



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI FISICA

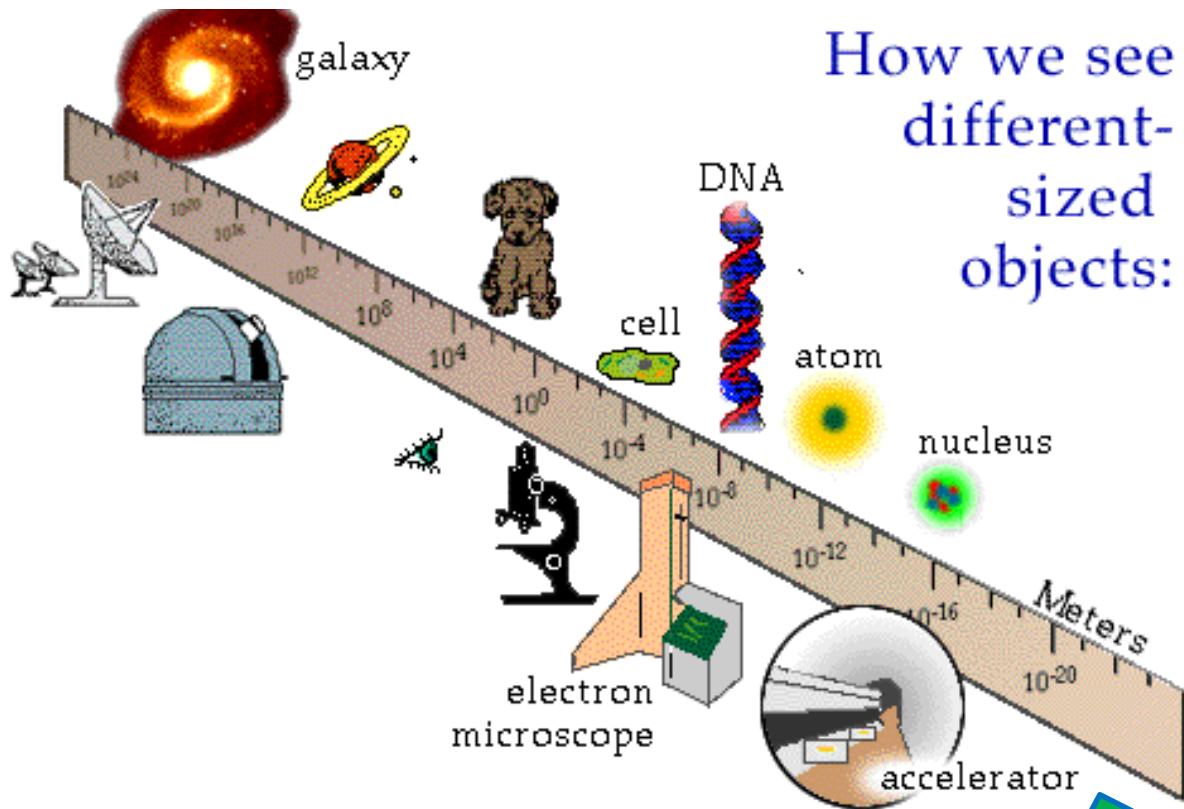
Percorsi della Laurea Magistrale in Fisica

La Fisica delle Particelle e delle Astroparticelle

G. Alimonti, A. Andreazza, B. Caccianiga, L. Caccianiga, L. Carminati, M. Citterio, D. D'Angelo, S. D'Auria, M. Fanti, M. Giammarchi, L. Miramonti, N. Neri, L. Perini, F. Ragusa, A. Re

L'ATTIVITA` DI RICERCA IN PARTICELLE E ASTROPARTICELLE

Alla caccia dei costituenti ultimi



Quali sono i costituenti «fondamentali» del nostro universo ?

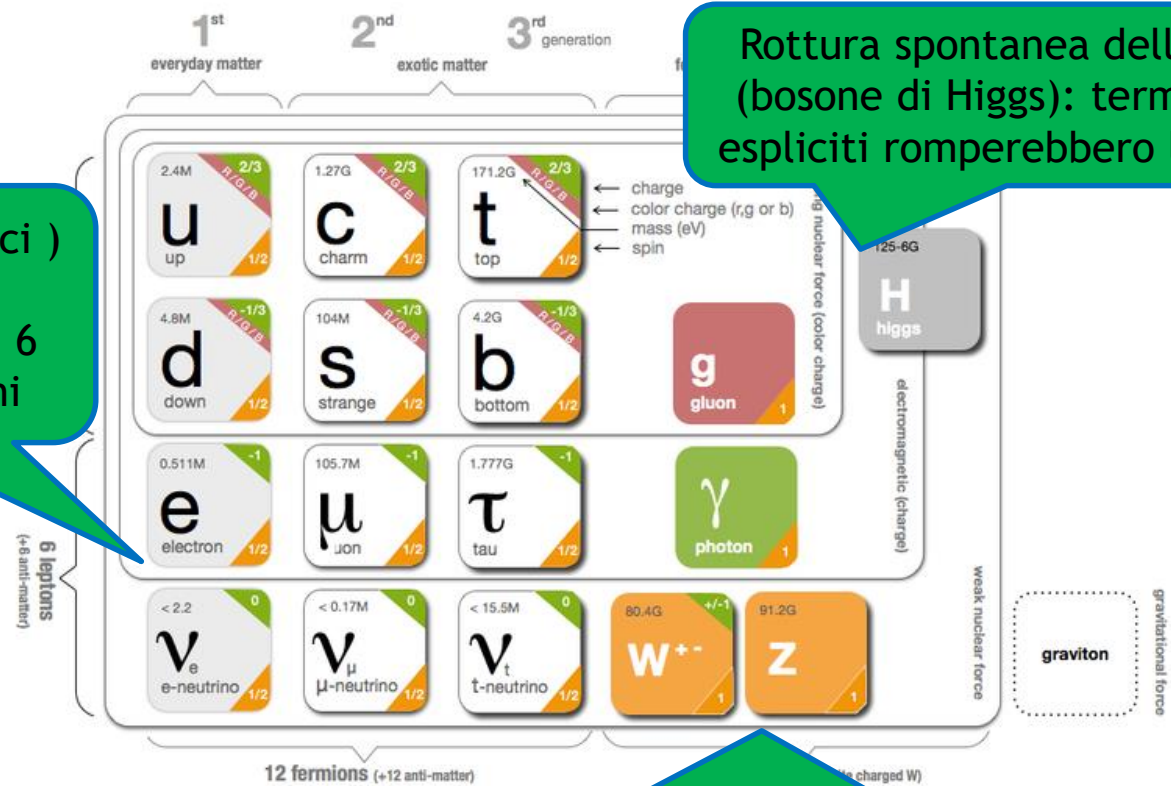
Quali sono le regole fondamentali del gioco ?

Il Modello Standard delle interazioni fondamentali

E' una teoria di Gauge basata sulla teoria quantistica dei campi

12 campi (fermionici) «materiali» (+ antiparticelle): 6 quarks e 6 leptoni

Rottura spontanea della simmetria (bosone di Higgs): termini di massa espliciti romperebbero la simmetria!



Interazioni pensate come «scambio» di «mediatori». Termini di interazione generati dall'invarianza di gauge

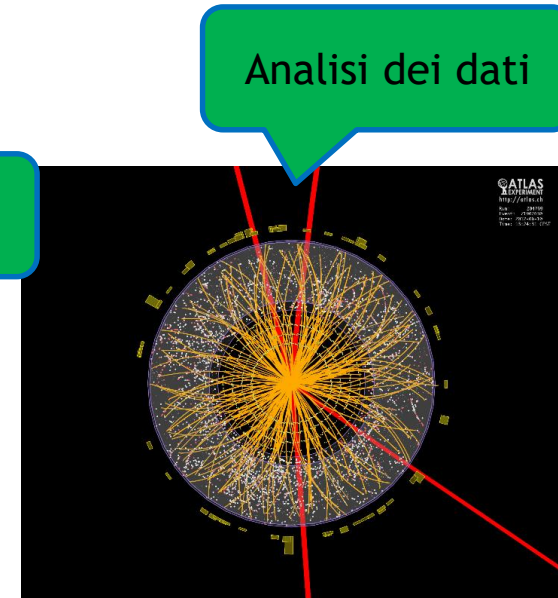
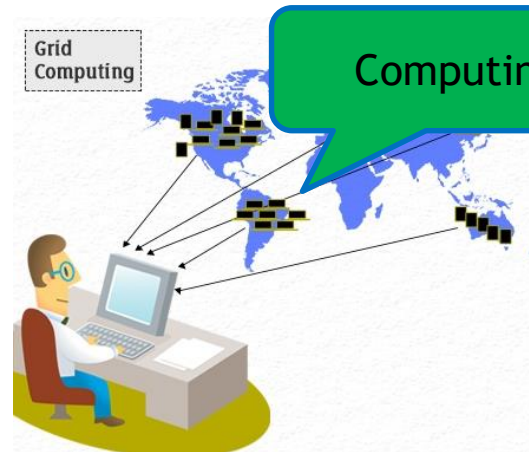


Il Modello Standard delle interazioni fondamentali

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{(U(1), SU(2) and SU(3) gauge terms)} \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R\sigma^\mu iD_\mu \nu_R + (\text{h.c.}) && \text{(lepton dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R\bar{M}^e\bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] && \text{(electron, muon, tauon mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R\bar{M}^\nu\phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] && \text{(neutrino mass term)} \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R\sigma^\mu iD_\mu d_R + (\text{h.c.}) && \text{(quark dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R\bar{M}^d\bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] && \text{(down, strange, bottom mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R\bar{M}^u\phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] && \text{(up, charmed, top mass term)} \\
 & +(\overline{D_\mu\phi})D^\mu\phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/2v^2. && \text{(Higgs dynamical and mass term)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

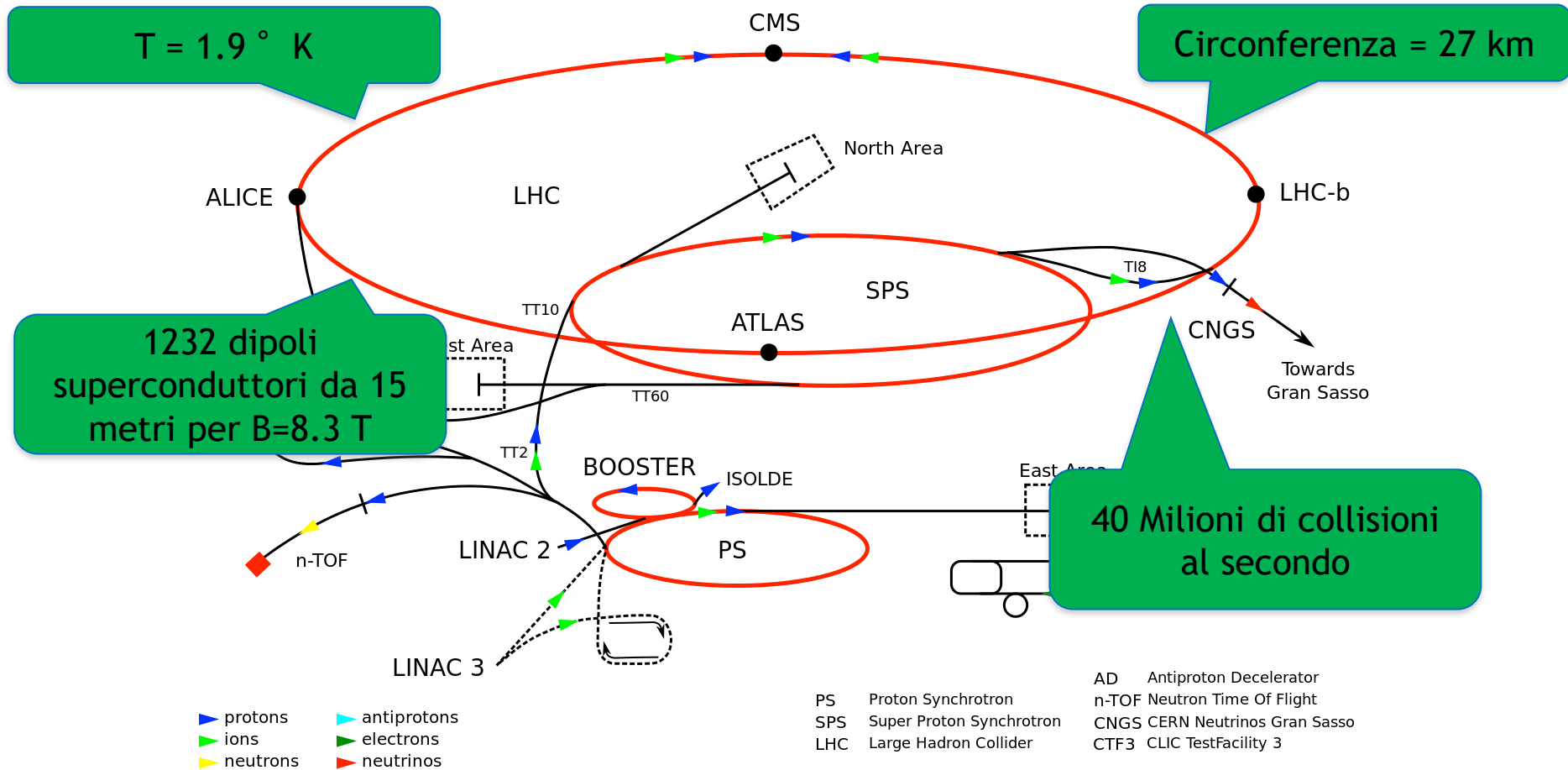
La ricerca in fisica delle particelle

- Lo studio della fisica delle particelle elementari si poggia su



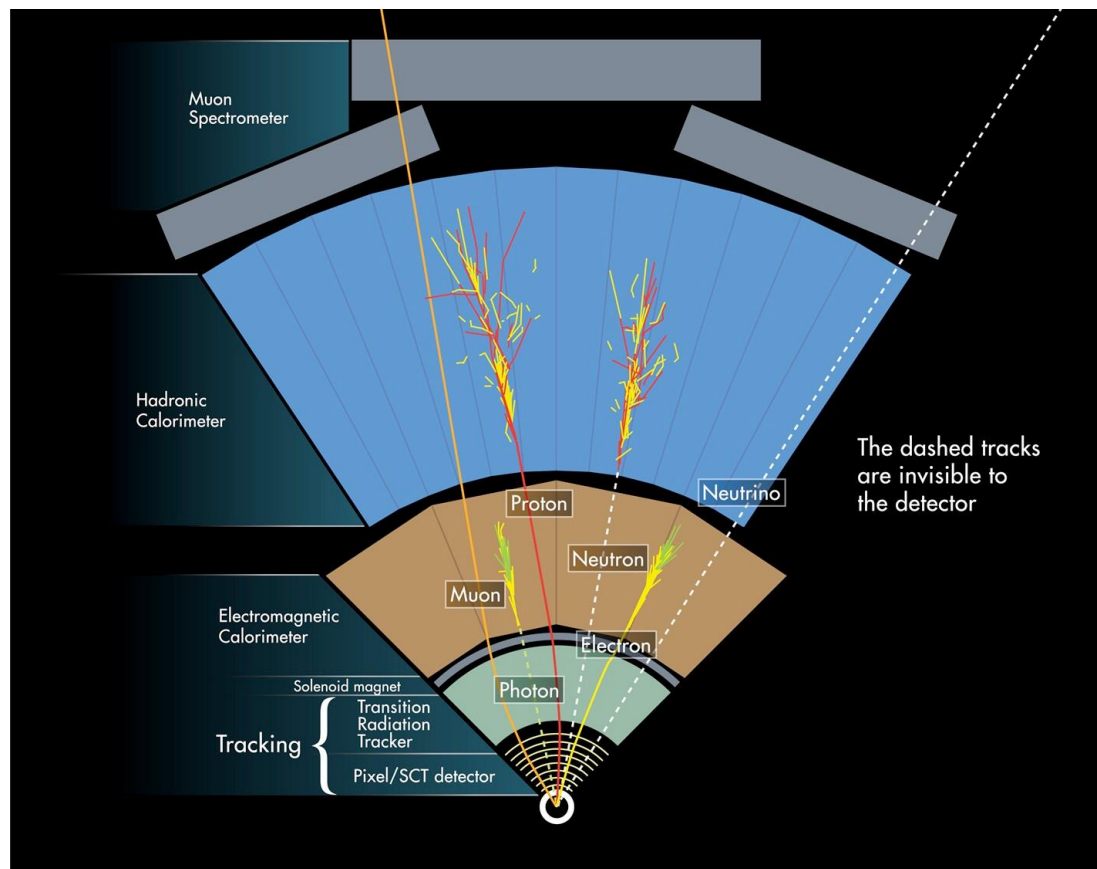
Il collisionatore LHC

- Studio delle interazioni fondamentali in condizioni controllate !

