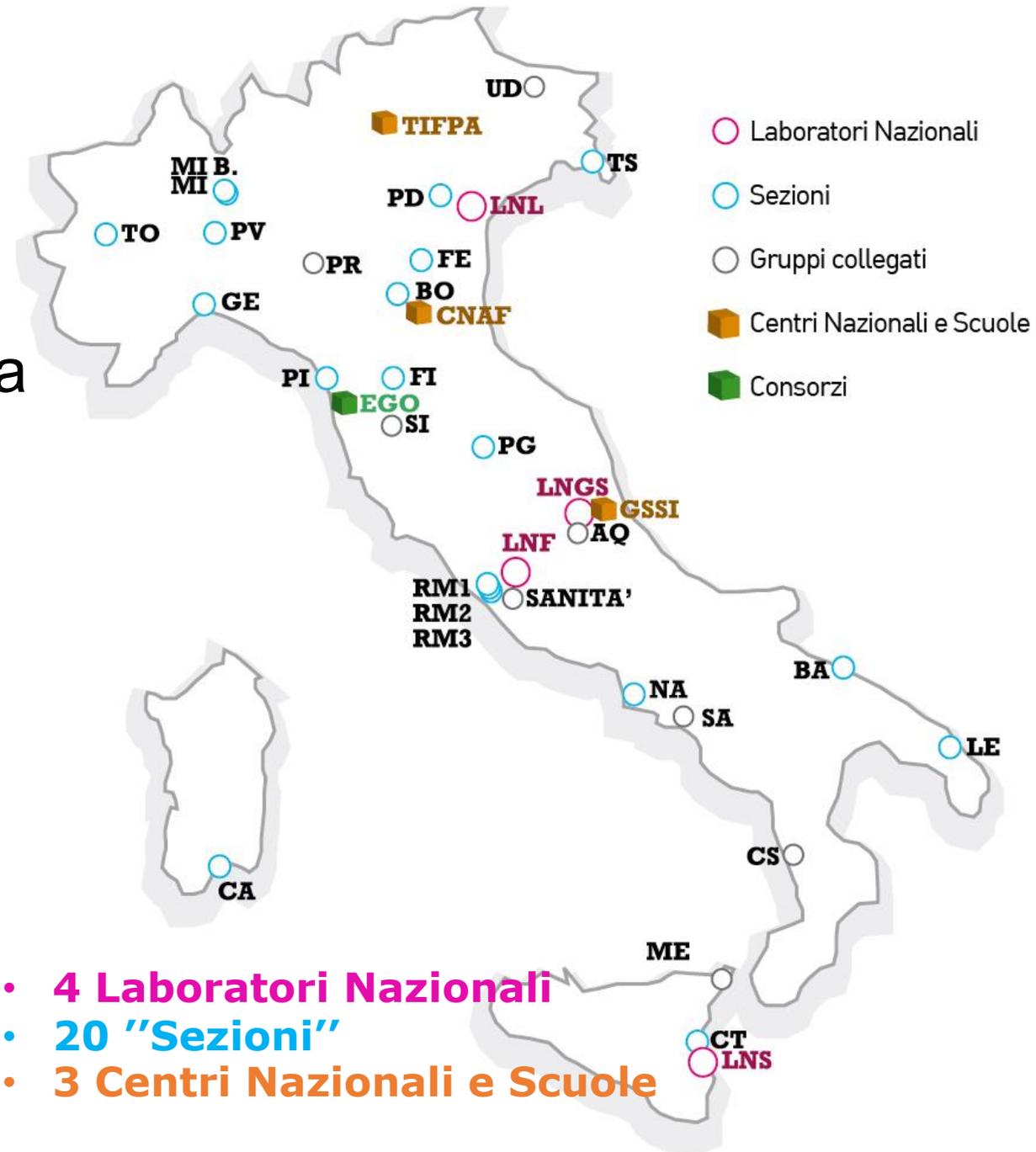
- È un **E**nte **P**ubblico di **R**icerca vigilato dal MIUR
- Finanzia le attività di ricerca in fisica delle particelle elementari
- Presente nelle maggiori Università (le **"Sezioni"**)
- **Sinergia** tra Dip. di Fisica e INFN:
 - Universitari integrati in INFN
 - Ricercatori INFN con incarichi didattici in università

2000 dipendenti

3000 collaboratori

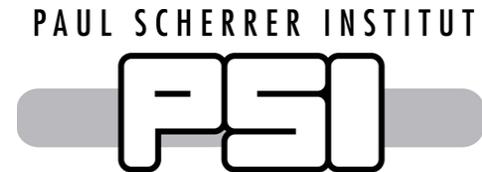
1300 giovani (laureandi, dottorandi, borsisti)

30 Paesi in cui svolge attività di ricerca



Collaborazioni aperte con

- CERN, Ginevra
- FermiLab, Chicago
- PSI, Zurigo (CH)
- GSI (D)
- RAL, Didcot (UK)
- MAInz Microtron, Mainz (D)
- Laboratori INFN di Frascati
- Laboratori INFN di Legnaro
- Lab. di Energia Nucleare Applicata



Science & Technology
Facilities Council



L'esperimento MAMBO

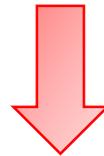
A2 @ MAMI
(Mainz)

MAMi-Bonn

B1 BGO-OD @
ELSA (Bonn)

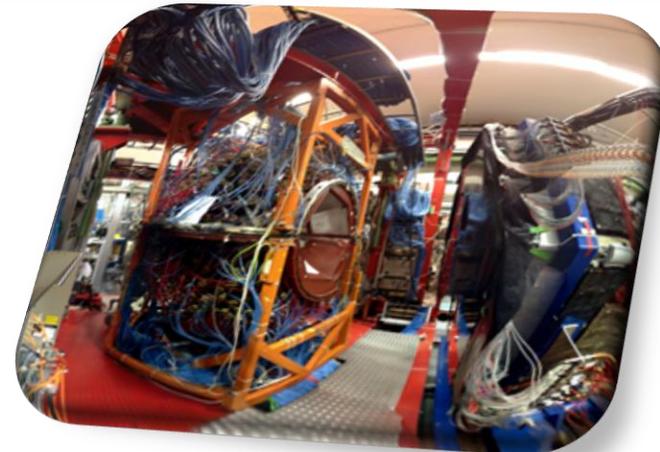
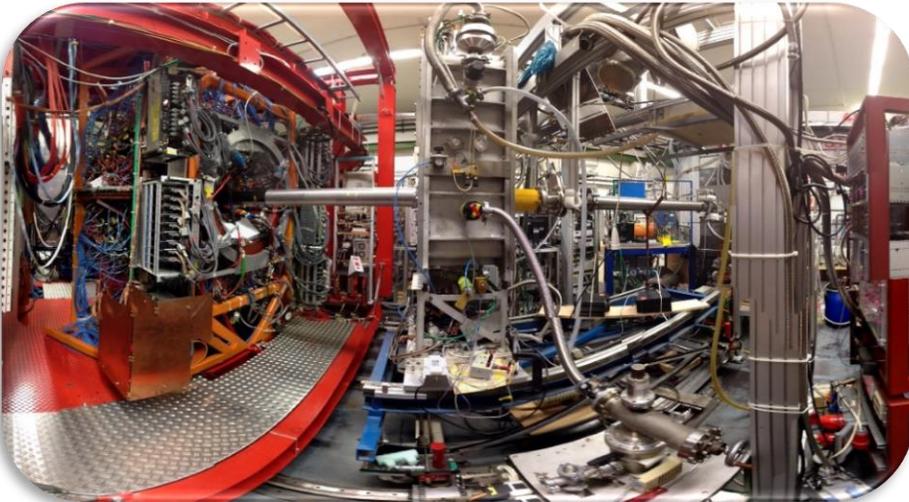
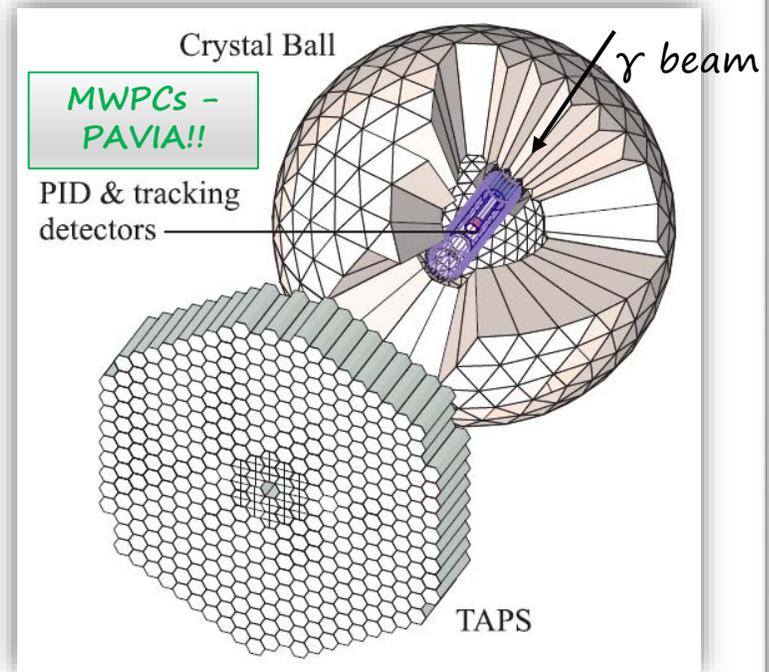
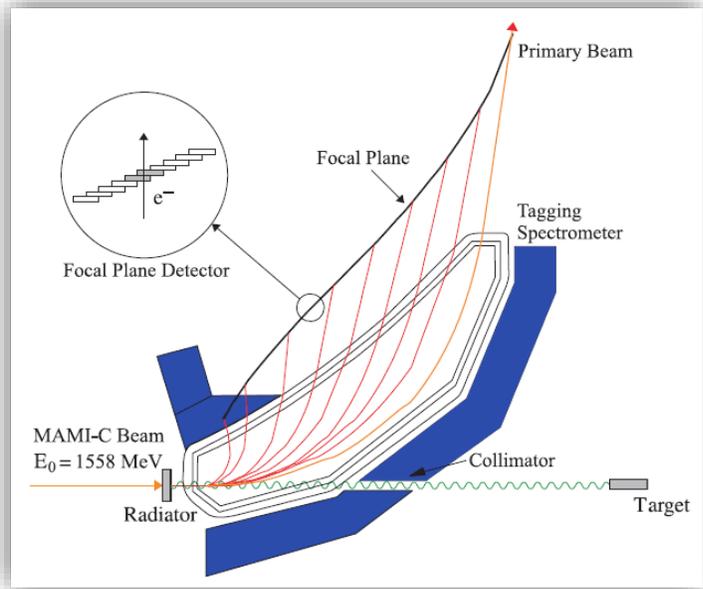
Goal di MAMBO:

- **Studiare le proprietà fondamentali di protone/neutrone e dei loro stati risonanti** (informazioni necessarie per risolvere il problema dello **spin**)
- **Verificare i principi quantistici fondamentali** (conservazione carica, CP, ...) attraverso lo studio dei decadimenti rari dei mesoni η ed η'
- Studiare le modifiche delle **proprietà fondamentali del protone/neutrone all'interno dei nuclei atomici** («neutron skin»)



- Si utilizzano **fasci di fotoni** prodotti per bremsstrahlung presso gli acceleratori MAMI @ Mainz ($E_\gamma < 1.5$ GeV) ed ELSA @ Bonn ($E_\gamma < 3$ GeV)
 - Misure con basse sezioni d'urto e/o di precisione

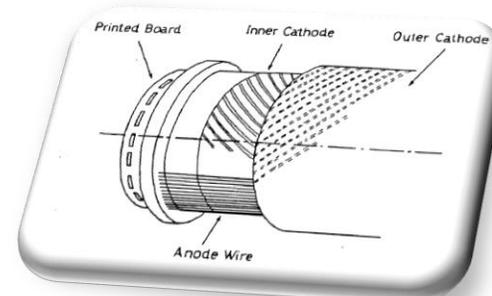
L'esperimento MAMBO - A2 @ MAMI (Mainz)



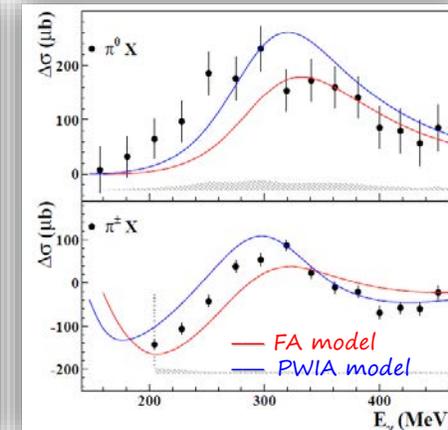
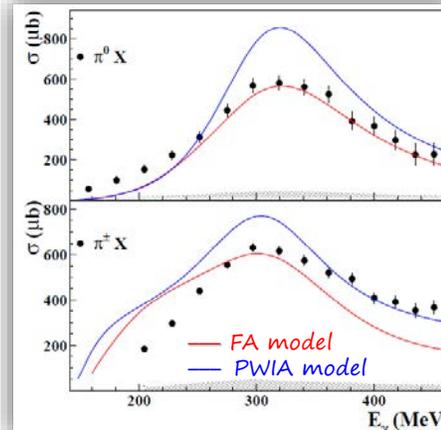
L'esperimento MAMBO

Attività del gruppo di Pavia:

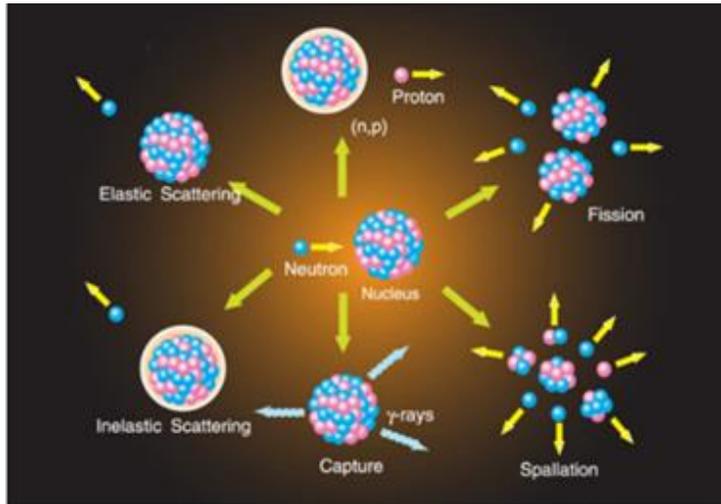
- Costruzione, test, commissioning e manutenzione delle **camere a fili cilindriche** (MWPCs) usate sia a Mainz sia a Bonn per il tracciamento delle particelle cariche emesse nelle reazioni indotte dai fotoni



- Coordinamento del programma di fisica che utilizza fasci di fotoni linearmente polarizzati e bersagli di protoni/neutroni polarizzati
- Analisi offline dei dati raccolti
- Partecipazione alla presa dati

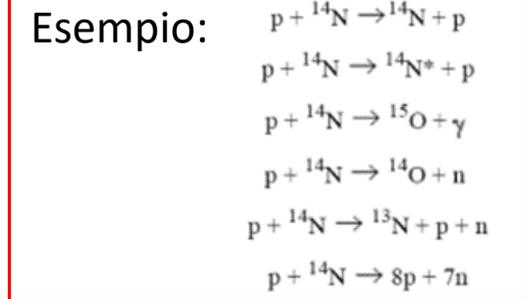


Studio di sezioni d'urto di reazioni nucleari inesplorate

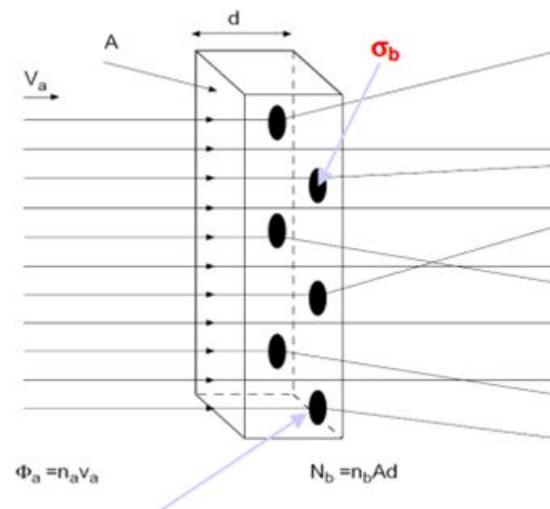


- 1. Reazioni nucleari:** potente strumento per investigare la materia e le forze sub-atomiche
 - *simili* a reazioni chimiche: stato finale può essere diverso da stato iniziale
 - *...ma diverse* da reazioni chimiche: stato finale non determinato univocamente -> **maggiore ricchezza** e potenzialità di ricerca.

Molti canali disponibili, a seconda di proiettile, bersaglio, energia con numero illimitato di stati quantici possibili.



- 2.** Alcuni stati finali sono **radioattivi** e al momento molti sono **inesplorati** e potenzialmente interessanti. Conoscenze riassunte nel concetto di **sezione d'urto**: grandezza **calcolabile** e **misurabile**.



