

# Curriculum di Fisica Nucleare e Subnucleare (72 CFU)



Daniela Rebutti e Paolo Vitulo  
Università di Pavia e INFN, Sezione di Pavia



---

Presentazione Laurea Magistrale in Scienze Fisiche  
Pavia - 17 maggio 2017

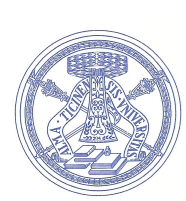


12 CFU acquisibili con i seguenti insegnamenti obbligatori:

Nome insegnamento	Settore	CFU	Semestre	Laurea <sup>(1)</sup>
Laboratorio di fisica nucleare e subnucleare I	FIS/04	6	II	M
Rivelatori di particelle	FIS/01	6	II	M

6 CFU acquisibili con 1 insegnamento scelto dal seguente elenco:

Nome insegnamento	Settore	CFU	Semestre	Laurea <sup>(1)</sup>
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 matematici della fisica teorica	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



24 CFU acquisibili con 4 insegnamenti scelti dal seguente elenco:

Nome insegnamento	Settore	CFU	Semestre	Laurea <sup>(1)</sup>
Fisica delle particelle elementari I	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

6 CFU acquisibili con 1 insegnamento scelto dal seguente elenco:

Nome insegnamento	Settore	CFU	Semestre	Laurea <sup>(1)</sup>
Tecniche digitali di acquisizione dei dati	FIS/01	6	I	T
Tecnologie fisiche e beni culturali	FIS/07	6	II	T
Procedimenti informatici di simulazione	FIS/01	6	II	M
Metodi statistici della fisica	FIS/01	6	I	M



12 CFU acquisibili con 2  
insegnamenti nei settori  
FIS/05, MAT/05, MAT/06,  
MAT/08, INF/01, ING-IND/  
09, ING-IND/18, ING-INF/01,  
ING-INF/05, ING-INF/07,  
MED/36

12 CFU acquisibili mediante  
insegnamenti a scelta libera

- Astronomia/astrofisica
- Analisi matematica
- Probabilità e statistica matematica
- Analisi numerica
- Informatica
- Sistemi per energia e ambiente
- Fisica dei reattori nucleari
- Elettronica
- Sistemi elaborazione delle informazioni
- Misure elettriche e elettroniche
- Diagnostica per immagini e radioterapia



- 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**
- L'attività di ricerca, che si svolge in collaborazione con oltre duecento istituzioni italiane e straniere, dà luogo ogni anno a un centinaio di pubblicazioni scientifiche sulle più importanti riviste internazionali, a una ventina di comunicazioni a congressi di fisica in ogni parte del mondo, a molte tesi di laurea e di dottorato



# Laboratori di ricerca



I Laboratori internazionali presso i quali sono attualmente in corso esperimenti cui partecipano gruppi di ricerca di Pavia sono:

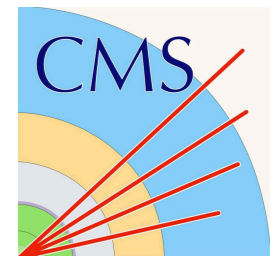
- Centro Europeo Ricerche Nucleari (**CERN**), Ginevra (CH)
- Paul Scherrer Institute (**PSI**), Zurigo (CH)
- Laboratori **GSI** (D)
- Rutherford Appleton Laboratories, **RAL**, Didcot (UK)
- Mainz Microtron (**MAMI**), Magonza (D)
- Laboratori Nazionali di **Frascati** dell'INFN (LNF), Frascati
- Laboratori Nazionali di **Legnaro** (PD)
- Laboratorio di Energia Nucleare Applicata (**LENA**), Pavia
- Fermi National Laboratory (**FERMILAB**), Chicago (IL, USA)



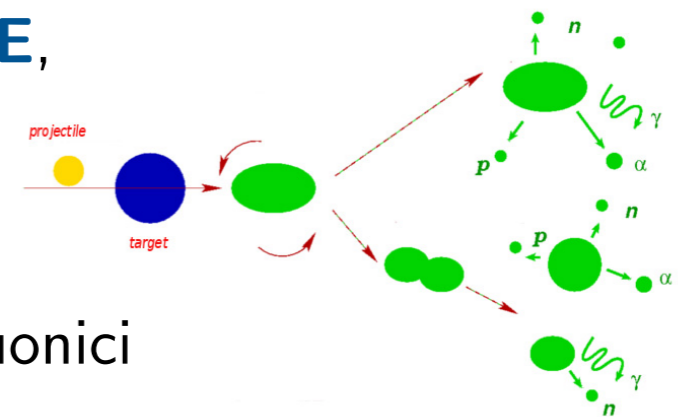


# Fisica delle interazioni fondamentali

- **Fisica delle Particelle Elementari**: studio del bosone di Higgs (ma non solo), della Supersimmetria, delle interazioni tra particelle fondamentali - I gruppi coinvolti in queste ricerche, **ATLAS**, **CMS** e **ALICE**, effettuano le loro ricerche presso l'acceleratore LHC al CERN

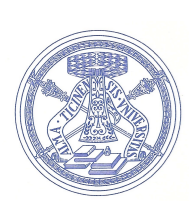


- **Fisica Adronica e Spettroscopia Nucleare**: proprietà dei nucleoni (protoni e neutroni) liberi e nel mezzo nucleare. In particolare vengono considerati la loro struttura interna, le loro correlazioni, le distribuzioni di carica e di corrente nei nuclei, le correlazioni nucleari (**ALICE**, **MAMBO**, **PASTA**, **COME**)



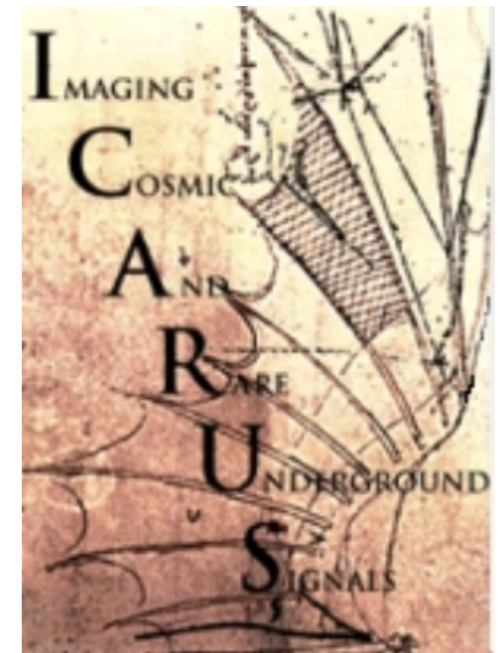
- **Fisica di Precisione** : misura dello splitting iperfine di atomi muonici per la misura del raggio del protone (**FAMU**), violazione del numero delle famiglie leptoniche (**MEG**)





# Astrofisica e Fisica del Neutrino

- Studio di oscillazioni di neutrino mediate dalla presenza di un eventuale nuovo stato di neutrino, cosiddetto sterile, per ora soltanto suggerito da risultati ambigui di passati esperimenti. Attività di ricerca e sviluppo volta principalmente allo studio e alla caratterizzazione di nuovi tipi di foto-rivelatori (PMT e Silicon PMT) che funzionino alle temperature criogeniche del LAr (**ICARUS**/CERN-WA104)
- Studio della Materia Oscura attraverso lo studio dei flussi di antiprotoni e antideuteroni (**GAPS**) utilizzando rivelatori ad alta quota







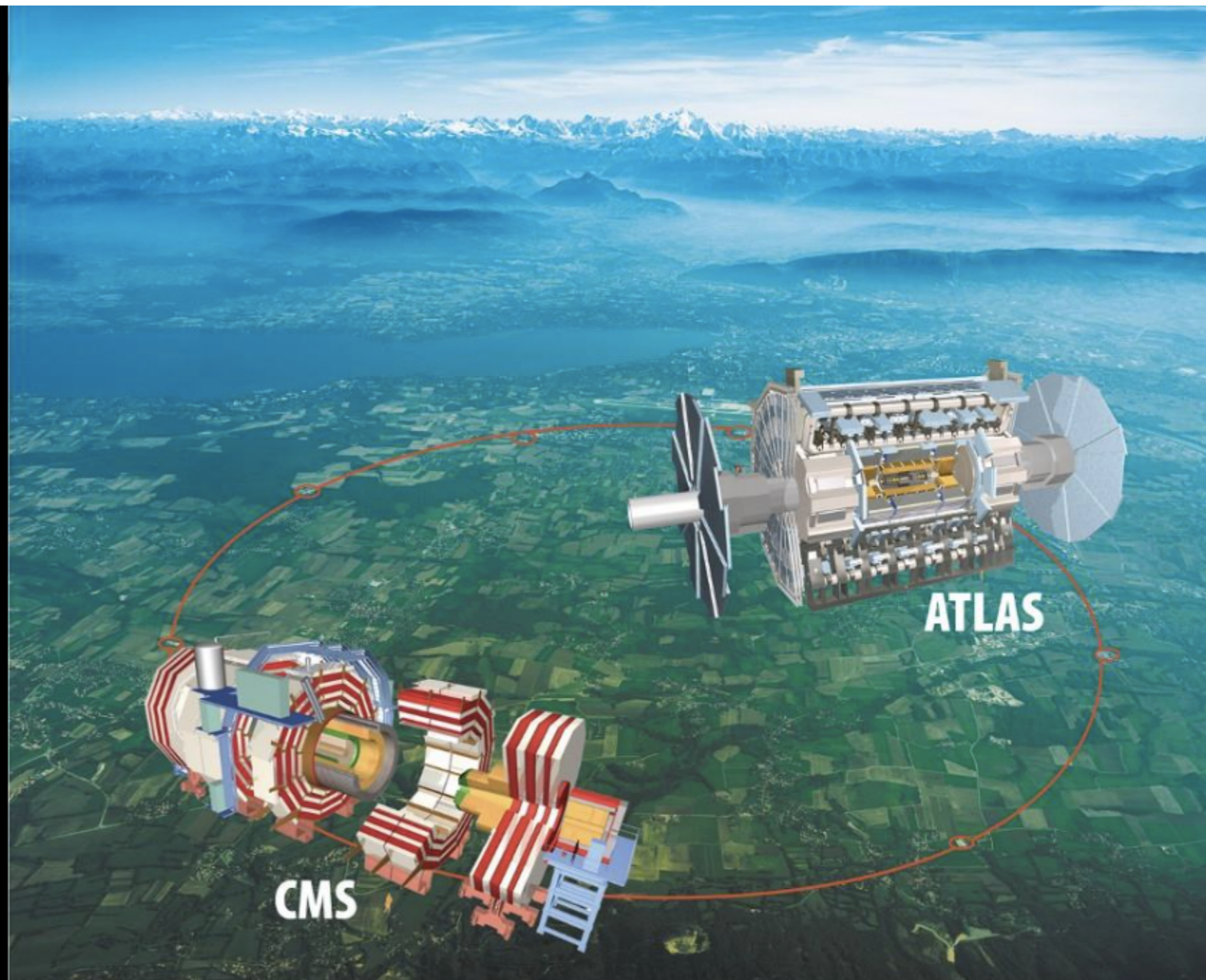
## CMS e ATLAS

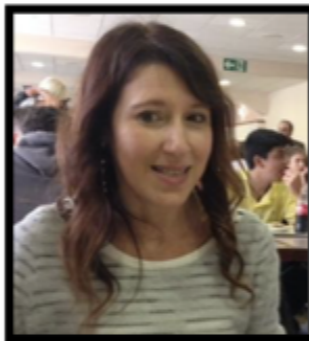
≈ 8000 ricercatori  
≈ 400 istituzioni

A Pavia:

≈ 30 ricercatori  
di cui alcuni  
temporaneamente al CERN

≈ 10 ex-pavesi lavorano al  
CERN o in altre istituzioni  
europee





**Cristina Riccardi**  
Respons. Upgrade



**Gianluca Traversi**



**Paola Salvini**  
Respons. Locale



**Paolo Vitulo**



**Martina Ressegotti**



**Alessandro Braghieri**



**Francesco Fallavollita**



**Alice Magnani**



**Ilaria Vai**



**Paolo Montagna**



**Lodovico Ratti**



**Alessandro Manghisoni**



**Valerio Re**

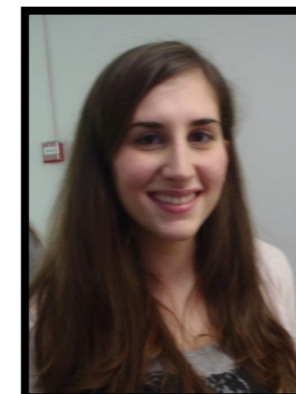
**...et al.**



# ATLAS @Pavia



Giacomo Polesello



Athina Kourkoumelis



Daniela Rebuzzi



Paolo Dondero



Riccardo Poggi



Gabriella Gaudio  
Respons. Locale



Michele Livan



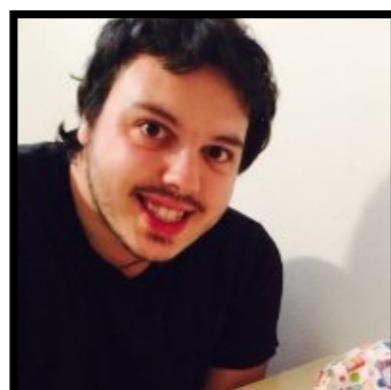
Valerio Vercesi



Bob Ferrari



Adele Rimoldi



Simone Sottocornola



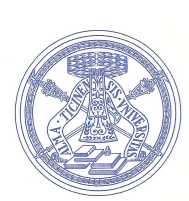
Edoardo Farina



Andrea Negri



Gianluca Introzzi



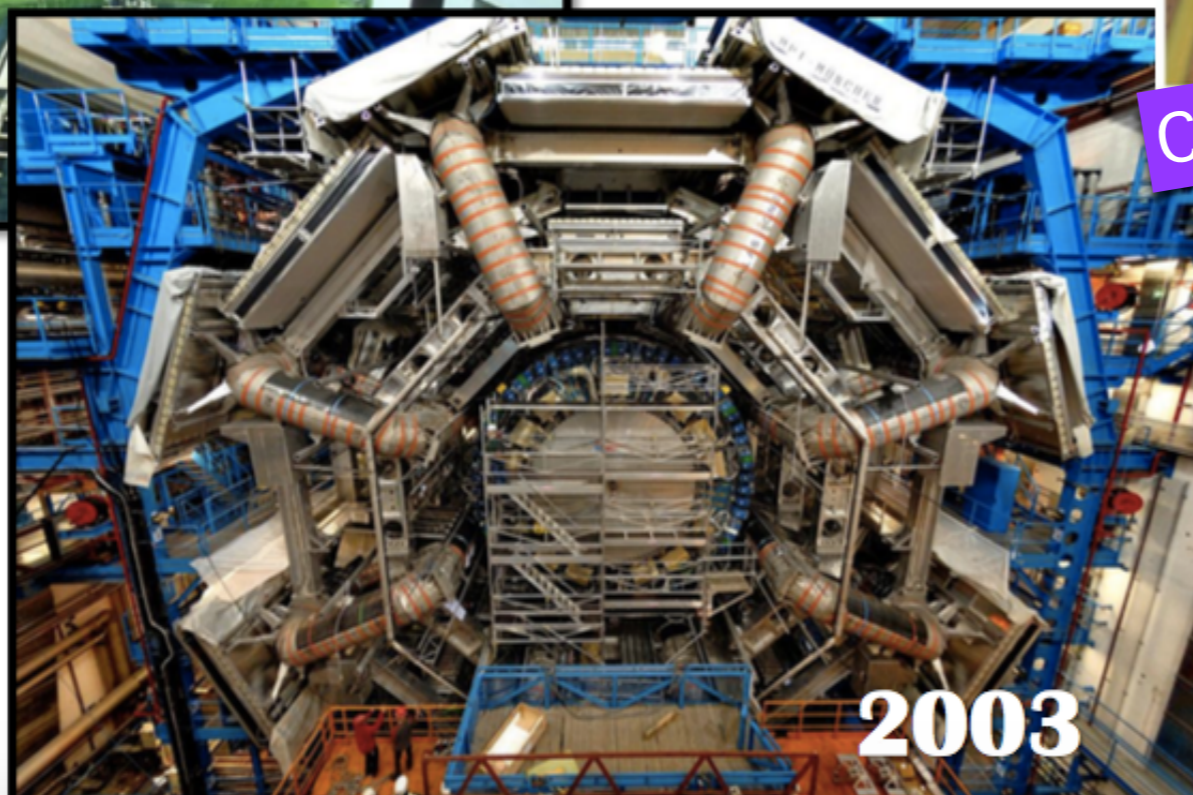
# Costruzione dei Detector

## Costruzione...Installazione...



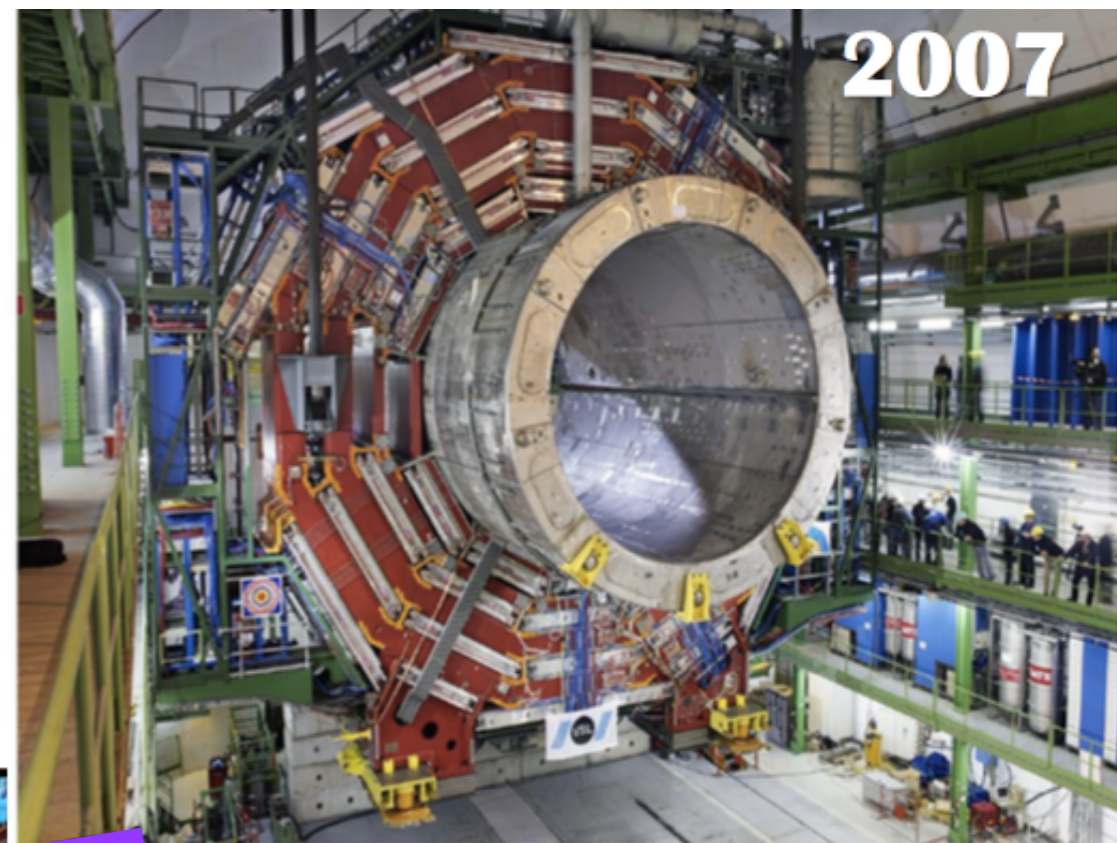
2001

ATLAS



2003

CMS



2007

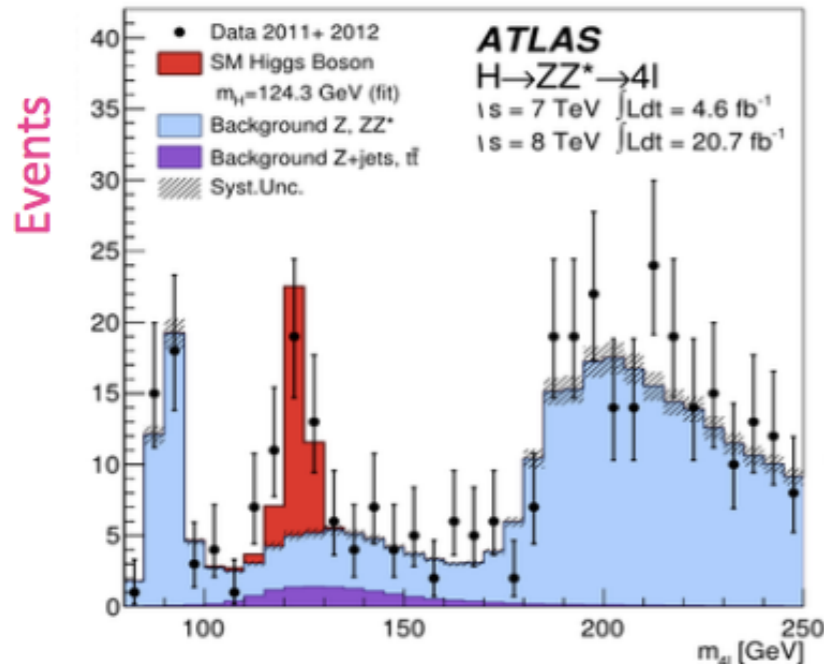


2002/2003

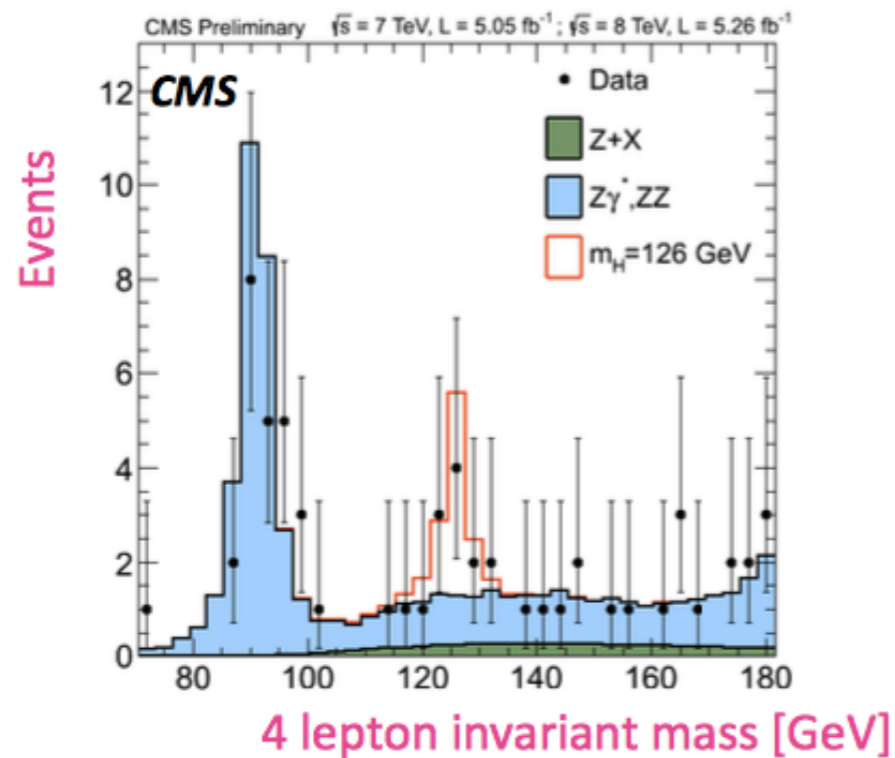


# La scoperta del Bosone di Higgs

## 4 Luglio 2012 - La scoperta



ATLAS & CMS



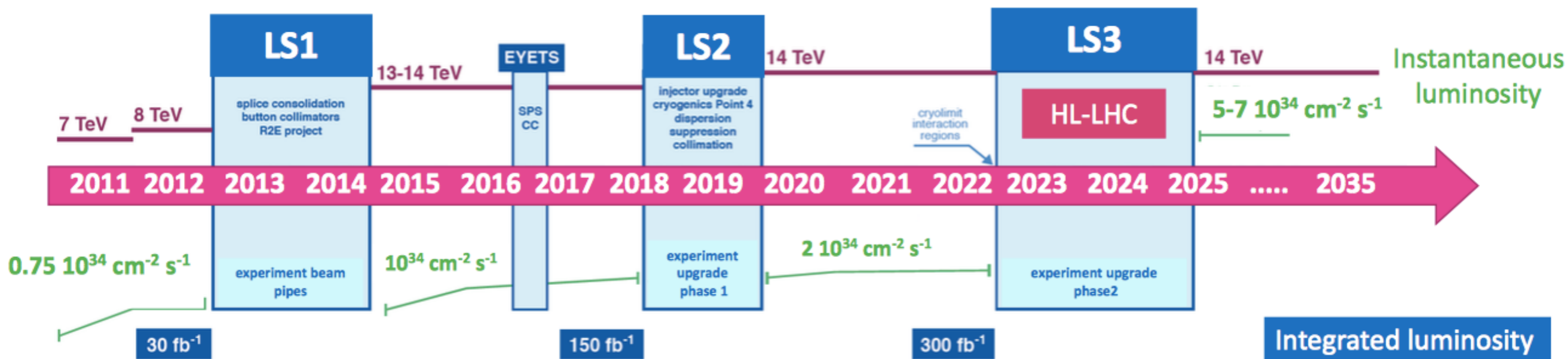


# Le fasi di LHC

*Run2 - Energia 13 -14 TeV, Statistica 5 volte superiore rispetto a quella del Run1*

*Altri due Long Shutdown in programma per il 2018 e 2023.*

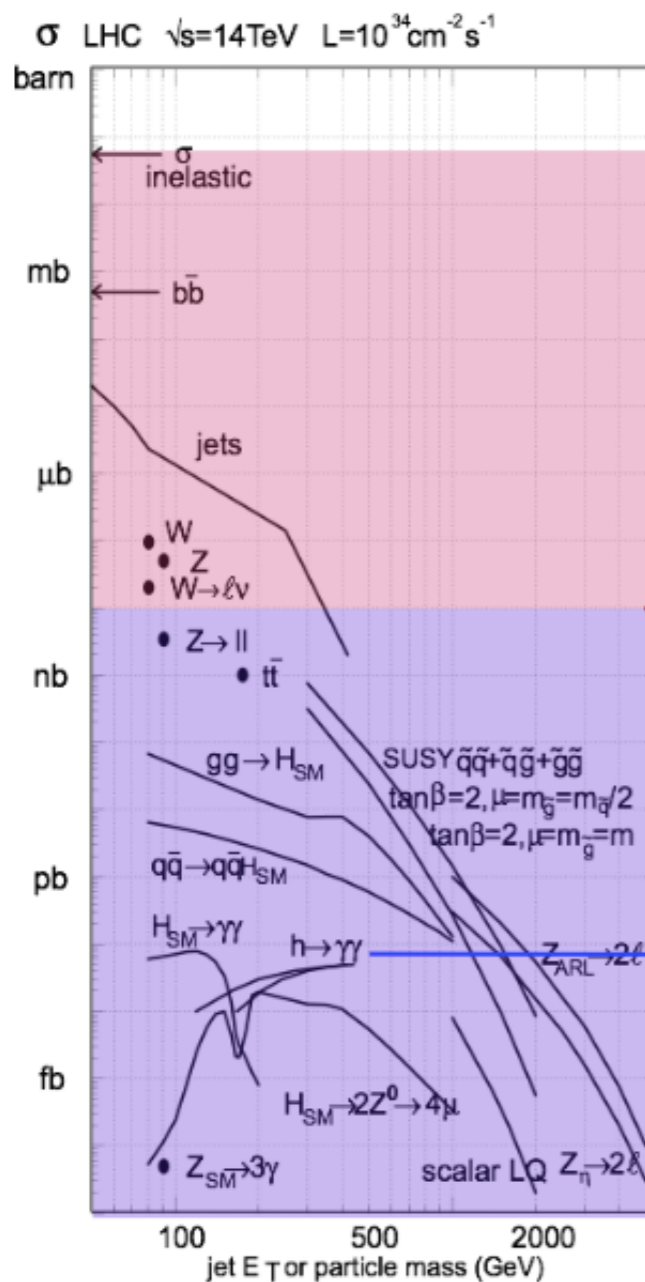
*L' aumento del numero di collisioni al secondo di LHC costringerà i rivelatori a lavorare oltre ben le specifiche di design.*





# Trigger e Acquisizione Dati - ATLAS

ATLAS



Collisioni (60 TB/s)

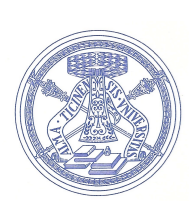
Scrittura (600 MB/s)

<sup>5</sup>  
1/10 collisioni

Higgs

<sup>10</sup>  
1/10 collisioni





# Attività hardware - ATLAS e CMS

Le attività pavesi si concentrano prevalentemente sullo spettrometro a muoni.

1. **Monitoraggio** delle prestazioni dei rivelatori, che oggi hanno 15 anni. Studio di invecchiamento dovuto all'elevata radiazione a cui i rivelatori stessi sono sottoposti.
2. **Potenziamento** del rivelatore mediante la sostituzione o l'integrazione di parti dell'apparato
  - Alcuni rivelatori attualmente **in fase di costruzione** verranno installati durante il secondo Long Shutdown (Micromegas per Atlas, GEM per CMS)
  - Altri sono attualmente in fase di **R&D** (CMS) : occorrono rivelatori veloci, ad elevate granularità e resistenza alla radiazione da installare nella regione più vicina all'asse del fascio.
3. **Sviluppo di elettronica di lettura** veloce capace di operare in presenza di elevato flusso di particelle
  - [ATLAS] memorie associative per il riconoscimento di pattern in tempo reale
  - [CMS] elettronica per il tracciatore interno in collaborazione con CERN, Fermilab...