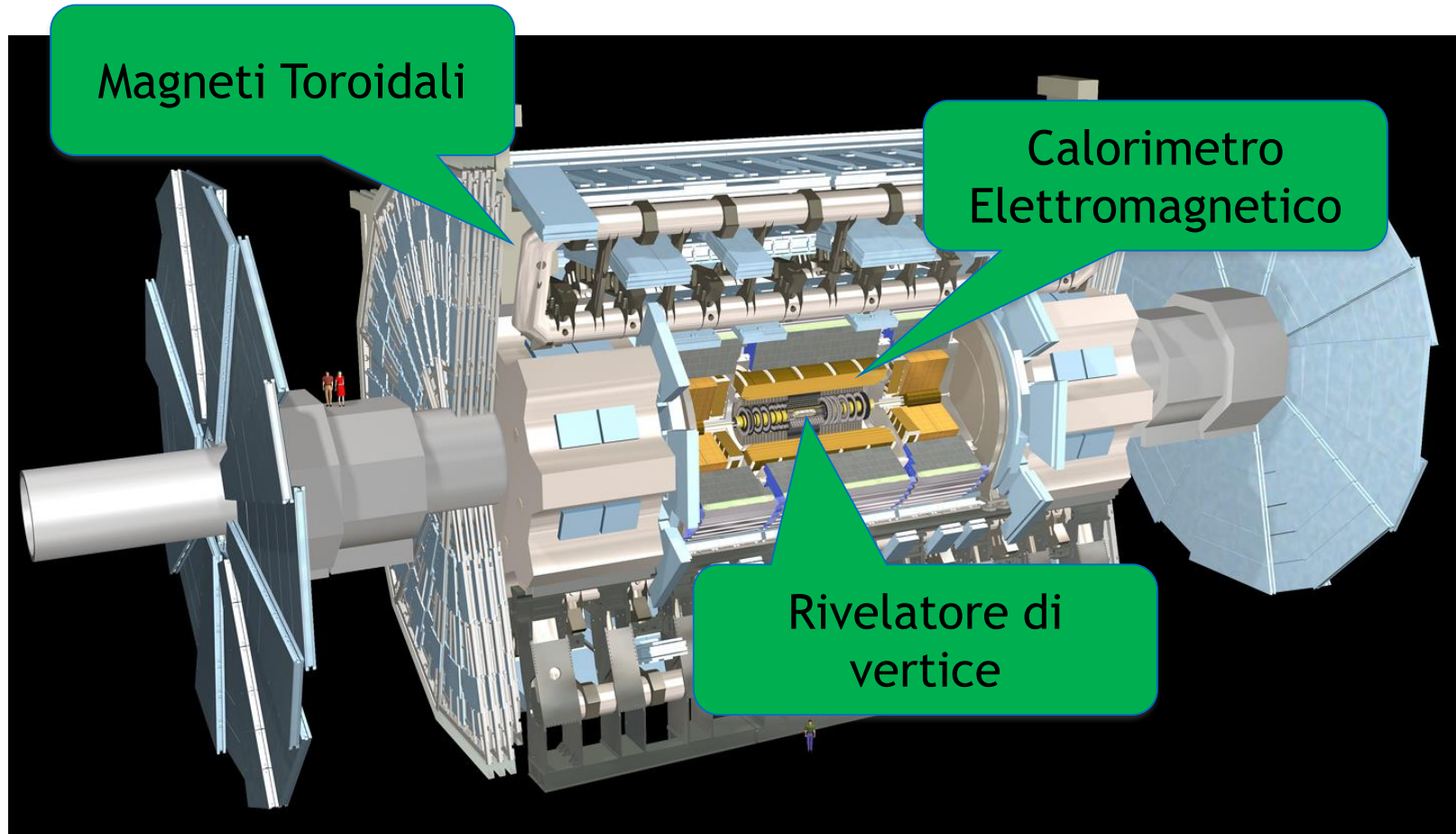


Apparati Sperimentali

- In una interazione vengono prodotte:
 - particelle cariche
 - adroni (interazione forte)
 - leptoni (interazione elettrodebole)
 - particelle neutre
 - fotoni
 - adroni (neutroni, kaoni)
 - neutrini (invisibili)
- Funzioni del rivelatore
 - misura della quantità di moto delle particelle cariche
 - misura dell'energia delle particelle neutre
 - identificazione

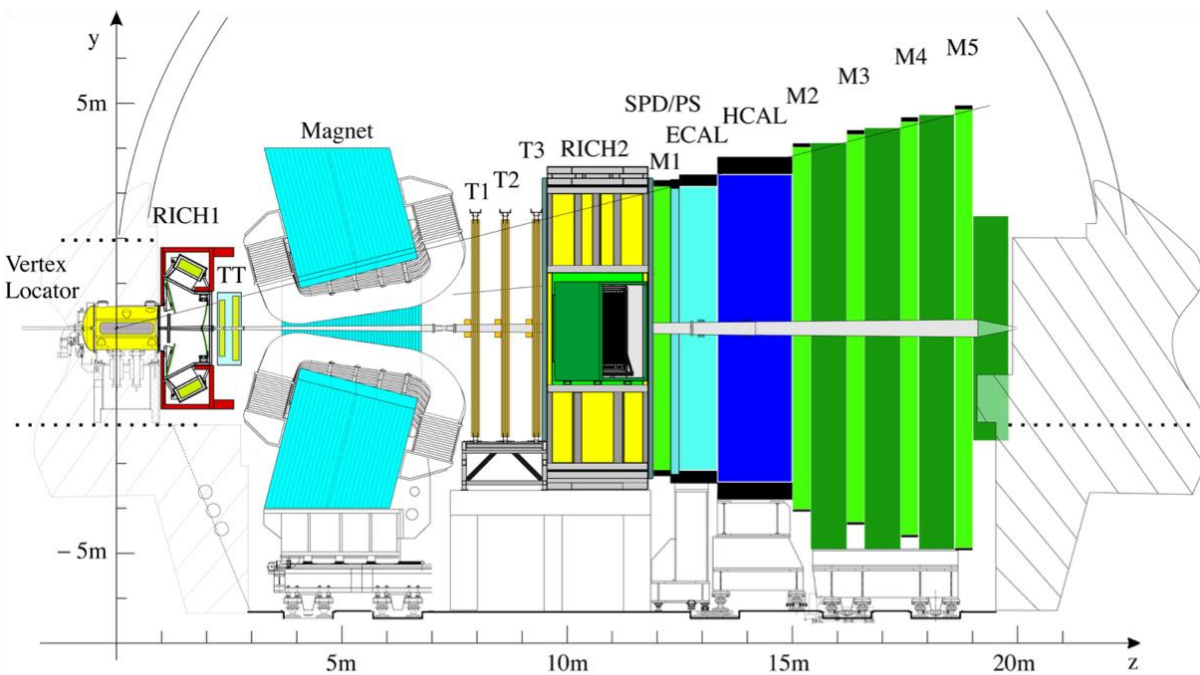


Il rivelatore ATLAS : attività a Milano



Esperimento LHCb: il rivelatore

LHCb è uno dei 4 maggiori esperimenti del LHC al CERN. Spettrometro magnetico in avanti dove la sezione d'urto di produzione di adroni con quarks b è massima

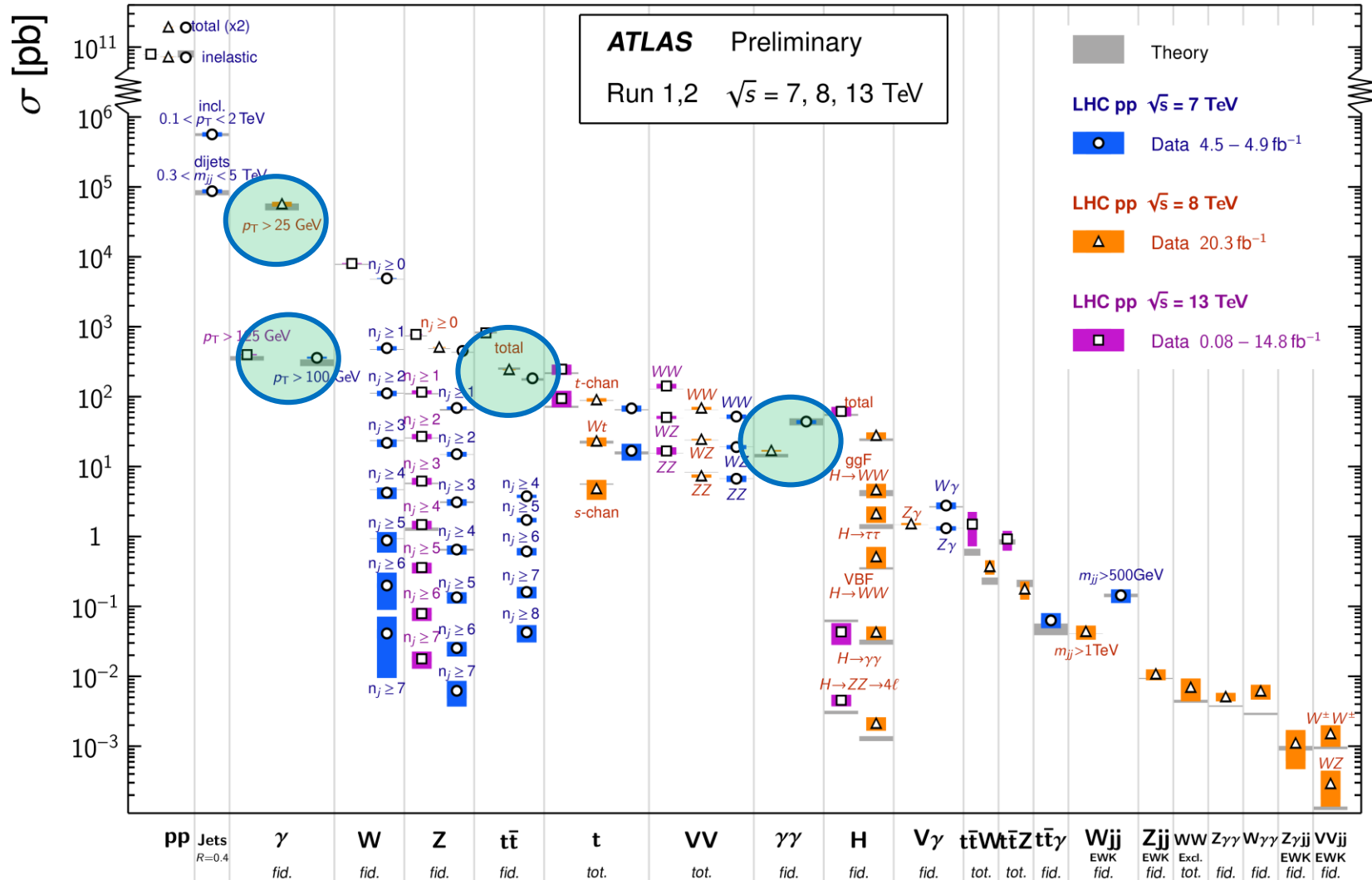


- Tracciatura di particelle cariche e ricostruzione di vertici di decadimento: rivelatori a silicio e a gas
- Campo magnetico di dipolo perpendicolare ai fasci con $\int B \cdot dl = 3.73 \text{ T} \cdot \text{m}$
- Identificazione di particelle con rivelatori Cherenkov (RICH)
- Calorimetro elettromagnetico e adronico
- Camere per identificazione di muoni

Verifiche del Modello Standard a LHC

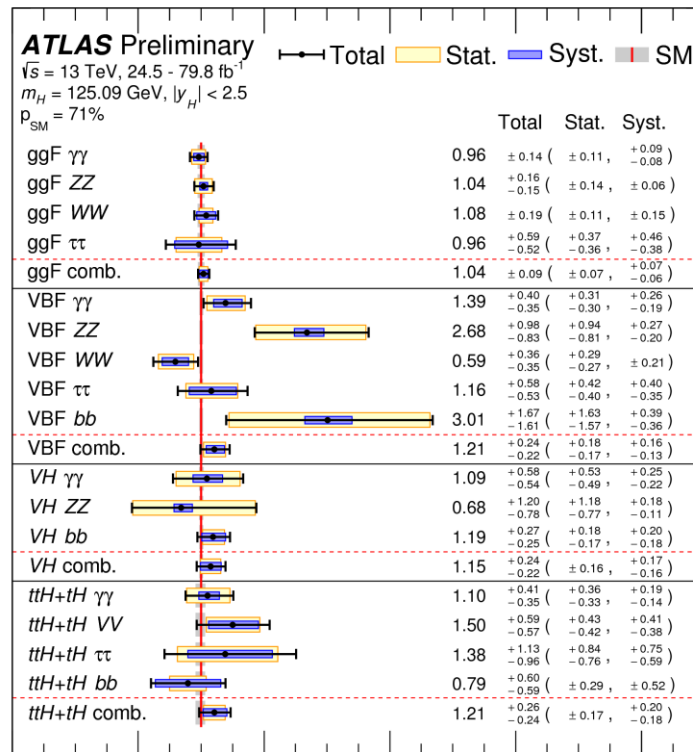
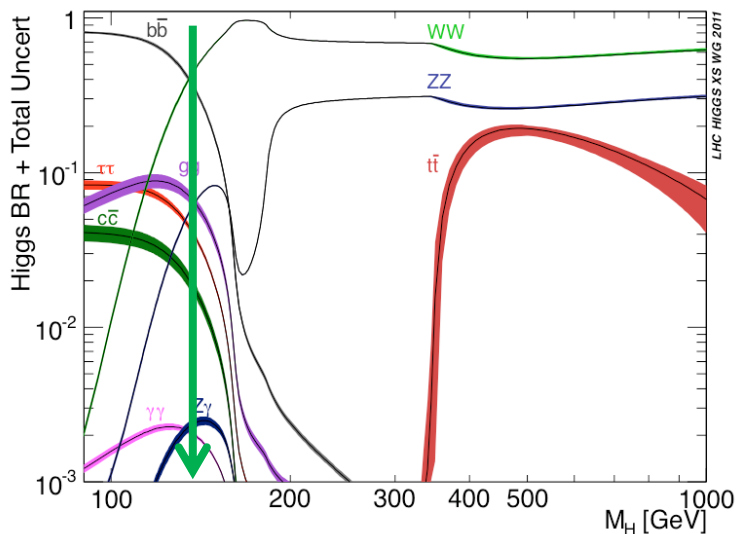
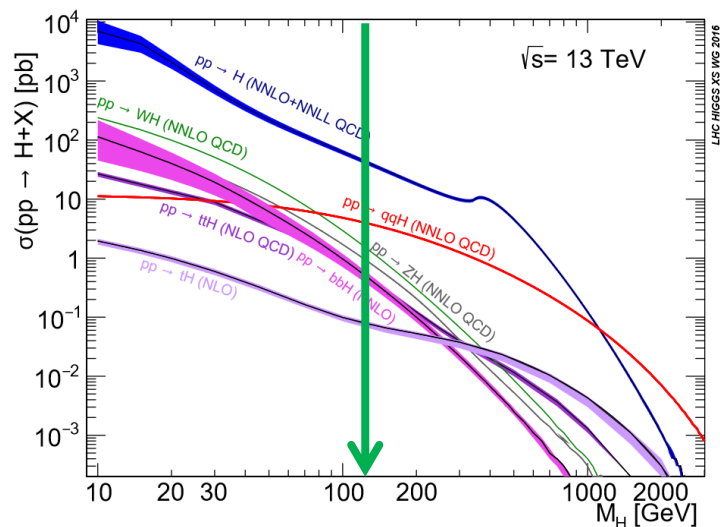
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: March 2017



La fisica dell'Higgs ad ATLAS

Lavoro in dipartimento sui canali $\gamma\gamma$ e $\tau\tau$



Parameter normalized to SM value



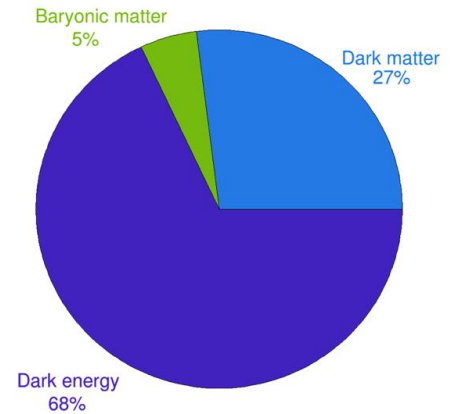
Il Modello Standard e oltre

Con la scoperta del bosone di Higgs è stato completato il **Modello Standard**

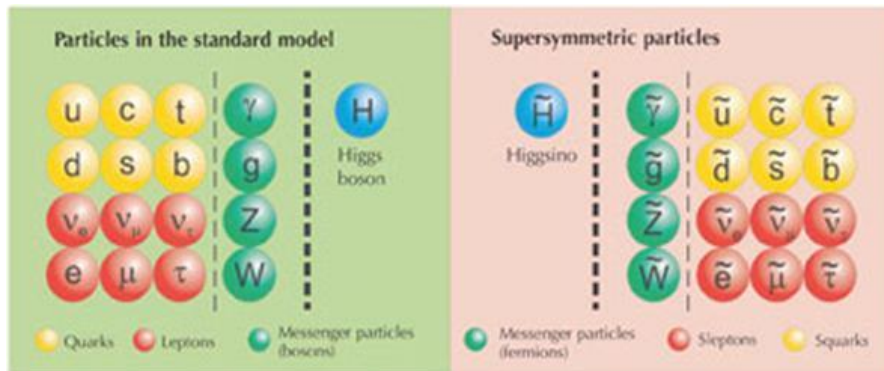
Questo però non può essere completo. In particolare:

- non spiega completamente **l'asimmetria materia-antimateria**
- la **materia oscura** non può essere spiegata con particelle del Modello Standard

A LHC si cerca di produrre nuove particelle che potrebbero estendere il Modello Standard



SuperSymmetry ?