Sezione d'urto:

$$\sigma_b = \frac{\dot{N}}{\Phi_a N_b}$$

number of reactions per unit time
 beam particles per unit time \times scattering centres per unit area

Contatto: andrea.fontana@pv.infn.it
 Corsi: Radioattività II/Lab. Fis. Nuc. II

Modellistica nucleare

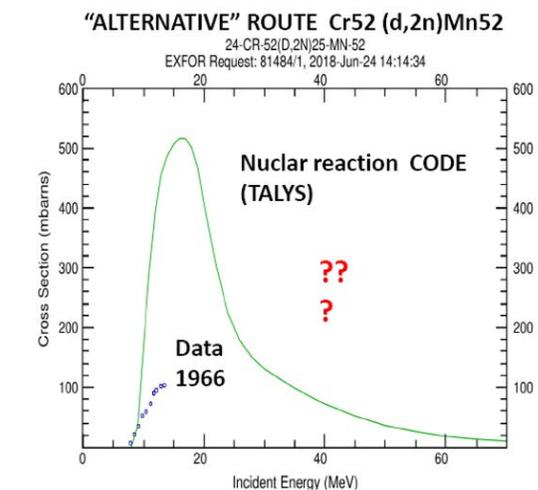
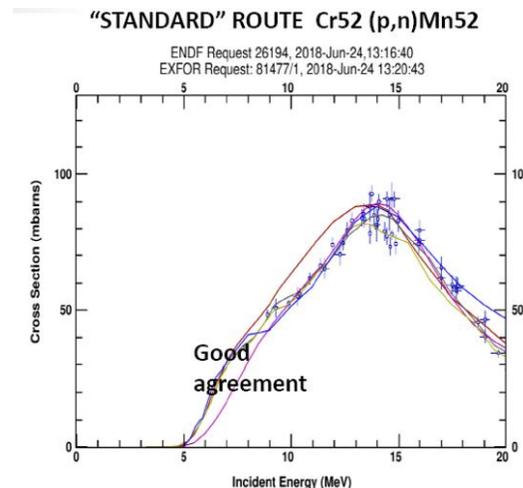
3. Come calcolare la sezione d'urto dei vari canali?

- Utilizzo di **modelli teorici** in **codici di calcolo Montecarlo**:
 - Fluka (*FLUktuierende KAskade*)
 - Geant4 (*GEneration ANd Tracking 4*)
 - Mcnp (*Monte Carlo Neutral Particles*)
 - Phits (*Particles and Heavy Ions Tracking System*)
- Utilizzo di **codici analitici** di modellistica nucleare:
 - Talys (*Simulation of Nuclear Reactions*)
 - Empire (*Nuclear Reaction Model Code*)
- Confronti con dati sperimentali.
- Studi importanti per la **Conoscenza** e per le **Applicazioni**.
- Connessione con attività' in Fisica Medica (progetto **METRICS**)

Che cosa imparo con una tesi su questi argomenti?

- Fisica Nucleare tradizionale e applicata alla Medicina.
- Tecniche di simulazione montecarlo e di analisi dati.
- Tecniche numeriche per risoluzione di problemi.
- Linguaggi di programmazione: **Fortran, C++, Python**.

Esempio:



Contatto: andrea.fontana@pv.infn.it

Corsi: Radioattività II/Lab. Fis. Nuc. II

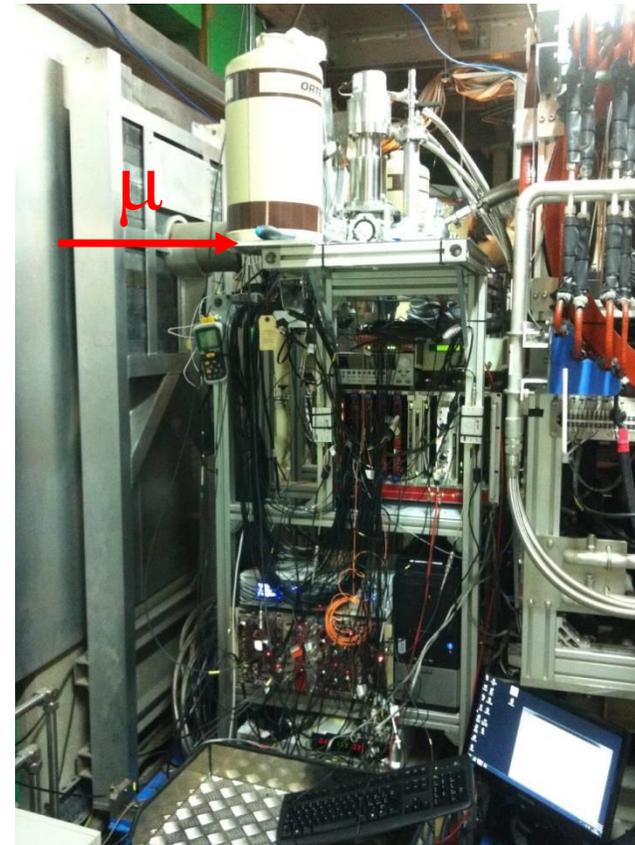
FAMU

Quando è grande il protone?

FAMU vuole misurare lo splitting iperfine nello stato base di un atomo di idrogeno dove al posto dell'elettrone c'è un muone: l'energia dello splitting è infatti legata al raggio del protone.

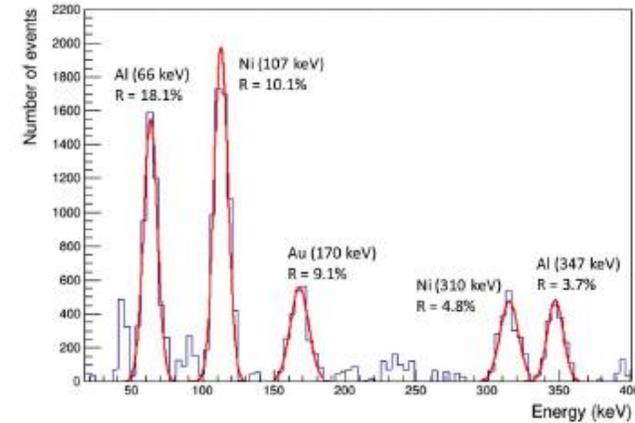
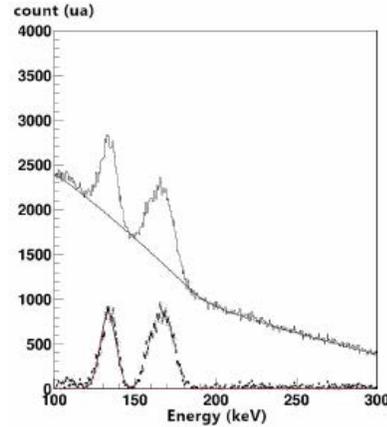
Ci sono discrepanze tra misure del raggio del protone effettuate con atomi elettronici e muonici: serve una misura definitiva.

Il bersaglio di FAMU è esposto ad un fascio di muoni (Laboratori RIKEN-RAL vicino a Oxford). Si creano atomi muonici che emettono raggi X tipici che vengono rivelati da cristalli scintillatori o rivelatori al Germanio.



Cosa facciamo a Pavia per FAMU?

Analisi dei dati raccolti nei test run 2016-2018.



Realizzazione dei monitor del fascio di muoni.



Realizzazione di un'ottica focalizzante per i muoni

<https://www.ts.infn.it/com/ricerca/gr3/famu/> (sito web di FAMU presso la Sezione INFN di Trieste)

Per ulteriori informazioni su FAMU e su possibili tesi triennali e magistrali, contattare:

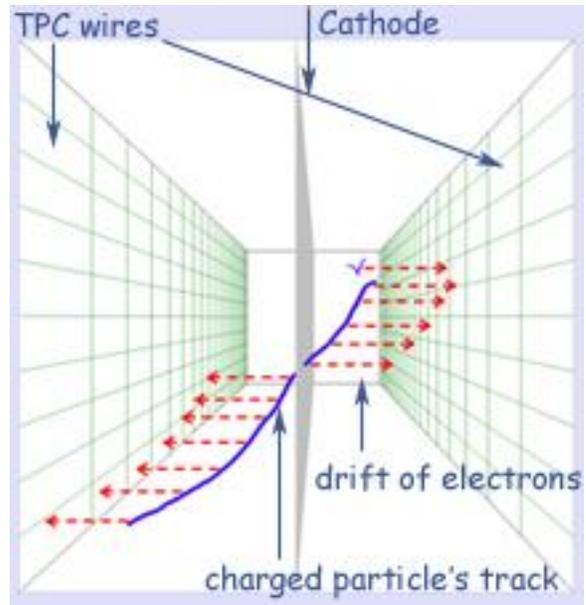
Alessandro Menegolli (ufficio 0-07 al piano terra, e-mail: alessandro.menegolli@pv.infn.it)

Antonio De Bari (ufficio 1-49 al piano terra, e-mail: antonio.debari@unipv.it)

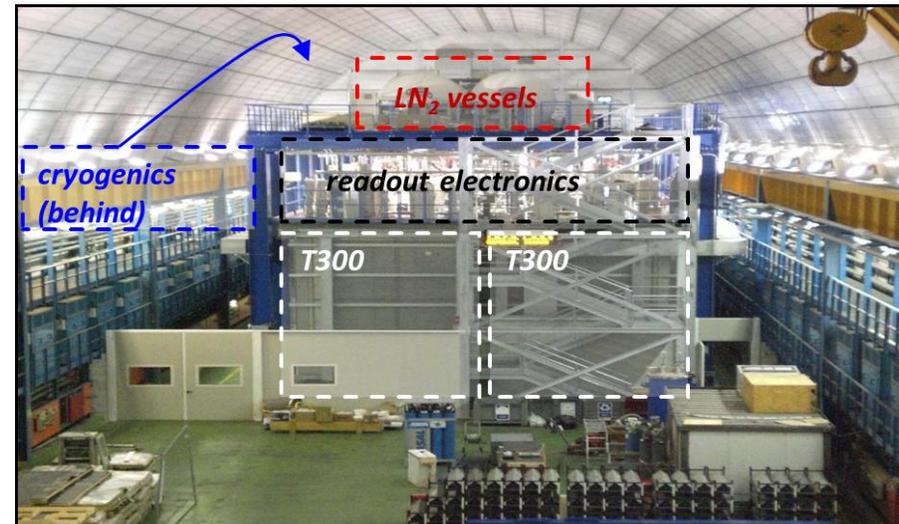
ICARUS-SBN

Alla ricerca dei neutrini sterili

ICARUS-T600 è un rivelatore di neutrini che si basa sulla tecnologia delle Camere a Proiezione Temporale (TPC) ad argon liquido: gli elettroni prodotti al passaggio di particelle ionizzanti sono trasportati da un campo elettrico verso dei fili di lettura spazati di tre millimetri. Questo permette la ricostruzione 3D delle tracce e la misura dell'energia delle particelle:

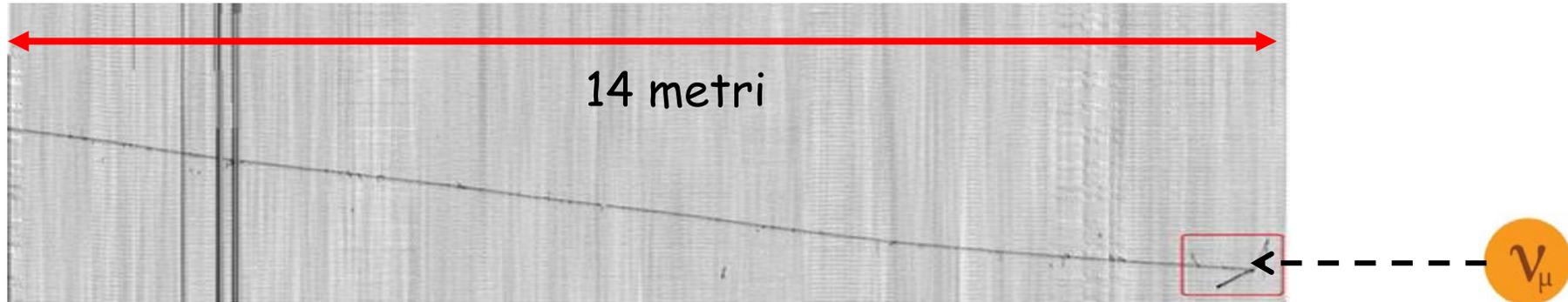


ICARUS-T600 nella Sala B dei Laboratori del Gran Sasso (2010-2013)

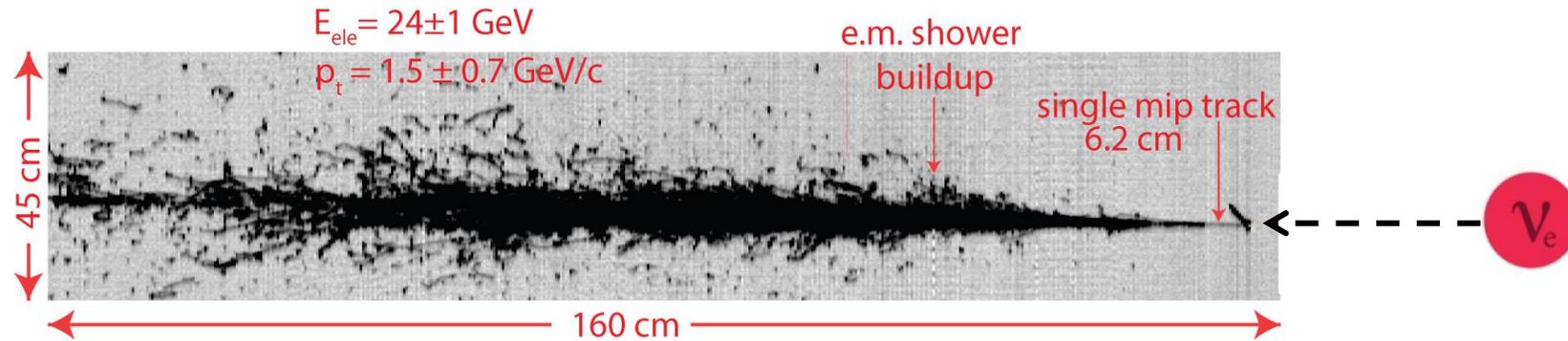


ICARUS è stato utilizzato per la ricerca di oscillazioni di neutrini:

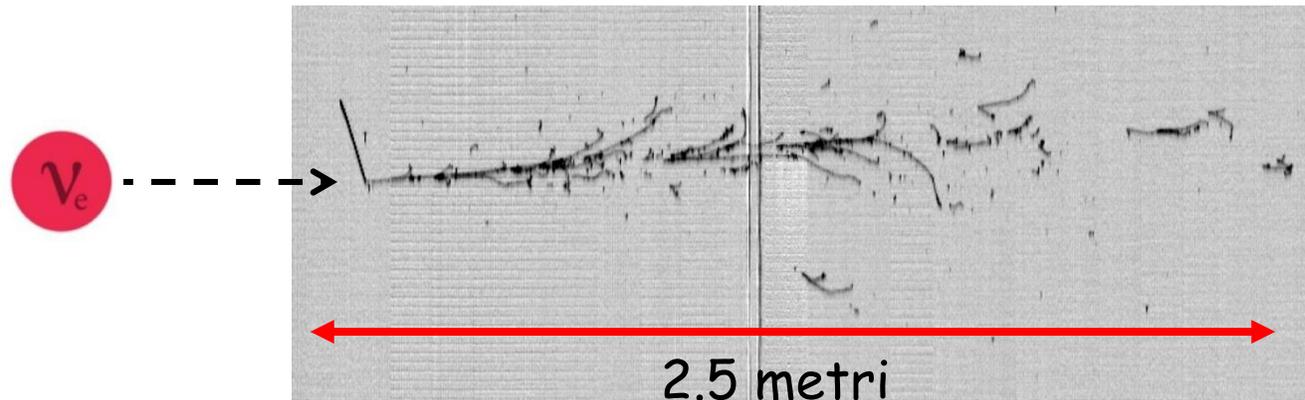
Interazione di un neutrino muonico dal fascio CERN to Gran Sasso in ICARUS:



Interazione di un neutrino elettronico dal fascio CERN to Gran Sasso in ICARUS:



Interazione di neutrino elettronico atmosferico in ICARUS:



Dal Gran Sasso al Fermilab (passando per il CERN..)



Fine 2014



Fermilab ora: stiamo per (ri)partire!!!



Upgrade al
CERN (2015-2017)



Il rivelatore ICARUS T600 sarà utilizzato assieme ad altri due rivelatori analoghi per la ricerca di stati «sterili» di neutrino, mediante misure di oscillazioni di neutrini short-baseline dal fascio Booster Neutrino Beam del Fermilab.

Cosa facciamo a Pavia per ICARUS?

- Sviluppo del software per la simulazione e l'analisi dei dati al Fermilab.
- Realizzazione e gestione del sistema di acquisizione dei segnali dei Tubi FotoMoltiplicatori (PMTs) e del trigger.
- R&D di nuovi tipi di foto-rivelatori per applicazioni in criogenia.

<https://icarus.fnal.gov/> (sito web di ICARUS al Fermilab).

<http://sbn.fnal.gov/> (sito web del progetto SBN al Fermilab).

<http://www.nu.to.infn.it/> (sito sempre aggiornato sulla fisica del neutrino).

<https://www.facebook.com/ICARUSExperiment/> (Pagina Facebook di ICARUS).