ATLAS & CMS







# Attività software - ATLAS e CMS

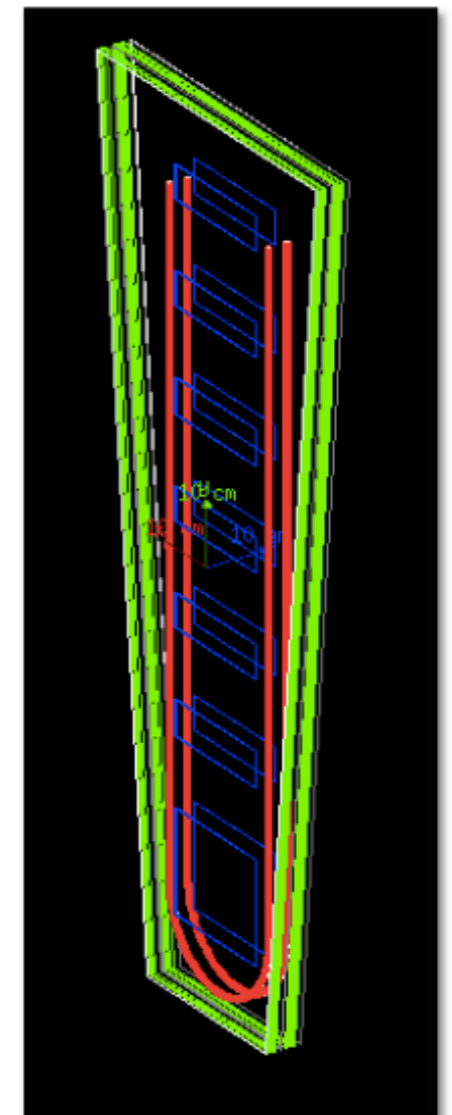
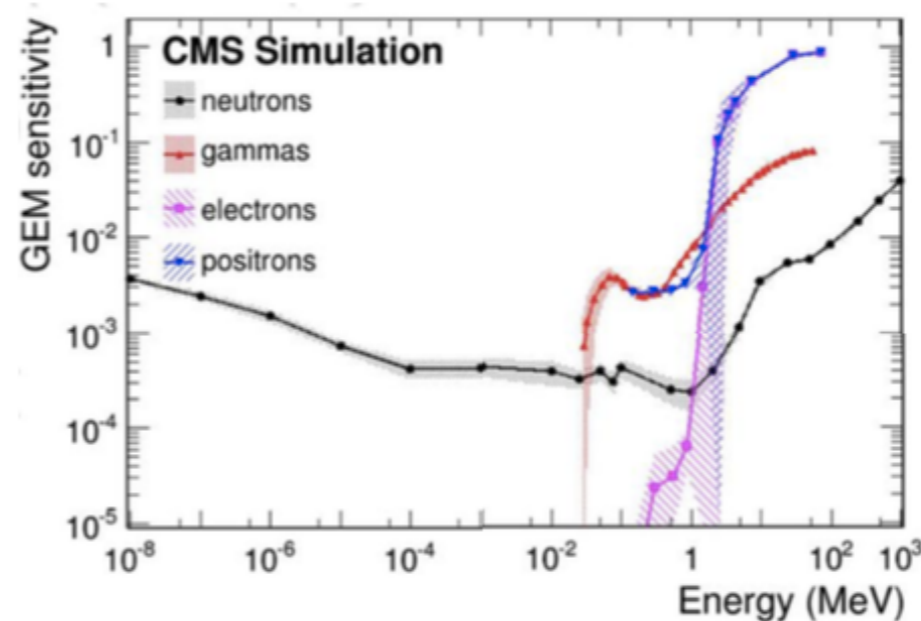
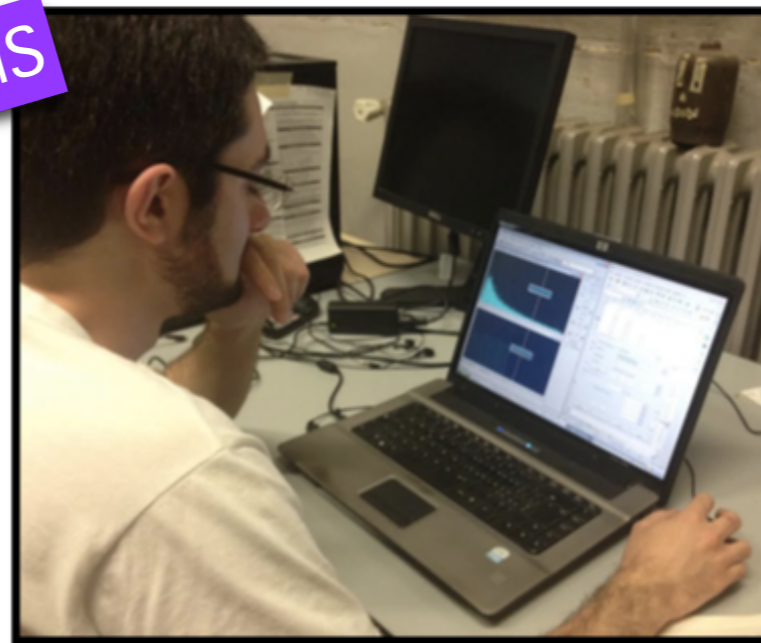
ATLAS & CMS

## Monitoraggio della performance dei rivelatori esistenti (ATLAS E CMS):

analisi dei dati dei rivelatori a muoni per il controllo del rateo e dei parametri funzionali

## Ricerca e Sviluppo (CMS):

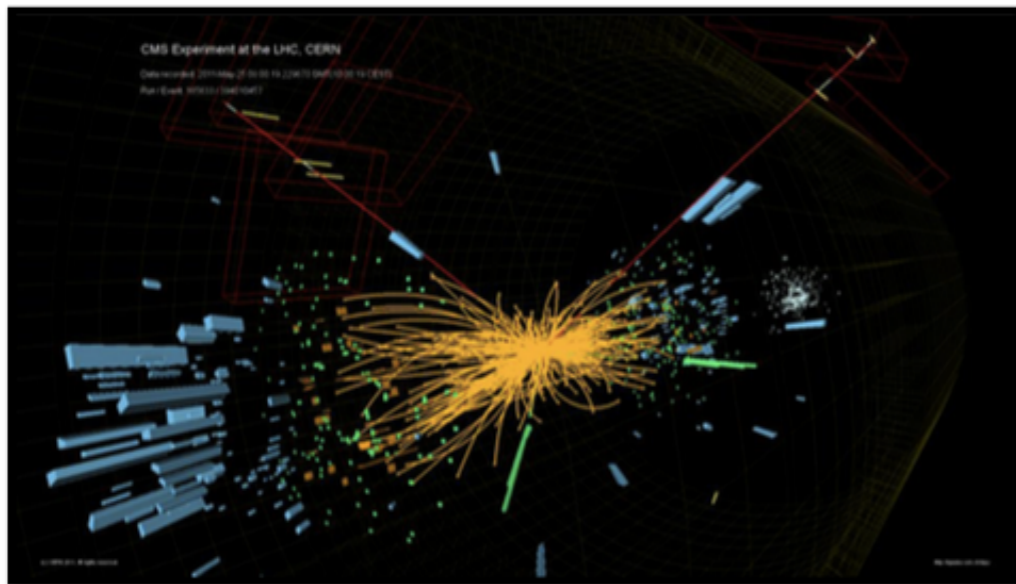
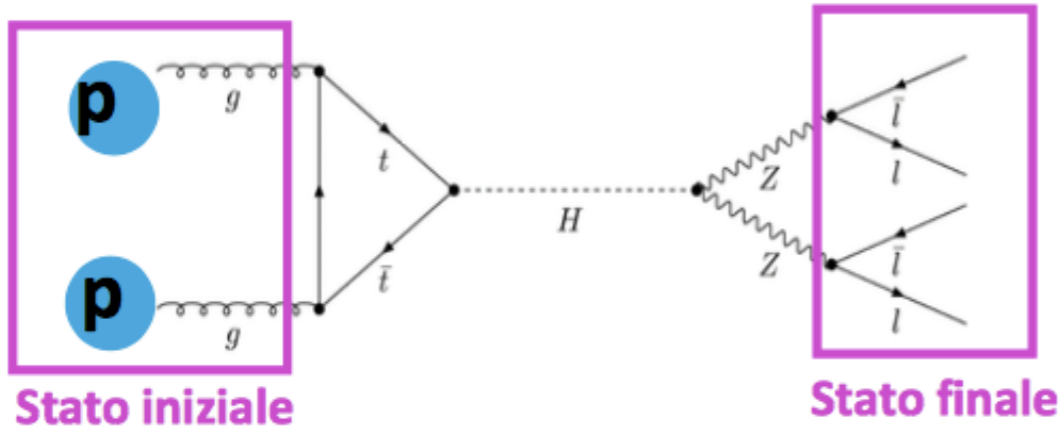
- Sviluppo del sistema di acquisizione dati per misure di irraggiamento.
- Analisi dei dati raccolti durante test di irraggiamento e testbeam su fascio
- Simulazione della risposta dei rivelatori all'elevato fondo presente in caverna





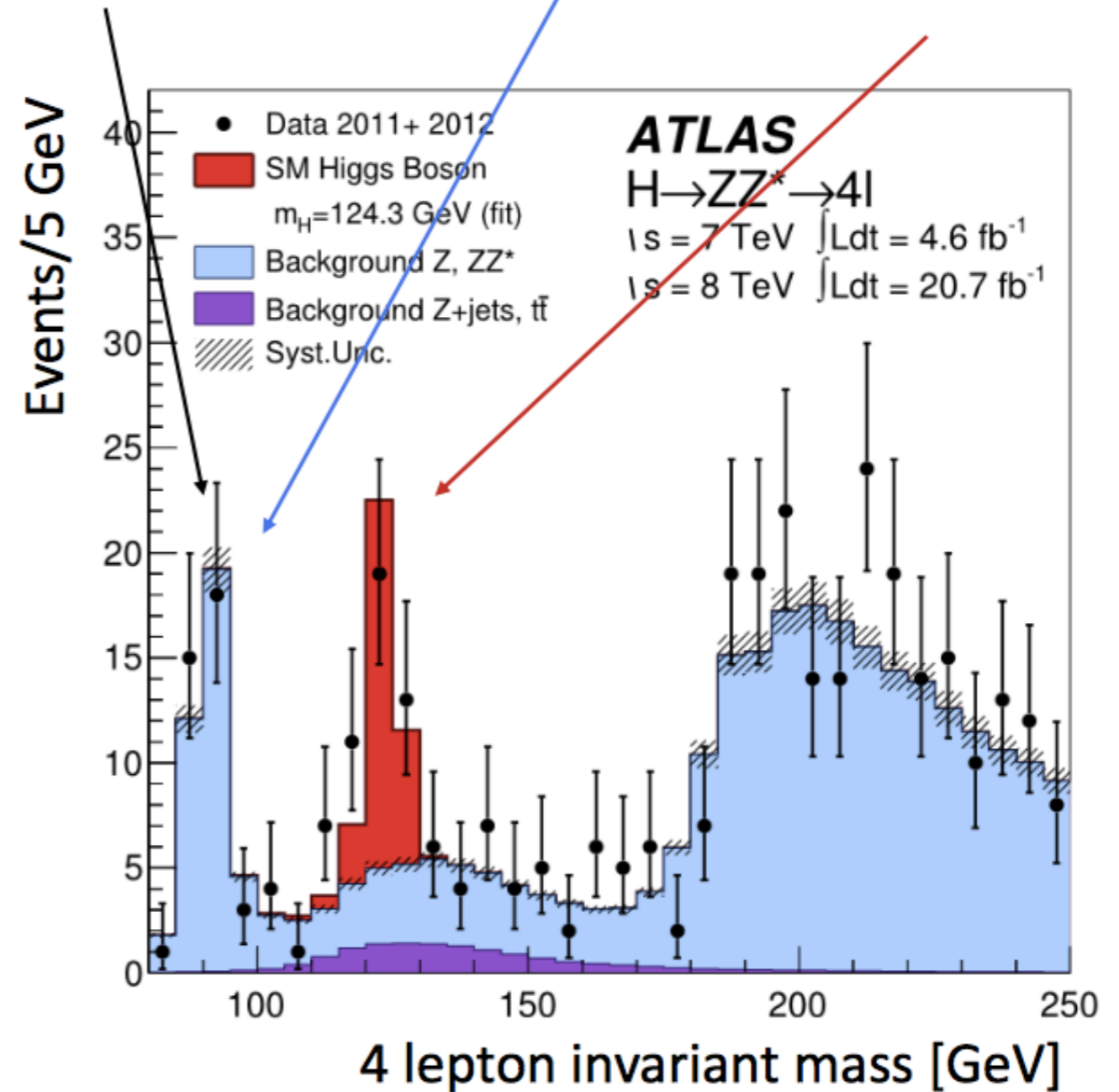
# Analisi dati ad LHC

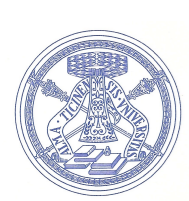
ATLAS & CMS



$$M = \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3 + E_4)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \vec{p}_4)^2}$$

Dati sperimentali      Fondo atteso da processi non Higgs      Segnale atteso in caso di esistenza dell'Higgs



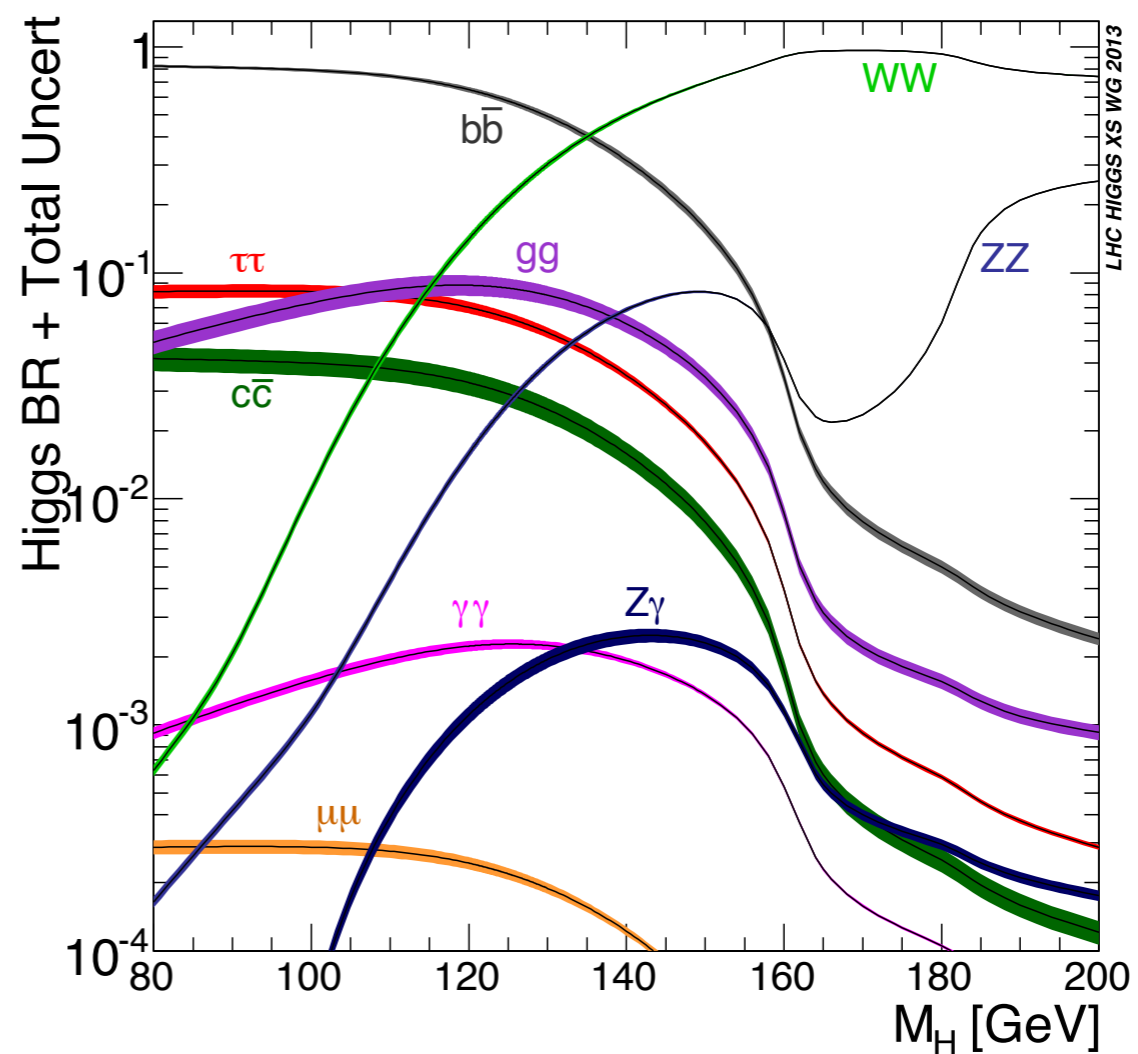


## Aspetti fenomenologici

Fondamentale per l'analisi è la conoscenza del modello teorico

Tra le attività del gruppo ATLAS Pavia lo studio delle sezioni d'urto di produzione e dei branching ratio di decadimento del bosone di Higgs in ambito Standard Model

