

# LA FISICA DELLE ASTROPARTICELLE NELL'INFN

IFAE 2015

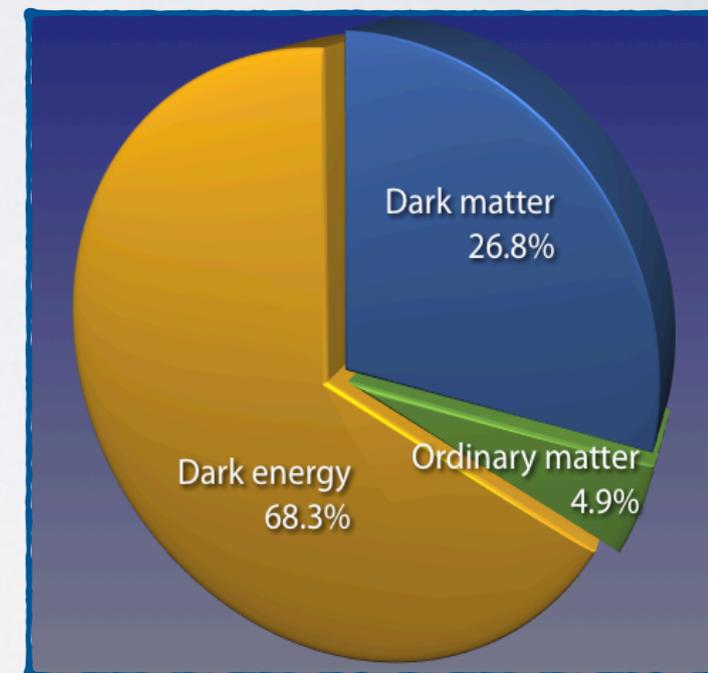
Roma Tor Vergata, 8 Aprile 2015

Marco Pallavicini

Università di Genova and INFN

- La fisica delle astroparticelle
  - Due modelli standard
  - L'attività dell'INFN
    - L'Universo oscuro
    - Radiazioni cosmiche
    - Natura, massa e oscillazioni dei neutrini
    - Gravitazione e onde gravitazionali
- Che cosa facciamo oggi per affrontare questi temi
  - Highlights sulle attività della CSN2 e sui risultati più recenti
- Che cosa stiamo preparando
  - Idee per il prossimo futuro, incluso “What Next”

- La fisica delle astroparticelle è al punto d'incontro di due “**Modelli Standard**”
  - Il **Modello Standard (MS)** vero e proprio, basato su  $SU_c(3) \otimes SU_L(2) \otimes U_Y(1) + RG$
  - Il **modello cosmologico  $\Lambda$ CDM**, basato sulla RG e sui paradigmi di Materia Oscura (DM), Inflazione e Energia Oscura (DE)
- Le due teorie, prese separatamente, sono di straordinario successo, MA:
  - **Neutrini**: la natura, la massa, e la fase (o fasi) di CPV sono ancora ignoti.
  - **Materia Oscura**: c'è, ma il MS non offre candidati solidi
  - Il MS non spiega l'evidente **asimmetria materia-antimateria**
  - Il MS non offre un meccanismo per **l'inflazione**
  - Il valore apparente di  **$\Lambda$  (Energia Oscura)** è “innaturalmente” piccolo nel contesto della RG.
  - La rivelazione diretta delle **onde gravitazionali** è ancora a venire



- Molte (non tutte) sono connesse alla fisica delle astroparticelle

## Radiazioni dal Cosmo

Fotoni e Carichi nello Spazio  
 Fotoni, Carichi e Neutrini da Terra

## Neutrini

Solari, SN, Astrofisici,  
 $0\nu\beta\beta$  e Misure dirette di massa  
 Oscillazioni con acceleratori,  
 reattori e sorgenti artificiali

## L'Universo Oscuro

Ricerche dirette e indirette di DM  
 Studio di Energia Oscura  
 CMBR polarizzato e Cosmologia

## Gravitazione e Fondamenti

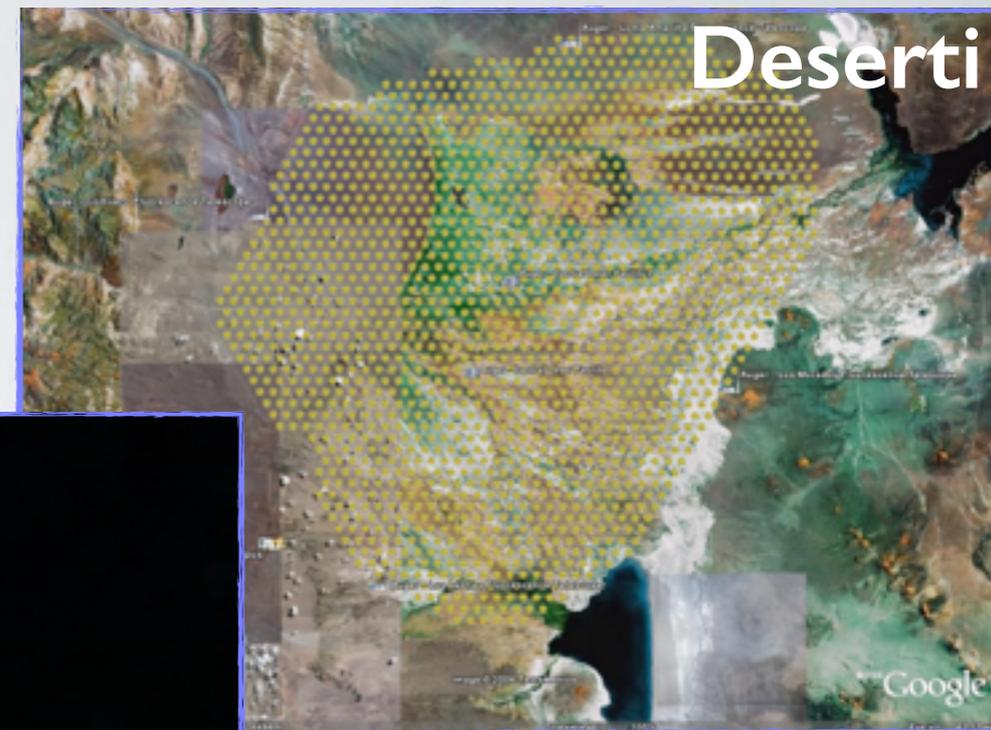
Rivelazione di O.G.  
 Test della Relatività Generale  
 Fondamenti di M.Q.