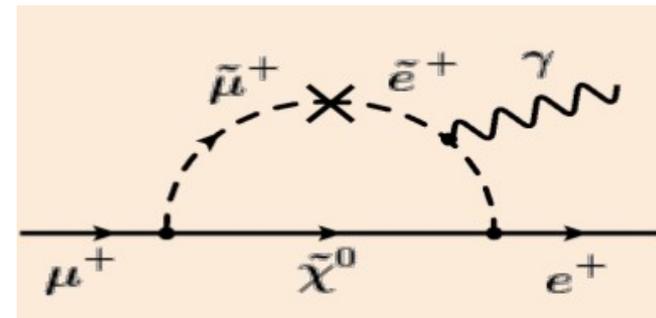
Per ulteriori informazioni su ICARUS e su possibili tesi triennali e magistrali, contattare:

Alessandro Menegolli (ufficio 007 al piano terra, e-mail: alessandro.menegolli@pv.infn.it)

MEG-II

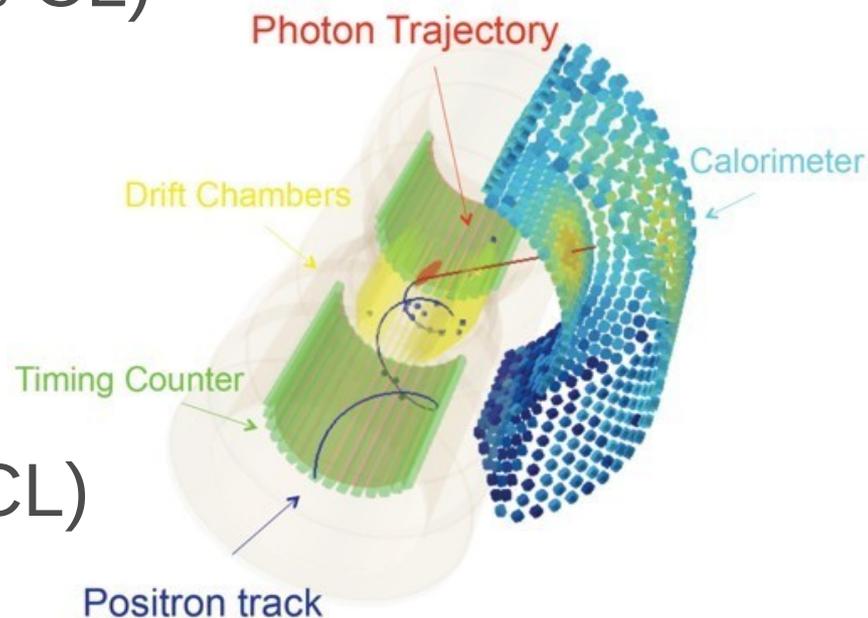
- MEG-I: esperimento al PSI sul decadimento $\mu \rightarrow e \gamma$

- Impossibile nel modello standard
- Indicherebbe la presenza di nuova fisica
- Nel 2016 MEG-I ha concluso analisi ponendo limite:
 $BR(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$ (90% CL)

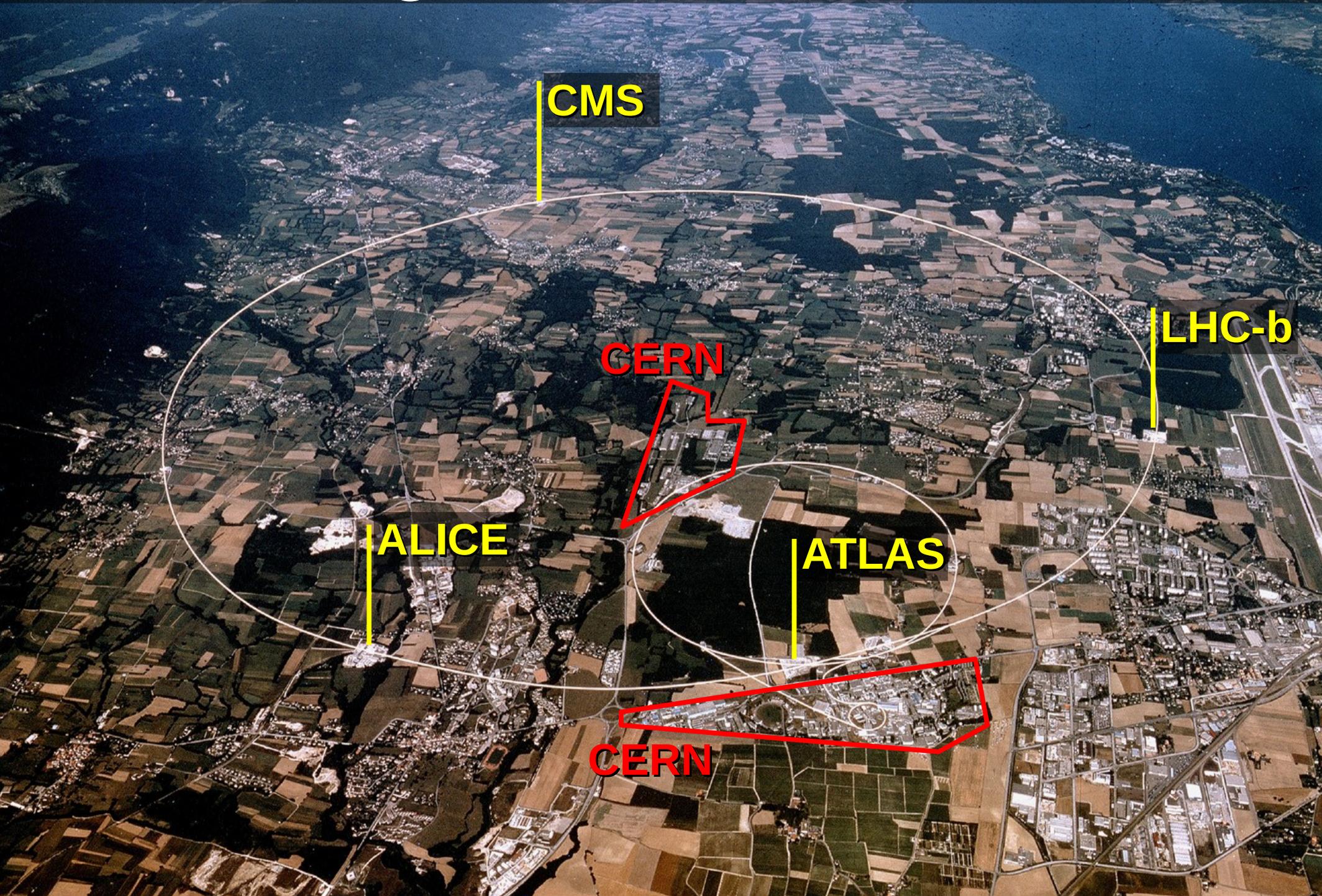


- MEG-II: upgrade di MEG-I

- Obiettivo: in tre anni abbassare il limite di un fattore 10:
 $BR(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 5 \times 10^{-14}$ (90% CL)



Large Hadron Collider



CMS

LHC-b

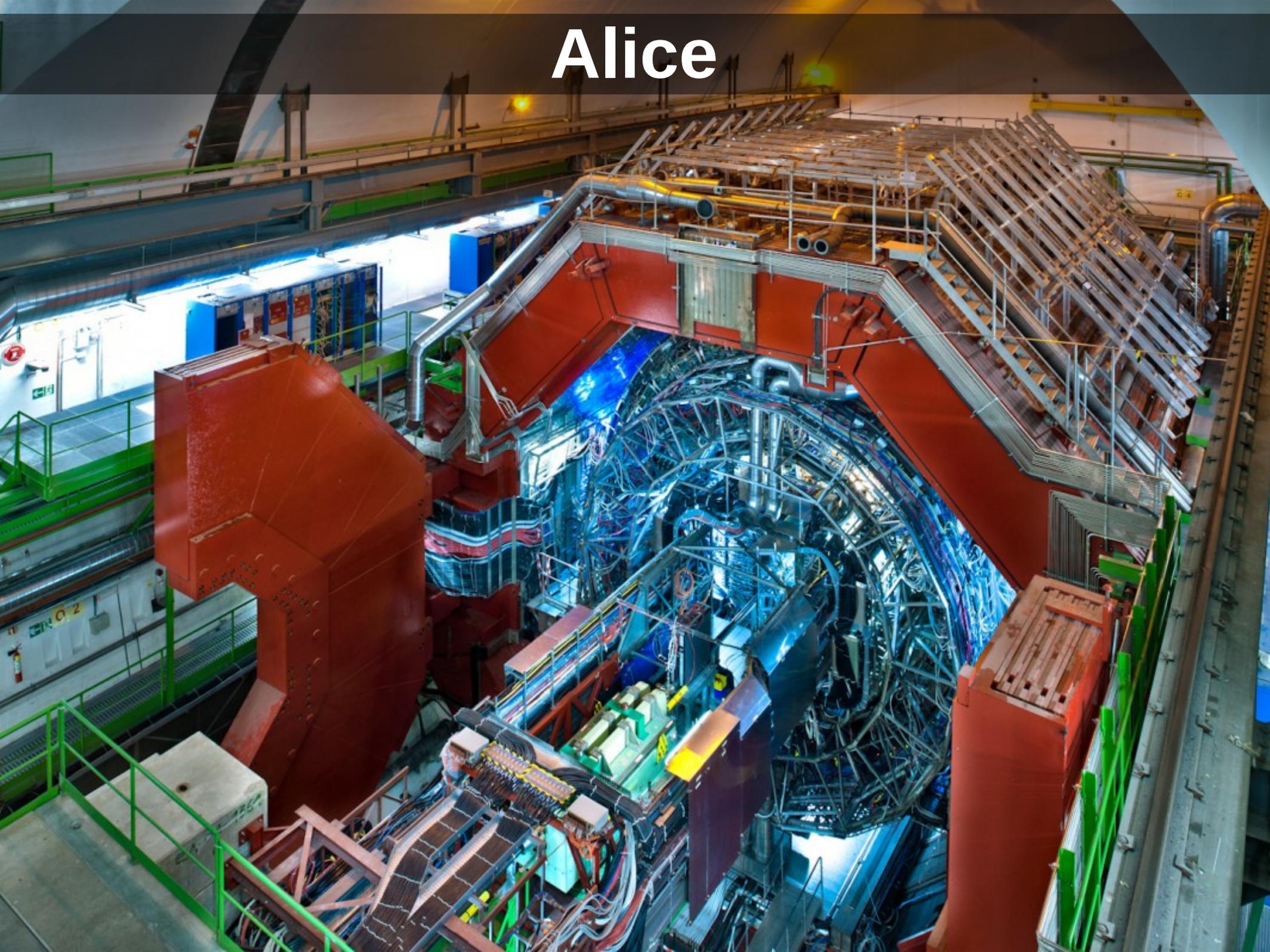
CERN

ALICE

ATLAS

CERN

Alice

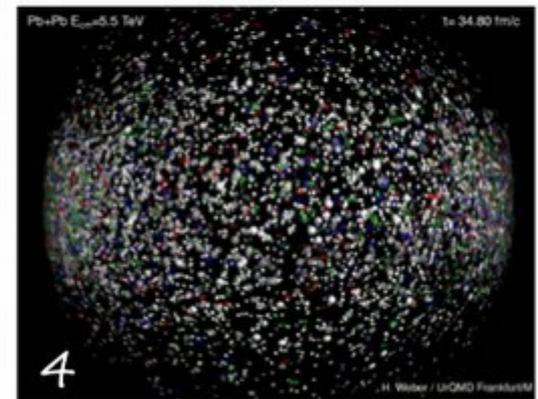
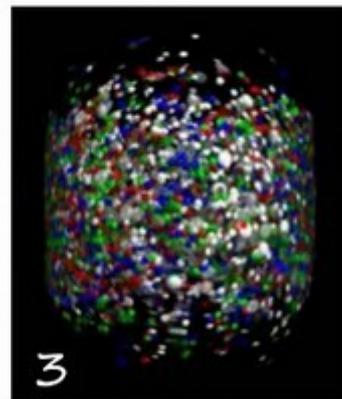
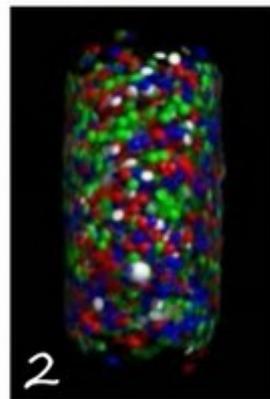
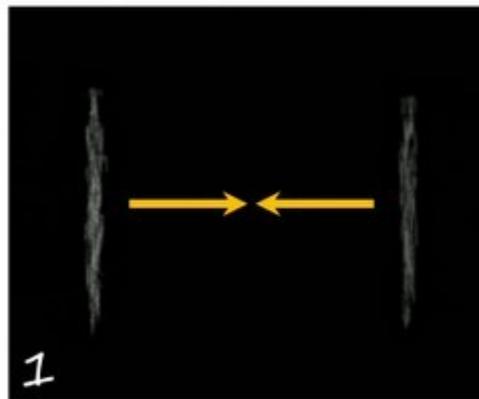


Un Mini-Bang al CERN

Come riproduciamo un mini Big-Bang?

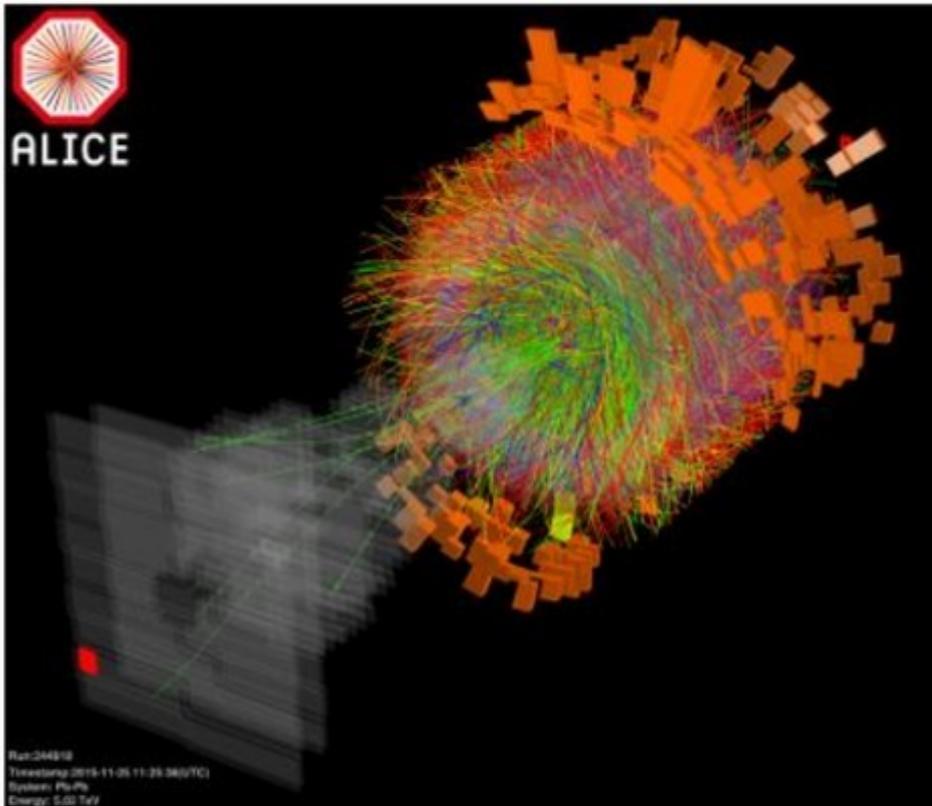
Tramite collisioni di nuclei pesanti accelerati fino a quasi la velocità della luce

1. Si fanno collidere l'uno contro l'altro, a **energie elevatissime (TeV/NN)**, due **ioni ^{208}Pb** : si hanno in ogni urto **416** nucleoni!
2. L'energia della collisione è concentrata in un volume delle dimensioni di un nucleo atomico: **densità d'energia ϵ simile a quella dell'universo** pochi μs dopo la formazione (decine di GeV/fm^3) \rightarrow l'elevata temperatura permette di rilasciare quarks e gluoni



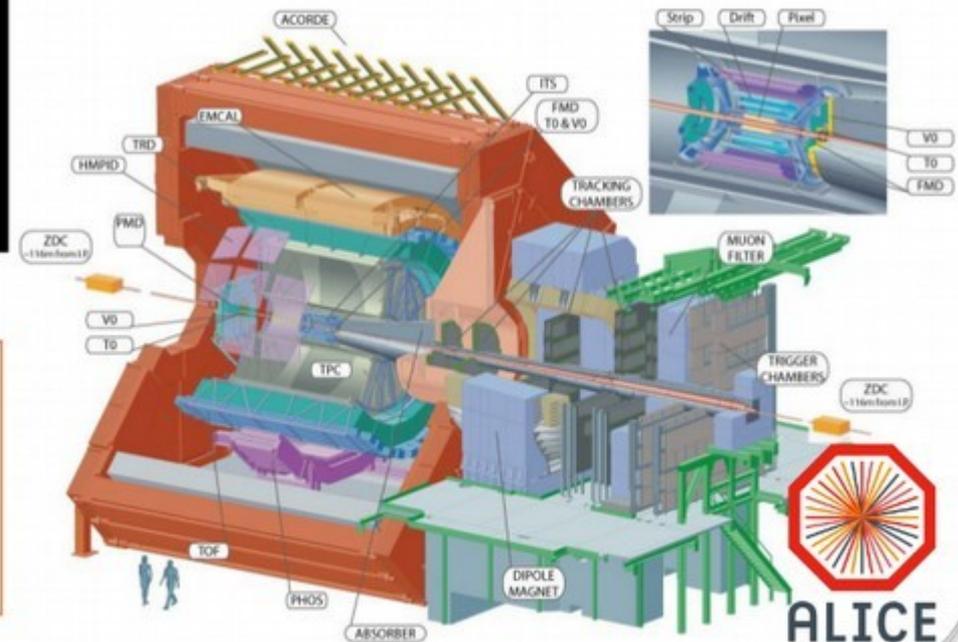
3. Gli adroni costituenti i due nuclei di Pb si fondono così nella **fireball, plasma di quark e gluoni (QGP)** che riproduce in piccolo il blob primordiale
4. Il plasma si espande e si raffredda fino a $T \sim 2 \cdot 10^{12}$ gradi, alla quale **quarks e gluoni si ricombinano** a formare la materia ordinaria ($t \sim 10^{-23}$ s)

ALICE: ritorno alle origini



Studiando questi eventi, ALICE esplora la fisica del confinamento, sonda le proprietà del vuoto, studia il meccanismo di generazione della massa e ci fornisce un'idea di come si comportasse la materia negli istanti immediatamente successivi al Big Bang

Apparato sperimentale ottimizzato per studiare le interazioni di ioni pesanti (Pb-Pb) e per rivelare le decine di migliaia di particelle prodotte in ogni collisione.