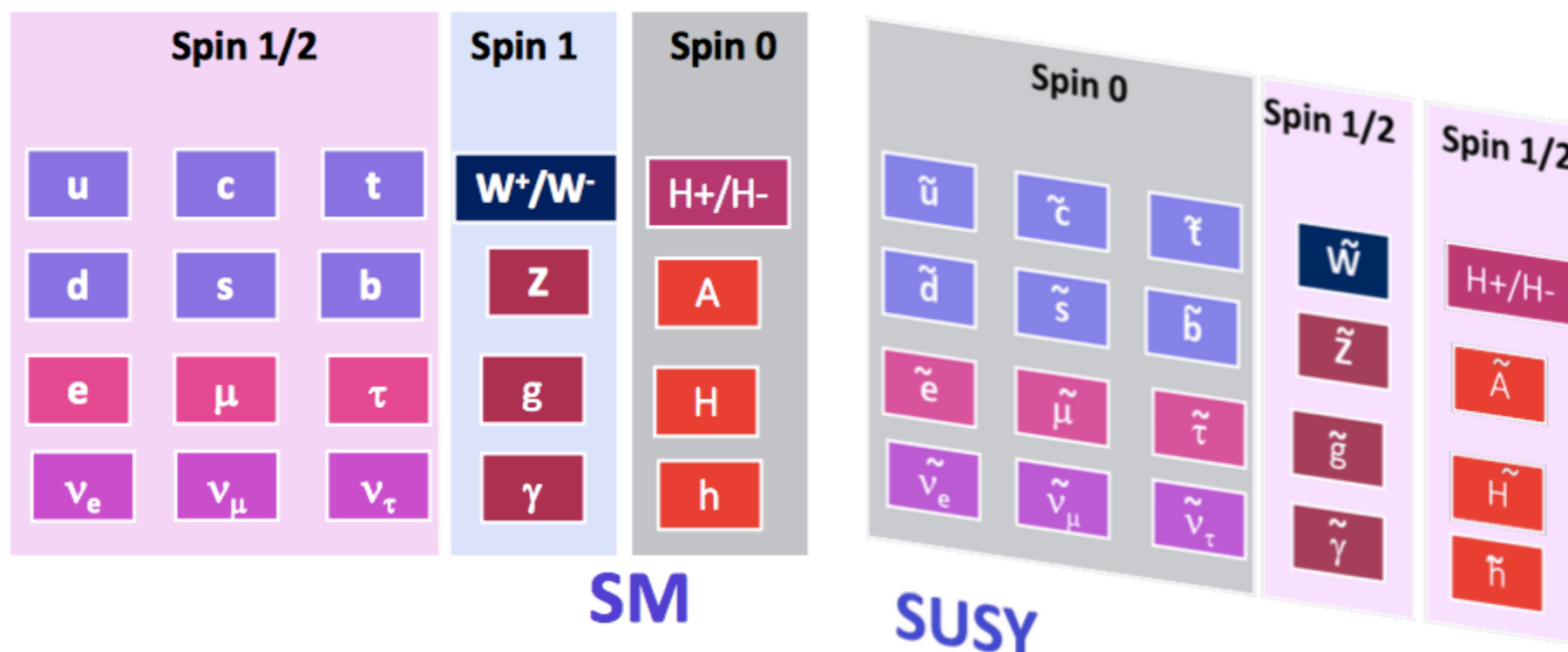
ATLAS





# Analisi Dati - Supersimmetria

ATLAS & CMS



[ATLAS]

Ricerca di stop  
in canali a 2 leptoni

Ricerca di Dark Matter

[CMS]

Ricerca di Higgs carico



ATLAS



[Daniela.Rebuzzi@unipv.it](mailto:Daniela.Rebuzzi@unipv.it)



[Andrea.Negri@unipv.it](mailto:Andrea.Negri@unipv.it)



[Gabriella.Gaudio@pv.infn.it](mailto:Gabriella.Gaudio@pv.infn.it)



[Cristina.riccardi@unipv.it](mailto:Cristina.riccardi@unipv.it)



[Paolo.Vitulo@unipv.it](mailto:Paolo.Vitulo@unipv.it)



[Ilaria.Vai@pv.infn.it](mailto:Ilaria.Vai@pv.infn.it)



[Alice.Magnani@pv.infn.it](mailto:Alice.Magnani@pv.infn.it)



[Paola.Salvini@pv.infn.it](mailto:Paola.Salvini@pv.infn.it)

CMS

# Curriculum di Fisica Nucleare e Subnucleare



# 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-vedi slide successiva-**)
- **Verificare i principi quantistici fondamentali** (conservazione carica, CP, ...) attraverso lo studio dei decadimenti rari di mesoni  $\pi$ ,  $\eta$  ed  $\eta'$
- Studiare le modifiche delle **proprietà fondamentali del protone/neutrone all'interno dei nuclei atomici** («neutron skin»  $\Rightarrow$  astrofisica nucleare)



- 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

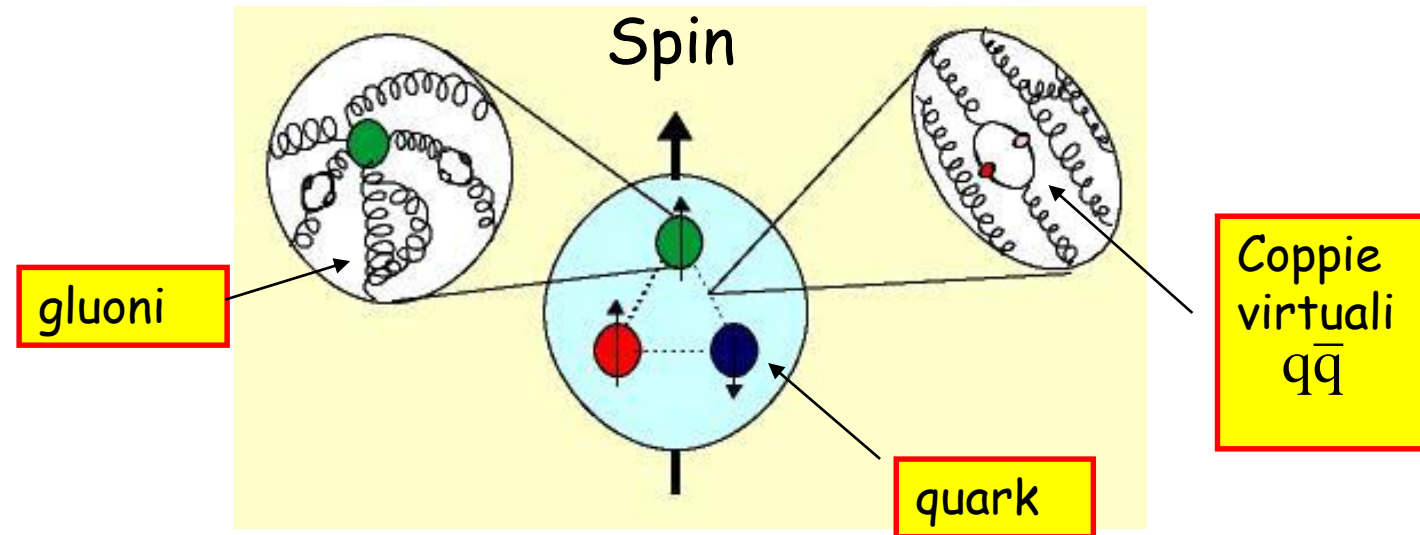
# L'esperimento MAMBO

**A2** @ MAMI  
(Mainz)

**MAMi-Bonn**

**B1** BGO-OD @  
ELSA (Bonn)

Perché il protone/neutrone ha spin ?



➤ **Modello "naif"**

$$\text{Spin} = \frac{1}{2} = \sum \text{Spin}_{\text{quark}}$$

➤ **QCD perturbativa**

$$\text{Spin} = \frac{1}{2} = \sum (\text{Spin} + L) (\text{quark} + \text{gluoni} + q\bar{q})$$

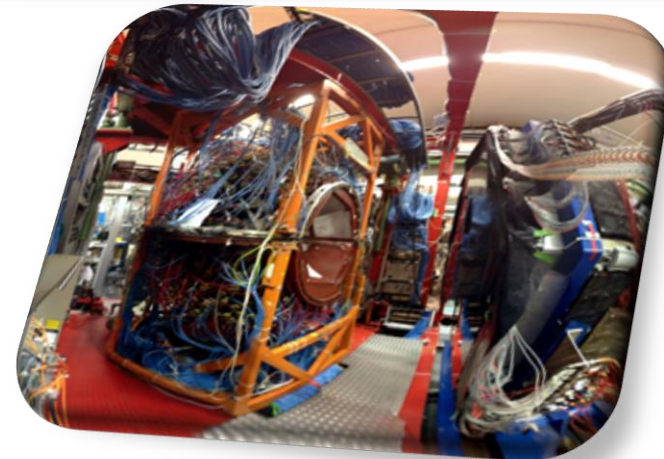
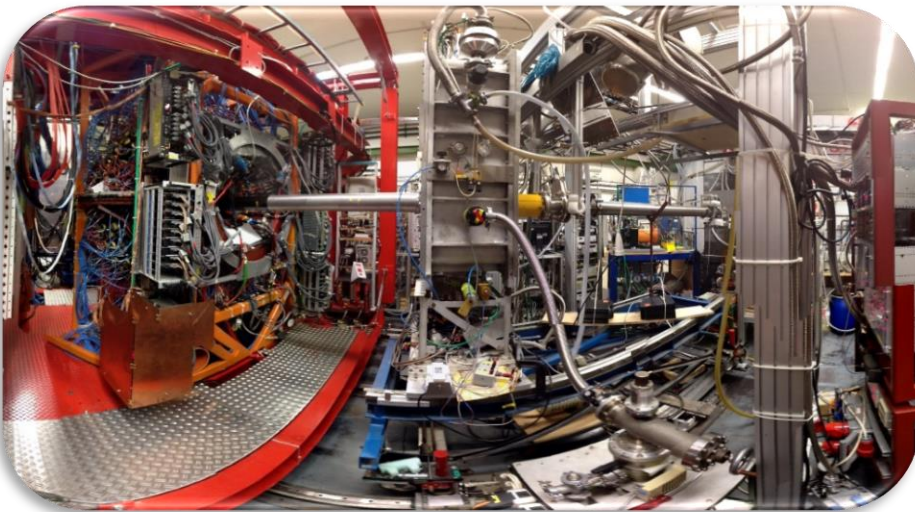
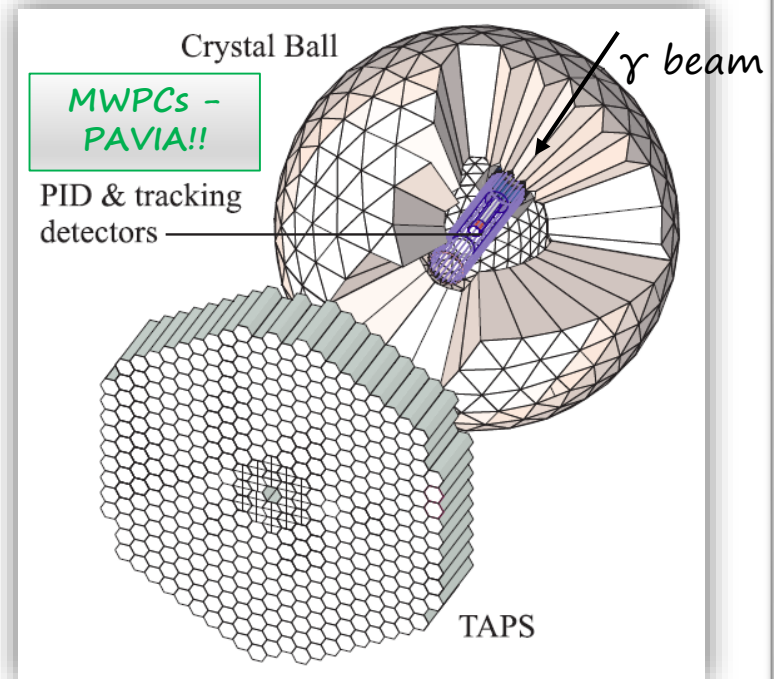
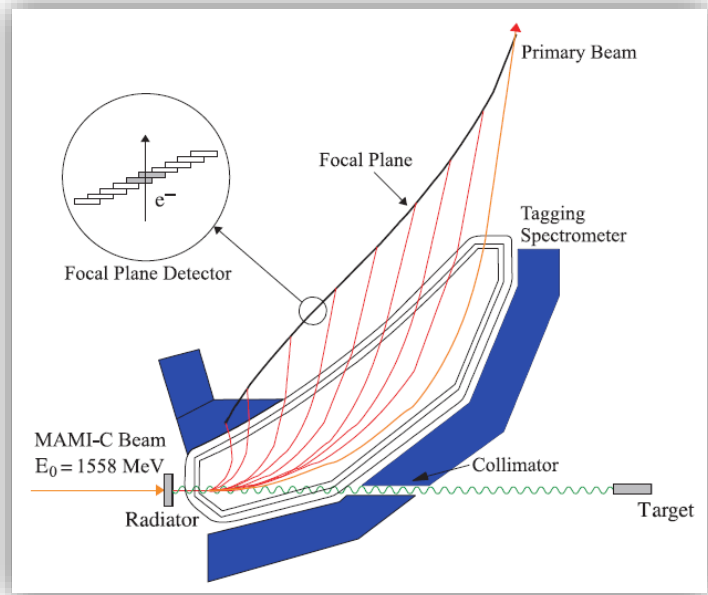
$$\sum \text{Spin}_{\text{quark}} \approx 80\% \text{ dello Spin}$$

➤ **Esperimenti:**

$$\sum \text{Spin}_{\text{quark}} \approx 20-30\% \text{ dello Spin (!)}$$



# L'esperimento MAMBO - **A2** @ MAMI (Mainz)



# L'esperienza MAMBO

Contatti:

P. Pedroni

[pedroni@pv.infn.it](mailto:pedroni@pv.infn.it)

A. Braghieri

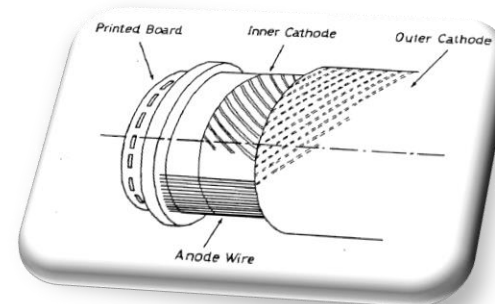
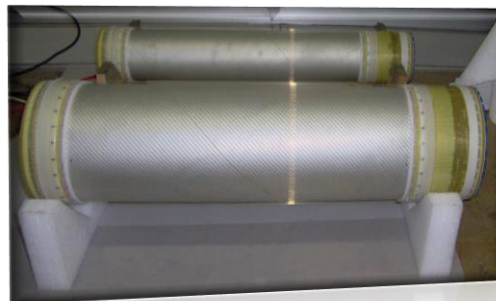
[braghieri@pv.infn.it](mailto:braghieri@pv.infn.it)