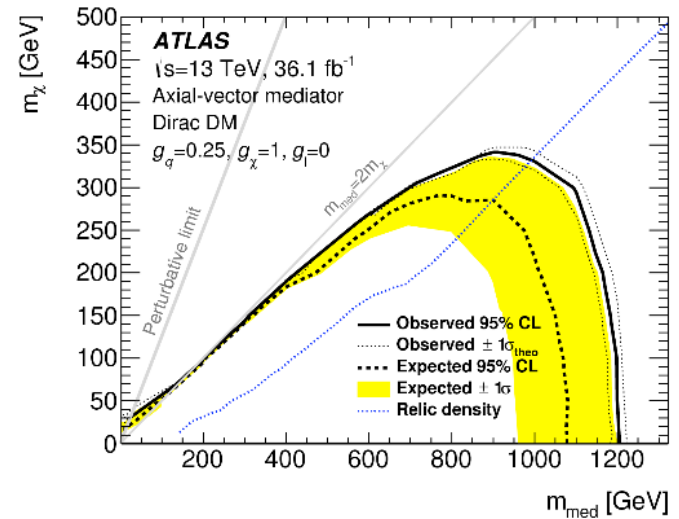
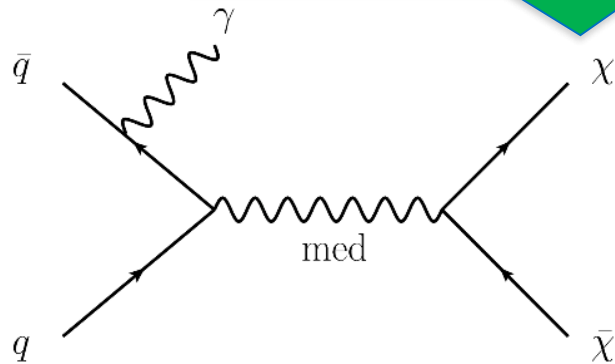


Extra Dimensions ?

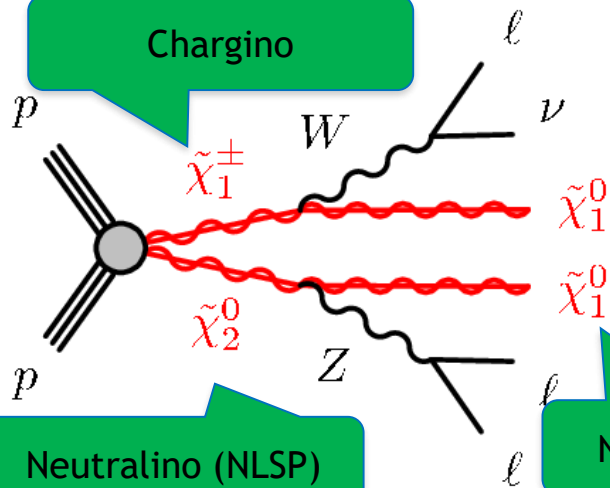


Il Modello Standard e oltre

Dark Matter candidate: WIMP

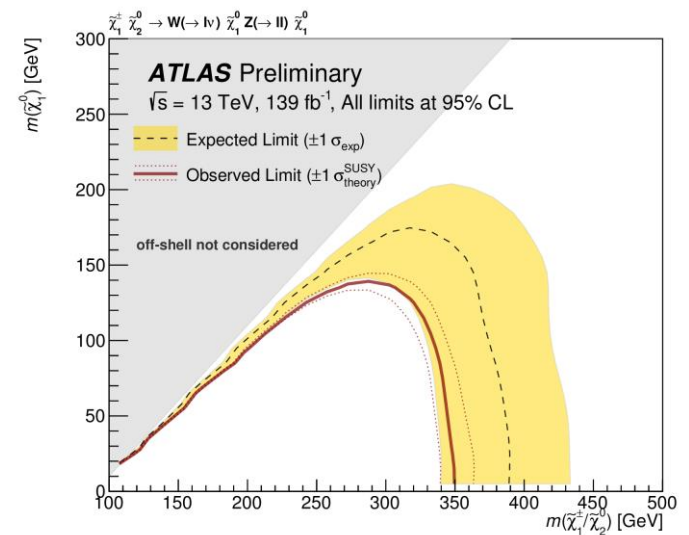


Chargino



Neutralino (NLSP)

Neutralino (LSP)

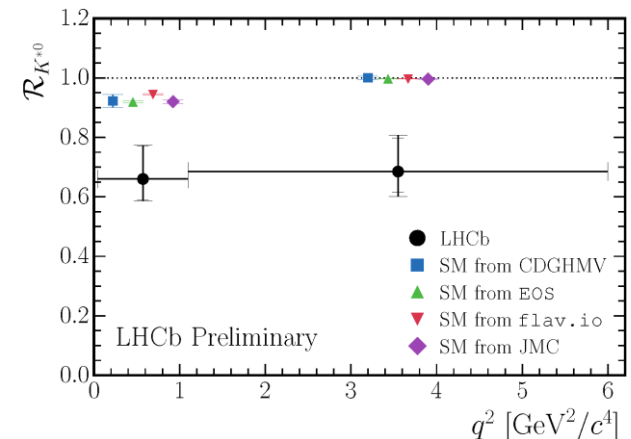


Ricerca di nuova fisica ad LHCb

- Asimmetria materia-antimateria nel nostro universo ?
 - Asimmetria dovuta ad una violazione della simmetria CP : trova posto nello SM ma non è sufficiente a spiegare l'asimmetria materia-antimateria
 - LHCb studia i decadimenti di particelle e antiparticelle con quark b per cercare nuovi contributi di violazione di CP
 - Progetto SELDOM : asimmetria legata ad un momento di dipolo elettrico non nullo

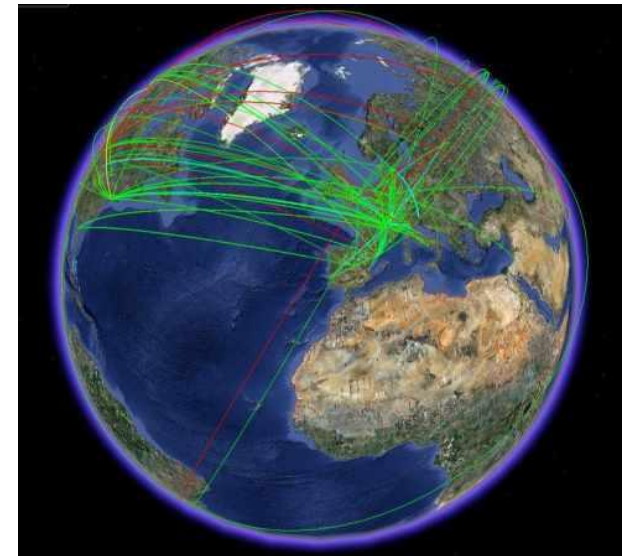
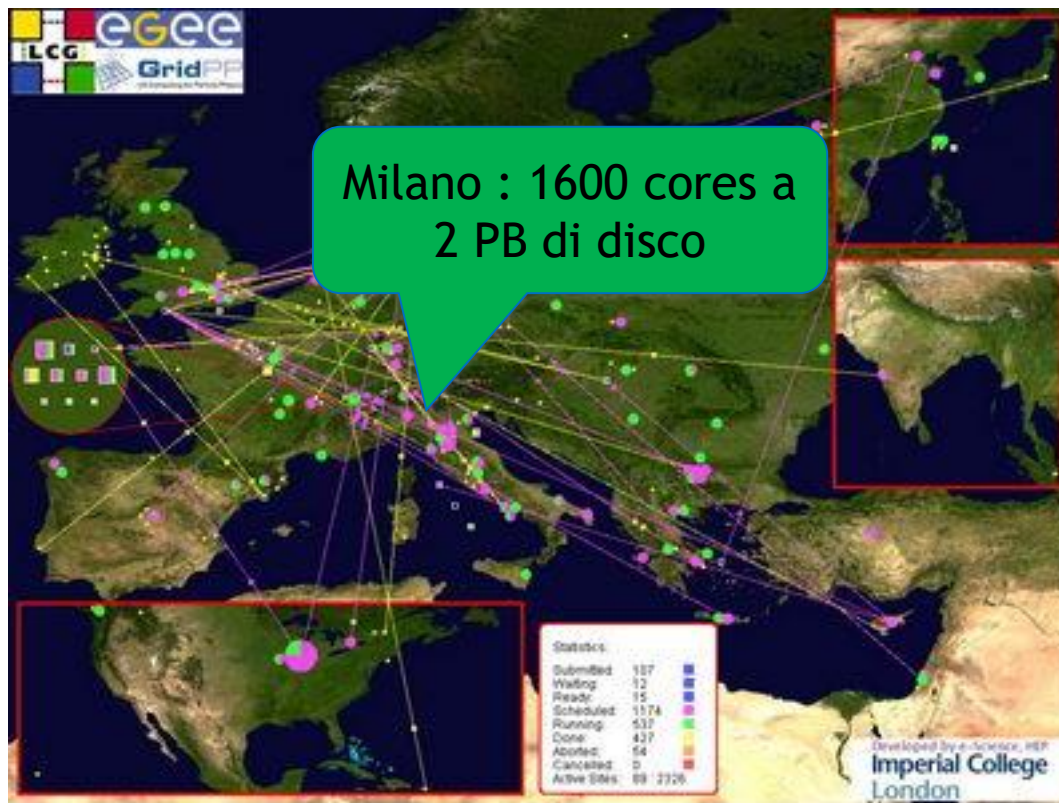


- Ricerca indiretta di nuova fisica attraverso deviazioni dallo SM : rapporto tra decadimento di B^0 in K^* e $\mu^+\mu^-$ e decadimento di B^0 in K^* e e^+e^- .
 - Lepton universality : il modello standard predice 1
 - Tensione al livello di 2.5σ



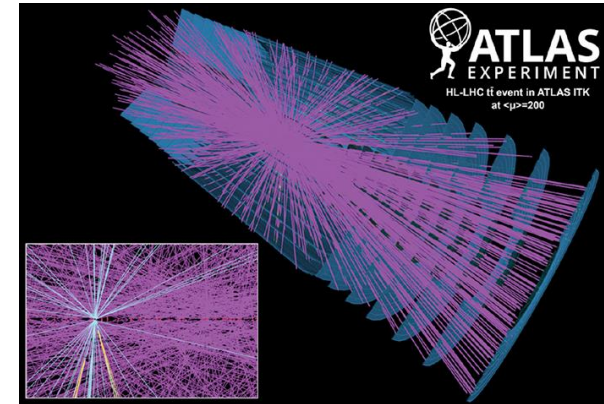
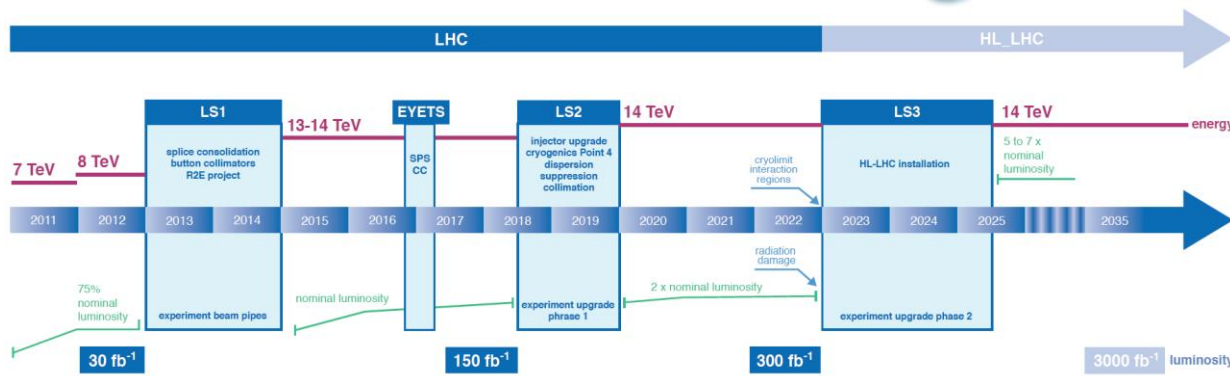
L'analisi dei dati ad LHC

- L'analisi di una gigantesca mole di dati (50 PB di dati/simulazioni l'anno) ha richiesto lo sviluppo di un'infrastruttura di calcolo molto sofisticata: la GRID
 - Ordine 10^6 cores in 170 centri di calcolo sparsi in 43 paesi in tutto il mondo connessi in una struttura gerarchica



Il futuro di LHC

LHC / HL-LHC Plan

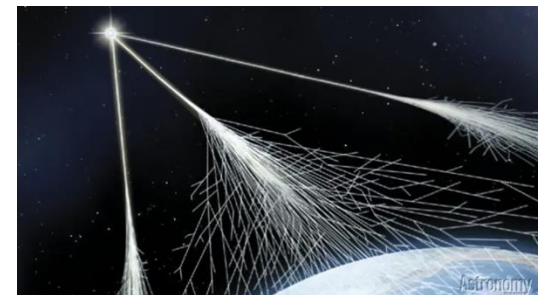


- Tracciatore interno di ATLAS completamente nuovo (ITK). Upgrades dell'elettronica di lettura del calorimetro elettromagnetico. Nuovo layer di timing detector (?)
- LHCb Upgrade I : incrementare rate di acquisizione a 40 MHz. Sviluppo di nuovi dispositivi per tracciatura in 4D (spazio e tempo) di particelle cariche (Timespot) per la fase di alta luminosità.



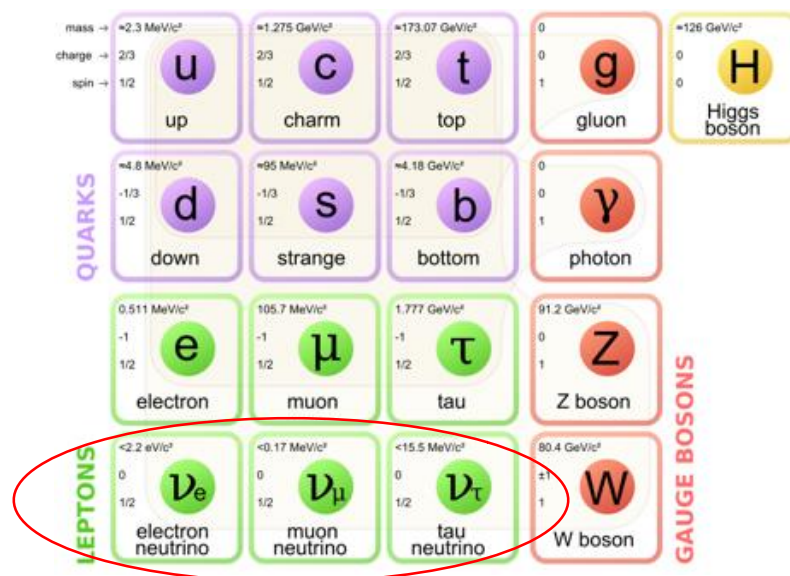
Cos'è la Fisica Astroparticellare?