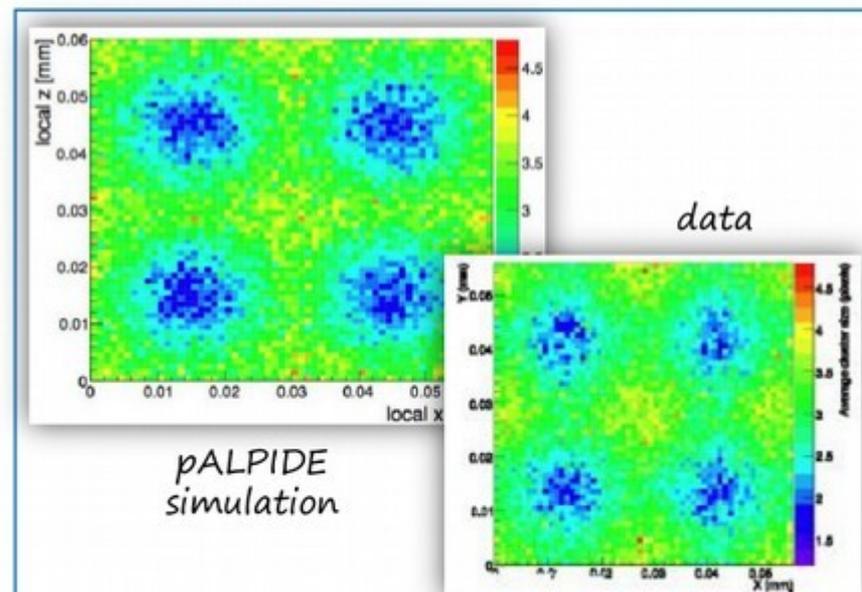
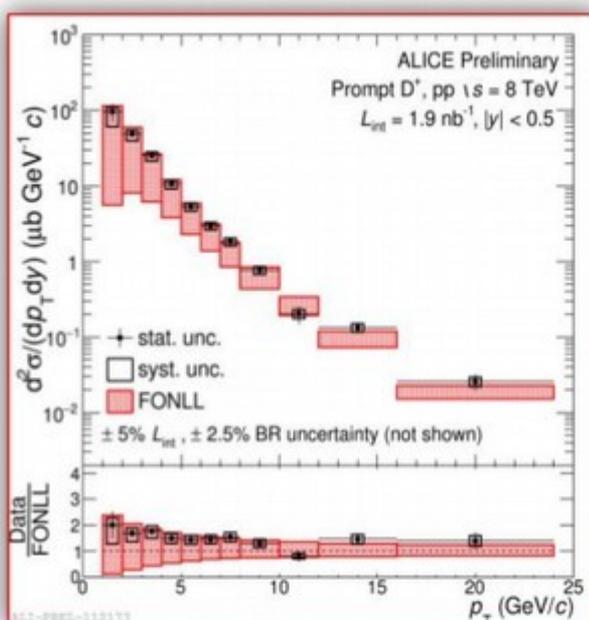
ALICE a Pavia



ALICE

Analisi dati:

fisica dell'heavy flavour (charm e beauty)
→ misura di sezione d'urto di produzione di mesoni charmati



Simulazione del rivelatore a pixel ITS:
upgrade del rivelatore di vertice
→ caratterizzazione e simulazione della risposta dei chip pALPIDE

Quality Assurance:

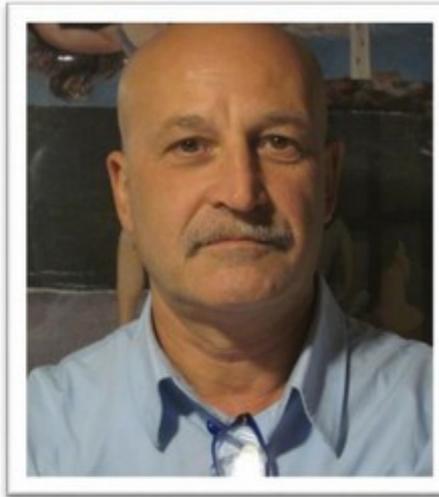
→ check delle prestazioni e del funzionamento del rivelatore ITS per dati e MC

Contatti

Alberto Rotondi
alberto.rotondi@unipv.it



Gianluigi Boca
gianluigi.boca@pv.infn.it



Susanna Costanza
susanna.costanza@pv.infn.it



+

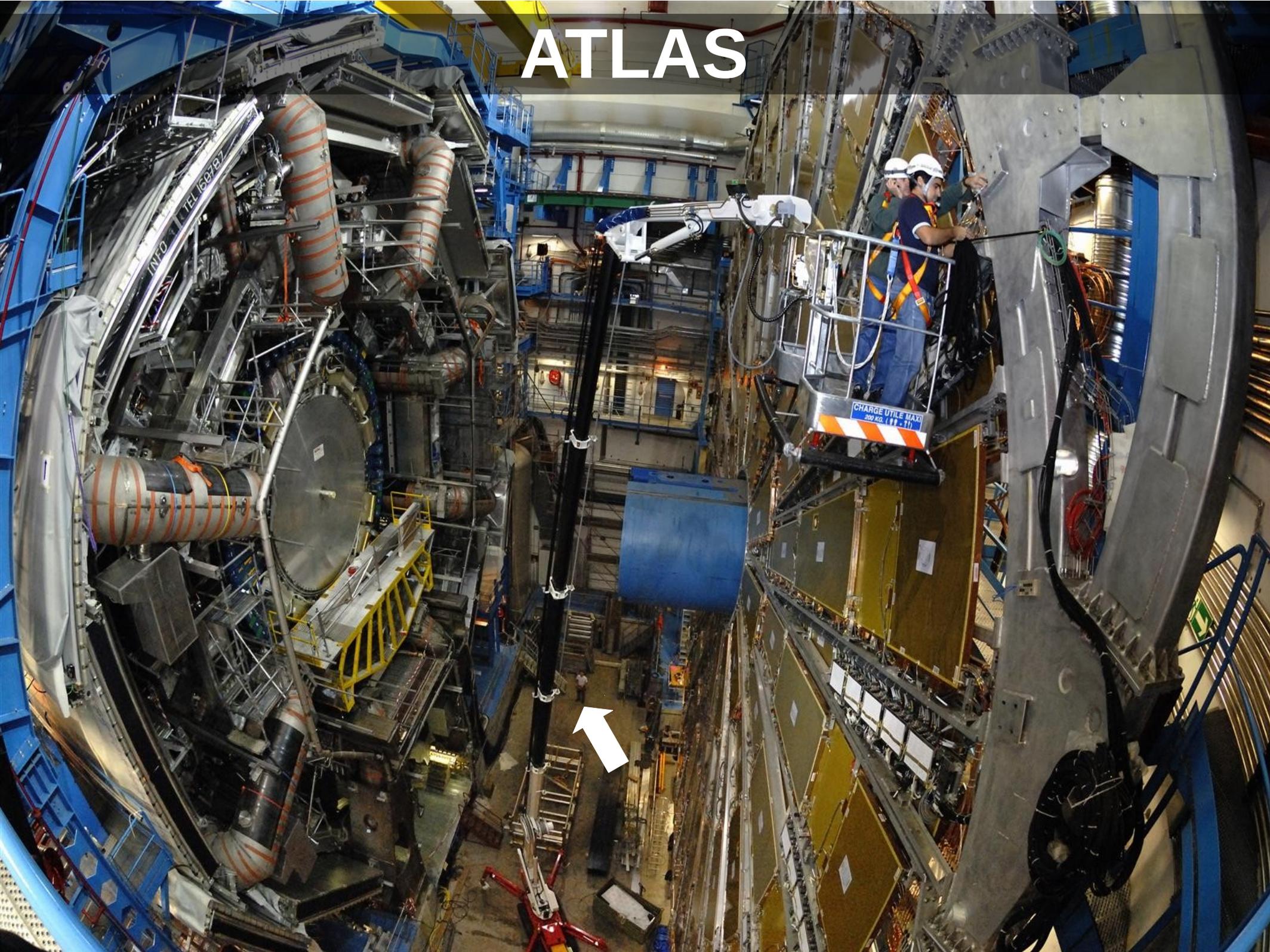
Gruppo collegato di Brescia (INFN): Germano Bonomi, Davide Pagano, Aldo Zenoni



Disponibilità di tesi!!!



ATLAS



INFO TEL 159787

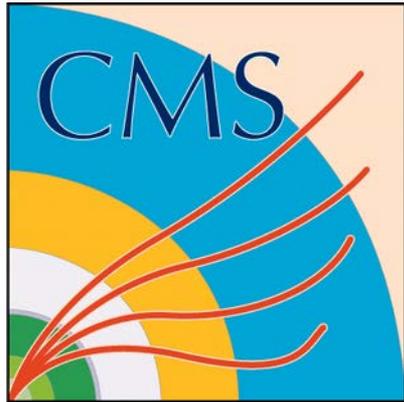
CHARGE UTILE MAXI
200 KG. (440 LB.)



CMS



Gruppo CMS



Ilaria Vai



Martina Ressegotti



Chiara Aimè



Davide Fiorina



Simone Calzaferri



Cristina Riccardi



Alessandro Braghieri



Paolo Montagna



Valerio Re



Alessandro Manghisoni



Paola Salvini



Paolo Vitulo



Ludovico Ratti



Gianluca Traversi



+ altri

Gruppo ATLAS Pavia



Gianluca
Introzzi



Roberto
Ferrari

Gabriella
Gaudio
Team Leader

Adele
Rimoldi

Andrea
Negri

Valerio
Vercesi

Daniela
Rebuzzi

Michele
Livan



Giacomo
Polesello

Giulia
Rovelli

Athina
Kourkoumeli

Edoardo
Farina



Simone
Sottocornola



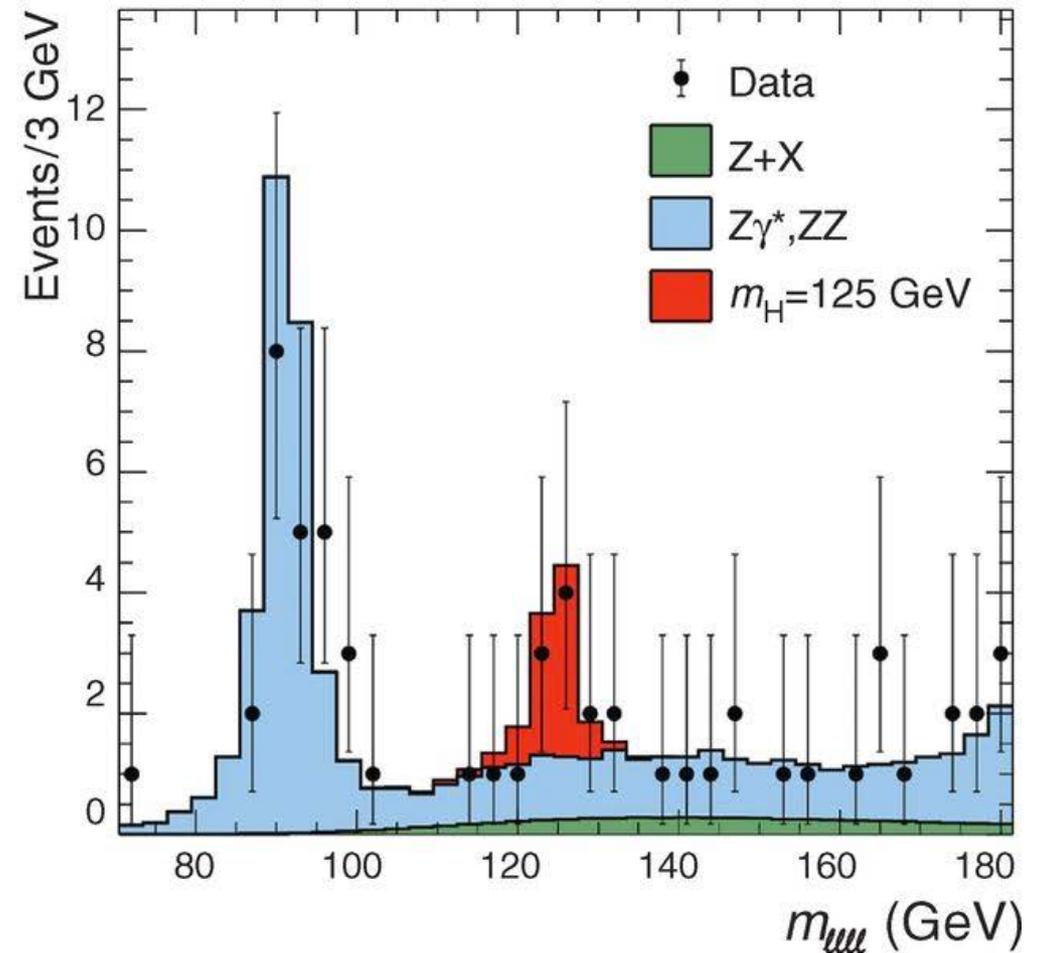
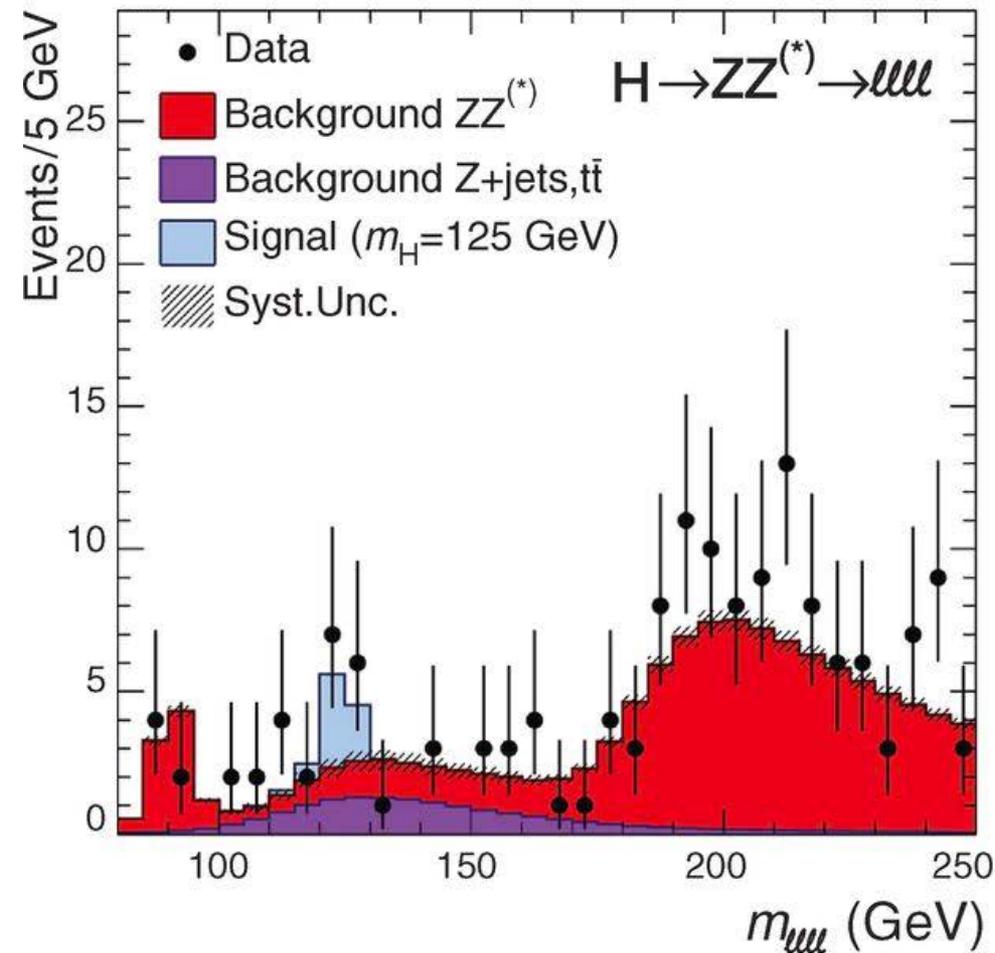
Agostino
Lanza