S. Costanza

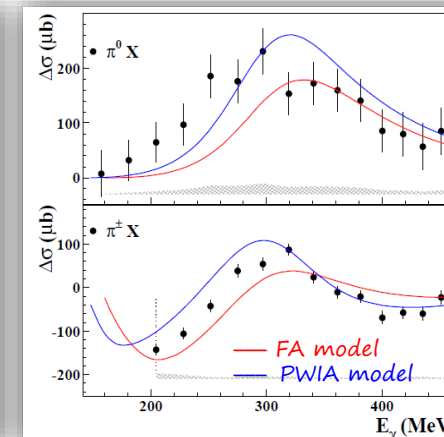
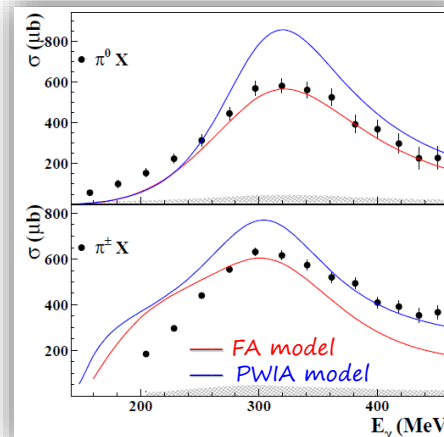
[costanza@pv.infn.it](mailto:costanza@pv.infn.it)

## 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



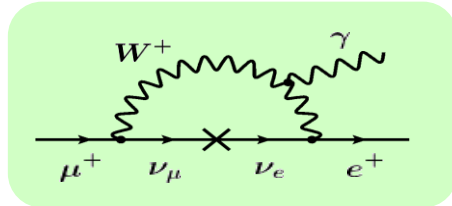
- **Coordinamento del programma di fisica** che utilizza fasci di fotoni linearmente polarizzati e bersagli di protoni/neutroni polarizzati
- **Analisi offline** dei dati raccolti
- Partecipazione alla **presa dati**



# MEGII experiment

## Search for $\mu \rightarrow e\gamma$

Standard Model incl. Dirac  $\nu$ 's:



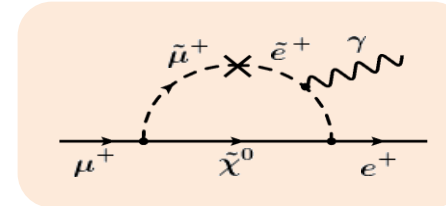
$$\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{1i}^2}{m_W^2} \right|^2$$

$< 10^{-54}$

*Impossible to detect*

$\mu \rightarrow e\gamma$  and other CLFV processes  
have never been observed

New Physics (e.g. SUSY):



$$\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma) \approx \frac{\alpha^3}{G_F^2 m_{\text{SUSY}}^4} (\delta_{LL})_{e\mu}^2 \tan^2(\beta)$$

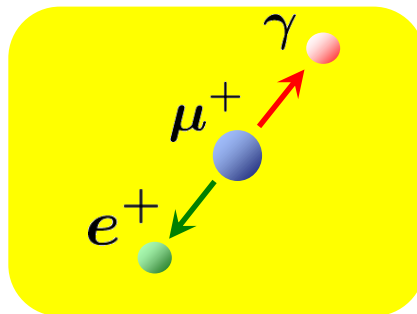
$\approx 10^{-11} \sim 10^{-14}$

*Small but not impossible!*

Observation of CLFV is clear  
evidence of new physics!



MEG limit:  $\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 5.7 \cdot 10^{-13}$  (90% C.L.)

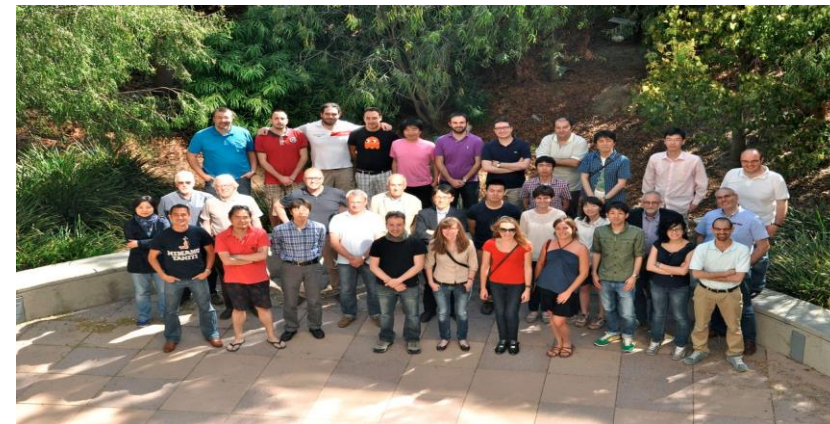


$$E_\gamma = 52.8 \text{ MeV}$$

$$E_e = 52.8 \text{ MeV}$$

$$\Theta_{e\gamma} = 180^\circ$$

$$T_{e\gamma} = 0 \text{ s}$$



## Cylindrical Drift Chamber (DC):

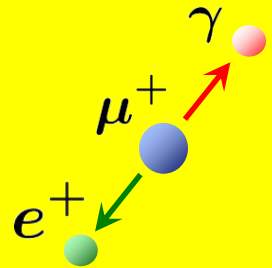
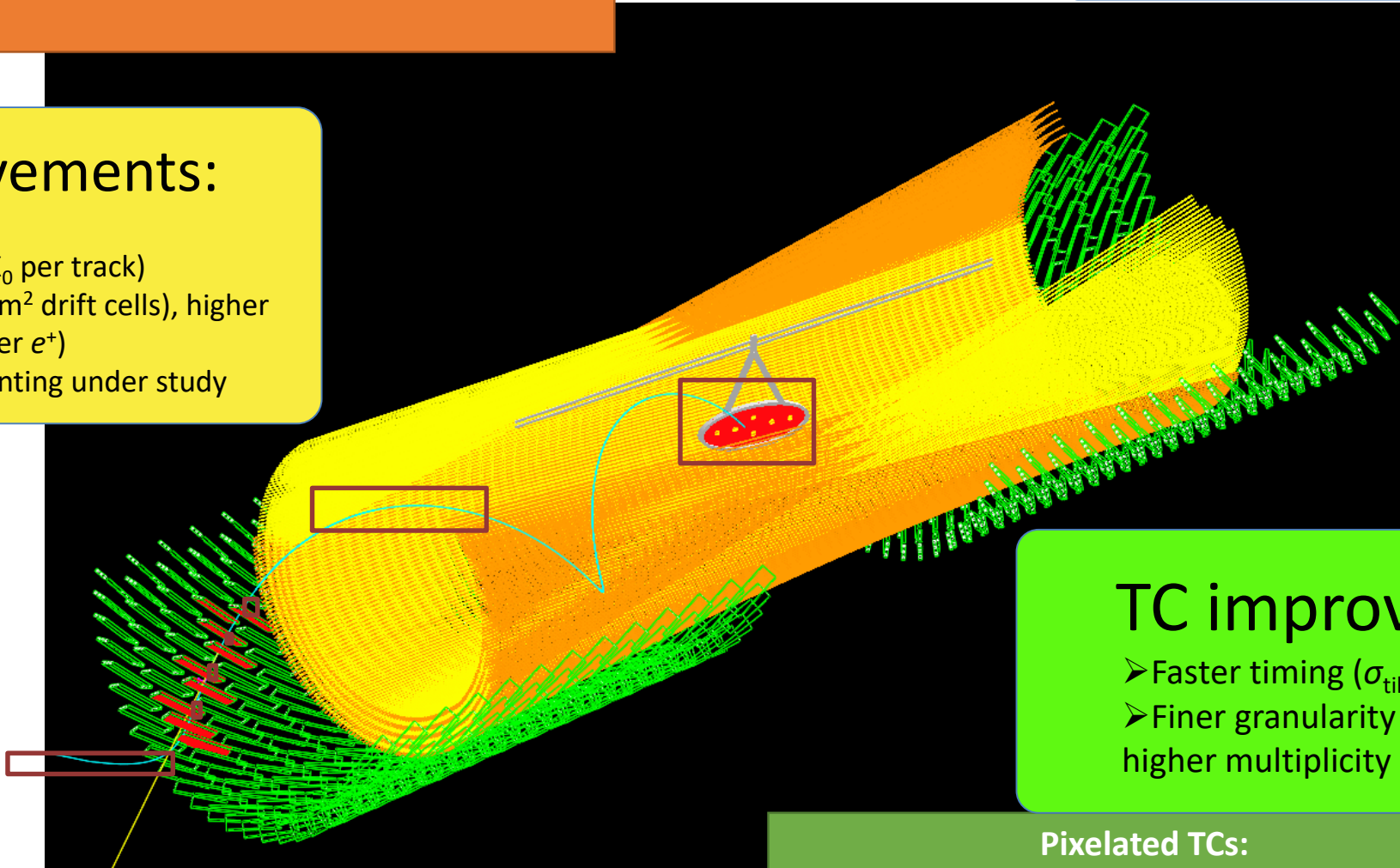
- Single-volume, low-Z gas mixture (He:iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 85:15)
- 1200 sense wires (2 m long, 20 μm diameter) with stereo angle (7°) configuration

## Improvements:

- Improved detection efficiency (x2)
- Improved timing resolution (eliminates 75 ps contribution to  $\sigma_t$ )

## DC improvements:

- Larger tracking volume
- Less material ( $1.7 \times 10^{-3} X_0$  per track)
- Finer granularity ( $7 \times 7 \text{ mm}^2$  drift cells), higher multiplicity (15  $\times$  60 hits per  $e^+$ )
- Possibility of cluster counting under study



## TC improvements:

- Faster timing ( $\sigma_{\text{tile}} < \sigma_{\text{bar}}$ )
- Finer granularity (16 bars  $\times$  256 tiles), higher multiplicity (1 bar  $\times$  9 tiles per  $e^+$ )

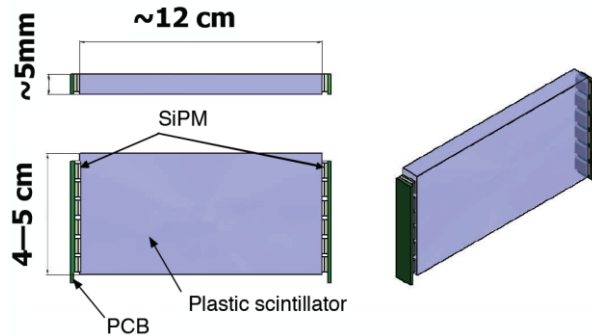
## Pixelated TCs:

- 512 ultra-fast plastic scintillator tiles
- Each tile read-out by multiple SiPMs

# Pixelated Timing counter (Pavia, Genova, Tokyo)

Long R&D to optimize scintillator, SiPM, Connection, bias, wrapping etc.

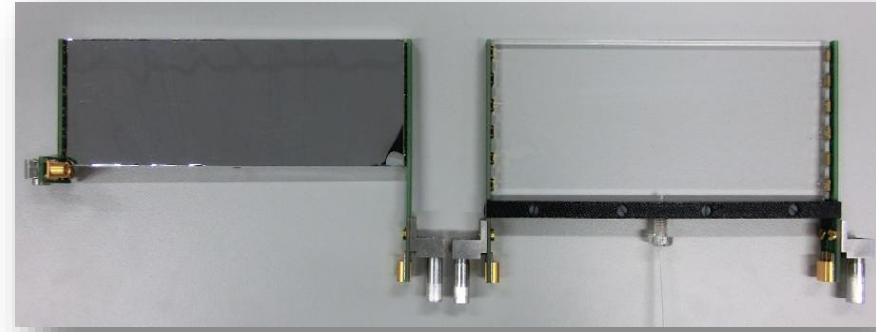
Single tile:



*AdvanSiD* SiPM  
(6-series):

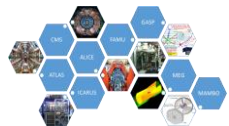
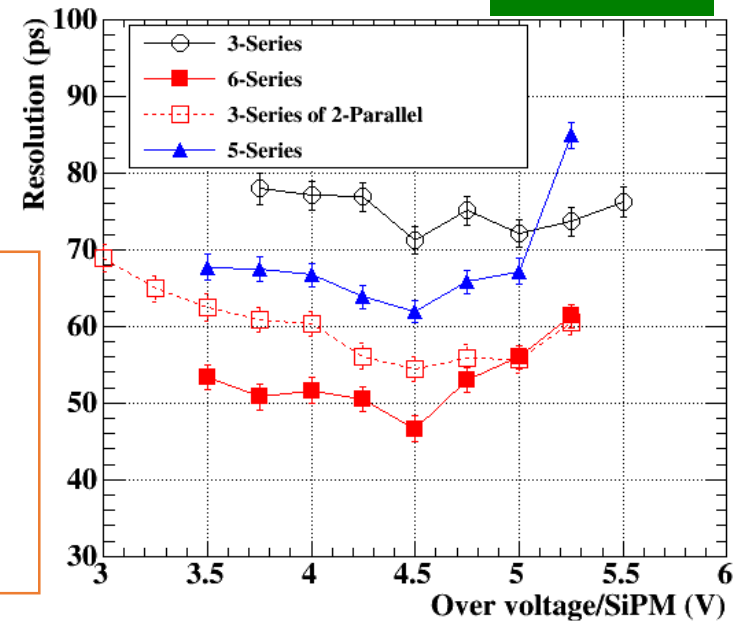
R&D finished. Construction ongoing.  
Radiation test just performed.  
Simulation and analysis in the next years.

Ask Prof. **P.W. Cattaneo** for information.



Single tile prototype tests using  $^{90}\text{Sr}$  source.