- Lo studio delle proprietà delle particelle elementari di origine astrofisica e cosmologica
- Due finalità legate a filo doppio:
 - A. rispondere a quesiti aperti in cosmologia
 - B. esplorare nuova fisica delle particelle oltre il Modello Standard
- I tre argomenti di ricerca
 1. Fisica del neutrino
 2. Ricerca della Materia Oscura
 3. Fisica dei Raggi Cosmici



I neutrini nel Modello Standard

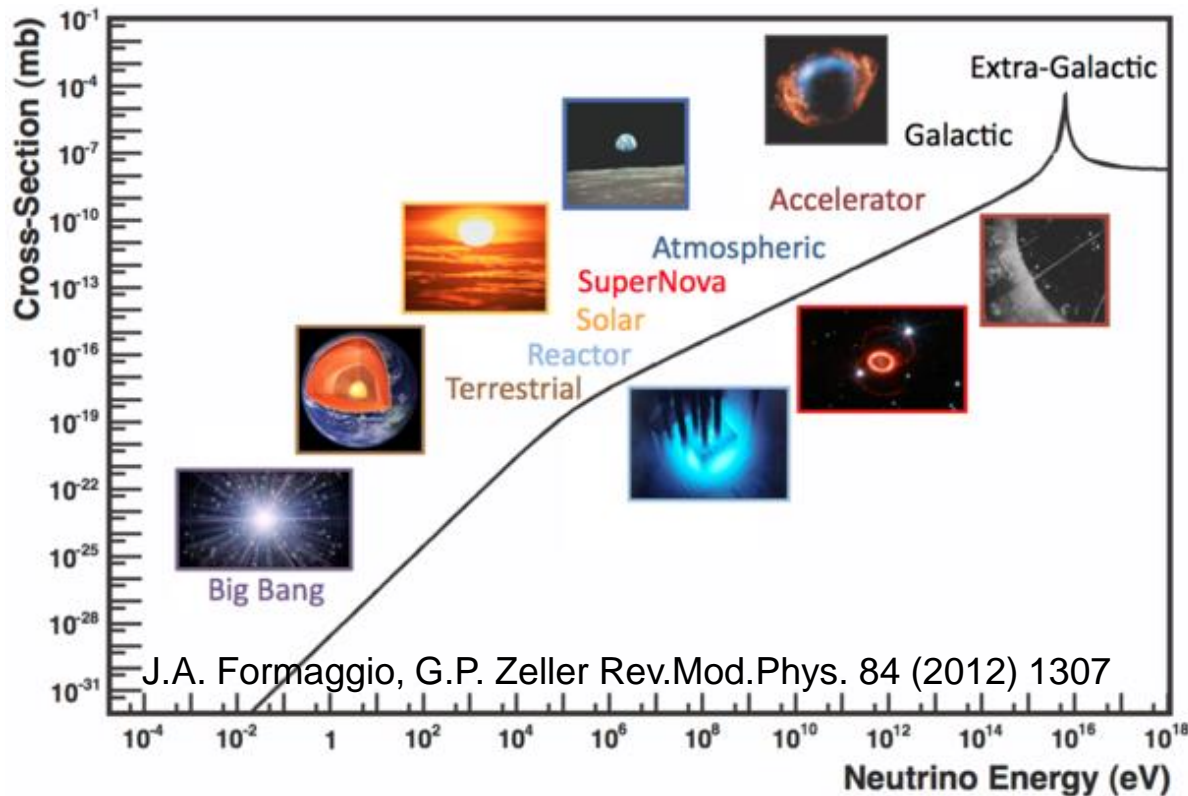
- Con la scoperta del bosone di Higgs è stato completato il Modello Standard
- Ad ogni leptone carico è associato un **neutrino** dello stesso sapore leptónico.
- I neutrini sono soggetti alla sola interazione debole.
- La probabilità che i neutrini interagiscono con la materia è così bassa che la quasi totalità ci attraversa indisturbata.



“I have done a terrible thing: I have postulated a particle that can never be detected” (W. Pauli, 1930)

Da dove arrivano i neutrini?

I neutrini sono generati nei processi di **interazione nucleare debole**



Sorgenti naturali:
Sole, Terra,
SuperNovae, neutrini
atmosferici, ecc..

Sorgenti artificiali:
reattori nucleari,
acceleratori, sorgenti
radioattive.

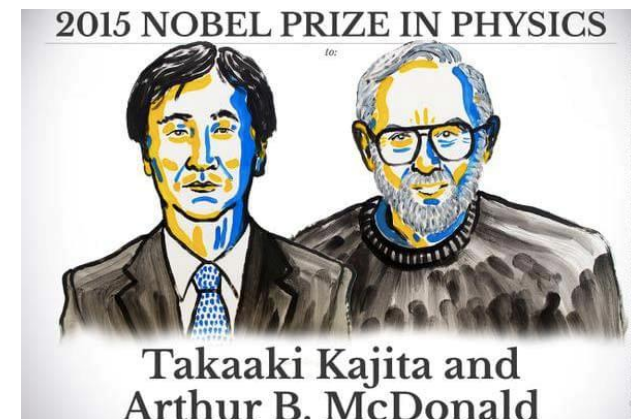
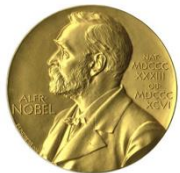
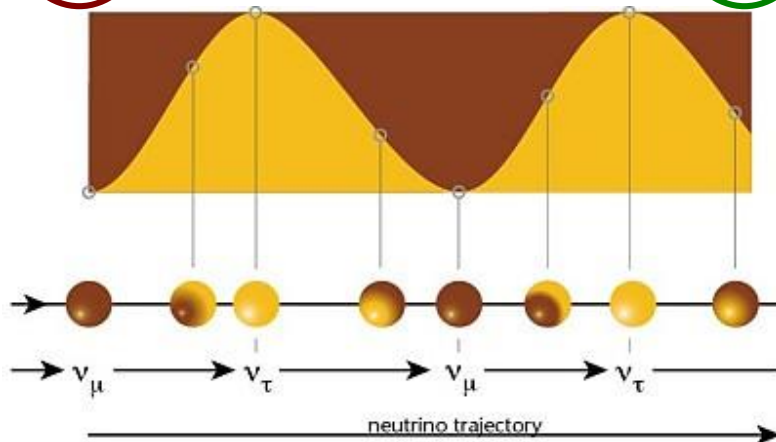
L'oscillazione dei neutrini

Nel modello standard i neutrini sono creati con un sapore leptonic ben definito cioè sono in un **autostato del sapore** e si supponevano privi di massa.

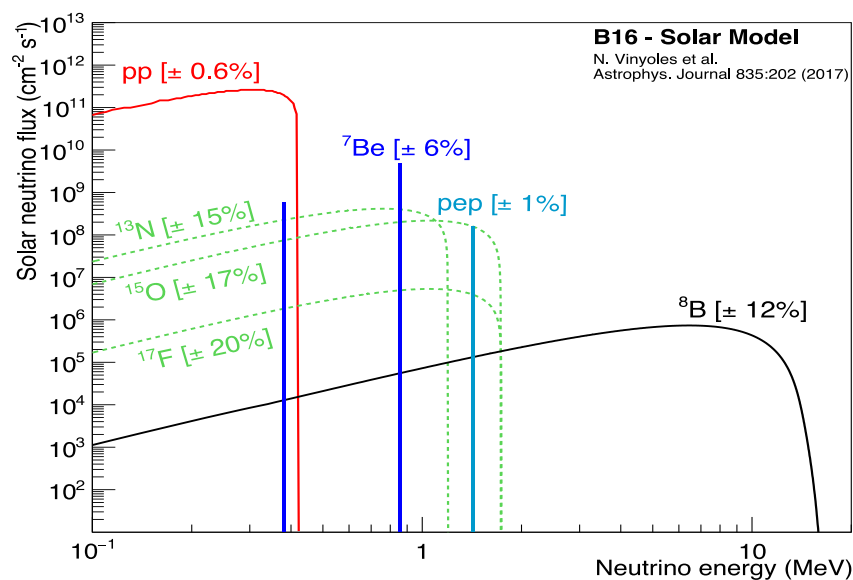
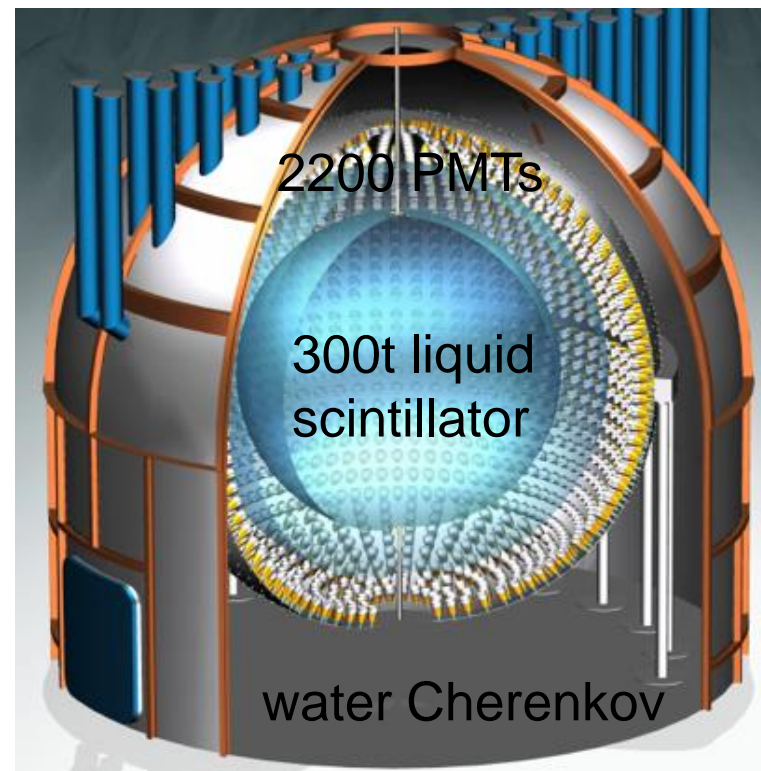
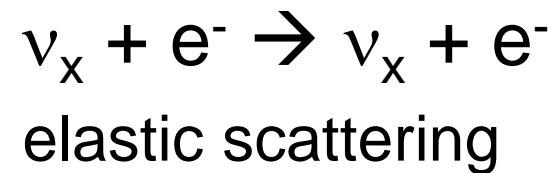
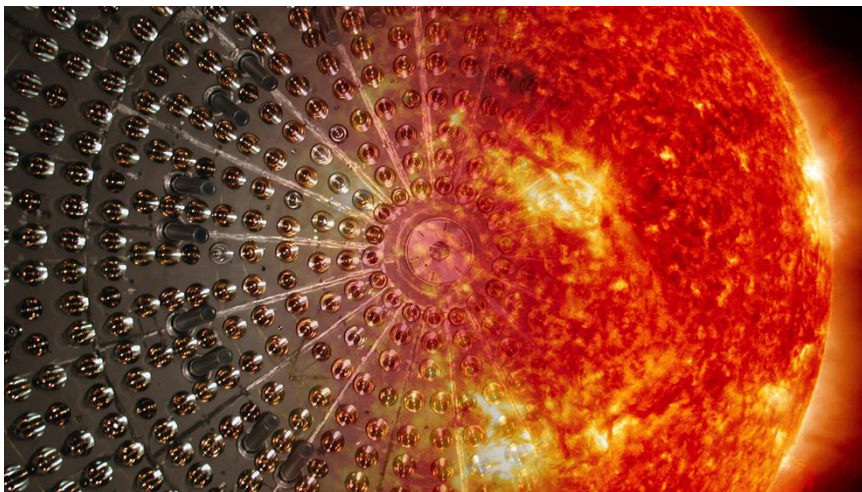
Recentemente (2003) abbiamo scoperto che i neutrini hanno massa e che gli **autostati di massa** non coincidono con quelli di sapore. Durante la propagazione la combinazione di autostati varia: il neutrino può essere rivelato in un autostato di sapore diverso da quello in cui è stato emesso: si parla di Oscillazione del neutrino.

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

La **matrice PMNS** 3×3 descrive il mescolamento di sapore dei neutrini.



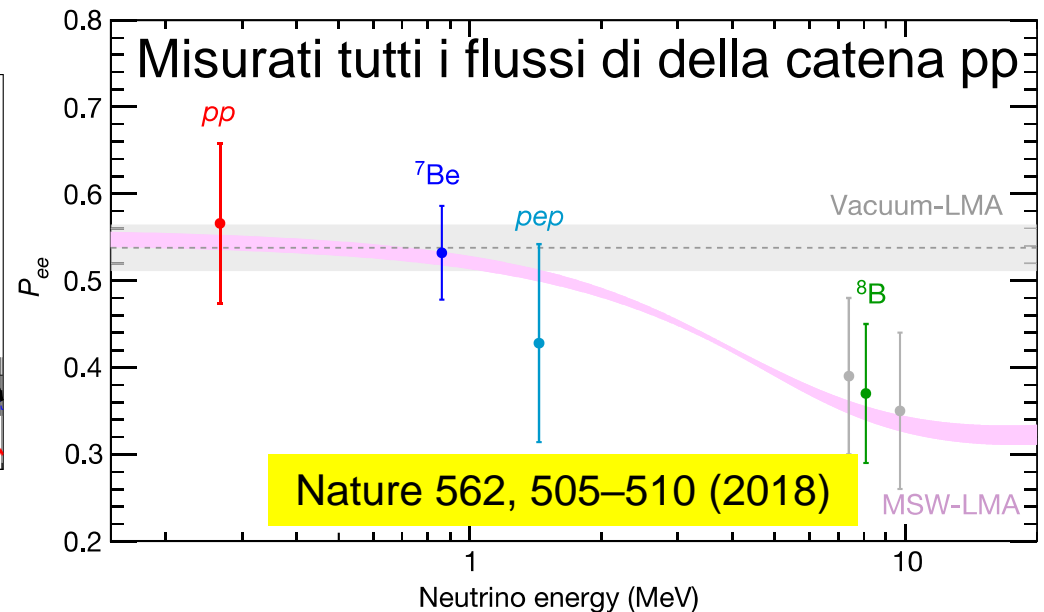
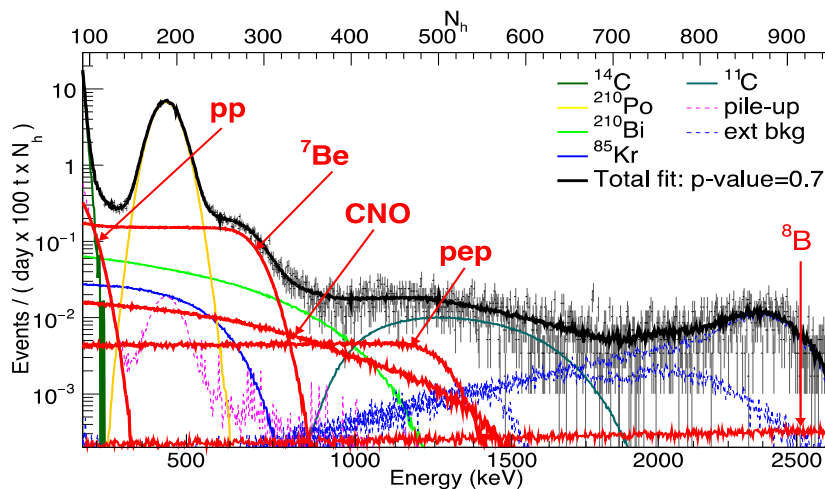
Neutrini Solari e Borexino



Neutrini Solari e Borexino



In funzione dal 2007, è l'esperimento di maggior successo al mondo nel campo dei neutrini solari



1. Modello Solare

2. Oscillazioni dei neutrini

Prossima sfida: misurare il flusso di neutrini del ciclo CNO, mai osservati prima e di grande importanza astrofisica

Proprietà del Neutrino (JUNO)