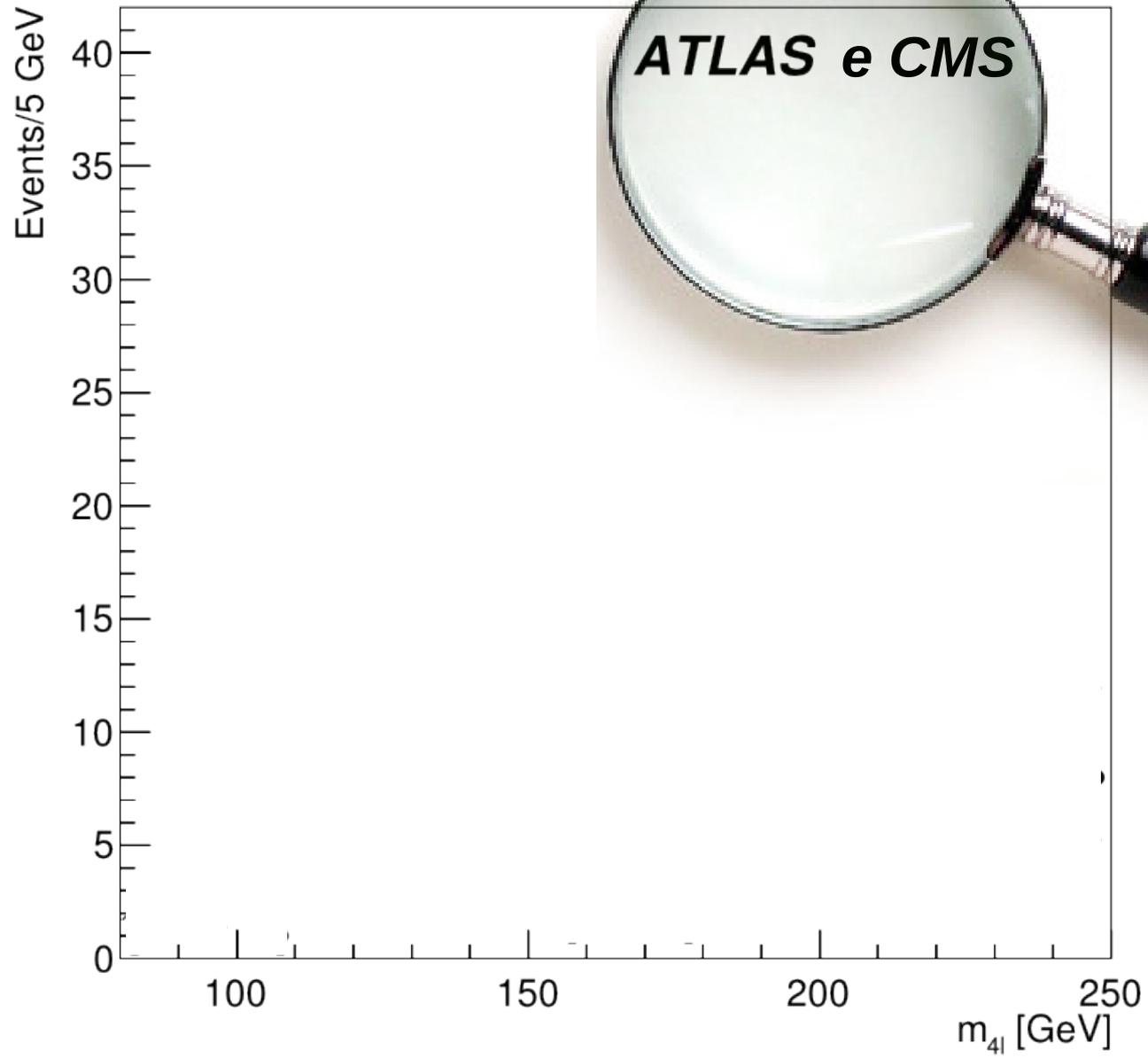
Lorenzo
Pezzotti

Scoperta Bosone di Higgs

- 4 Luglio 2012: ATLAS e CMS annunciano scoperta del bosone di Higgs



I rivelatori



Ricerca e sviluppo di rivelatori



Ricerca e sviluppo di rivelatori



All'epoca

- Io avevo i capelli
- Il prof. Vitulo era nerd
- La prof. Rebuzzi era dotata di massa propria



Costruzione: 2001



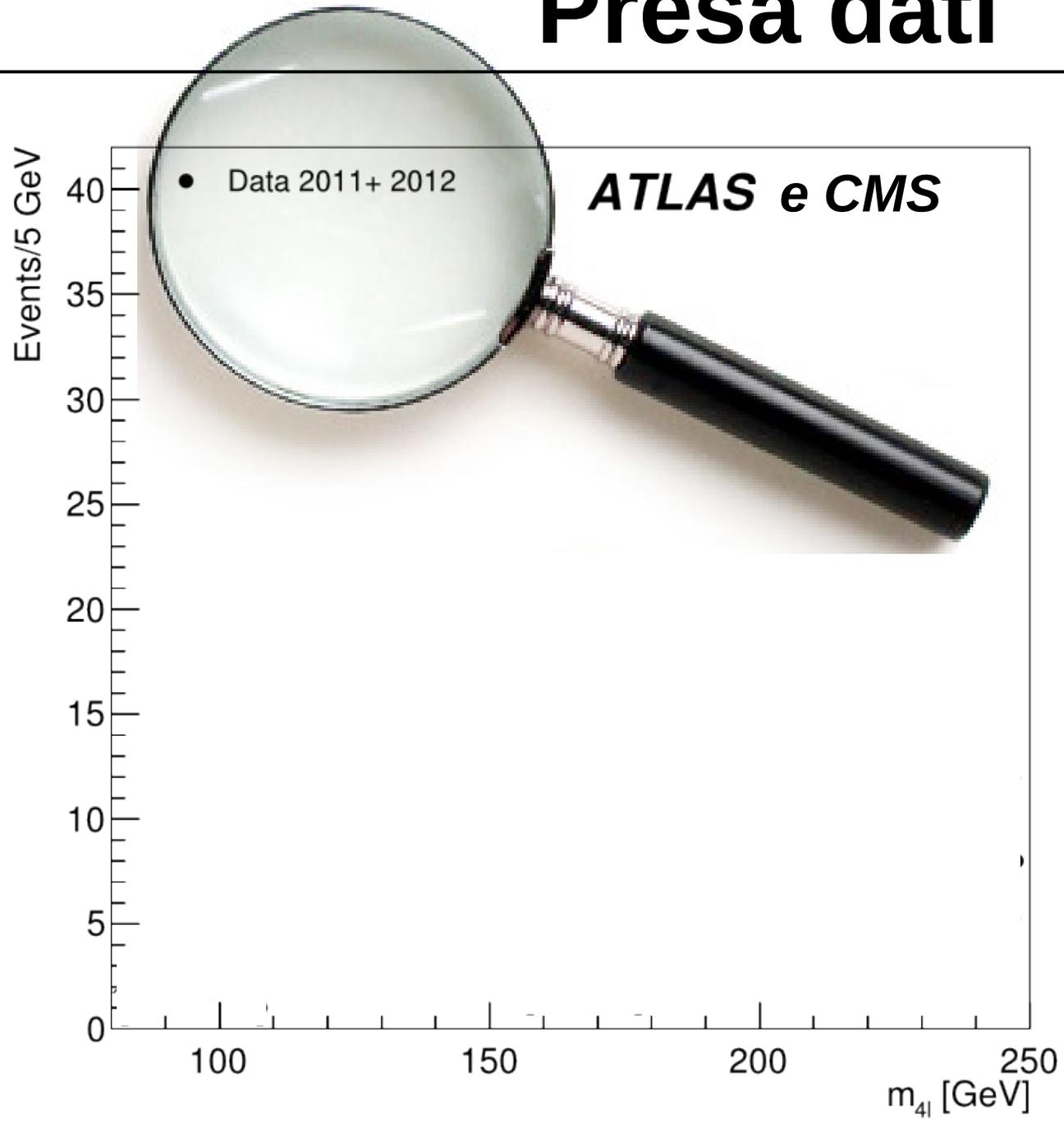
Costruzione: 2002



Costruzione: 2003-2006



Presca dati



Presena dati: 2010-12, 2015-18, 2021-...

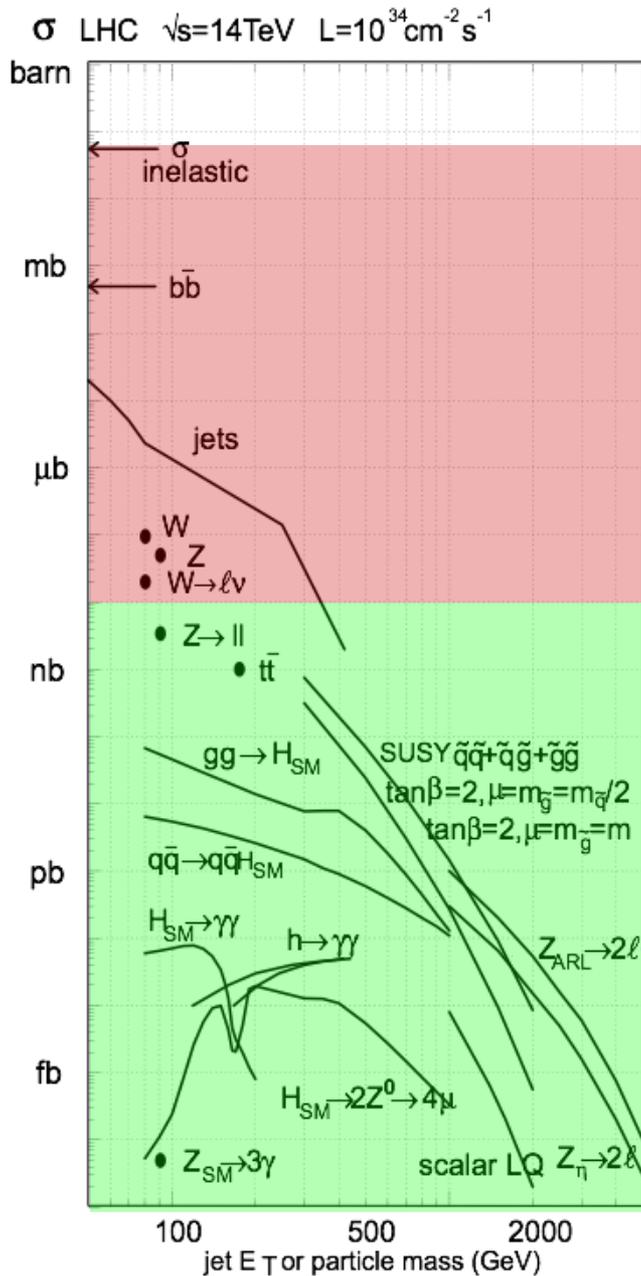


Manutenzione e monitoraggio

- Manutenzione dei sottorivelatori
 - RPC @CMS
 - MDT @ATLAS
- Misure invecchiamento rivelatori (CMS)
 - Misura corrente per valutare la resistività degli elettrodi nel tempo
- Monitoraggio
 - Verifica costante delle performance dei rivelatori (ATLAS, CMS)



Eventi Rari: selezione



Rate

GHz → Collisioni (60 TB/s)

10^8 canali

MHz

kHz

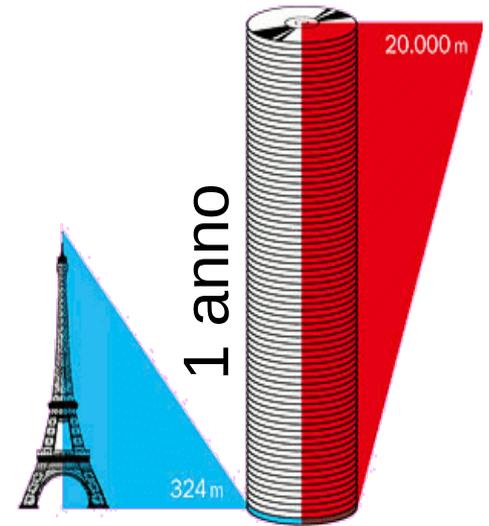
→ Scrittura (1 GB/s)
 $1/10^5$ collisioni