- **Internamente ai modelli, con uno sguardo oltre**
  - **Radiazione non termica di alta o altissima energia**
    - Cosmologia, astrofisica e fisica delle particelle
  - **Astrofisica Multi-messenger (fotoni, carichi, neutrini, O.G. in futuro?)**
    - Origine, propagazione, informazioni sulla sorgente
  - **Test di Relatività Generale**
    - Misure di precisione post-Newton, rivelazione diretta di Onde Gravitazionali
  
- **Oltre ai Modelli Standard**
  - **Ricerca diretta e indiretta di DM**
    - Natura del (o dei) candidato/i, interazioni
  - **Cosmologia *new!***
    - CMBR polarizzato e inflazione, Equazione di Stato della DE, Ricerca di Anti-Nuclei
  - **Proprietà standard e non-standard dei neutrini**
    - Dirac vs Majorana, Fasi di CP, PMNS, Neutrini Sterili, Momento Magnetico

## Sottoterra



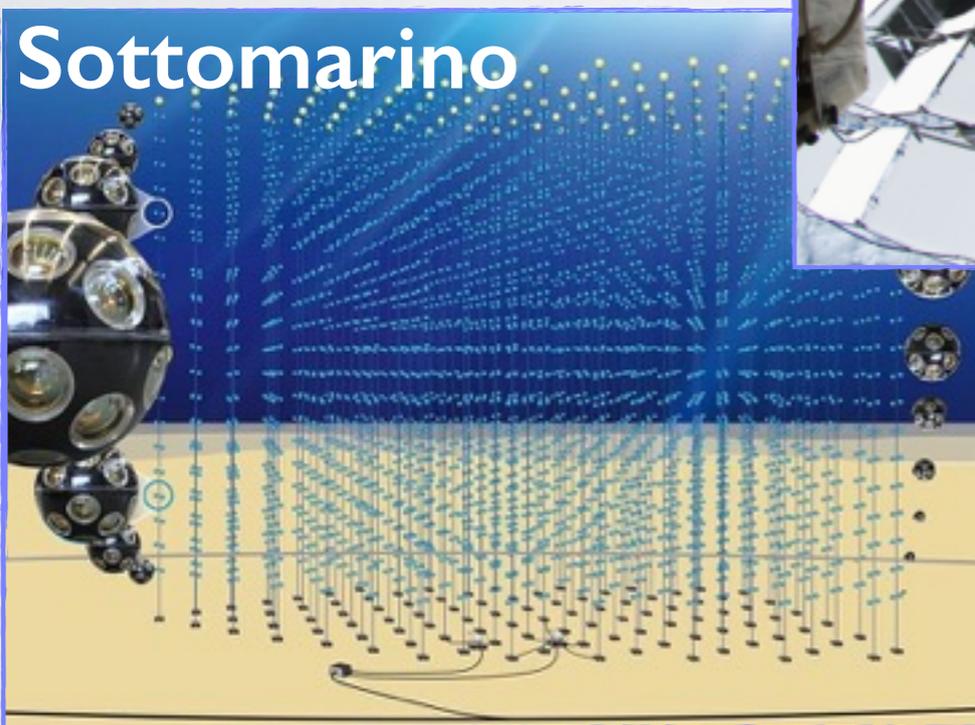
## Deserti



## Spazio



## Sottomarino



## Montagne



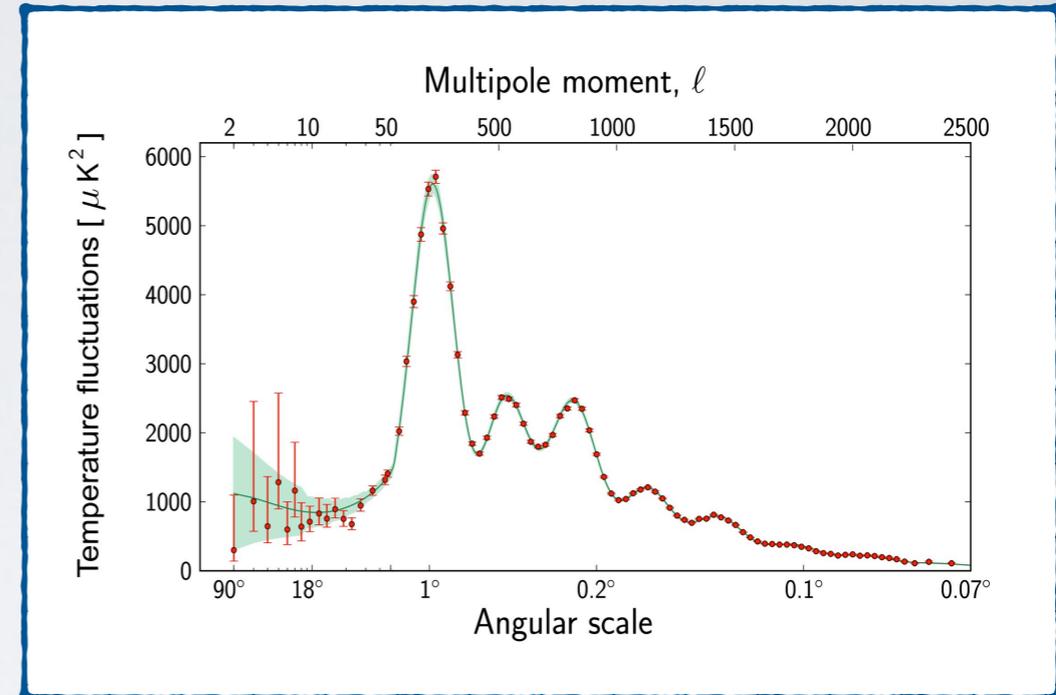
## L'Universo Oscuro

Ricerche dirette e indirette di DM  
 Studio di Energia Oscura  
 CMBR polarizzato e Cosmologia

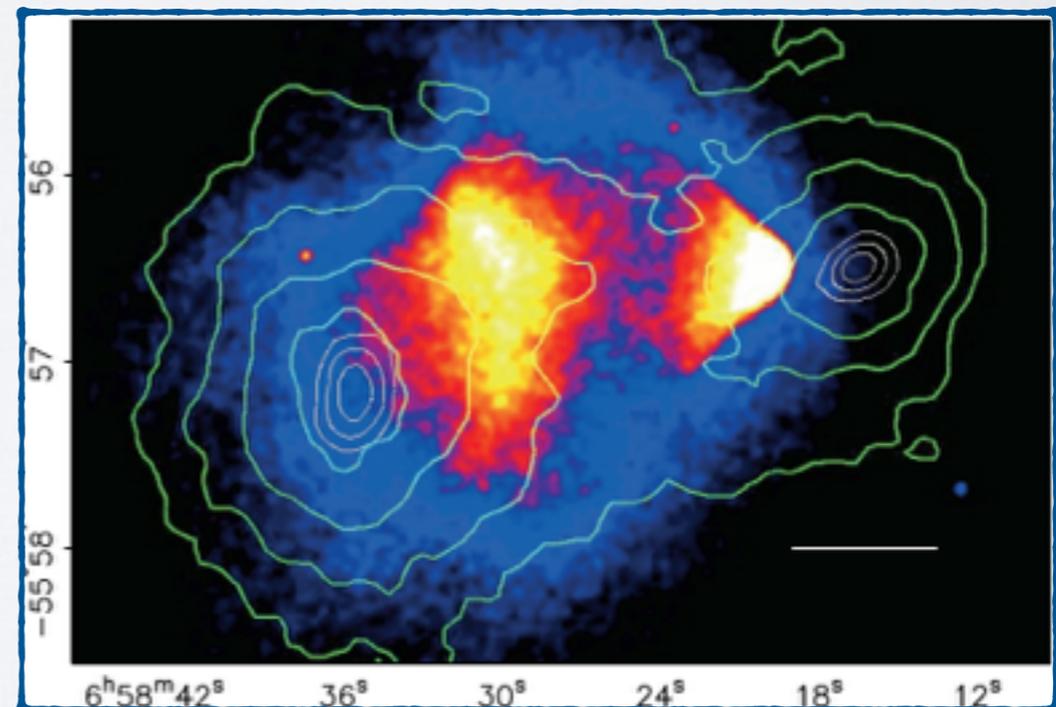
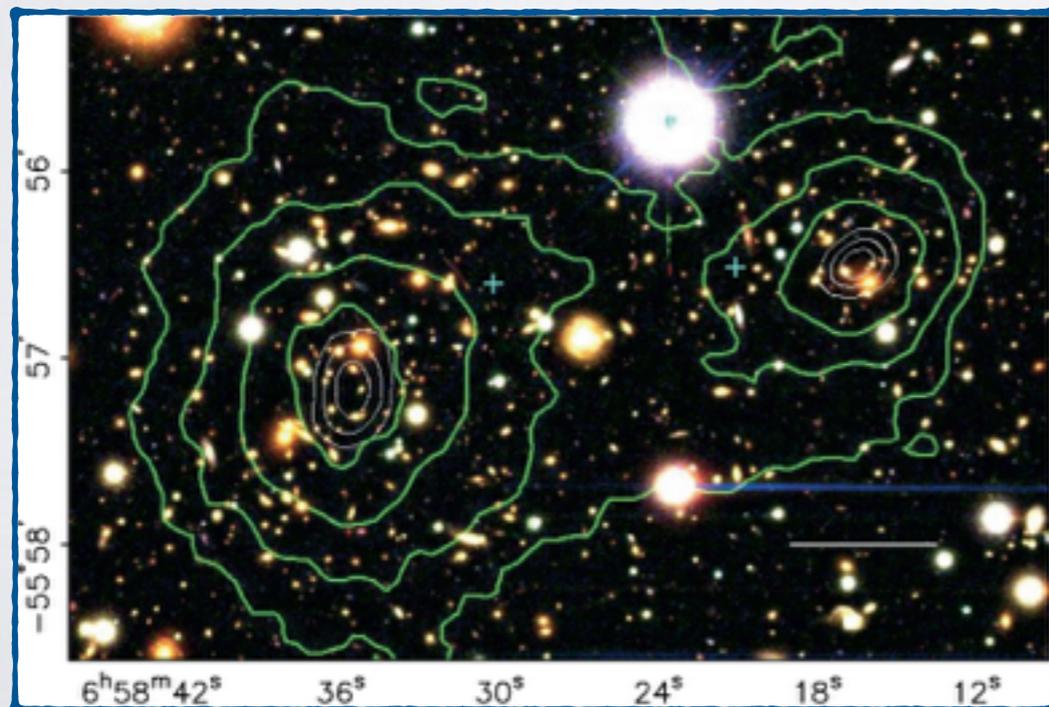
- Ricerca diretta di DM al Gran Sasso:
  - CRESST, DAMA-LIBRA, DARKSIDE-50, XENON-It
  