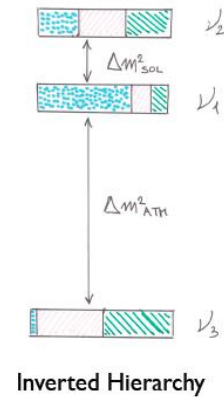
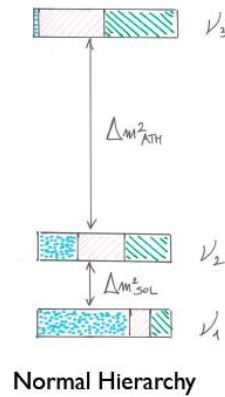


Three Flavor Eigenstates
Three Mass Eigenstates

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha,i} |\nu_i\rangle$$

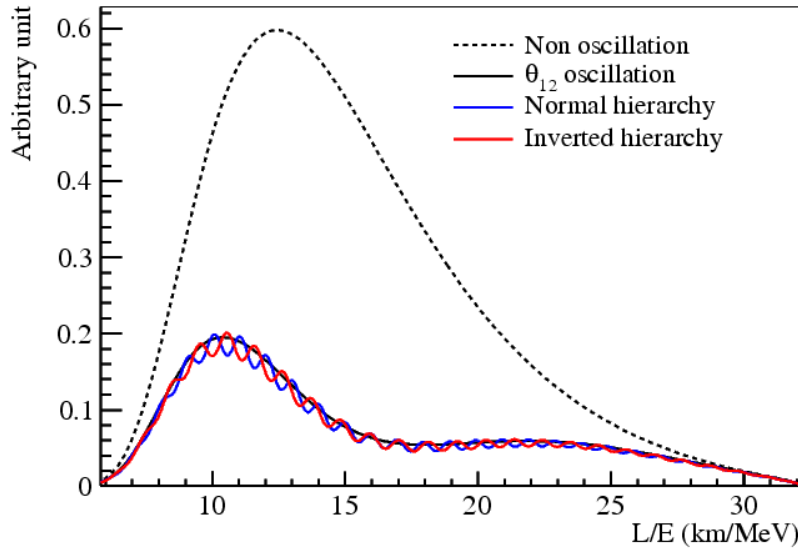
$\alpha = e, \mu, \tau$

ν_e ν_μ ν_τ

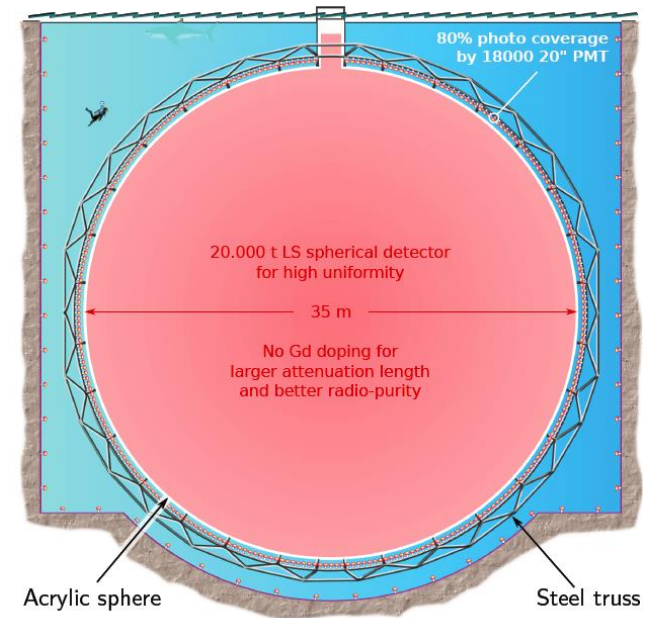


Quale è la corretta gerarchia delle masse?

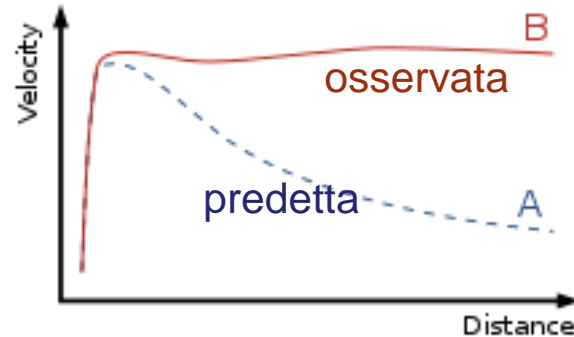
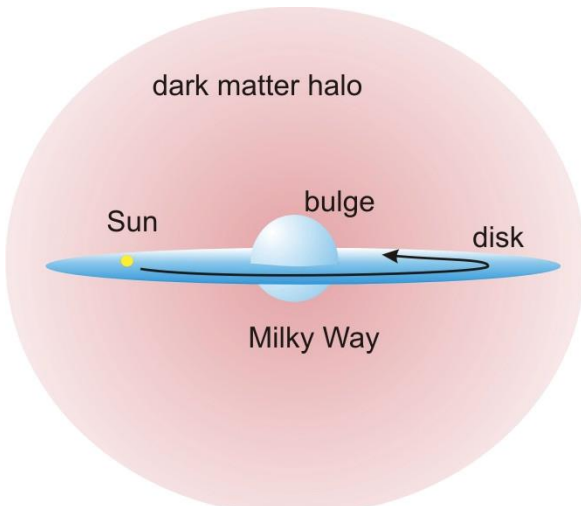
Normale o Invertita?



Violazione di CP nel settore leptonic
Misura di precisione dei parametri di mescolamento dei neutrini:



Ricerca di Materia Oscura



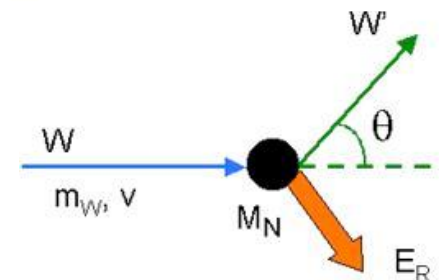
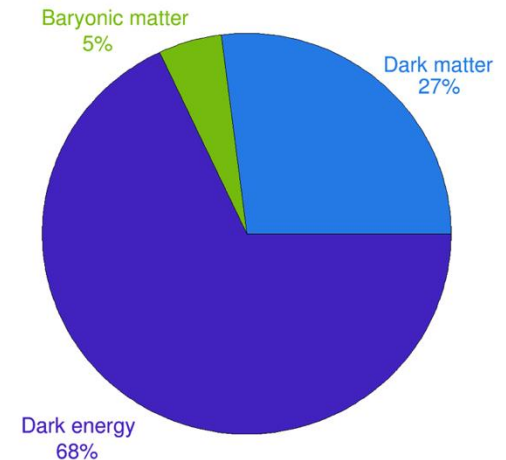
1970 - Misurando la velocità di rotazione delle stelle nelle galassie si scopre che esse sono formate da una massa molto maggiore di quella che si stimava

Numerose osservazioni indicano la presenza di materia oscura formata da particelle:

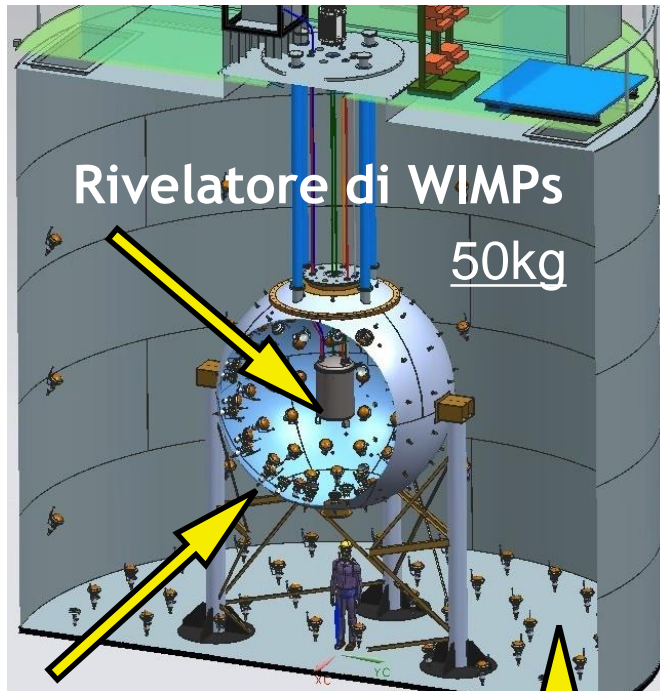
- Neutra: se avesse carica elettrica (o di colore) l'avremmo già osservata.
- Massiva: deve spiegare la formazione delle strutture che si osservano nell'universo su larghissima scala.
- debolmente interagente (\sim dell'ordine dell'interazione debole).
- (Molto probabilmente) non relativistica.

Tra i candidati più accreditati della Materia Oscura si hanno le **WIMPs** (Weakly Interacting Massive Particles)

Nella ricerca diretta di Materia Oscura si misura il rinculo nucleare che le WIMPs producono.



DarkSide-50



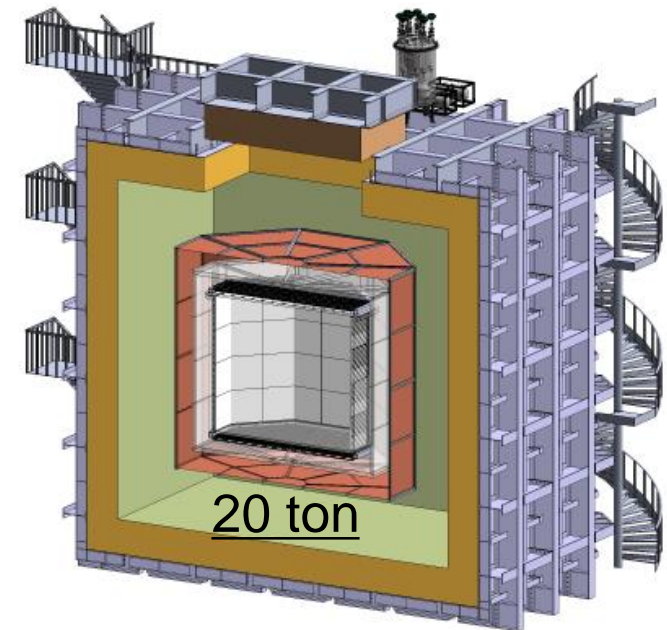
Rivelatore di WIMPs
50kg

Rivelatore di Neutroni
(Scintillatore Liquido)

Rivelatore di muoni
(Water Cherenkov)

Camere a proiezione temporale ad Argon Liquido (-189°C), che costituisce il bersaglio per l'interazione delle WIMPs

Presi dati dal 2014:
leader per WIMP nella regione del GeV



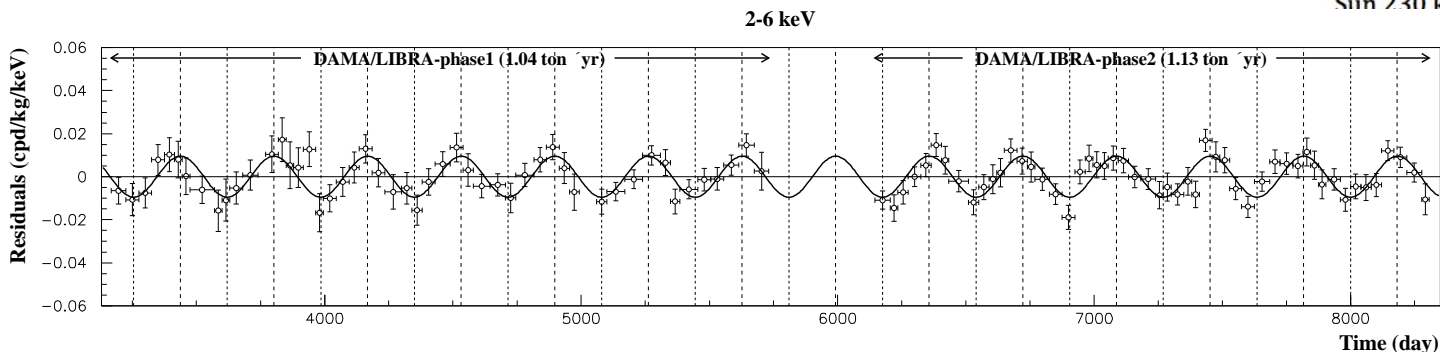
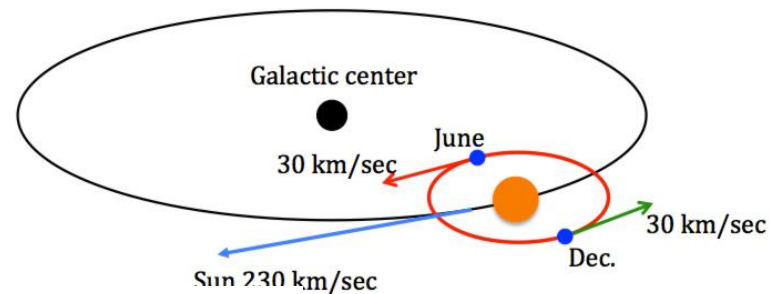
DarkSide-20k

in fase di sviluppo (exp. 2022)

Materia Oscura (SABRE)



Una segnatura caratteristica dell'interazione di Materia Oscura è la **modulazione annuale** del segnale dovuta alla cinematica del moto terrestre nell'alone.

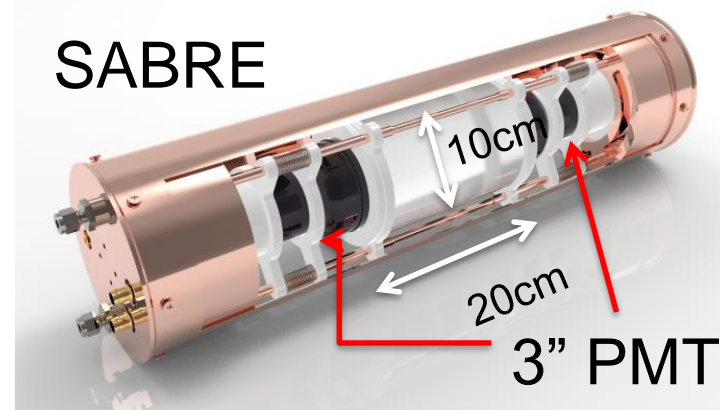


Cristalli scintillanti di Nai(Tl) ultrapuri

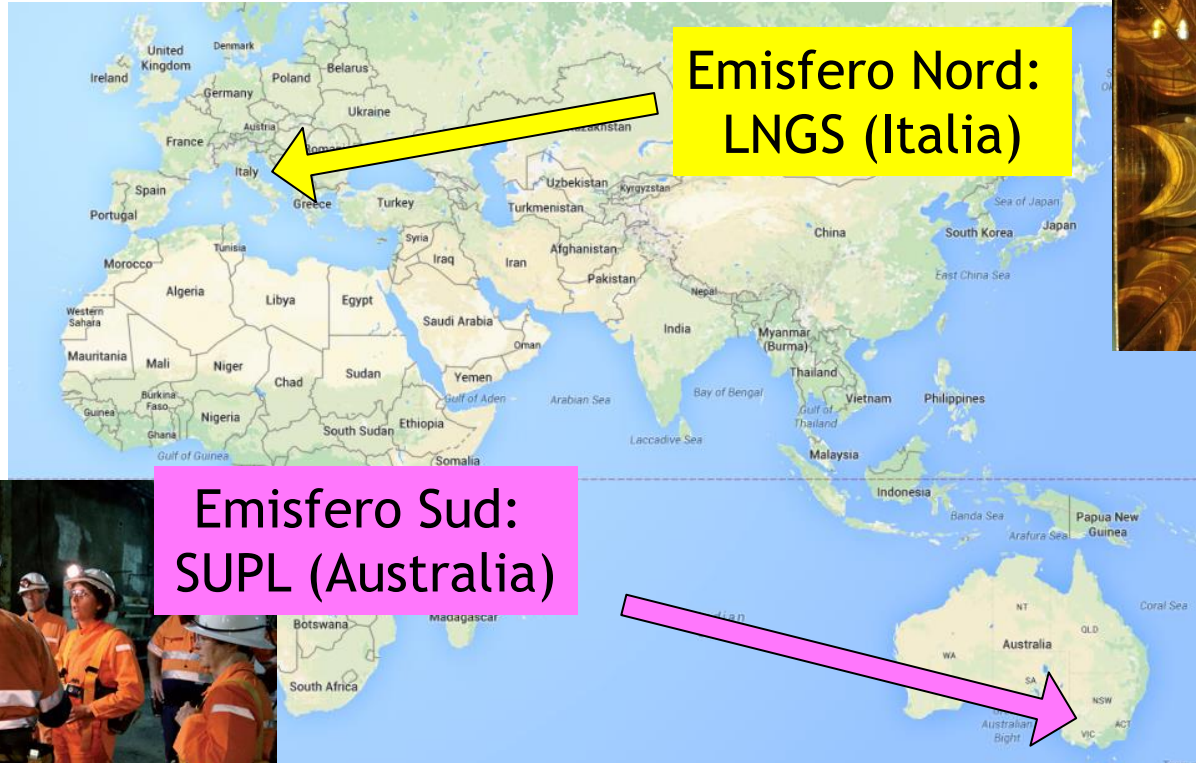
Motivazione: un esperimento riporta una chiara modulazione del segnale interpretabile come **materia oscura**, non confermata da altri esperimenti.