Hz

mHz → Higgs

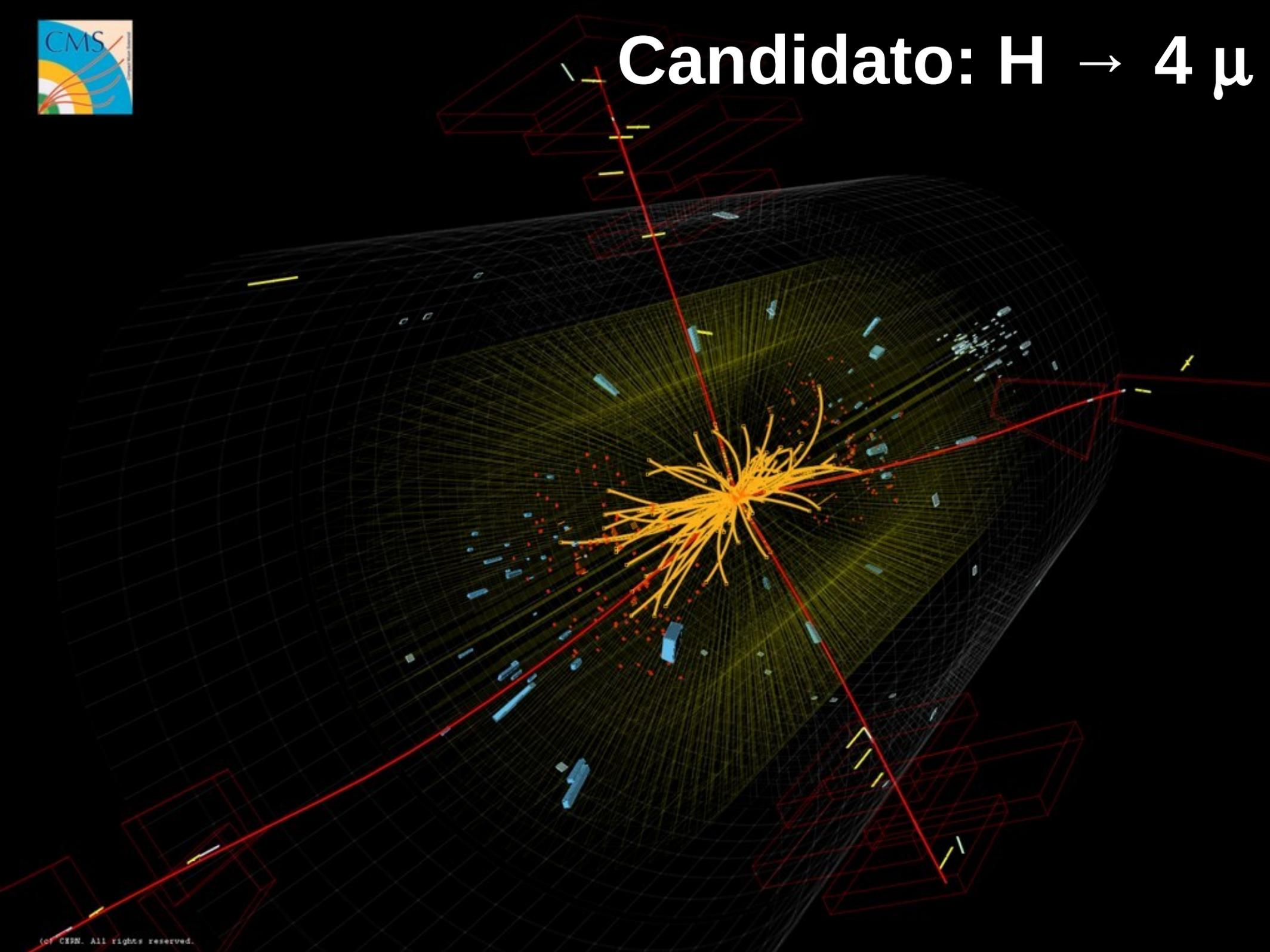
$1/10^{10}$ collisioni

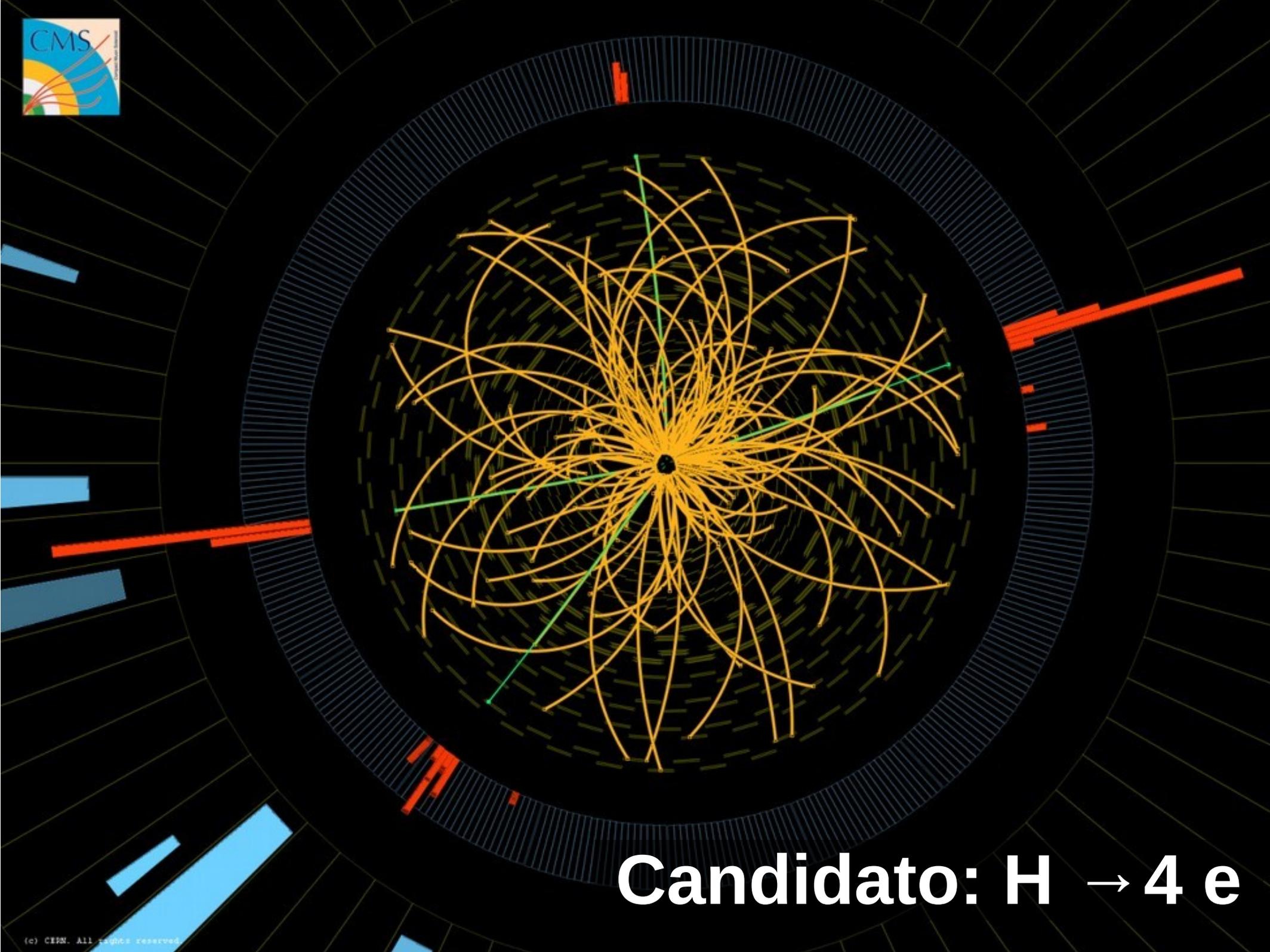
μHz





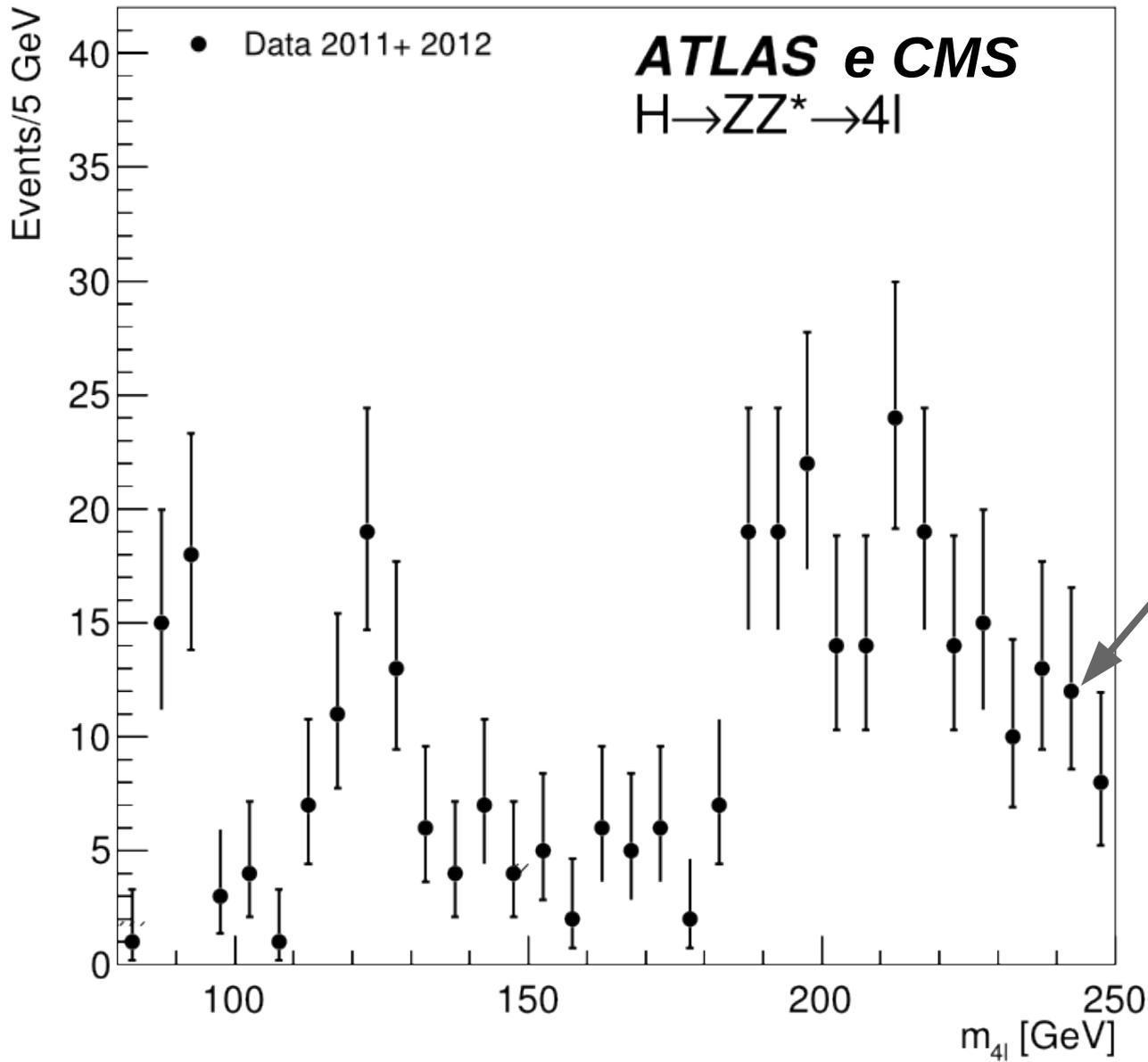
Candidato: $H \rightarrow 4 \mu$





Candidato: $H \rightarrow 4 e$

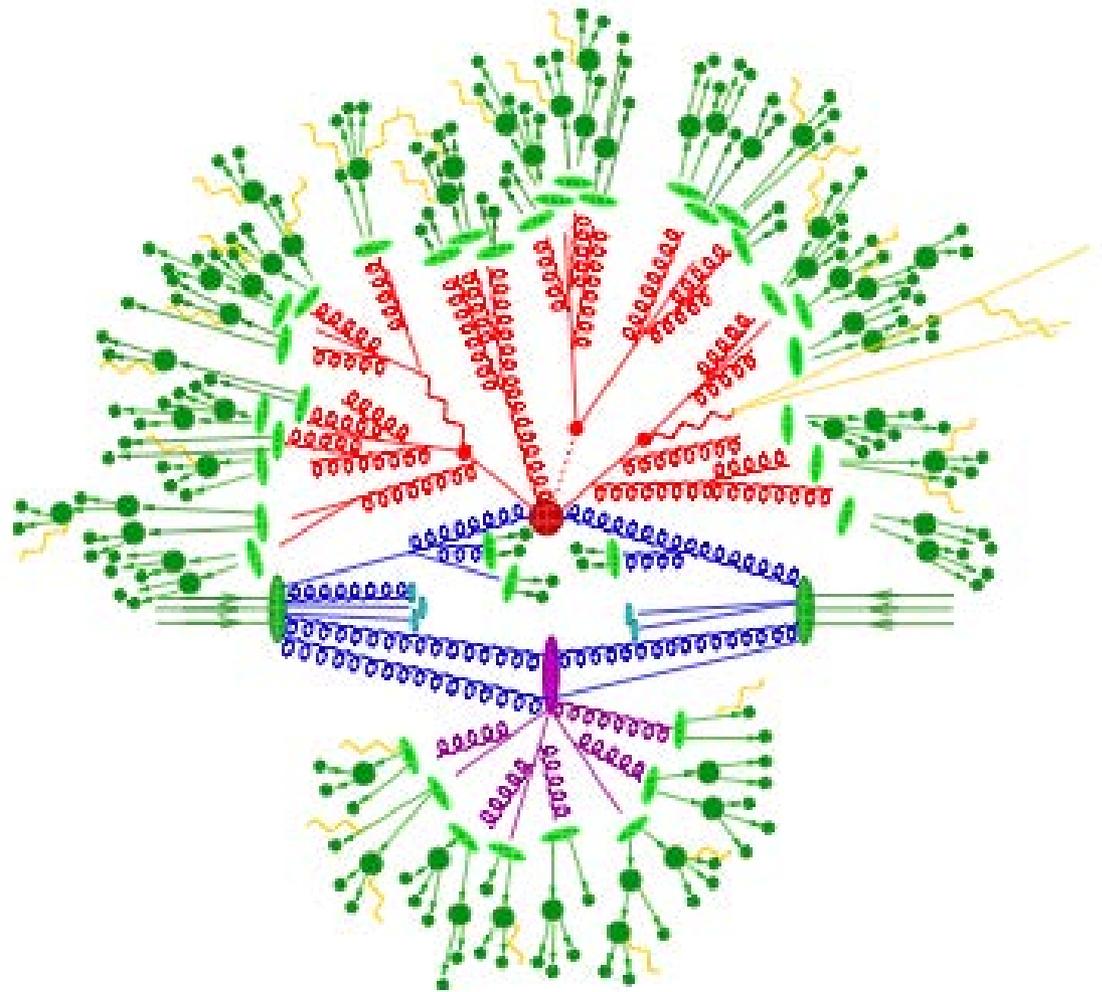
Con 2 anni di dati



**I punti sono
i dati
sperimentali**

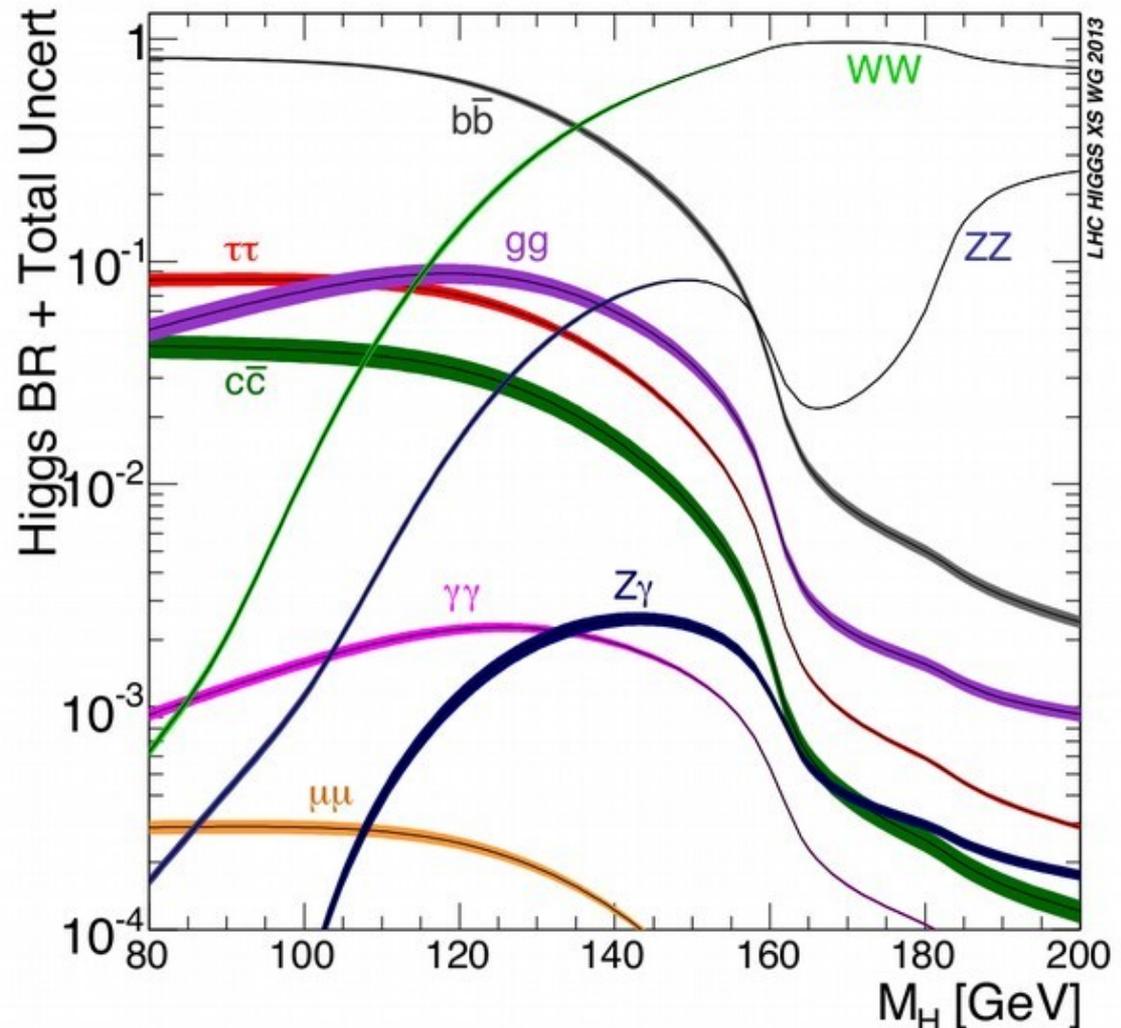
Fenomenologia

- Per l'analisi dei dati è necessaria una perfetta conoscenza dei modelli teorici
- Simulazione
 - Sia del segnale
 - Che del fondo
- Esempio
 - Studio delle sezioni d'urto di produzione e dei branching ratio di decadimento del bosone di Higgs

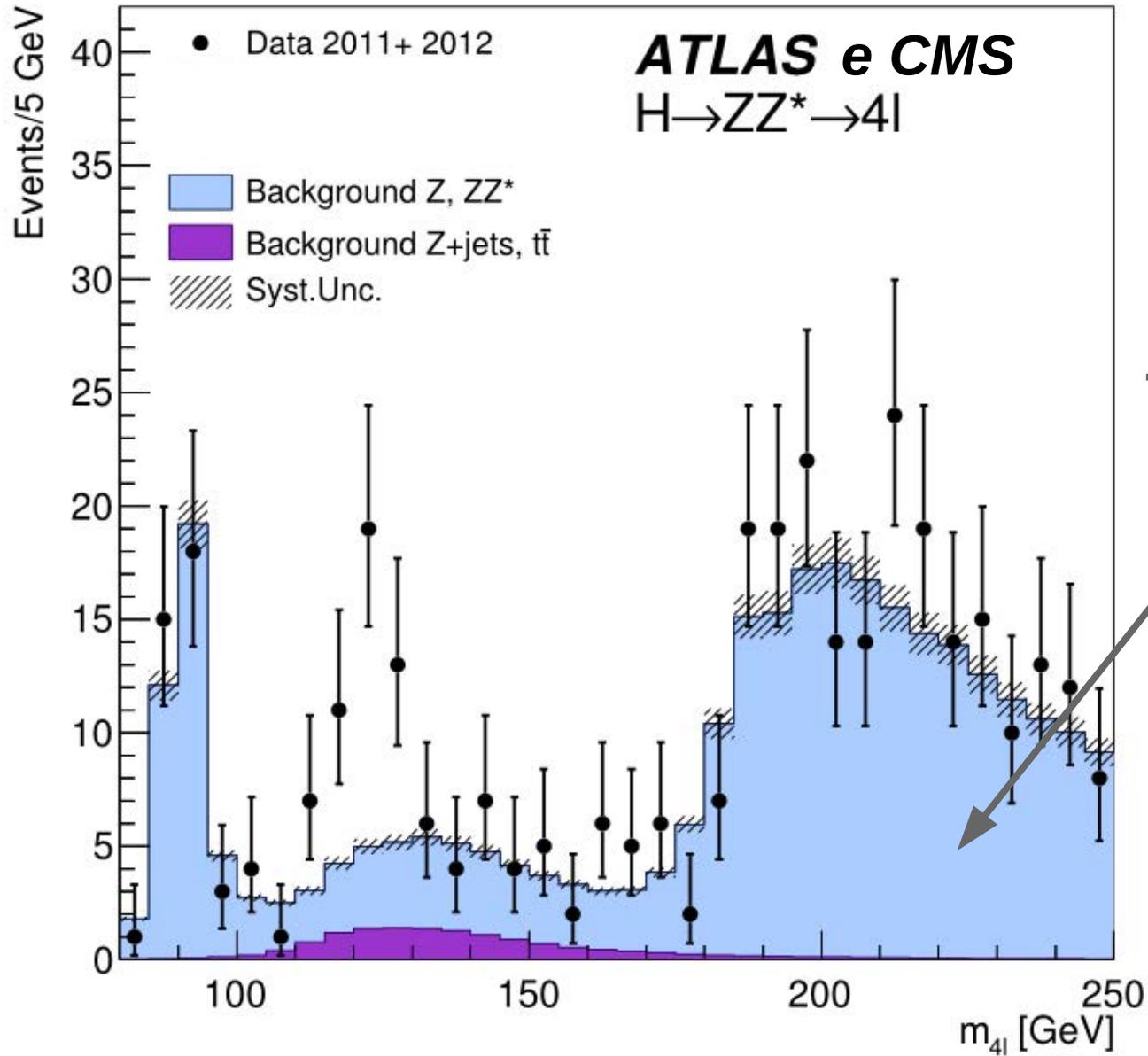


Fenomenologia

- Per l'analisi dei dati è necessaria una perfetta conoscenza dei modelli teorici
- Simulazione
 - Sia del segnale
 - Che del fondo
- Esempio
 - Studio delle sezioni d'urto di produzione e dei branching ratio di decadimento del bosone di Higgs