- Ricerca indiretta di DM nello spazio:
  - AMS-02, FERMI, PAMELA
  
- In futuro, Cosmologia:
  - LSPE, EUCLID

- La sua esistenza è ormai molto solida
- Velocità viriale nei clusters (Zwicky, 1933)
- Rotazione delle galassie (Rubin, 1980)
- Gravitational Lensing (clusters)
- CMBR + Formazione strutture
- $\Omega_b \sim 4\%$  dalla BB nucleosintesi

Planck



Bullet Cluster IE 0657 558 ( $z=0.296$ )

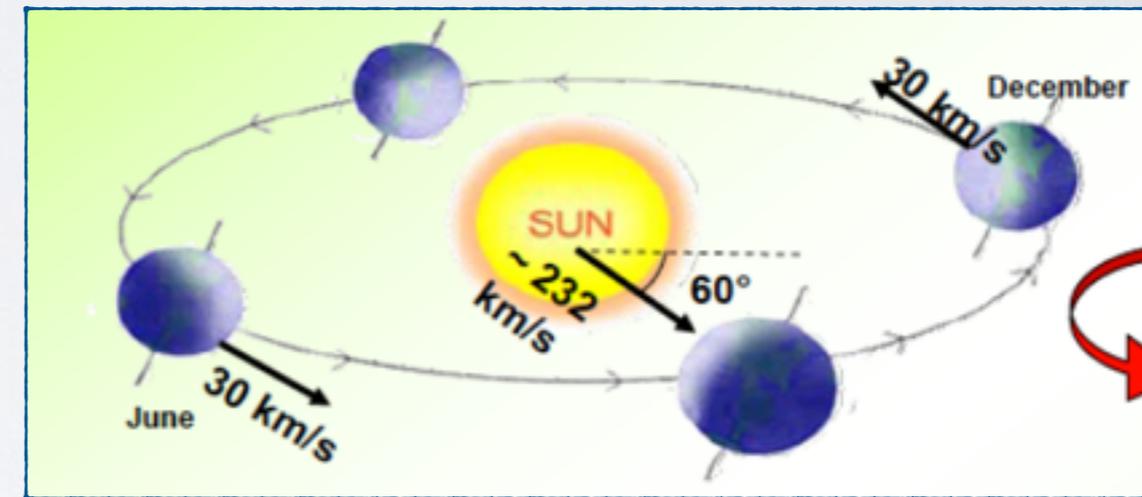
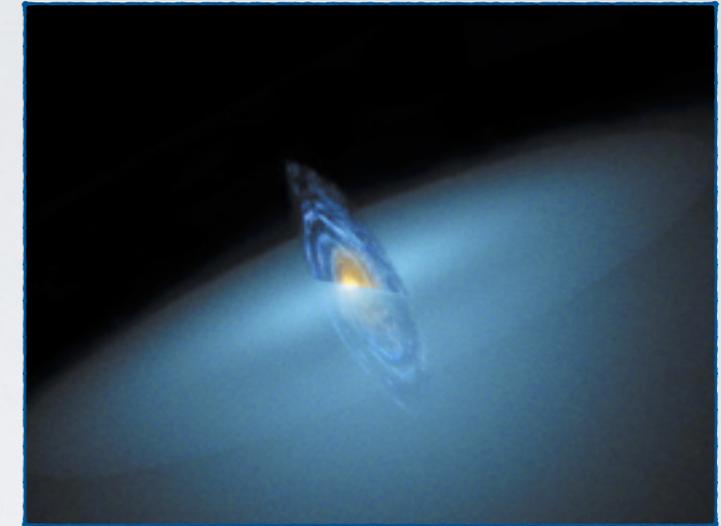
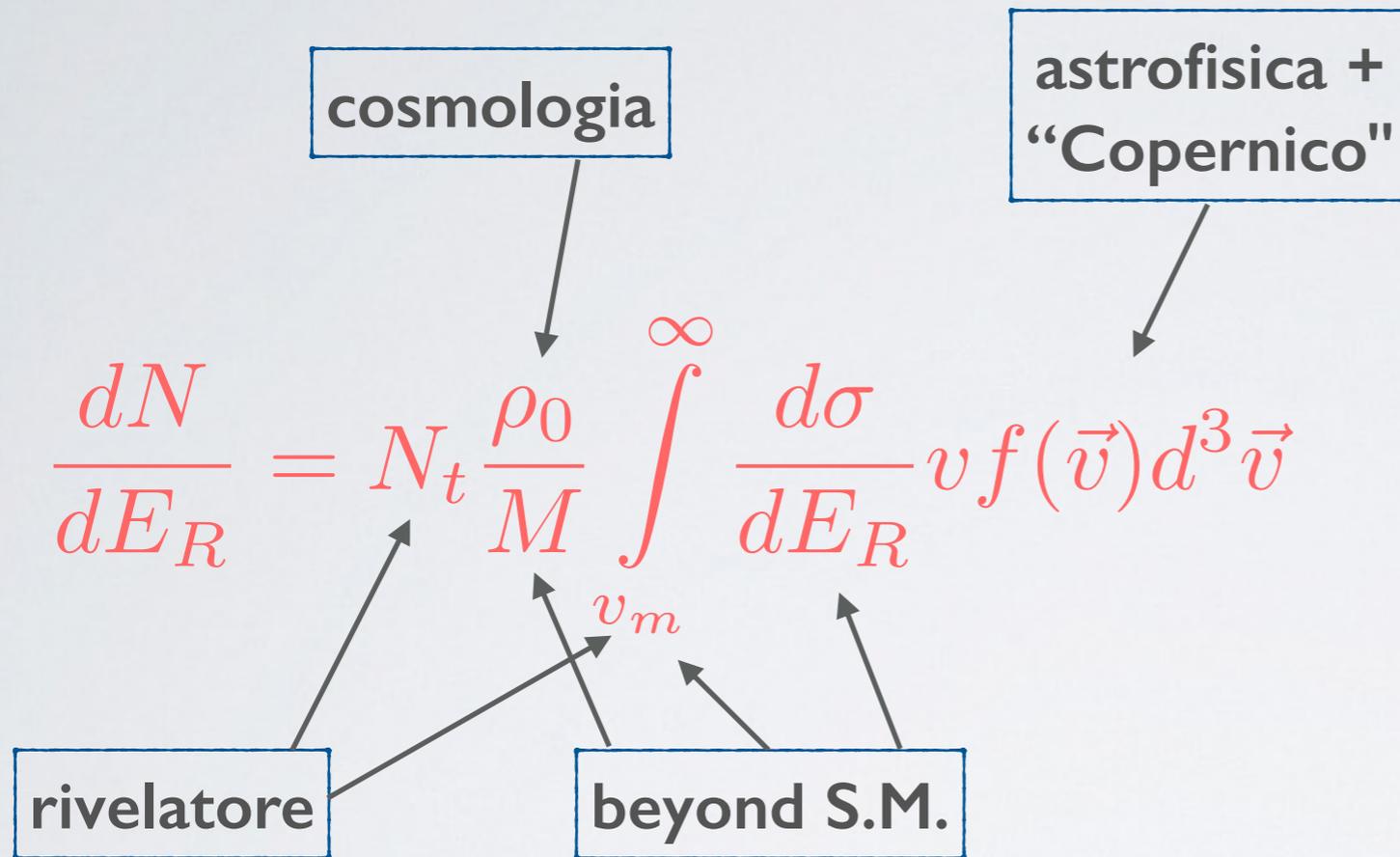


- Se la DM ha interazioni non gravitazionali, si può trovare in tre modi.
  - Assumendo un'interazione effettiva a 4 corpi, possiamo vedere l'ampiezza di scattering da tre angolazioni diverse (canali u, t, s):



- **DIRETTA:** si cerca in un rivelatore un segnale associato all'interazione della particella di DM con il mezzo (scintillazione, ionizzazione, bolometri)
- **INDIRETTA:** si cerca (nello spazio prevalentemente, ma anche da Terra per alcune tipologie di candidati) un segnale associabile a annichilazione (o decadimento)
- **PRODUZIONE:** si cerca di produrre il candidato agli acceleratori