Necessità di una misura indipendente con un rivelatore di nuova generazione e maggiore sensibilità.

SABRE



SABRE (Italia-USA-Australia) consisterà di due rivelatori gemelli



Identificazione univoca della Materia Oscura
su ogni modulazione di origine stagionale

Fisica dei Raggi Cosmici

UHECRs: Raggi Cosmici con $E > 10^{18}$ eV

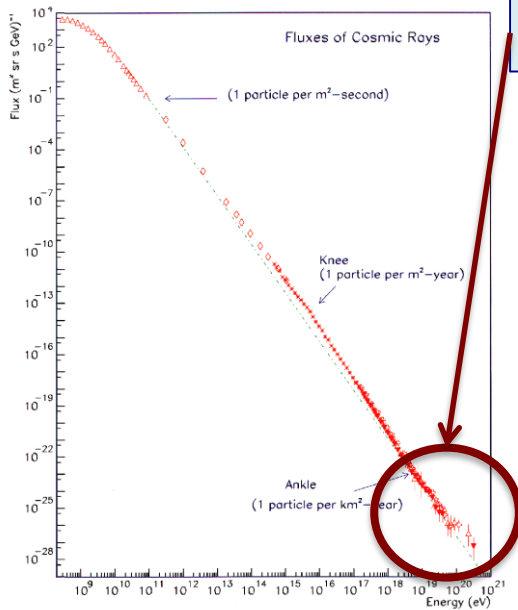
LHC	UHECRs
14 TeV (cms)	400 TeV (cms)

PROBLEMI APERTI:

Quali sono le **sorgenti** in grado di accelerare particelle a energie così alte? → **Meccanismi di accelerazione**

Come funzionano le interazioni adroniche a così alta energia?
→ **Difficoltà ad estrapolare con simulazioni**

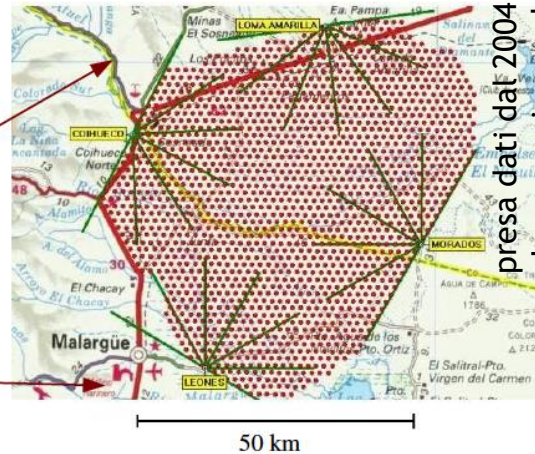
Possibili acceleratori:



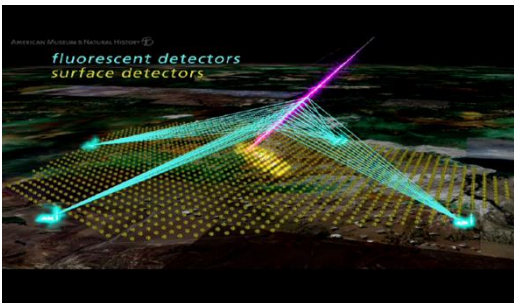
L'osservatorio Pierre Auger

È un Rivelatore Ibrido che combina le due tecniche: **1600 water cherenkov tanks** (griglia triangolare con spaziatura di 1.5 km) = 3000 km²

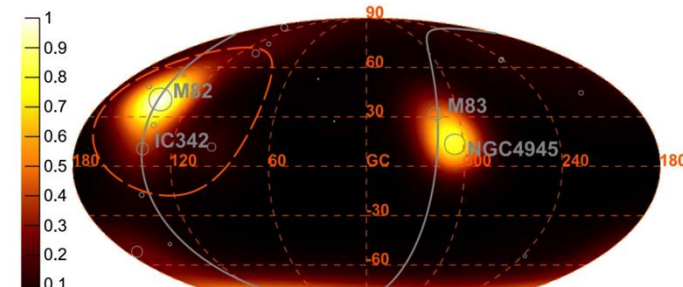
24 fluorescence telescopes stations (4 building)



Pampa Amarilla (Malargüe, province of Mendoza)



I RC di Ultra Alta Energia, essendo poco deviati dal campo magnetico galattico ed extra-galattico, “puntano” direttamente alle sorgenti che li hanno generati.



Possibile correlazione con la posizione di galassie di tipo «starburst», ad alta nascita stellare

Astronomia con particelle cariche

inoltre, Auger può osservare anche γ e neutrini di alta energia

→ **Astronomia multi-messenger**

Visita ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso

- Unico laboratorio al mondo creato per la Fisica Astroparticellare Underground
- 180.000 m³ in 3 sale sperimentali
- Copertura rocciosa: ~ 1400m
- Ospita 3 esperimenti in cui il dip. è impegnato (Borexino, DarkSide, SABRE) e molti altri.
- ven 5 e sab 6 Luglio
- iscrizioni entro lun 24 giugno:
 - <https://forms.gle/FLxewDCbvzeWm67q7>



info: davide.dangelo@unimi.it
lorenzo.caccianiga@mi.infn.it



IL PERCORSO DIDATTICO

Fisica delle Particelle e delle Astroparticelle

- Corsi suggeriti primo anno

PRIMO SEMESTRE	Amb.	C F U	SECONDO SEMESTRE	Amb.	C F U
Elettrodinamica Classica	1	6	Fenomenologia del Modello Standard delle Particelle Elementari	5	6
Interazioni Elettrodeboli	3	6	Laboratorio di Strumentazione per Rivelatori di Particelle	5	6
Fisica delle Particelle	3	6	Rivelatori di Particelle	3	6
Corso in ambito 2) o 4)	2/4	6	Corso in ambito 2) o 4)	2/4	6
Abilità informatiche		3	Corso a scelta		6
Inglese		3			
TOTALE CFU		30	TOTALE CFU		30

Fisica delle Particelle e delle Astroparticelle

- Corsi suggeriti secondo anno

PRIMO SEMESTRE	Amb.	C F U	SECONDO SEMESTRE	Amb.	C F U
Laboratorio di Fisica delle Particelle	5	6	Tesi di Laurea		3 6
Fisica Astroparticellare	3	6	Tirocinio formativo		6
Corso libero		6			
TOTALE CFU		18	TOTALE CFU		4 2

- Caratterizzanti (ambiti 1,2,3,4) 42 CFU
- Affini e Integrativi (ambito 5) 18 CFU
- A scelta 12 CFU
- Totale $72+45+3 = 120$ CFU



Fisica delle Particelle e delle Astroparticelle

- Per soddisfare gli obblighi per gli ambiti disciplinari **2)** e **4)** lo studenti consulti le tabelle del Manifesto degli Studi
- Segnaliamo come particolarmente interessanti i seguenti corsi:
 - **Primo semestre:**
 - Teoria delle Interazioni Fondamentali 1 **(2)**
Corso avanzato del secondo anno della Laurea Magistrale
 - Metodi Matematici della Fisica: Geometria e Gruppi 1 **(2)**
 - Relatività Generale **(2)**
 - Astronomia 1 **(4)**
 - Astrofisica Nucleare e Relativistica 1 **(4)**
 - **Secondo semestre**
 - Fisica Teorica 1 **(2)**
 - Cosmologia **(4)**
 - Astrofisica Teorica **(4)**
- Per soddisfare eventuali obblighi per l'ambito Affine e Integrativo **5)** o per corsi a scelta segnaliamo infine i seguenti corsi:
 - **Primo semestre:** Elettronica 1 **(5)**, Elettronica dei Sistemi Digitali **(5)**
 - **Secondo semestre:** Metodologie di Analisi Dati **(3)**, Fisica degli Acceleratori 1 **(3)**, Elettronica Nucleare **(3)**



Tesi di laurea

- **Differenti tipi di tesi disponibili nei vari gruppi di ricerca.**
 - Rivelatori di particelle
 - Sviluppo o costruzione di nuovi rivelatori
 - Comprensione dei rivelatori (calibrazioni, test beam...)
 - Computazionali e tecnologiche
 - Applicazioni di tecnologie ed algoritmi di calcolo avanzati (Machine Learning)
 - Sviluppo di elettronica e meccanica di alta precisione
 - Analisi dati
 - Misure con i dati raccolti dagli esperimenti
 - Sviluppo di nuovi metodi di analisi
- **Offrono opportunità**
 - di inserimento in gruppi di ricerca internazionali
 - di soggiorni nei principali laboratori di ricerca europei e mondiali



PARTICELLE E ASTROPARTICELLE A MILANO

Esperimento ATLAS: attività a Milano

- **Analisi dati:**

- Proprietà del bosone di Higgs e processi del Modello Standard
- Ricerca di particelle supersimmetriche ed esotiche (gravitone, mini-blackholes, candidati di materia oscura)

- **Rivelatori di particelle:**

- Sviluppo di rivelatori a silicio di nuova concezione: pixel ibridi, CMOS monolitici, rivelatori di timing
- Ricostruzione di tracce a livello di trigger con algoritmi fortemente paralleli

- **Computing:**

- Ottimizzazione di algoritmi di ricostruzione e calibrazione con tecniche di calcolo avanzate (Machine Learning)
- Nuove tecnologie per il processamento di grandi quantità di dati

- **Per tesi in ATLAS contattare:**

G. Alimonti, A. Andreazza, L. Carminati, M. Citterio, S. D'Auria, M. Fanti, T. Lari, V. Liberali, F. Ragusa, S. Resconi, F. Tartarelli, R. Turra



Esperimento LHCb: attività a Milano

- **Analisi dati:**

- Studio di violazione di CP nei barioni con beauty
- Studio di decadimenti rari
- Spettroscopia, pentaquark e ricerca di nuove particelle

- **Upgrade del rivelatore:**

- Nuovi rivelatori a silicio per la tracciatura di particelle cariche
- Sviluppo e test di prototipi in laboratorio a Milano e al CERN per l'Upstream Tracker (UT)
- Sviluppo di dispositivi innovativi di trigger basati sulla ricostruzione in tempo reale di tracce (Timespot)
- SELDOM : targhetta fissa per lo studio di momento di dipolo nei barioni pesanti

- **Per tesi in LHCb contattare:**

M. Citterio, P. Gandini, V. Liberali, N. Neri,



Astroparticelle: attività a Milano

- **Analisi dati:**
 - Studio dei neutrini solari e terrestri
 - Studio dei candidati di Materia Oscura
 - Studio dei Raggi Cosmici di Ultra Alta Energia
- **Rivelatori di particelle:**
 - Rivelatori di muoni con scintillatori plastici
 - Scintillatori liquidi, PMTs e SiPM
 - Sviluppo di Rivelatori NaI(Tl) ad altissima purezza
- **Computing:**
 - Sviluppo algoritmi di ricostruzione e discriminazione
 - Simulazioni Monte Carlo
- **Per tesi in Fisica Astroparticellare contattare:**
B. Caccianiga, L. Caccianiga, D. D'Angelo, M. Giammarchi, P. Lombardi, L. Miramonti, G. Ranucci, A. Re.



Il Gruppo di Particelle e Astroparticelle

<http://www.fisica.unimi.it/ecm/home/ricerca/gruppi-di-ricerca/fisica-delle-particelle-e-astroparticelle>

Il Gruppo di Particelle e Astroparticelle raccoglie i membri del **Dipartimento di Fisica** e della sezione di Milano dell'**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare** che si occupano dello studio delle interazioni fondamentali tra i costituenti elementari della materia, in esperimenti sia ad acceleratori sia con radiazione cosmica di natura particellare e sorgenti e fasci di neutrini.

• Fisica agli acceleratori

- ATLAS (CERN)
 - Modello standard
 - Bosone di Higgs
 - Supersimmetria
- LHCb (CERN)
 - Fisica dei sapori pesanti
 - Violazione di CP e decadimenti rari

• Ricerca di materia oscura

- Dark side (Gran Sasso)
 - Interazioni di WIMP in Ar liquido
- SABRE (Gran Sasso e Australia)
 - NaI ultra puro

• Fisica del neutrino

- BOREXINO/SOX (Gran Sasso)
- JUNO (Cina)
 - Proprietà dei neutrini
 - Neutrini solari
 - Geoneutrini

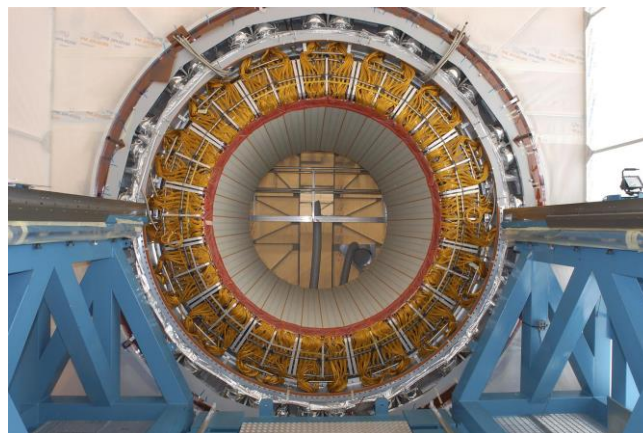
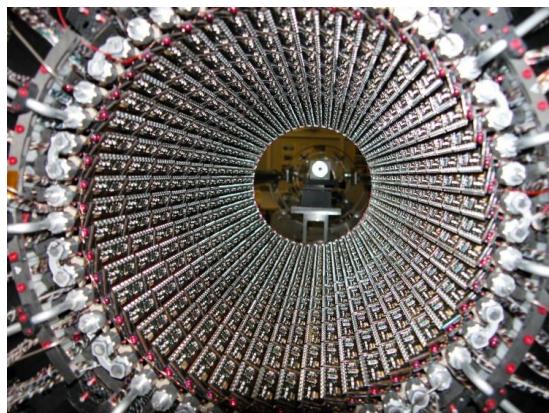
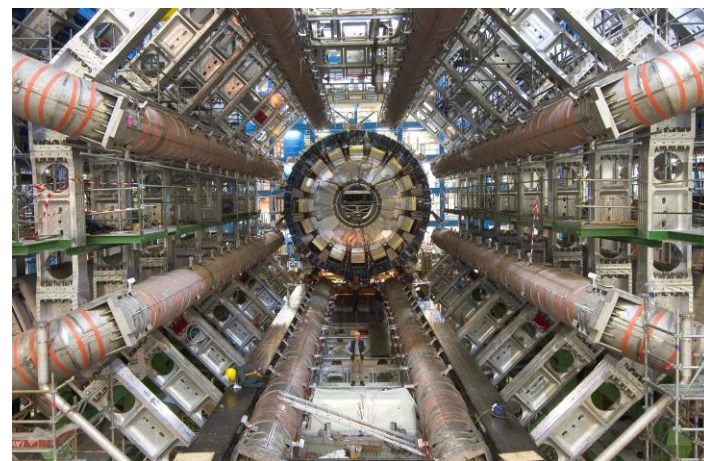
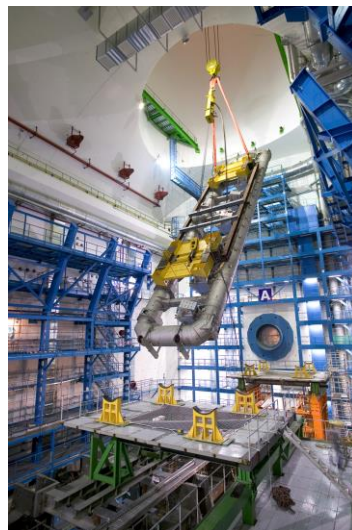
• Raggi cosmici

- AUGER (Argentina)
 - Raggi cosmici di altissima energia

BACKUP



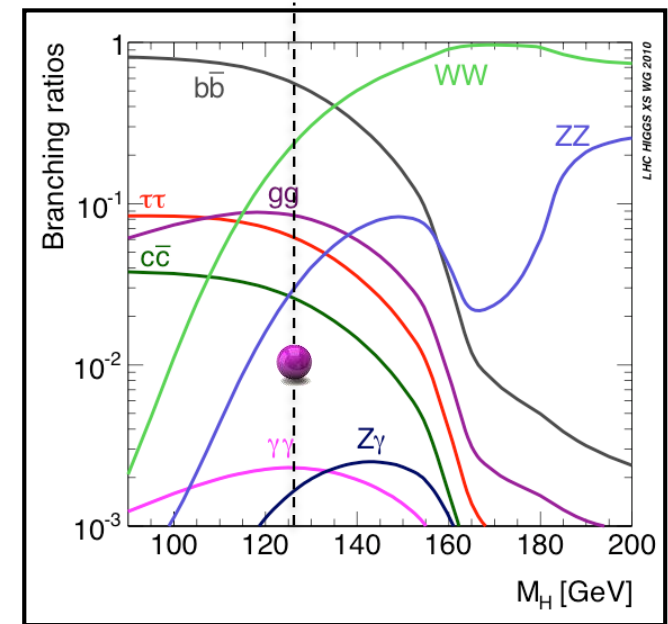
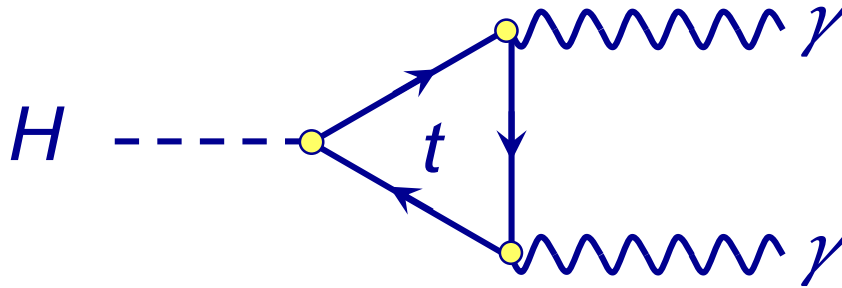
Il rivelatore ATLAS



Il decadimento $H \rightarrow \gamma\gamma$

- Nonostante abbia un tasso di decadimento molto piccolo si tratta del decadimento più importante per la scoperta
- Sorge spontanea una domanda:

- Come può il Bosone di Higgs decadere in due fotoni dal momento che questi ultimi hanno massa nulla?