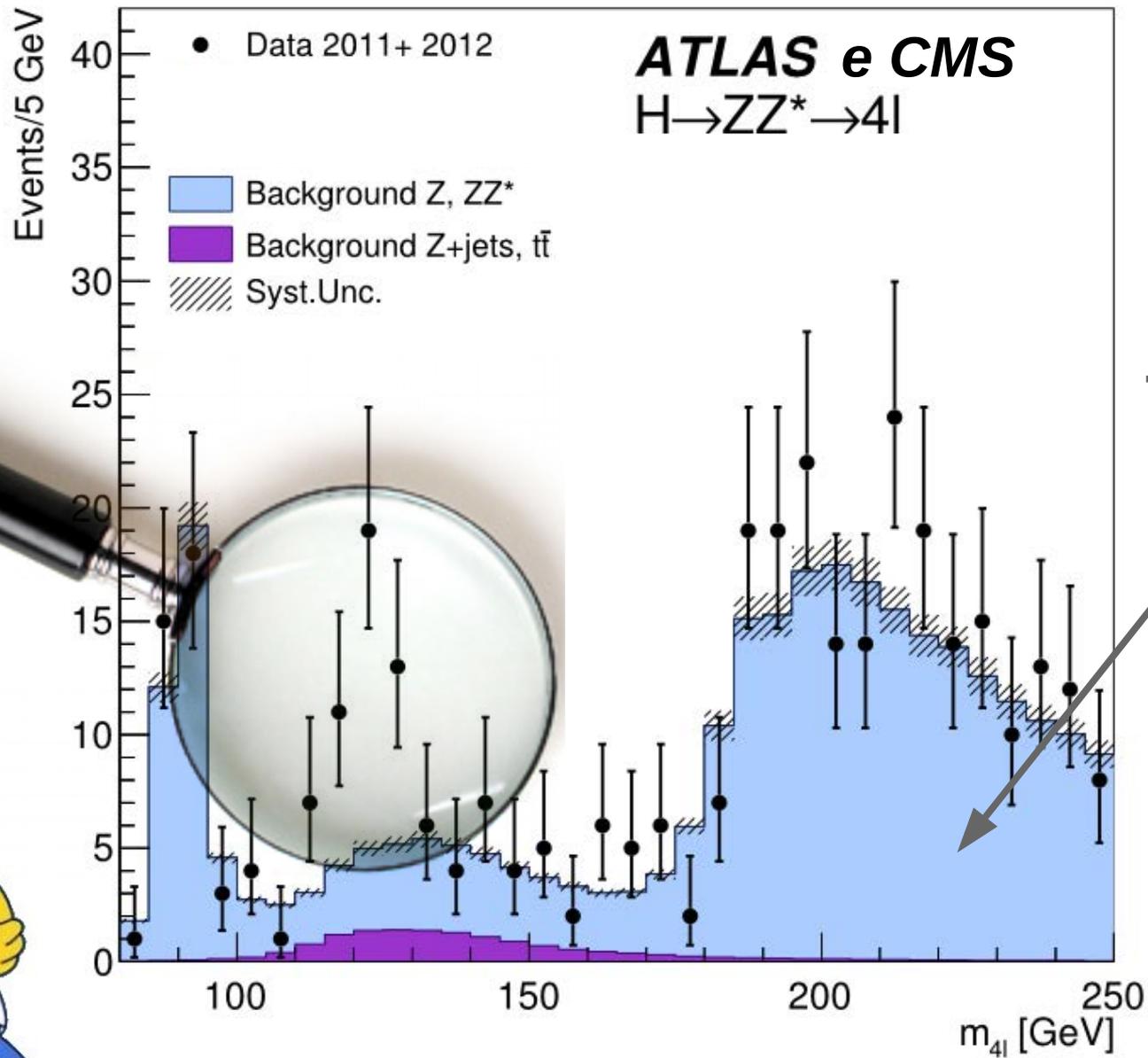


Con 3 anni di dati



L'area blu
è il fondo
atteso

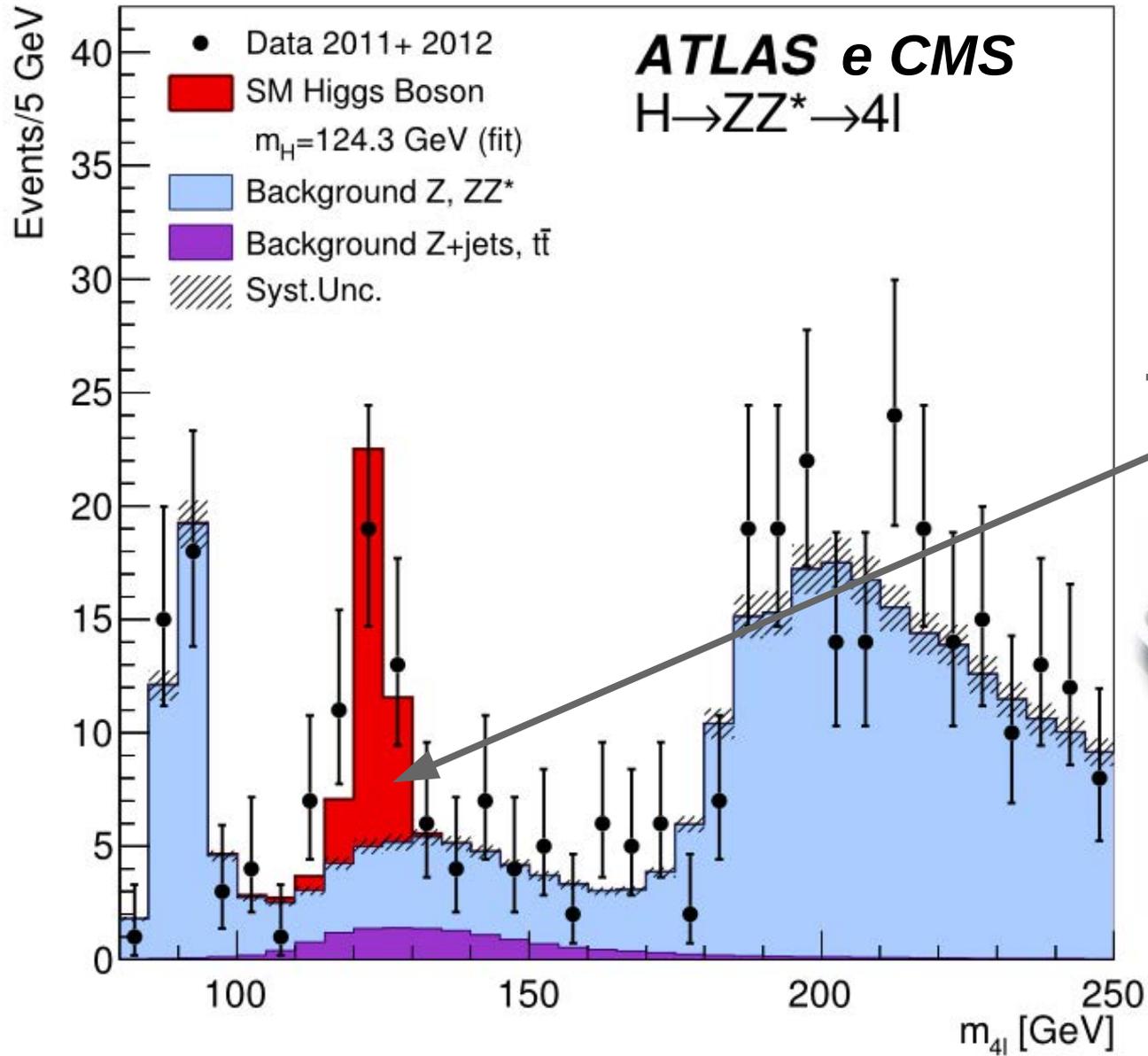
Con 3 anni di dati



L'area blu
è il fondo
atteso



Con 3 anni di dati

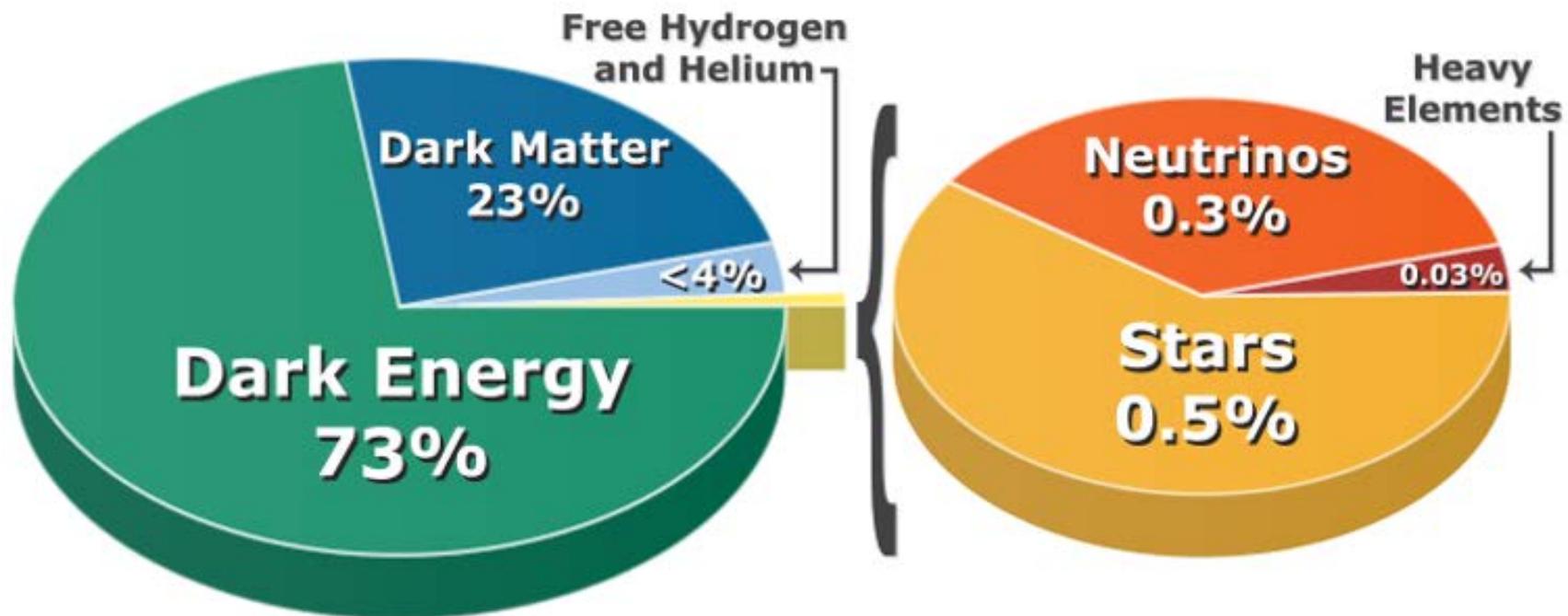


L'area rossa
è il segnale
atteso se ci
fosse l'Higgs



Fisica delle particelle: stato

- La scoperta del bosone di Higgs ha completato il modello standard. Ora sappiamo tutto?
 - No, non sappiamo quasi niente



Inoltre

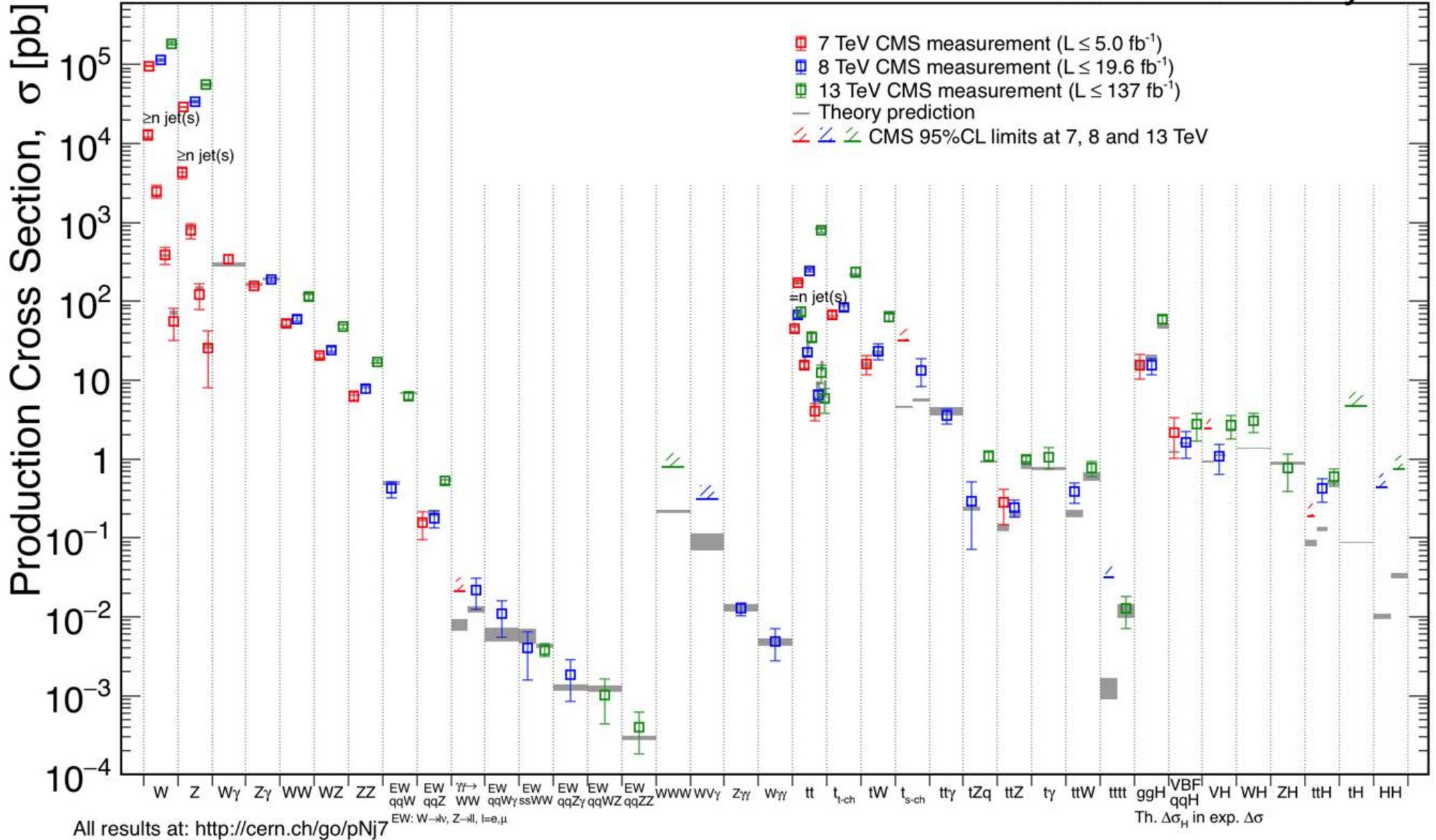
- I quark sono **indivisibili**?
- Dov'è finita l'antimateria?
- Esistono altre **dimensioni**?
- Esiste una teoria che unisca tutte le forze fondamentali?
- Cos'è la **materia oscura** ?
- Cos'è l' **energia oscura** ?