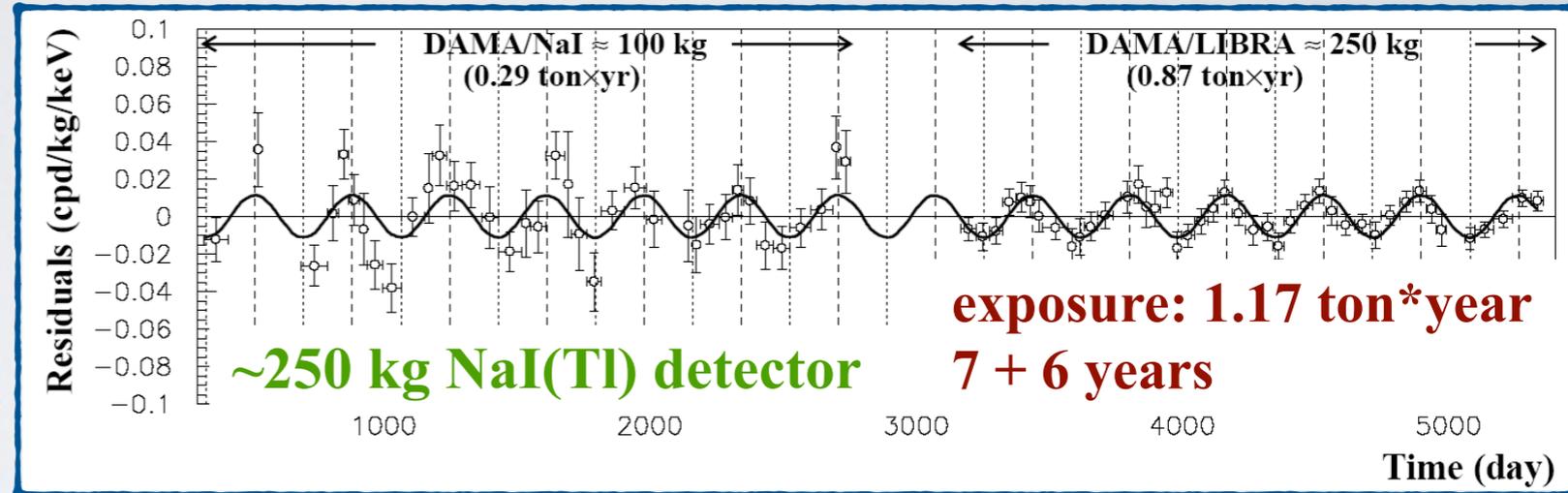
- I conteggi dipendono da molti fattori, alcuni ignoti, poco noti o model-dependent



- $N_t$ : num. di bersagli utili nel rivelatore
- $\rho_0$ : densità d'energia
- $\sigma$ : sezione d'urto del processo
- $M$ : massa del candidato
- $f(v)$ : distribuzione delle velocità ( $\sim$  Maxwelliana troncata) + velocità peculiare  $v_s + v_e$
- $E_R$ : energia depositata
- $v_m$ : velocità minima di soglia

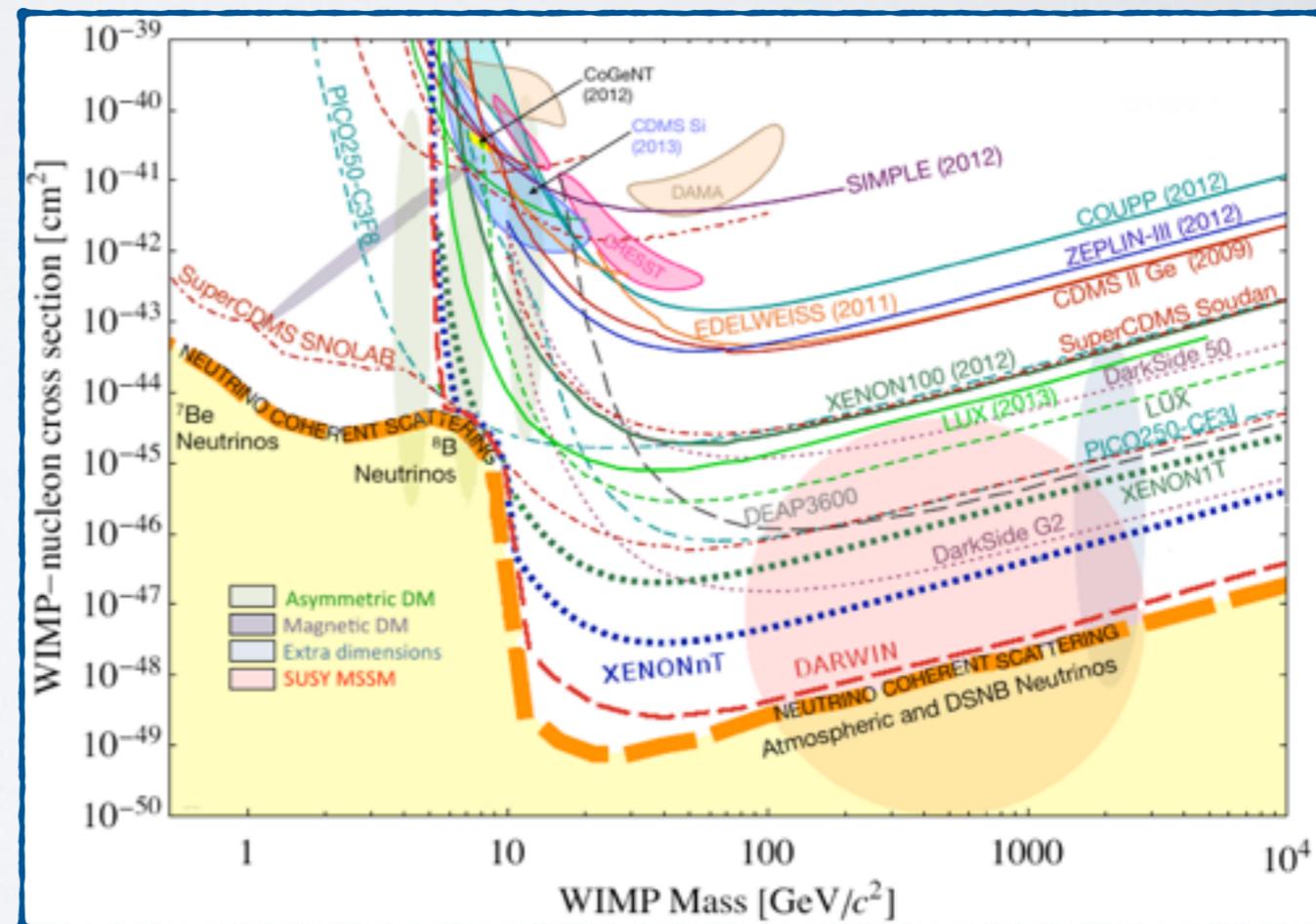
- **DAMA-LIBRA** osserva una modulazione annuale consistente con il segnale atteso da DM