- L'accoppiamento al quark t è molto elevato
 - Alta massa del quark t
- La coppia $t t$ è virtuale e questo diminuisce il tasso di decadimento

- È un decadimento relativamente abbondante:
- È importante perché è “facile” da osservare

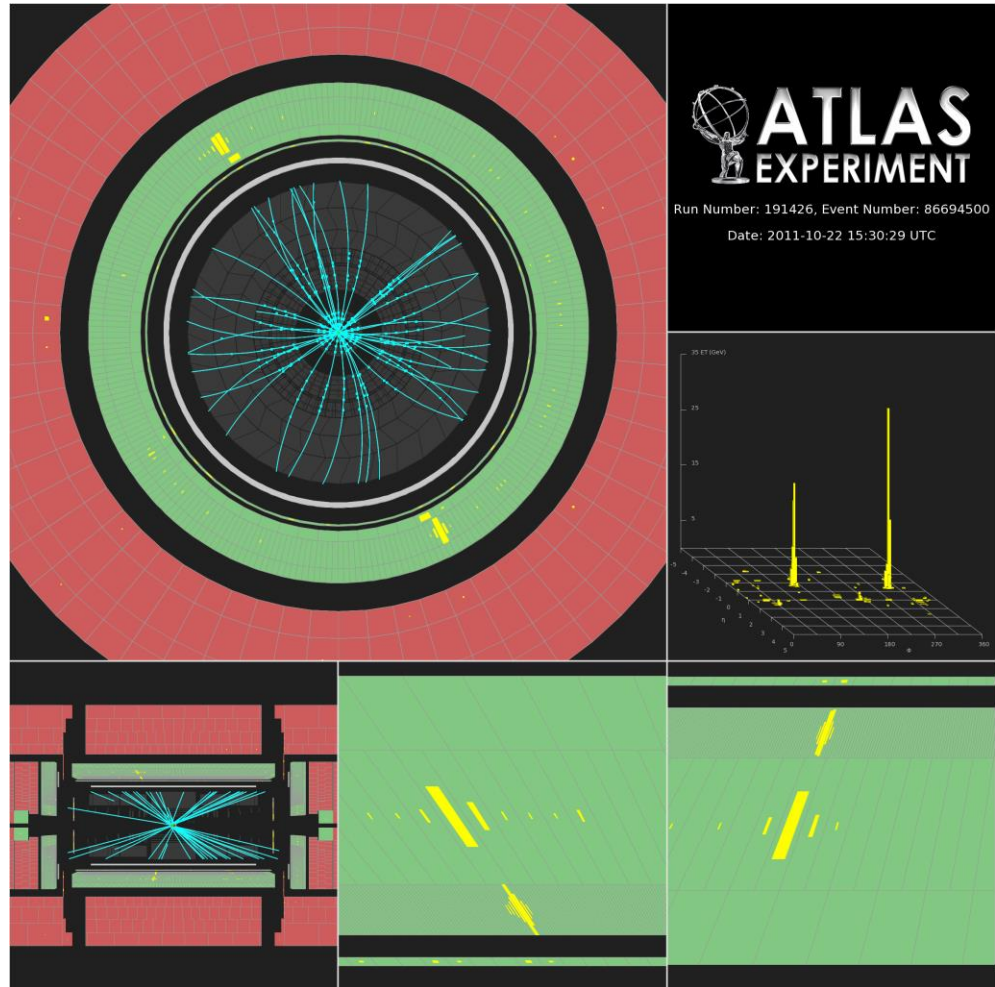
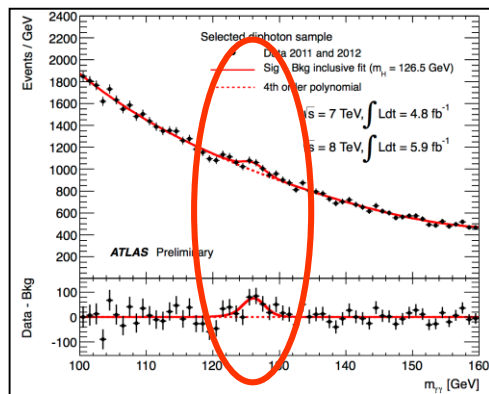
$$\sigma \times BR \approx 50 \text{ fb}$$

- Il decadimento in $b b$ è difficile da distinguere dal fondo adronico

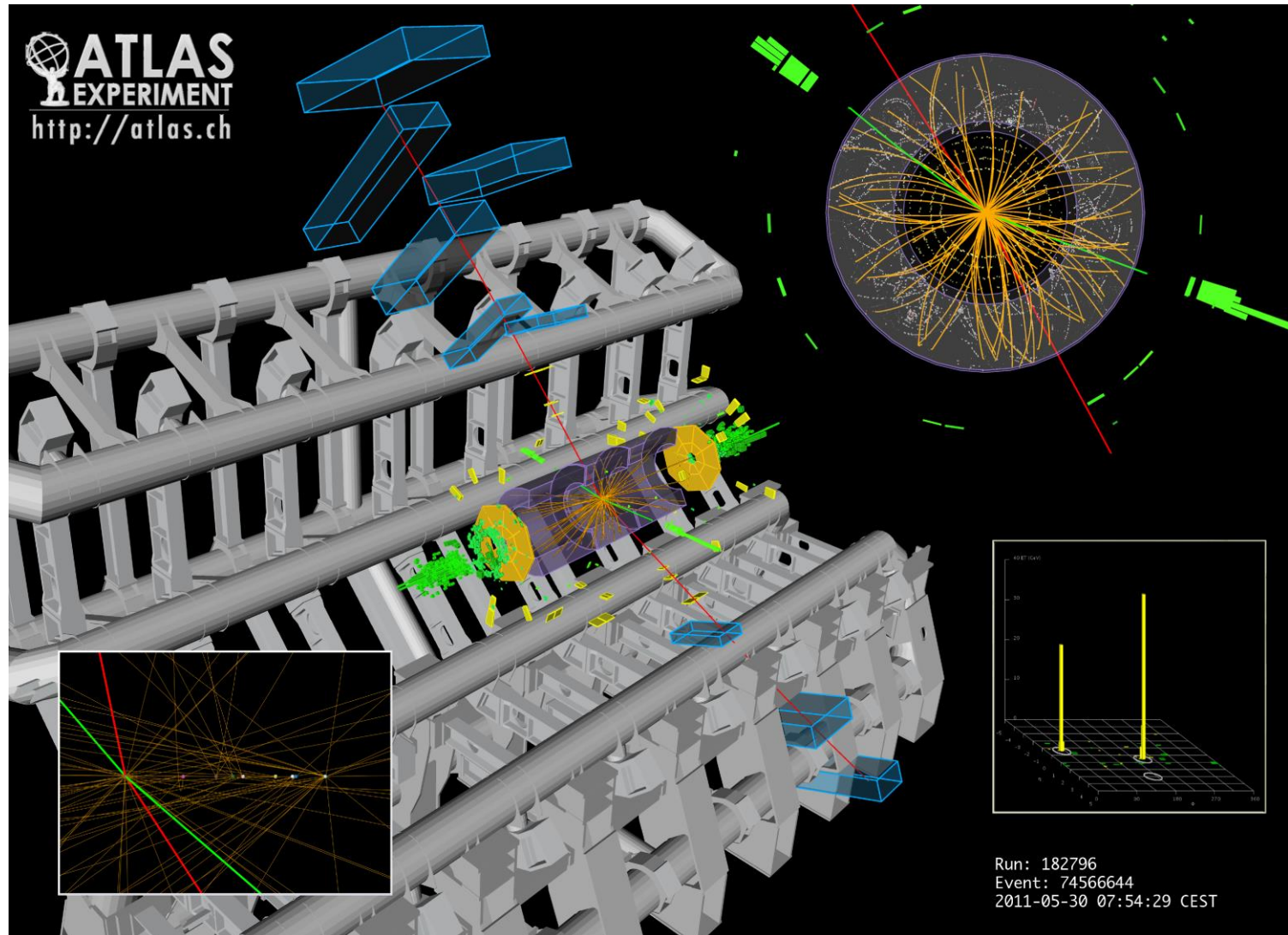
Il decadimento $H \rightarrow \gamma\gamma$

$$S_H \times BR(H \rightarrow gg) \approx 50 \text{ fb}$$

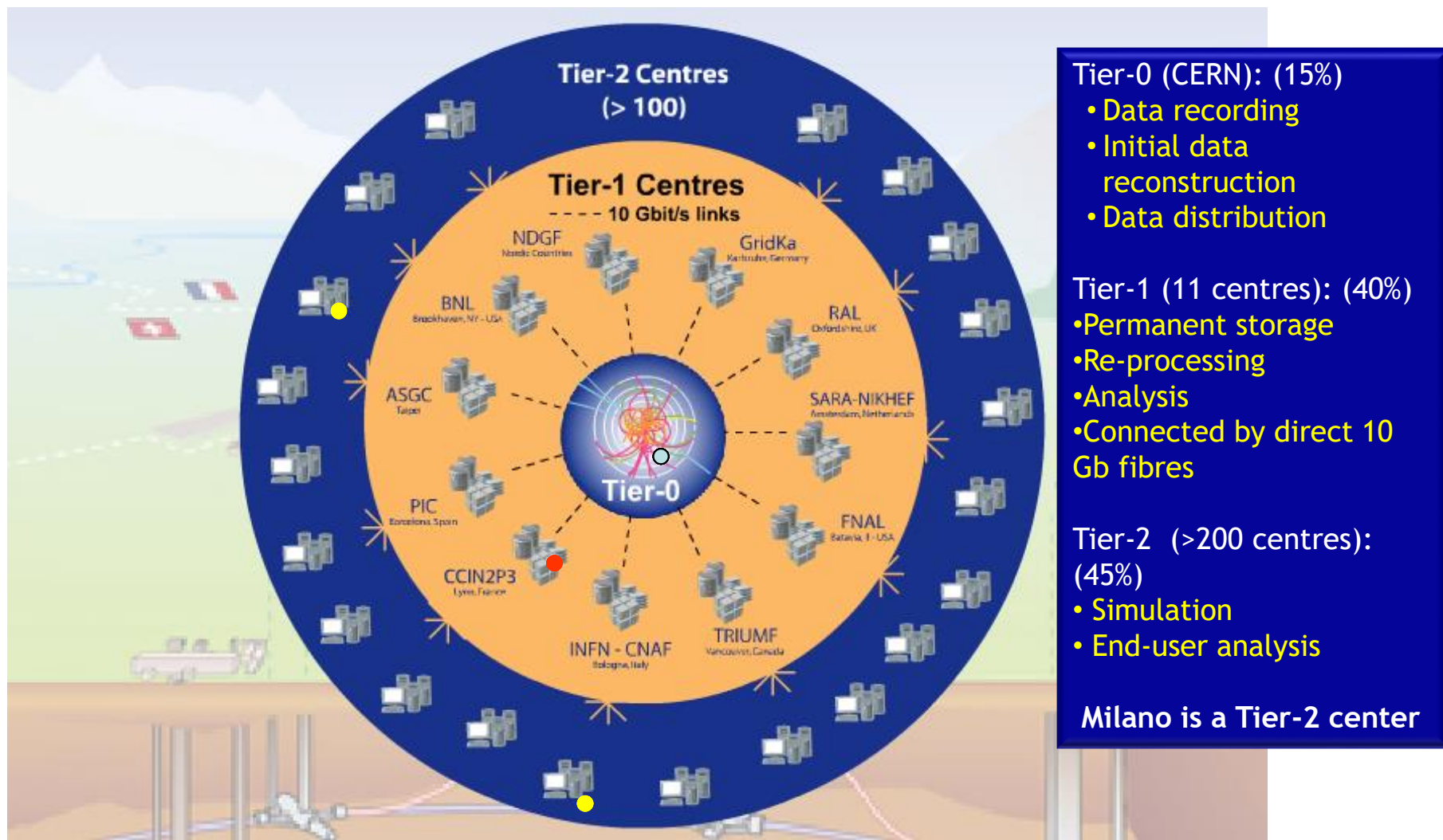
- “Facile” da selezionare
 - Due fotoni ad alto p_T
- Si può misurare la massa invariante del Bosone H
 - $m_{\gamma\gamma}^2 = 2E_1E_2(1 - \cos\theta)$
 - Gli eventi si raggruppano in un picco ($S/B \sim 0.03$)
 - “Semplice” contarli