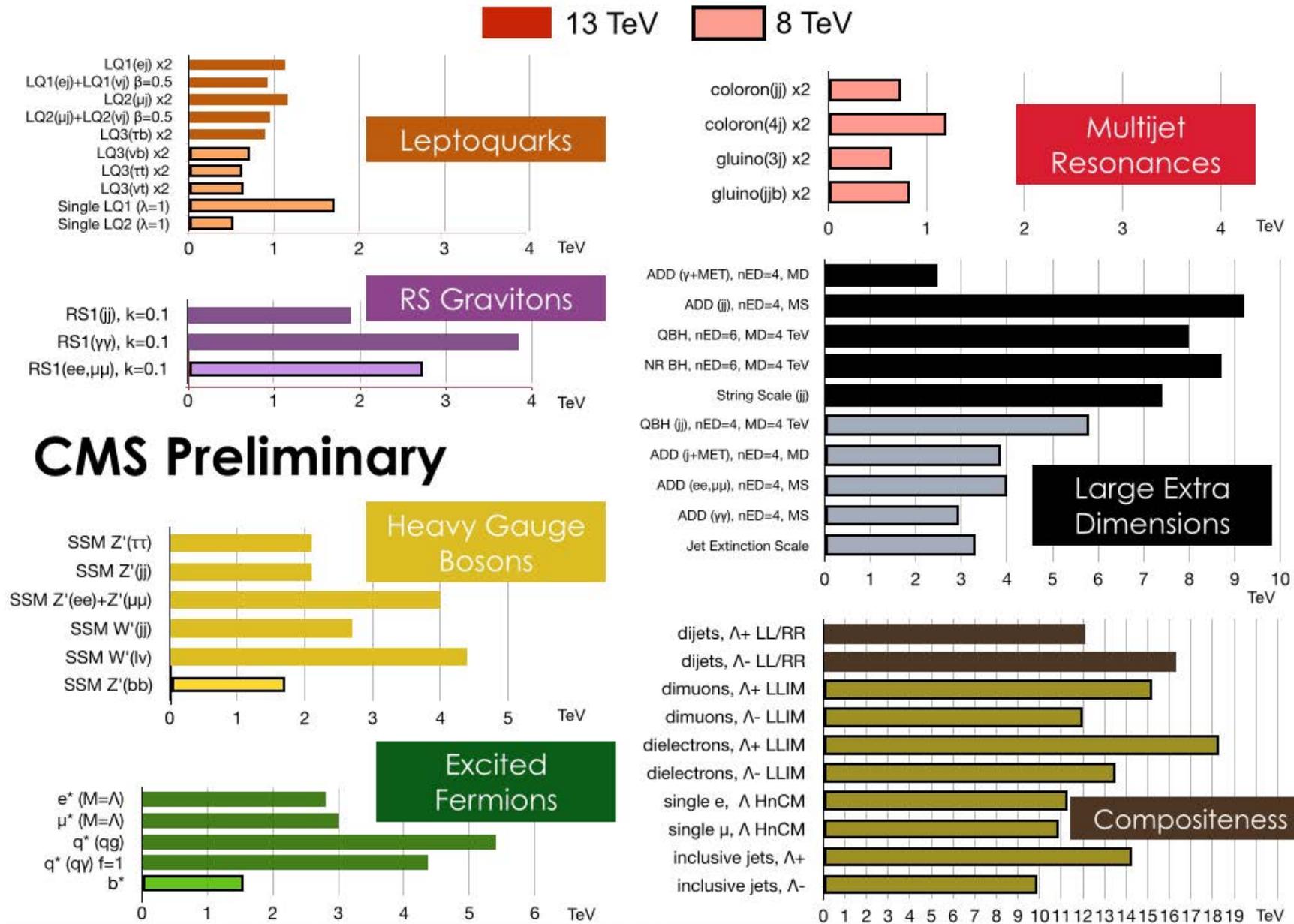
Decine di analisi in corso

March 2019

CMS Preliminary

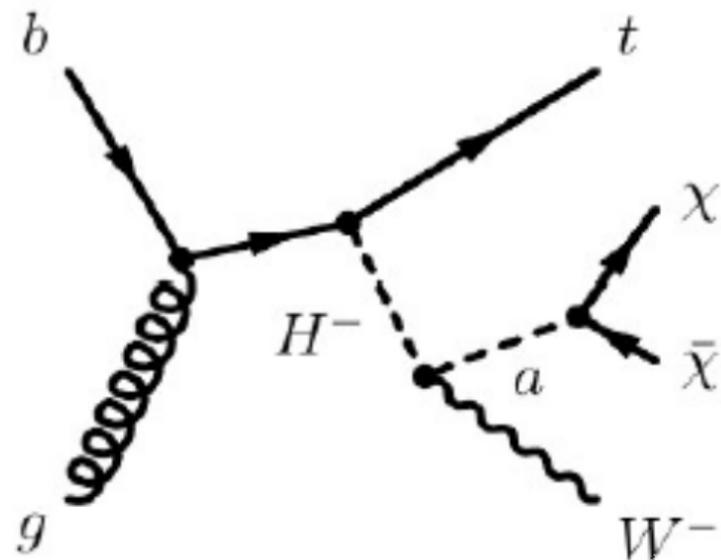
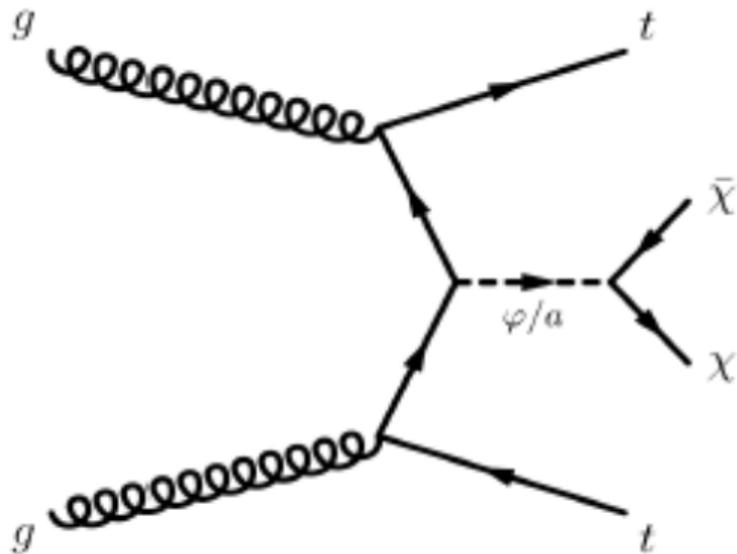


Decine di analisi in corso



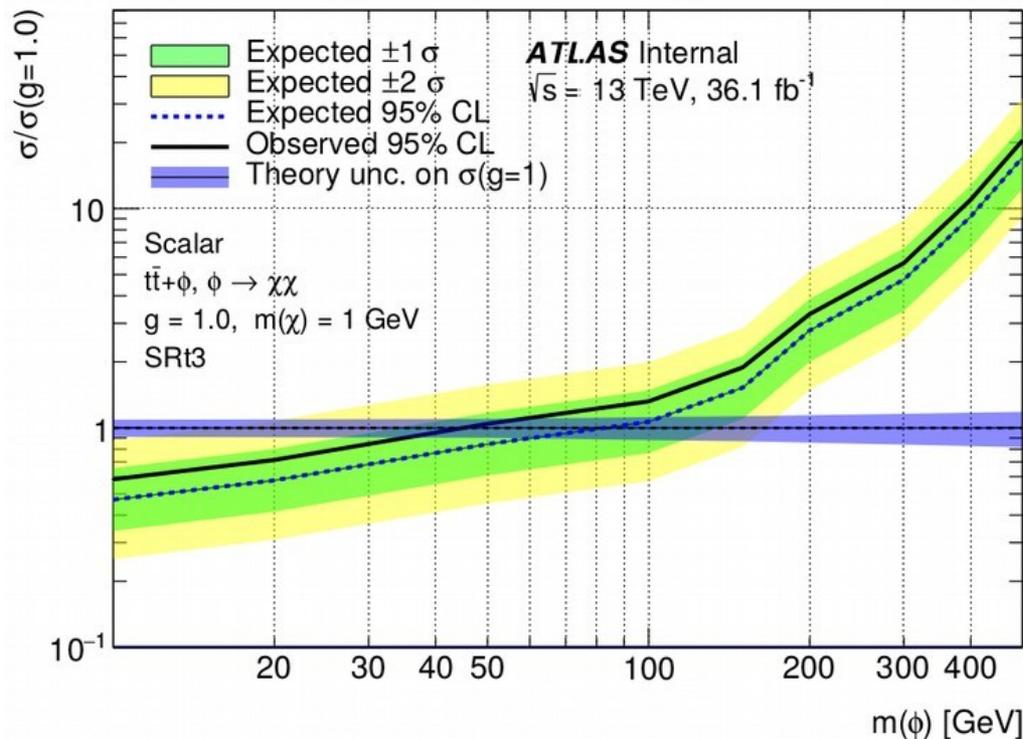
Analisi a Pavia (ATLAS)

- Ricerca di **supersimmetrie** e **dark matter**
 - Test di teorie oltre il modello standard
- Esempio: produzione di **dark matter**
 - mediata da nuova particella scalare
 - Mediata da Higgs carico in associazione col top



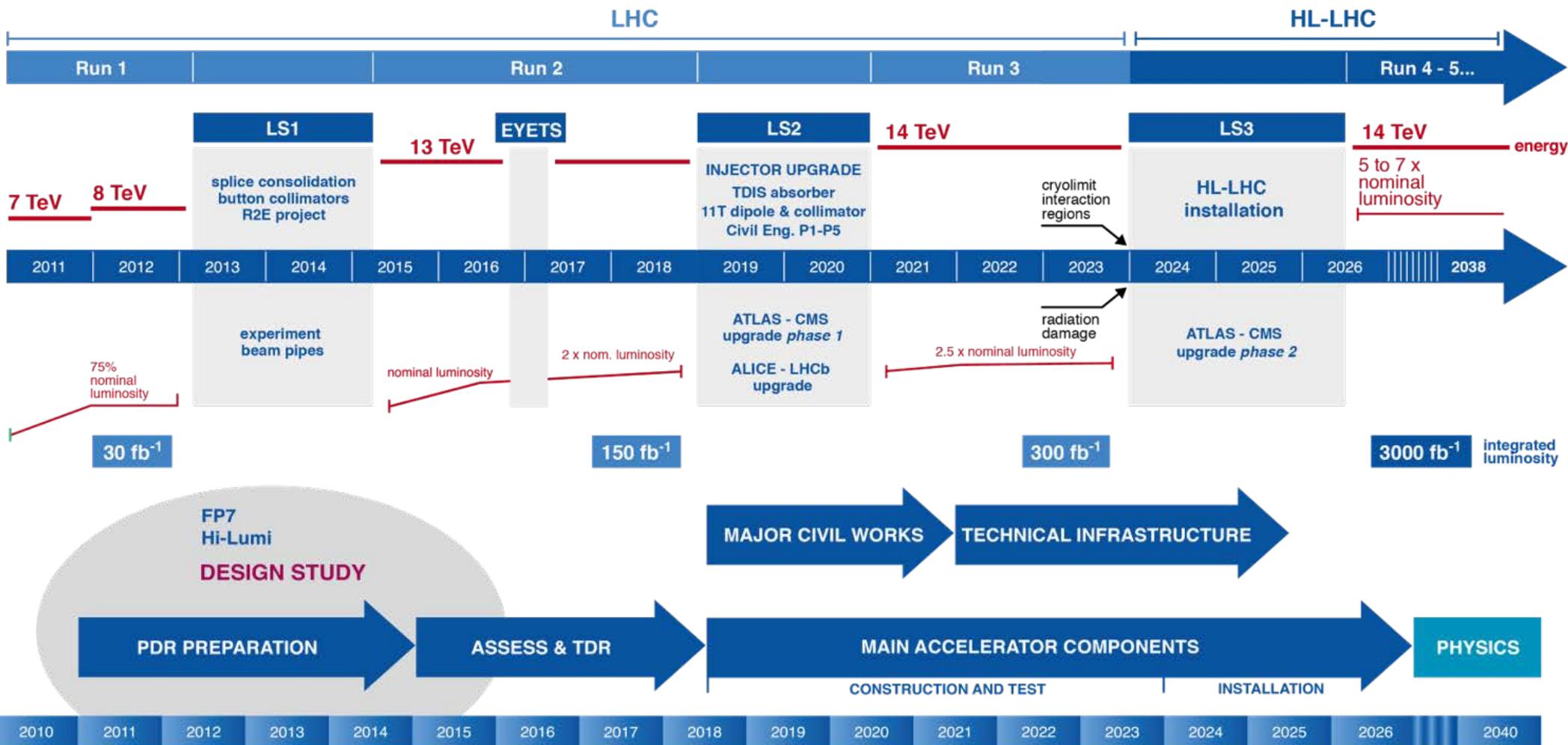
Analisi a Pavia (ATLAS)

- Ricerca di **supersimmetrie** e **dark matter**
 - Test di teorie oltre il modello standard
- Esempio: produzione di **dark matter**
 - mediata da nuova particella scalare
 - Mediata da Higgs carico in associazione col top



Decenni di ricerche e pubblicazioni

LHC / HL-LHC Plan



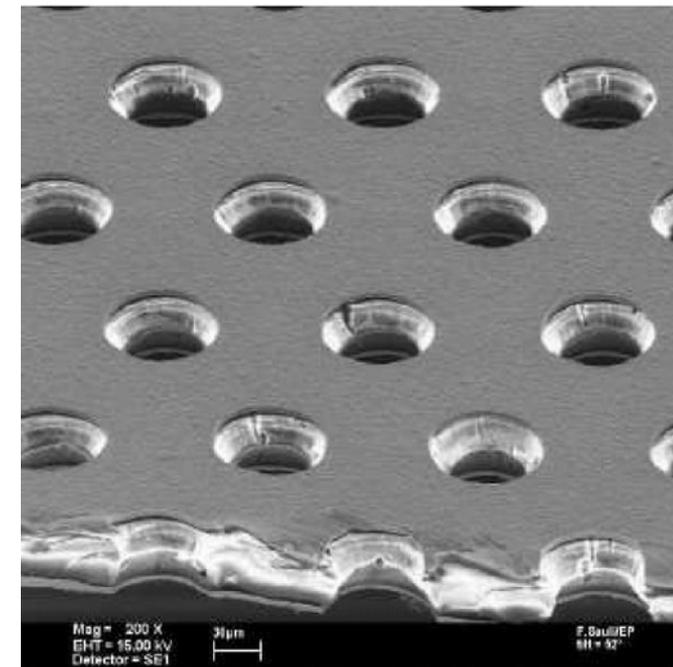
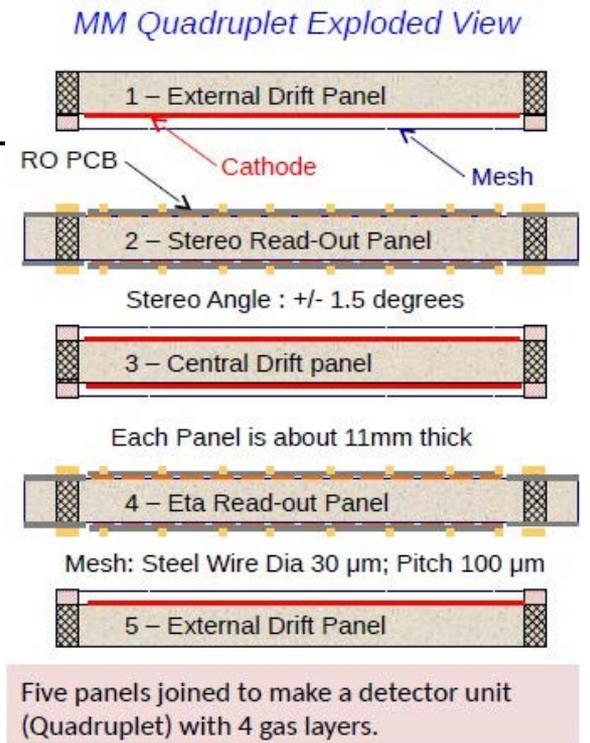
Attività di upgrade

- ATLAS

- Sviluppo e costruzione di Micro Pattern Gas Detector tipo Micro Mega per il run 3
- Sviluppo e installazione di tracciatori hardware: FTK per run 3 e HTT per run 4
- Nuovo sistema di dataflow per run 4

- CMS

- Studi di longevità di rivelatori RPC per il run 3
- Sviluppo e caratterizzazione di Micro Pattern Gas Detector tipo GEM per il run 3 e run 4
- Realizzazione dei chip di readout del futuro tracciatore interno per run 4



What next?

LHC

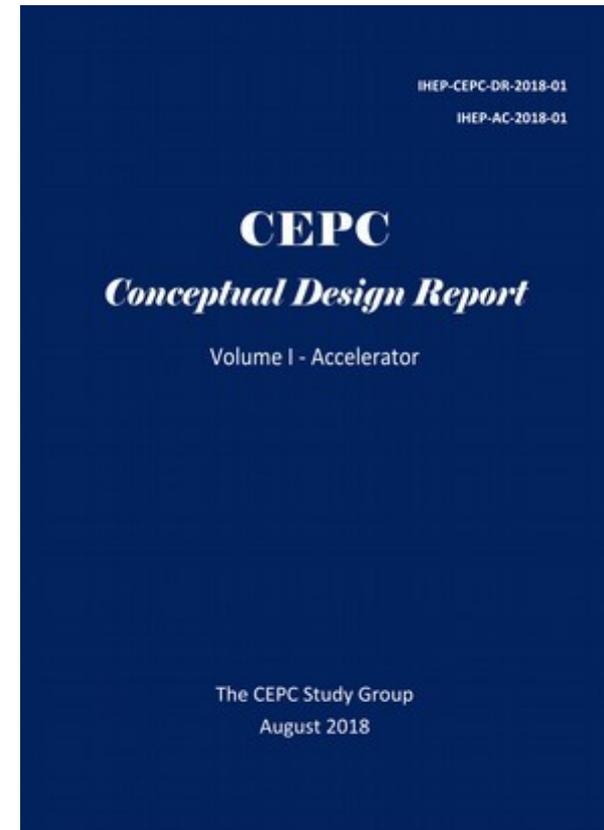
FCC

100 KM LONG



E dopo LHC?

- Attualmente grande fermento per i futuri acceleratori
 - **FCCee** → **FCChh** al CERN
 - **CepC** → **CppC** in Cina
 - **Muon collider** al CERN
- Studi sulle potenzialità di fisica
 - in collaborazione con i colleghi teorici
- R&D sui rivelatori di particelle
 - Ogni nuovo obiettivo di ricerca comporta lo sviluppo di nuove tecnologie di rivelazione delle particelle
 - Più precise, più resistenti, più veloci
 - Con ricadute in molteplici ambiti



Test Beam



CV (sub)nucleare: cosa si impara?

- La **fisica** delle particelle elementari
 - Da subito sul fronte della ricerca (in prima persona)
- Il **lavoro di gruppo** in ambiente internazionale e altamente competitivo
 - Comunicazioni regolari a meeting di collaborazione
 - Sviluppo capacità critica e autonomia
- Meccanica, elettronica e informatica
 - Tecnologia all'avanguardia con ricadute sulla società
 - C++, python, scripting
- Analisi dei dati (**big data & analytics**)
 - La fisica delle particelle tratta big data da sempre