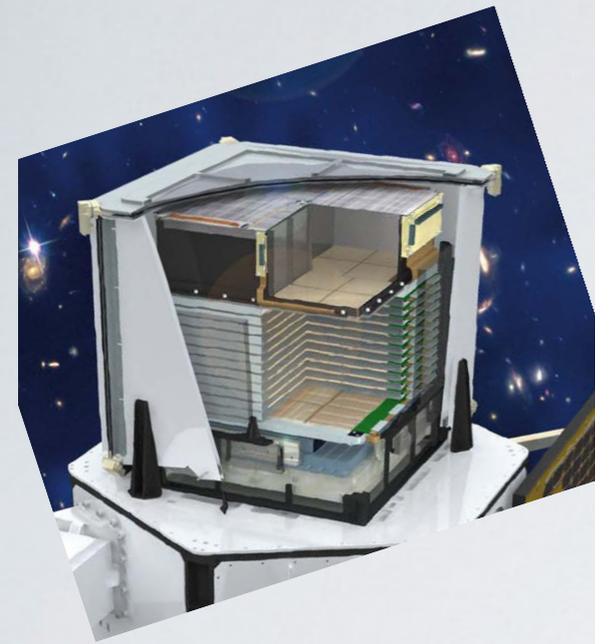
- Nessun taglio.
- Interazione ignota.
- Segnale indiscutibile



- Gli esperimenti che cercano WIMPS (rinculi nucleari) non vedono nulla

- Il presente INFN:
  - **Xenon-1t**: in costruzione
  - **DarkSide-50**: data taking
  - **CRESST**: data taking
- Il futuro:
  - Molte proposte sul tavolo per la nuova generazione, sia con grande massa sia con tecniche innovative





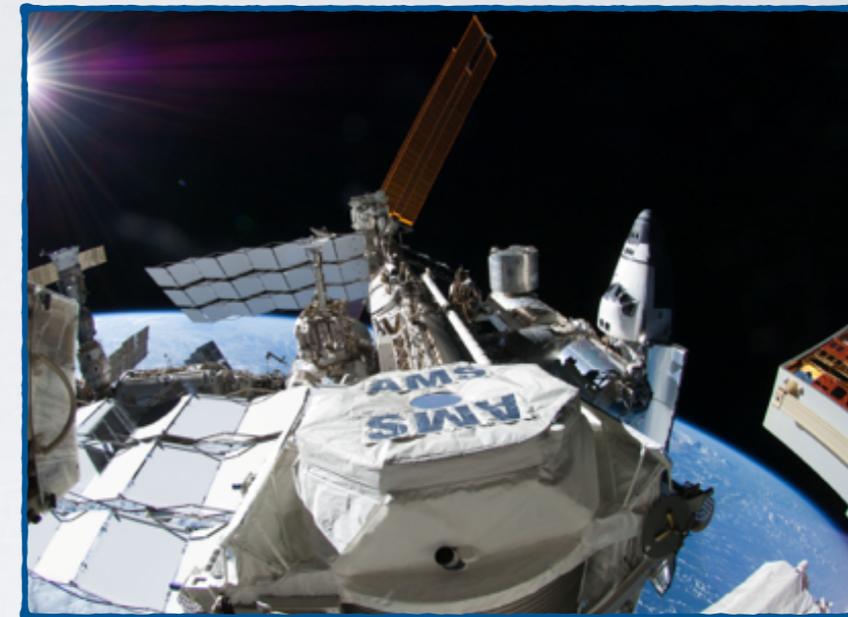
**AGILE, 23-4-2006**  
 X e  $\gamma$  soprattutto