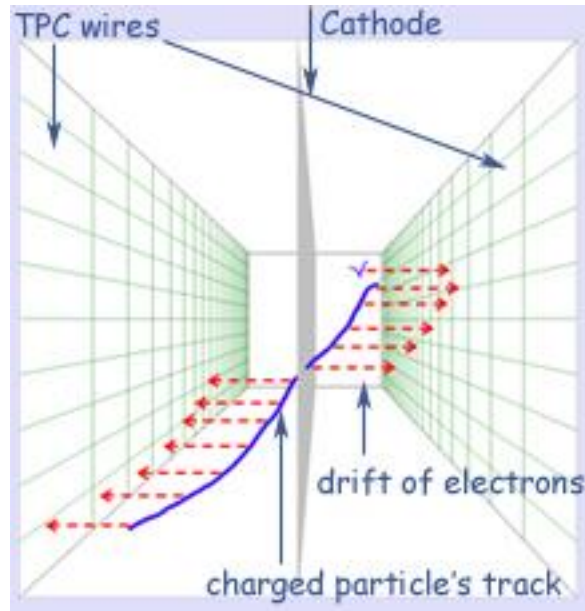
MEG TC bar  
resolution



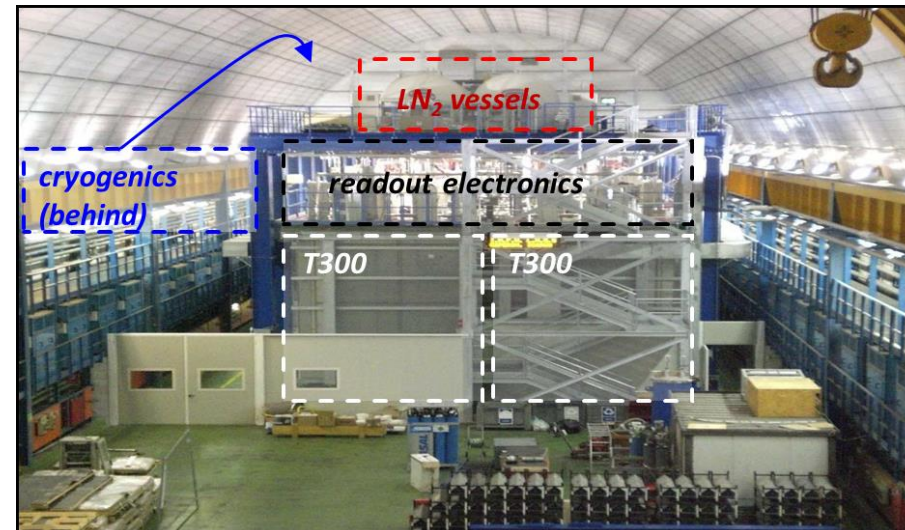
# ICARUS-SBN

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:

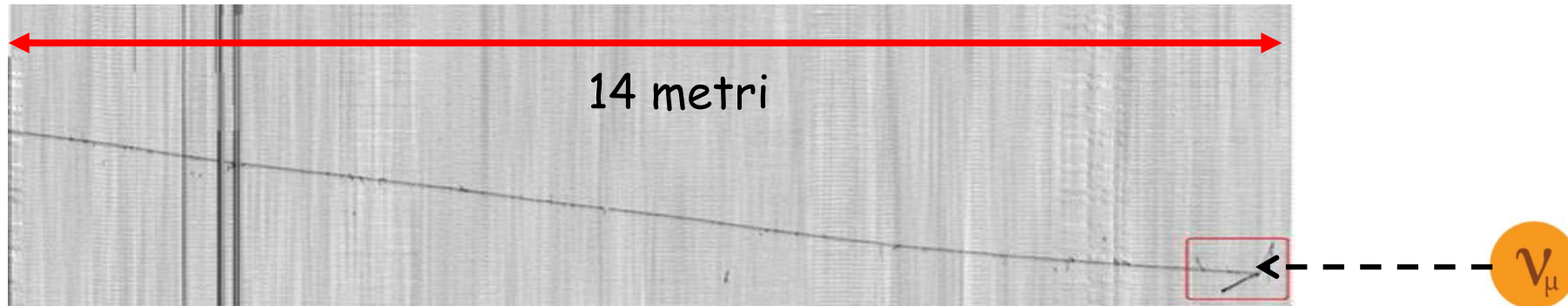


ICARUS-T600 nella Sala B dei  
Laboratori del Gran Sasso (2010-2013)

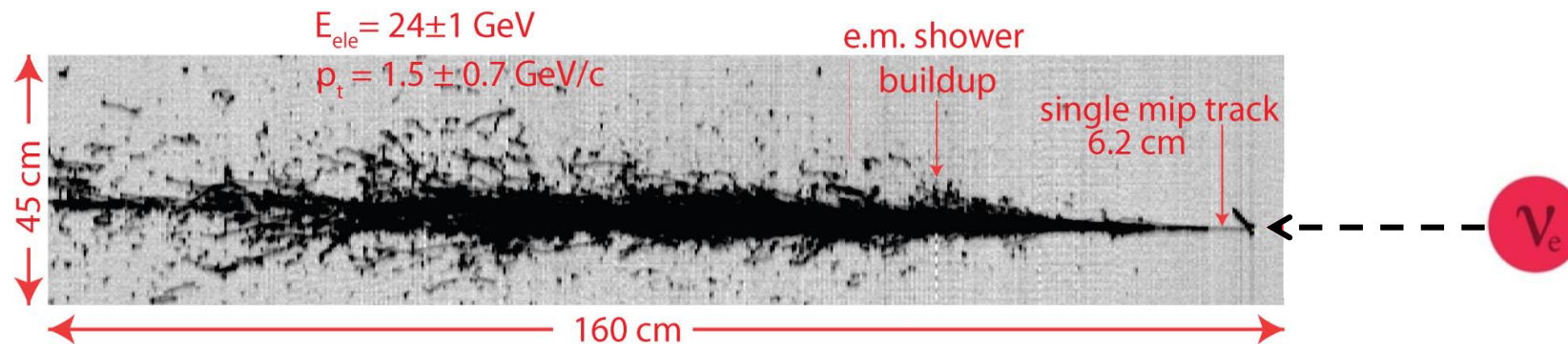


## ICARUS è stato utilizzato per la ricerca di oscillazioni di neutrini:

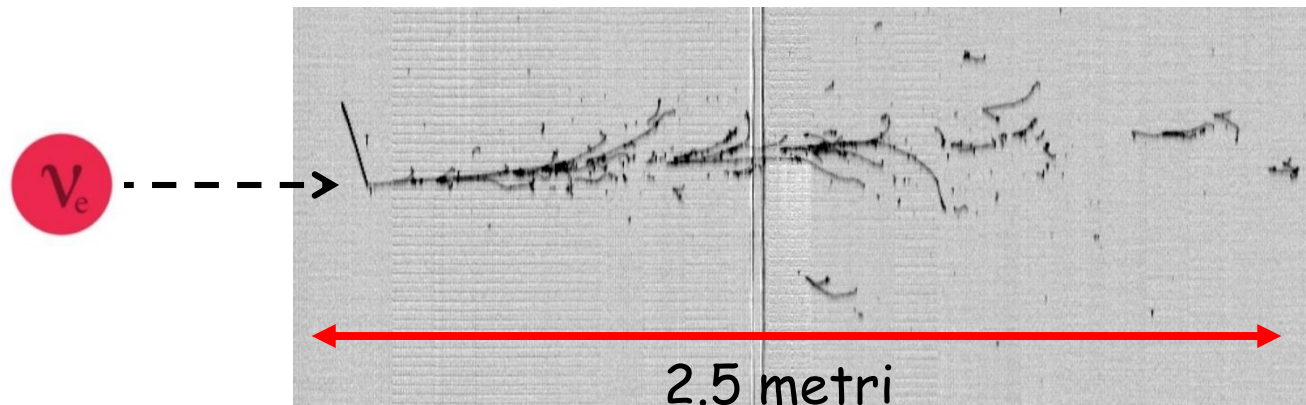
Interazione di un neutrino muonico dal fascio CERN to Gran Sasso in ICARUS:



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



Upgrade al CERN (2015-2017)



Fermilab: estate 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?

- Completamento dell'analisi dei dati presi al Gran Sasso.
- Sviluppo del software per la simulazione e l'analisi dei dati al Fermilab.
- Realizzazione e installazione del sistema di rivelazione della luce di scintillazione mediante PMTs.
- Realizzazione e gestione del sistema di acquisizione dei segnali dei PMTs e del trigger.
- R&D di nuovi tipi di foto-rivelatori per applicazioni in criogenia.

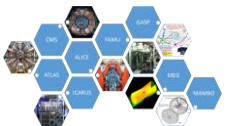
<http://icarus.lngs.infn.it/> (sito web di ICARUS con descrizione e referenze alle pubblicazioni).

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

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

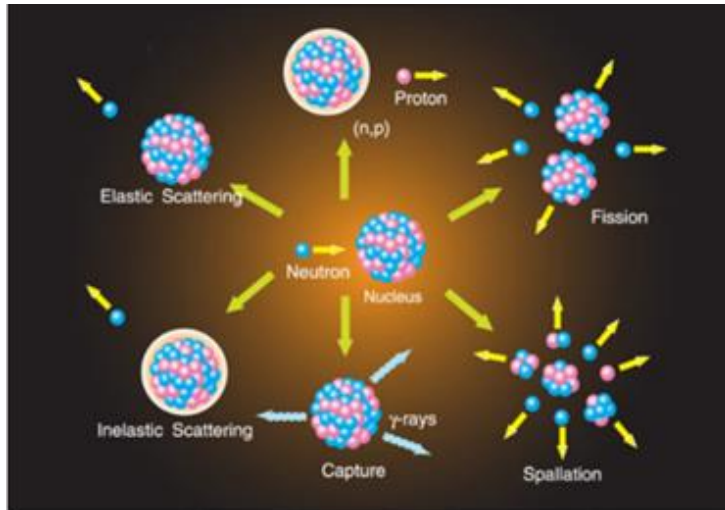
Per ulteriori informazioni su ICARUS e su possibili tesi magistrali, contattare:

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



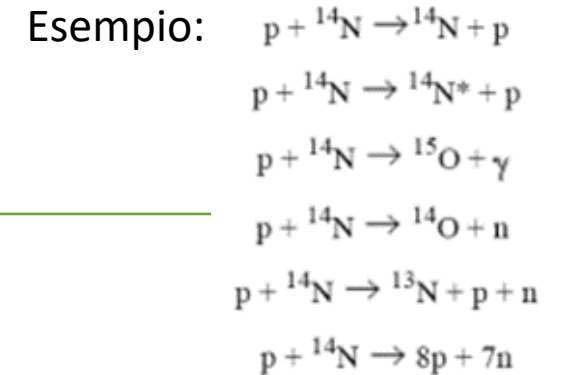
# Studio di sezioni d' urto di reazioni nucleari inesplorate

## Nuova attività

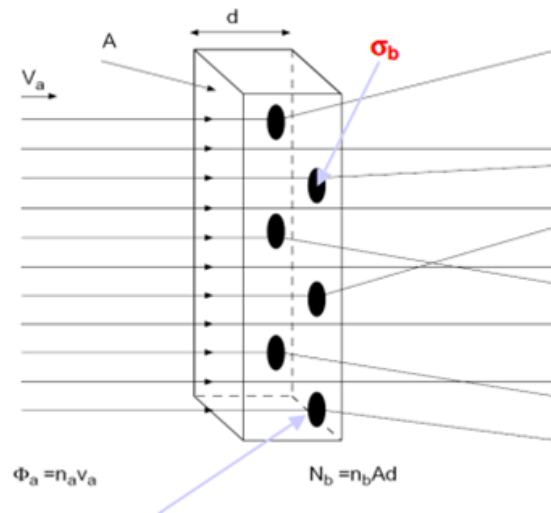


1. **Reazioni nucleari:** potente strumento per investigare la materia e le forze sub-atomiche
  - *simili* a reazioni chimiche: stato finale può essere diverso da stato iniziale
  - *...ma diverse* da reazioni chimiche: stato finale non determinato univocamente -> **maggiore ricchezza** e potenzialità 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](mailto:andrea.fontana@pv.infn.it)  
 Corso di Radioattività II

# Studio di sezioni d' urto di reazioni nucleari inesplorate

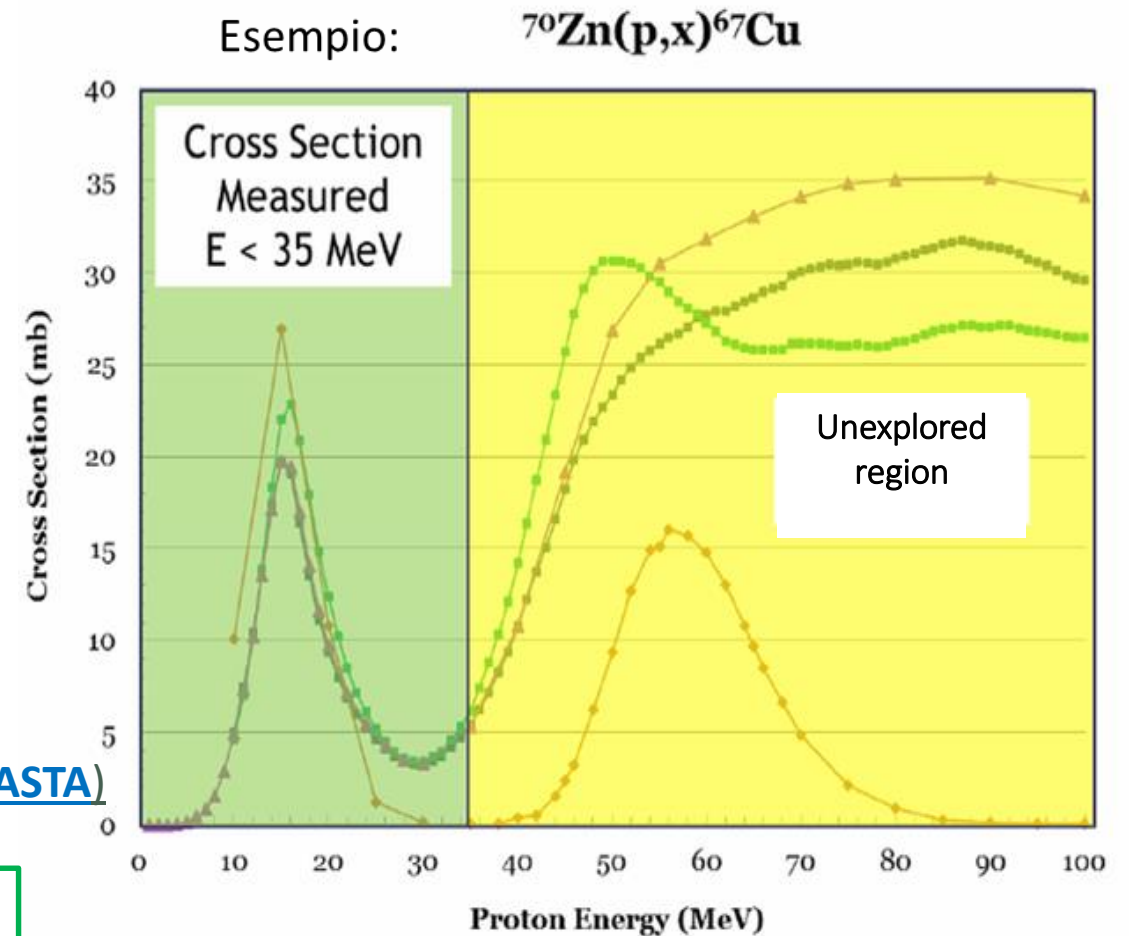
## Nuova attivita'

### 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 attivita' in Fisica Medica (progetti **COME/PASTA**)

### Che cosa imparo con questa tesi?

- Fisica Nucleare tradizionale
- Tecniche numeriche per risoluzione di problemi
- Linguaggi di programmazione: Fortran, C++, Python