Il decadimento $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2\mu 2e$

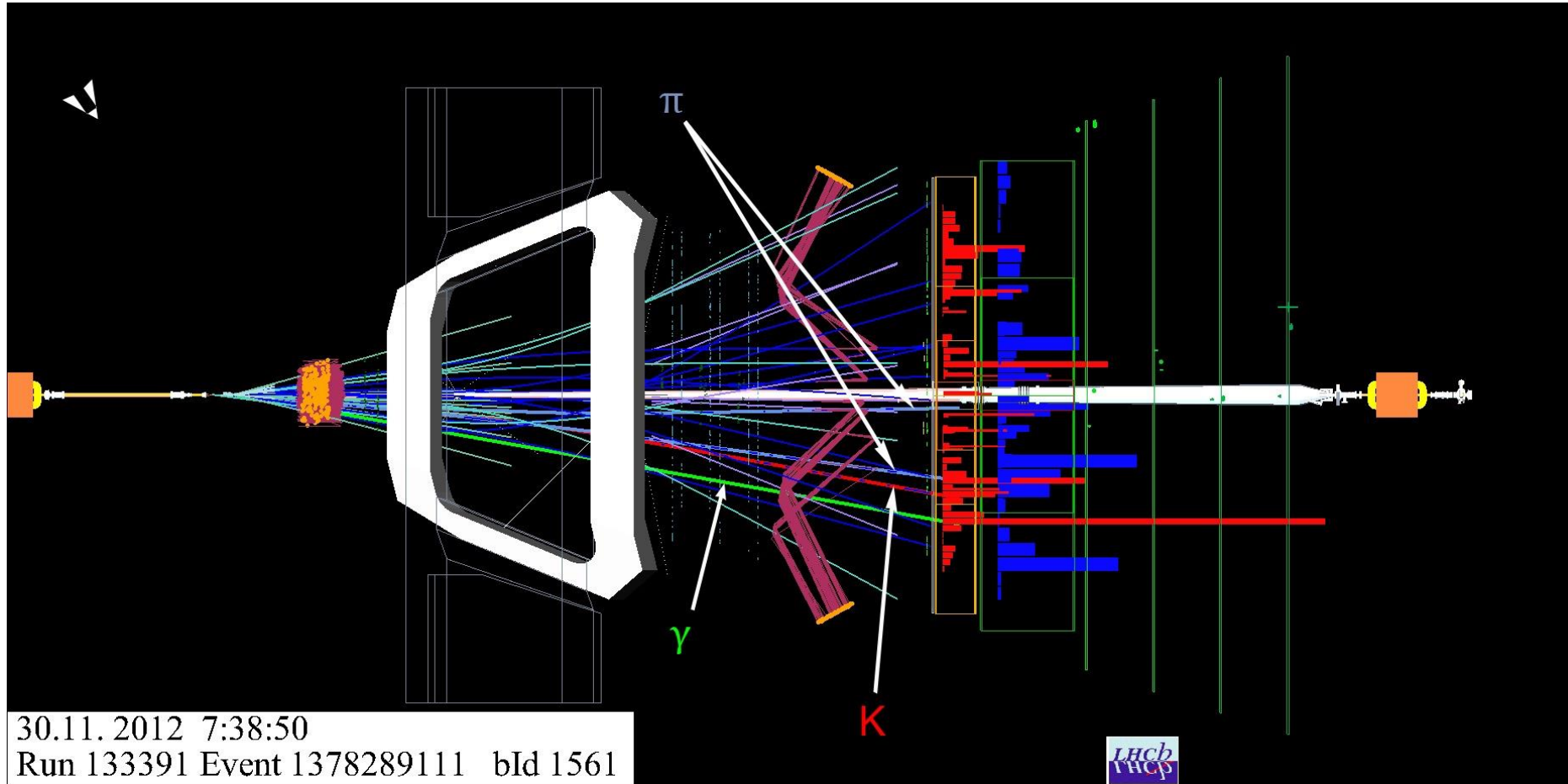


ATLAS: L'analisi dei dati



Esperimento LHCb: segnale di mesoni B

Un evento di segnale del decadimento $B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \gamma$

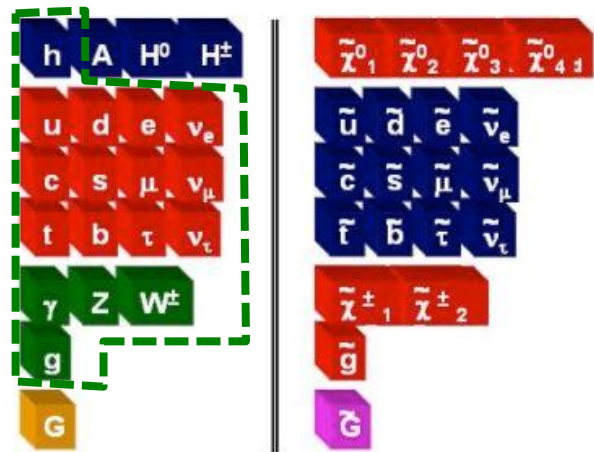


Il Modello Standard e oltre

Con la scoperta del bosone di Higgs è stato completato il **Modello Standard**

Questo però non può essere completo. In particolare:

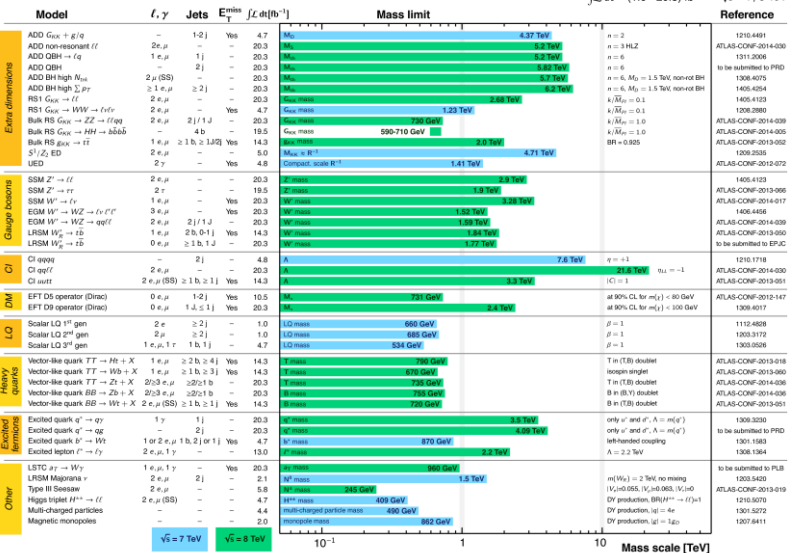
- non spiega completamente l'**asimmetria materia-antimateria**
- la **materia oscura** non può essere spiegata con particelle del Modello Standard



A LHC si cerca di produrre nuove particelle che potrebbero estendere il Modello Standard

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Exclusion
Status: ICHEP 2014

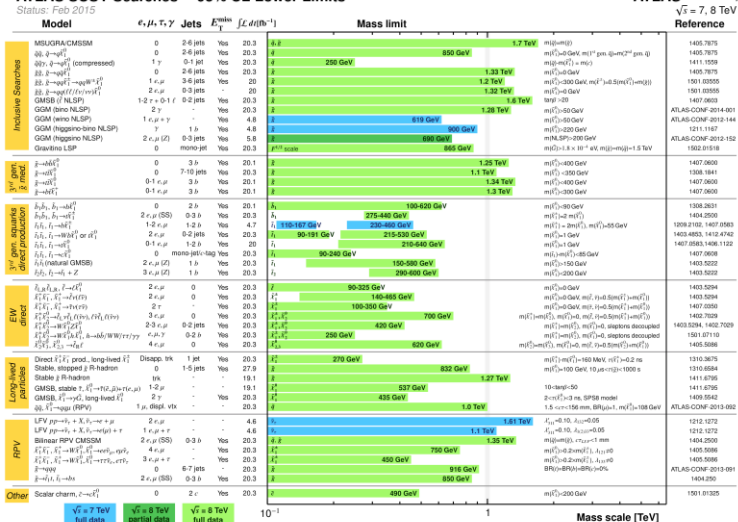
ATLAS Preliminary



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

ATLAS Preliminary

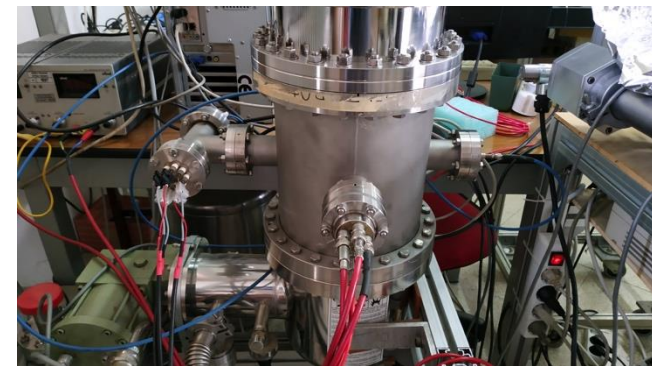
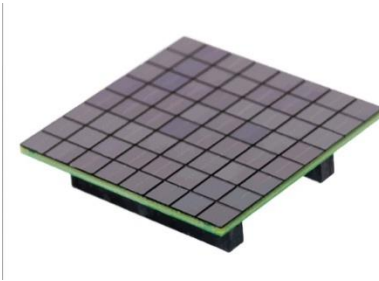


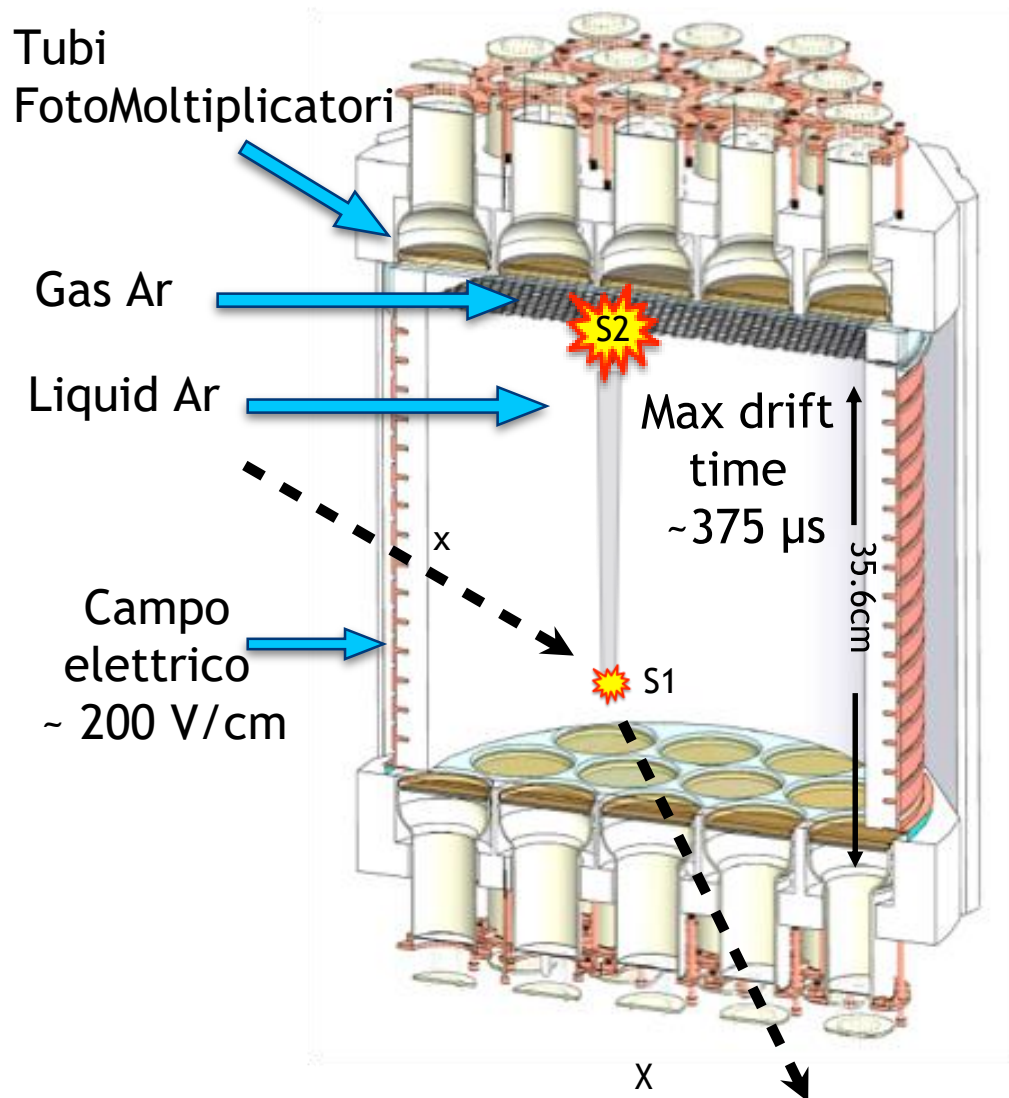
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed m_{T1} theoretical signal cross section uncertainty.



Sviluppo SiPM criogenici

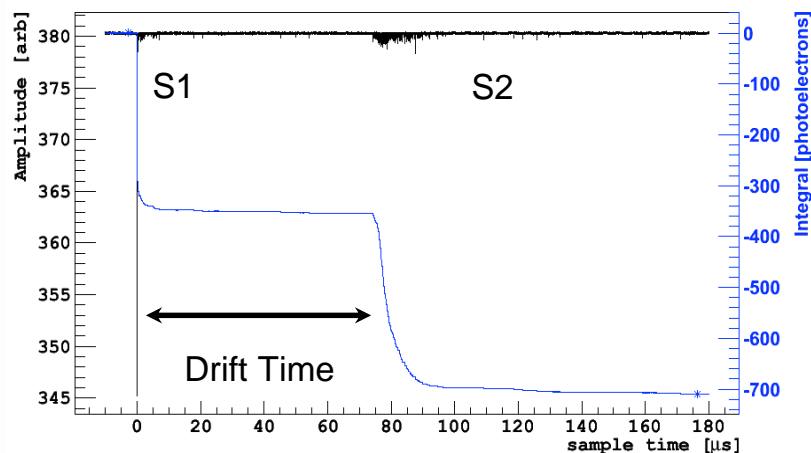
- La tecnologia SiPM ha fatto enormi progressi
- Migliore alternativa ai PMTs per applicazioni criogeniche (e.g. T ~ LAr)
- Sviluppo di crio-elettronica per lettura su larghe superfici
- Applicazioni sia in Fisica del Neutrino che della Materia Oscura
 - DUNE (long baseline): trappole di luce
 - DarkSide-20k
 - upgrade di SABRE (applicato ai cristalli di NaI(Tl))





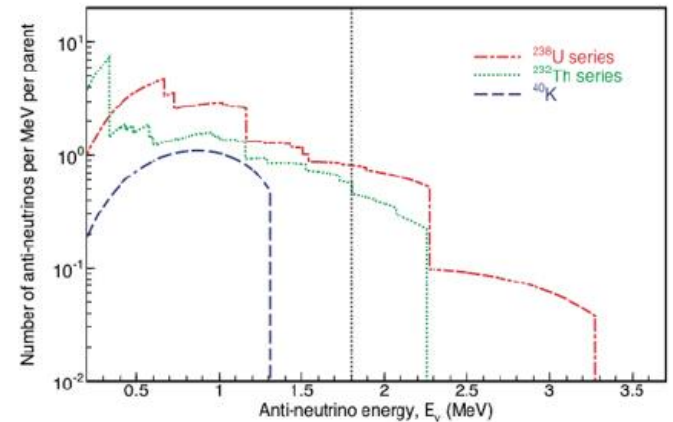
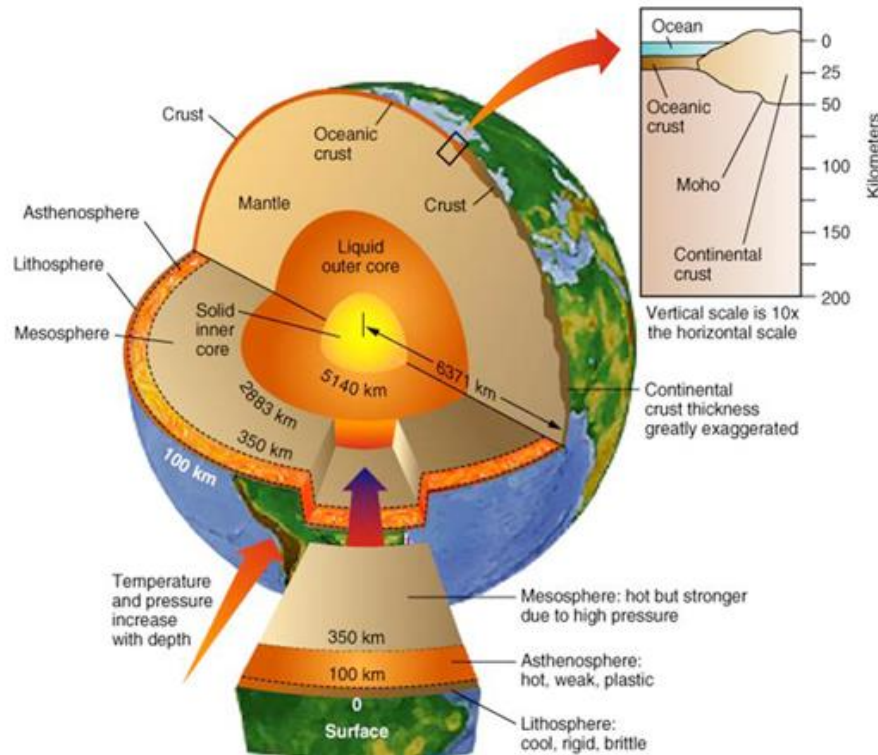
Camera a Proiezione Temporale Bifasica

Zero background grazie alla discriminazione segnale prompt/delayed (S1/S2)



GeoNeutrini: (Borexino, JUNO)

Rivelazione degli anti-neutrini emessi dai radionuclidi presenti nella crosta terrestre e nel mantello per lo **studio del calore radiogenico emesso dalla Terra**.



Una collisione a LHC

<https://www.youtube.com/watch?v=HCFqVpLz8j8>