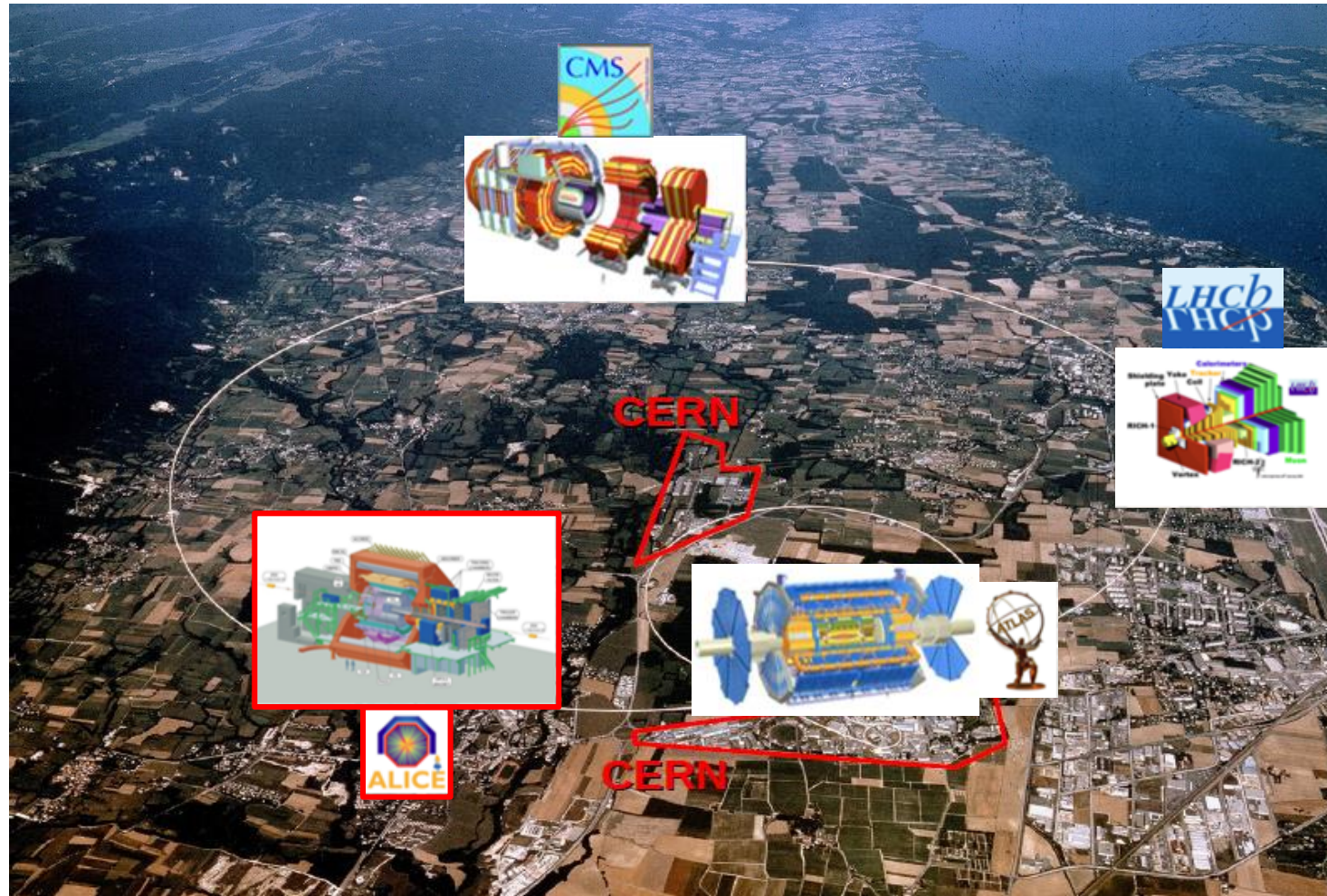


Contatto: [andrea.fontana@pv.infn.it](mailto:andrea.fontana@pv.infn.it)

Corso di **Radioattività II**



# ALICE: A Large Ion Collider Experiment



42 paesi, 174 istituti, 1800 membri

**Unico esperimento a LHC dedicato alla fisica con fasci di ioni!**

# ALICE: a journey of discovery

Un viaggio verso l'origine dell'Universo



Big Bang



13.8 miliardi di anni

$10^{28}$  cm

Oggi

Un'importante sfida scientifica:  
comprendere i primissimi istanti  
di vita del nostro Universo

- Cosa accade alla materia quando viene riscaldata ad una temperatura 100000 volte più alta di quella presente al centro del Sole?
- Perché la massa del protone è 100 volte superiore a quella dei quarks che lo compongono?
- È possibile liberare i quarks contenuti all'interno dei protoni?

# La «zuppa» primordiale

Fino a circa un centomillesimo di secondo dal Big Bang ( $10^{-37}$  –  $10^{-5}$  s) l'Universo era formato da una «zuppa» di quark e gluoni:  
il Quark Gluon Plasma (QGP)



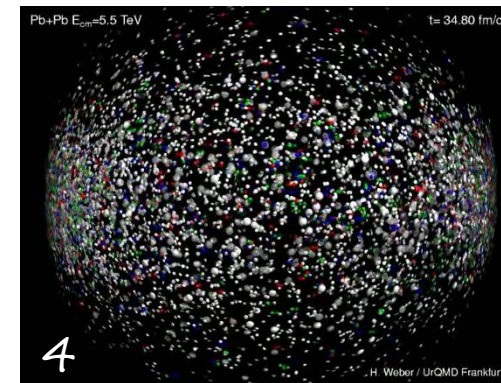
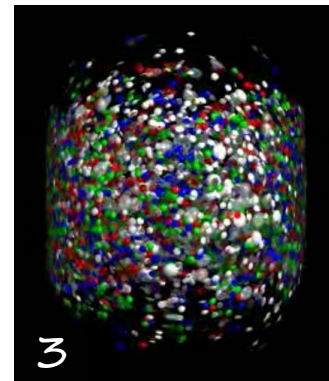
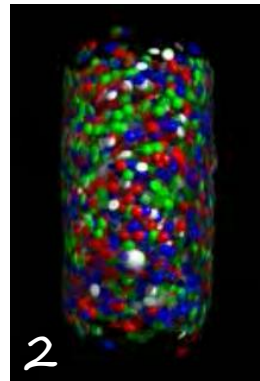
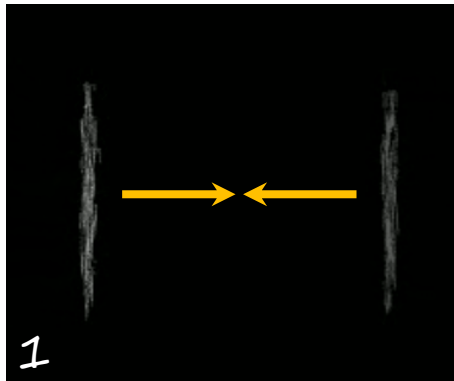
- ❑ Come facciamo a studiare il QGP?
  - Possiamo cercare di **ricrearlo**, o quantomeno di riprodurne una sua approssimazione
- ❑  $T_{\text{sole}} = 15$  milioni K  
 $T_{\text{QGP}} > 1000$  miliardi K
- ❑ È possibile ricreare un tale sistema in laboratorio???
  - **Sì!!!!** Al CERN, presso l'acceleratore LHC.
  - **Di QGP si occupa l'esperimento ALICE!**

# Un Mini-Bang al CERN

Come riproduciamo un mini Big-Bang?

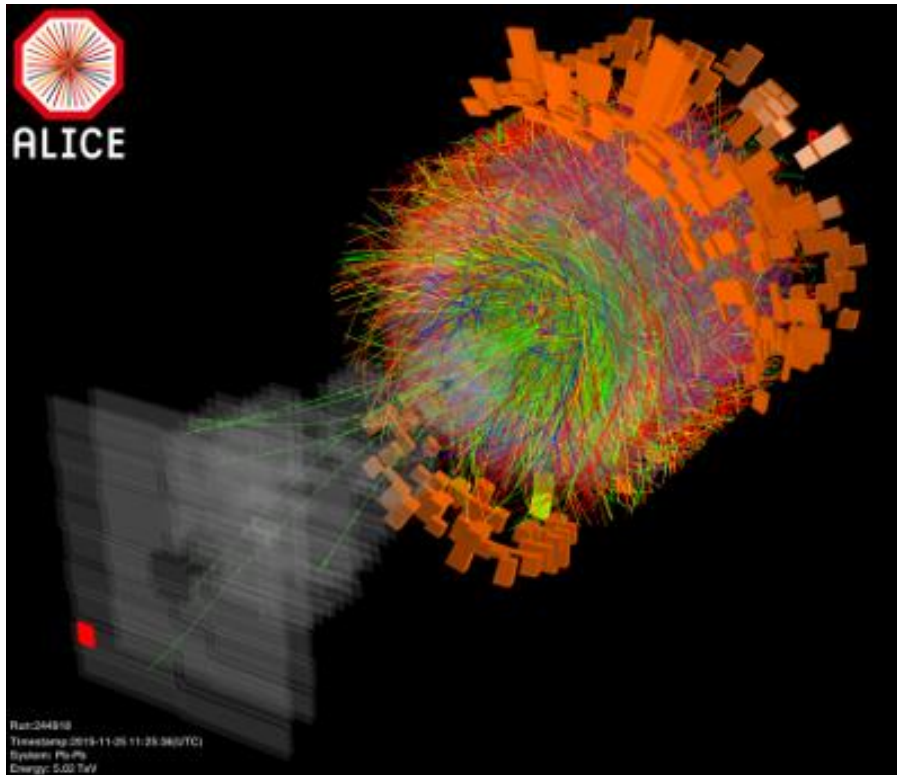
Tramite collisioni di nuclei pesanti accelerati fino a quasi la velocità della luce

1. Si fanno collidere l'uno contro l'altro, a **energie elevatissime (TeV/NN)**, due **ioni  $^{208}\text{Pb}$** : 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  $\epsilon$  simile a quella dell'universo** pochi  $\mu\text{s}$  dopo la formazione (decine di  $\text{GeV}/\text{fm}^3$ )  $\rightarrow$  l'elevata temperatura permette di rilasciare quarks e gluoni



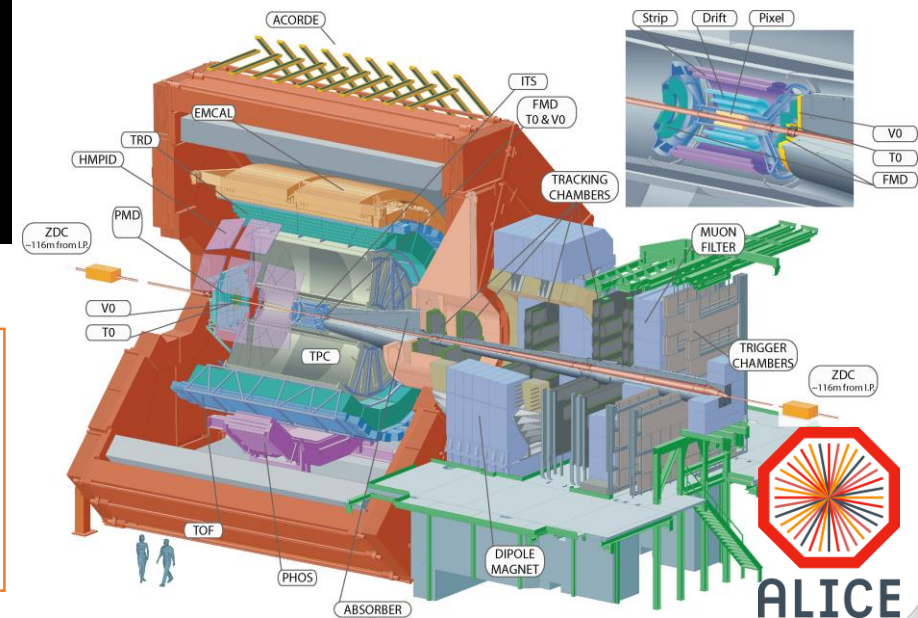
3. Gli adroni costituenti i due nuclei di Pb si fondono così nella **fireball, plasma di quark e gluoni (QGP)** che riproduce in piccolo il blob primordiale
4. Il plasma si espande e si raffredda fino a  $T \sim 2 \cdot 10^{12}$  gradi, alla quale **quarks e gluoni si ricombinano** a formare la materia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





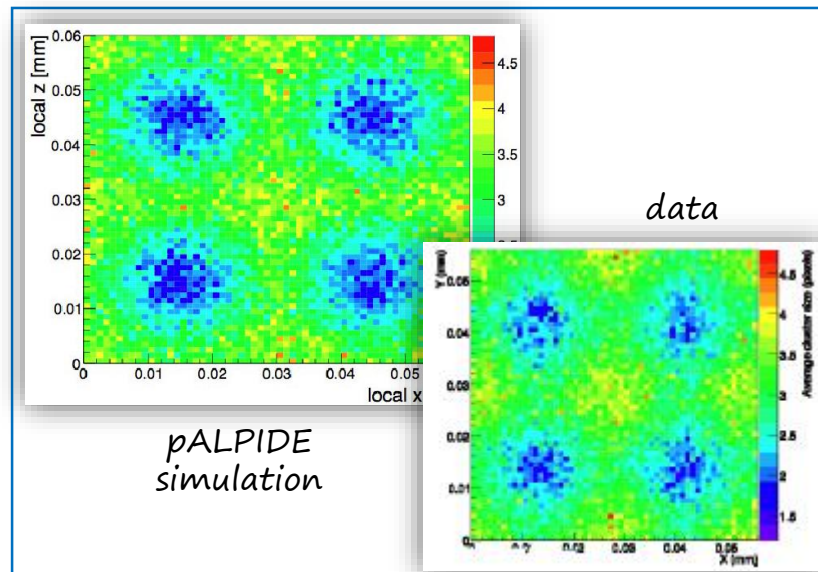
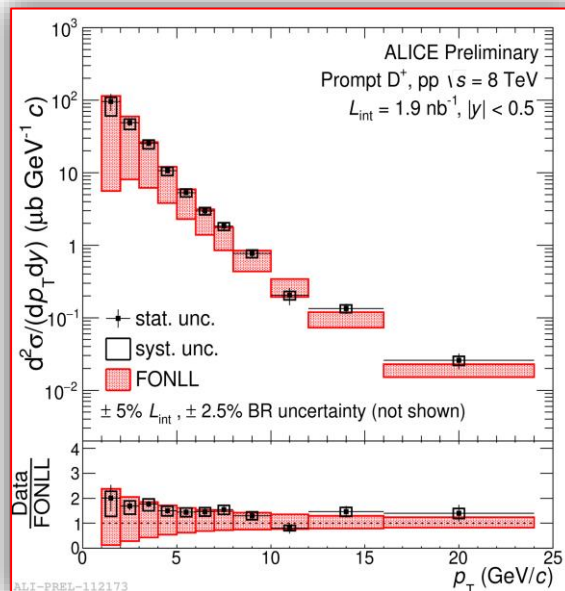
# ALICE a Pavia



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:

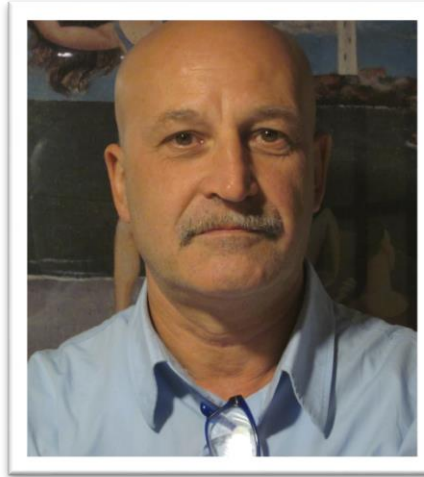
→ check delle prestazioni e del funzionamento del rivelatore ITS per dati e MC

# Contatti

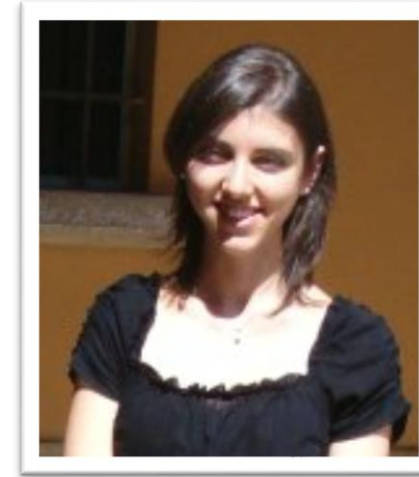
Alberto Rotondi  
[alberto.rotondi@unipv.it](mailto:alberto.rotondi@unipv.it)



Gianluigi Boca  
[gianluigi.boca@pv.infn.it](mailto:gianluigi.boca@pv.infn.it)



Susanna Costanza  
[susanna.costanza@pv.infn.it](mailto:susanna.costanza@pv.infn.it)

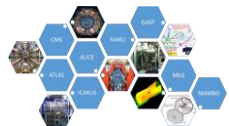


+

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



Disponibilità di tesi!!!



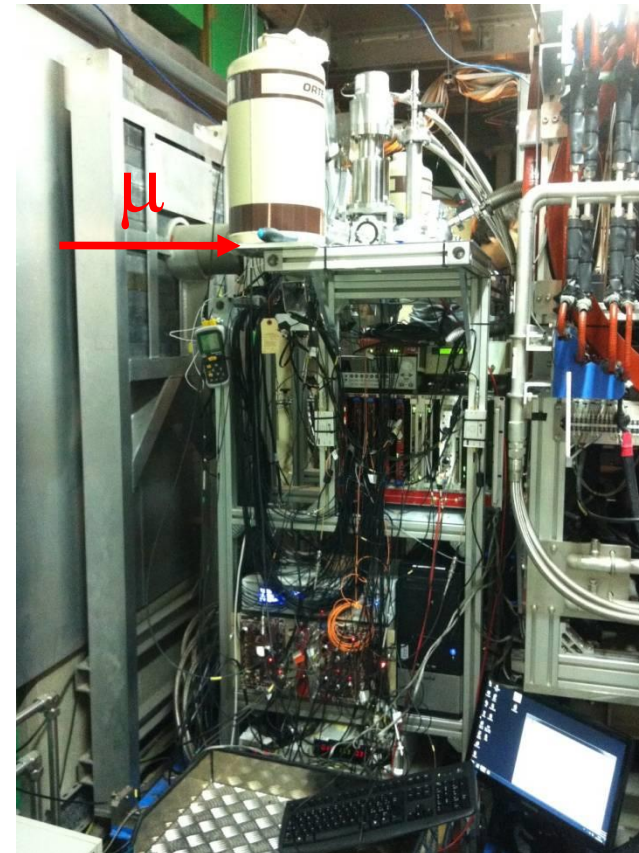
# FAMU (Fisica Atomi MUonici)

Quando è grande il protone?

FAMU vuole misurare i livelli iperfini nello stato fondamentale di un atomo di idrogeno dove al posto dell'elettrone c'è un muone: l'energia dei livelli è infatti legata al raggio del protone.

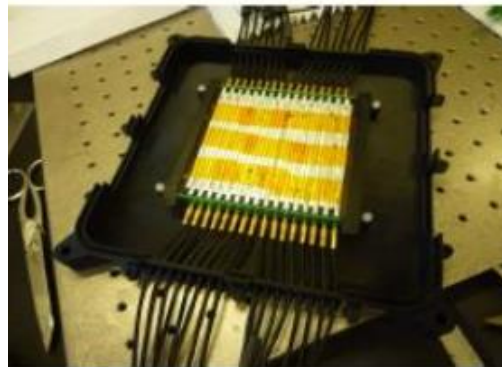
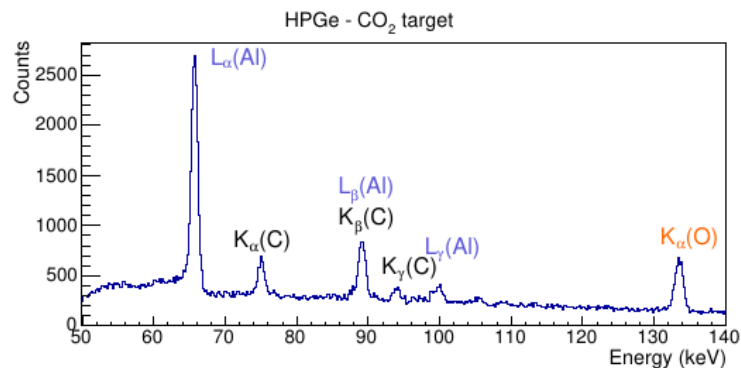
Ci sono discrepanze tra misure del raggio del protone effettuate con atomi elettronici e muonici: serve una misura definitiva.

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 2015-2016.
- Realizzazione dei monitor del fascio di muoni (odoscopi).
- Sviluppo dell'elettronica di amplificazione dei rivelatori di FAMU.



<https://webint.ts.infn.it/en/research/exp/famu.html> (sito web di FAMU presso la Sezione INFN di Trieste)

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

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

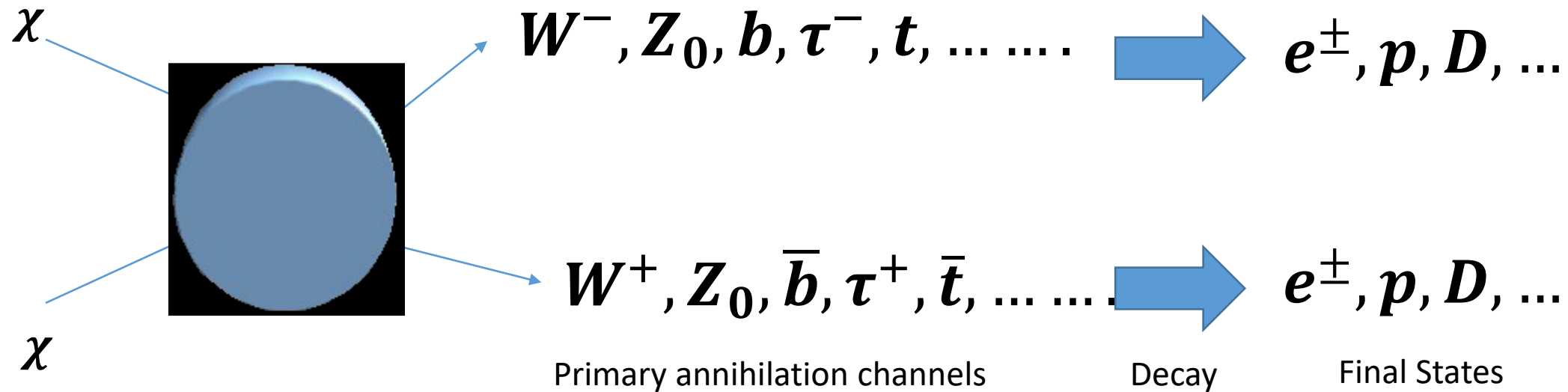


# GAPS: General Anti-Particle Spectrometer

Paolo W. Cattaneo  
INFN Pavia, Italy

Misura indiretta

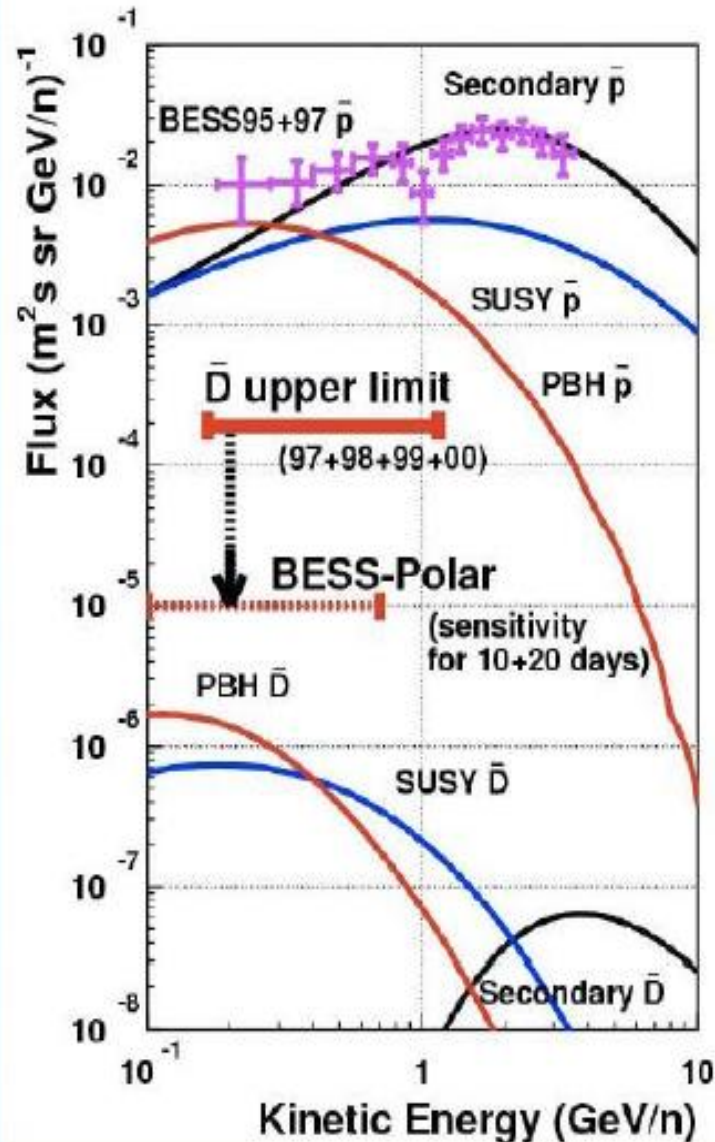
Dark Matter particles are stable. They can annihilate in pairs.



$$\text{Flusso} \propto n^2 \sigma_{\text{annihilation}}$$

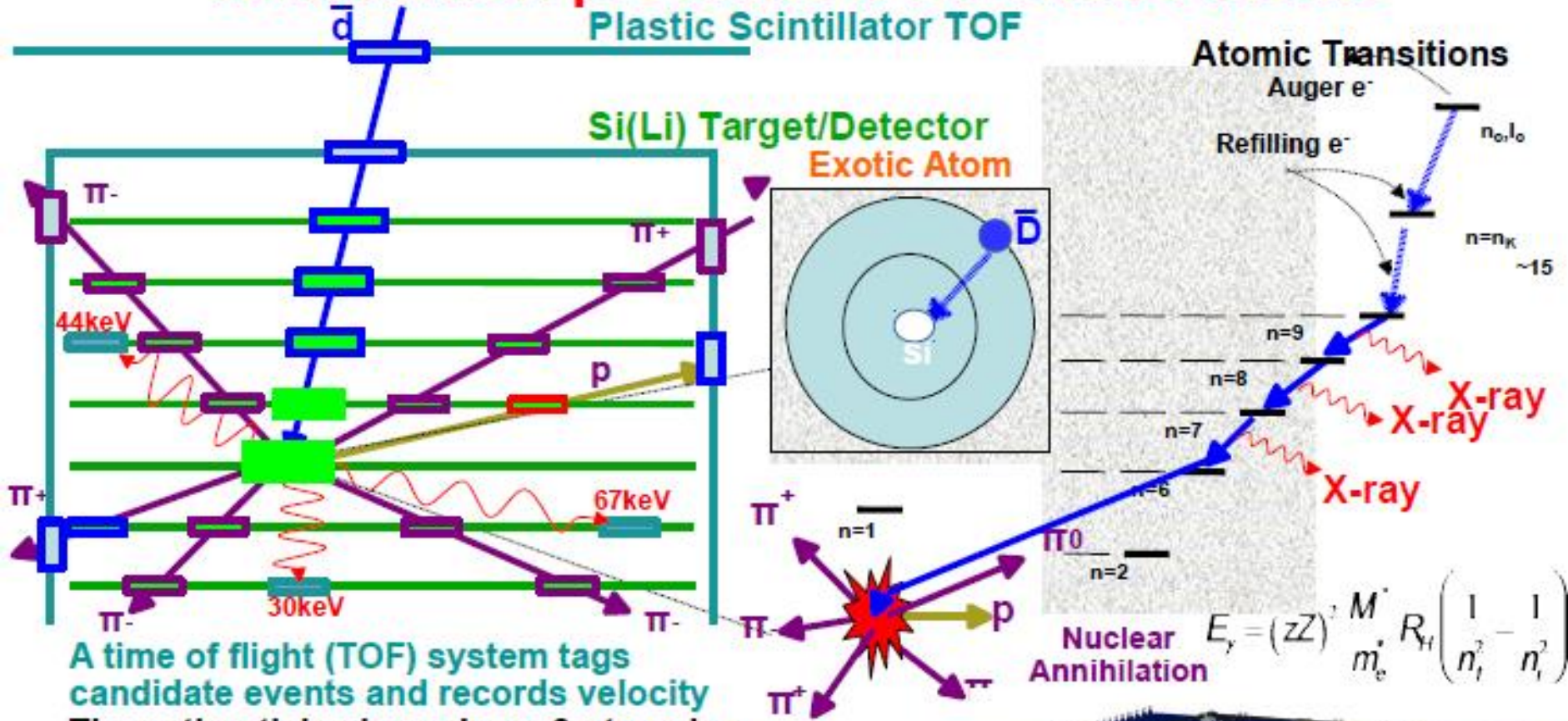
Reference «Cross Section»:  
 $\sigma v = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{sec}$

# Antideuteron Search



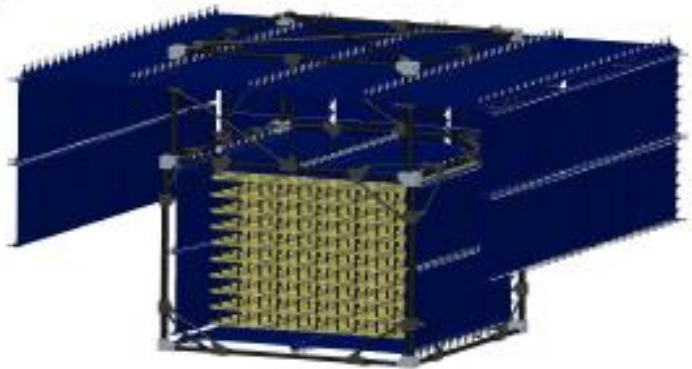
- Secondary  $\bar{D}$  probability is negligible at low energies due to kinematics
- Any observed  $\bar{D}$  almost certainly has a primary origin!
- $\bar{D}$  95% C.L. upper limit (first reported)  $1.92 \times 10^{-4}$  ( $\text{m}^2 \text{s sr GeV/n})^{-1}$  from BESS97+98+99+00.
- BESS-Polar II flight accumulated cosmic-ray data in near solar minimum conditions with more than 10~20 times the statistics of BESS97.

# GAPS detects atomic X-rays and annihilation products from exotic atoms



A time of flight (TOF) system tags candidate events and records velocity  
 The antiparticle slows down & stops in a target, forming an excited exotic atom  
 Deexcitation X-rays provide signature  
 Annihilation products provide added background suppression

X-ray yields were measured at KEK in 2004 and 2005



# GAPS science summary

## Antideuterons as DM signatures

- - **no astrophysical background** at low energy
  - **complementary** to direct/indirect searches and collider experiments
  - search for: **light DM**, heavy DM, gravitinoDM,  
LZP in extra-dimensions theories, (evaporating PBH)
- **Antiprotons as DM and PBH signatures**
  - precision flux measurement at ultra-low energy ( $E < 0.25$  GeV)
  - **complementary** to direct/indirect searches and collider experiments
  - **~ 10 times more statistics @ 0.2 GeV**, compared to BESS/PAMELA
  - search for: **light DM** gravitinoDM,  
LZP in extra-dimensions theories, evaporating PBH
- *Expected to launch from Antarctica in 2020/2021*

Contatto:

Paolo W. Cattaneo  
INFN Pavia

[paolo.cattaneo@pv.infn.it](mailto:paolo.cattaneo@pv.infn.it)

⇨ **1 LDB flight (~35 days) -> precision antiproton flux measurement**

~1500 antiprotons in GAPS  $E < 0.25$  GeV, while 30 for BESS, 7 for PAMELA at  $E \sim 0.25$  GeV

⇨ **2 LDB flights (~70 days) -> improved antideuteron statistics**

Antideuteron sensitivity:  $\sim 3.0 \times 10^{-6} [m^{-2} s^{-1} sr^{-1} (GeV/n)^{-1}]$  at  $E < 0.25$  GeV

⇨ **3 LDB flights (~105 days) -> Antideuteron sensitivity:  $\sim 2.0 \times 10^{-6} [m^{-2} s^{-1} sr^{-1} (GeV/n)^{-1}]$  at  $E < 0.25$  GeV**