**PAMELA, 15-6-2006**  
 $e^+$ ,  $e^-$ , nuclei,  
 anti-p, anti-He

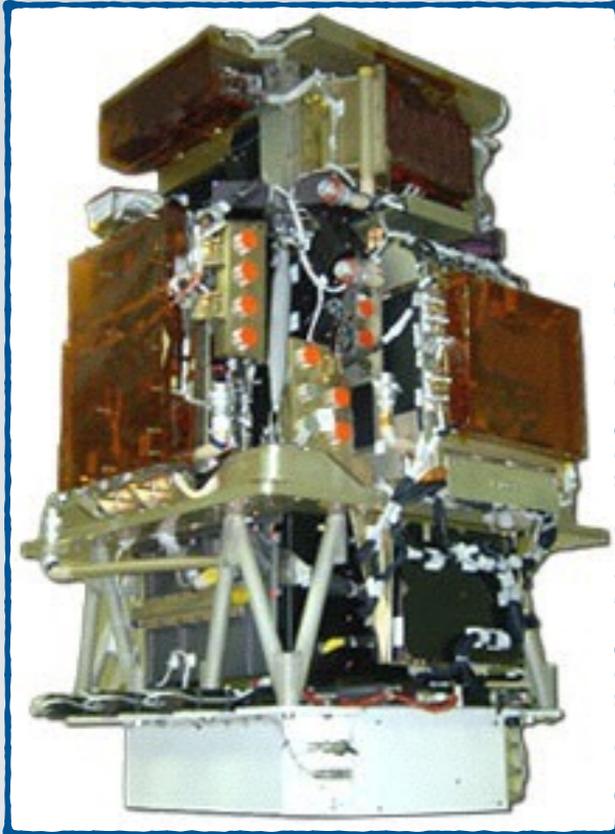


**FERMI, 11-6-2008**  
 Il nuovo cielo  $\gamma$ ,  
 ma anche elettroni

**AMS-02, 11-6-2011**  
 Il nuovo cielo  $\gamma$ ,  
 ma anche elettroni



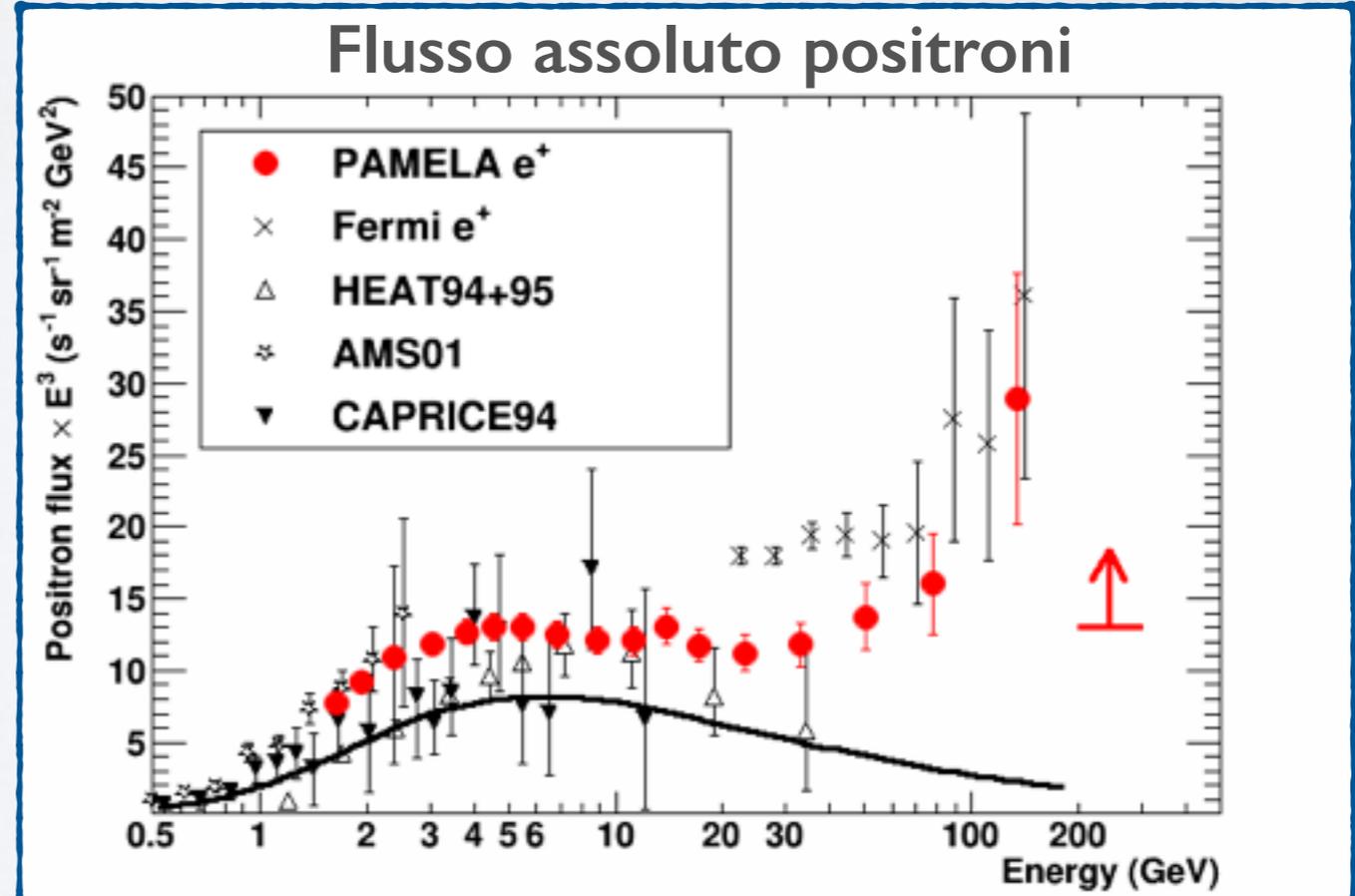
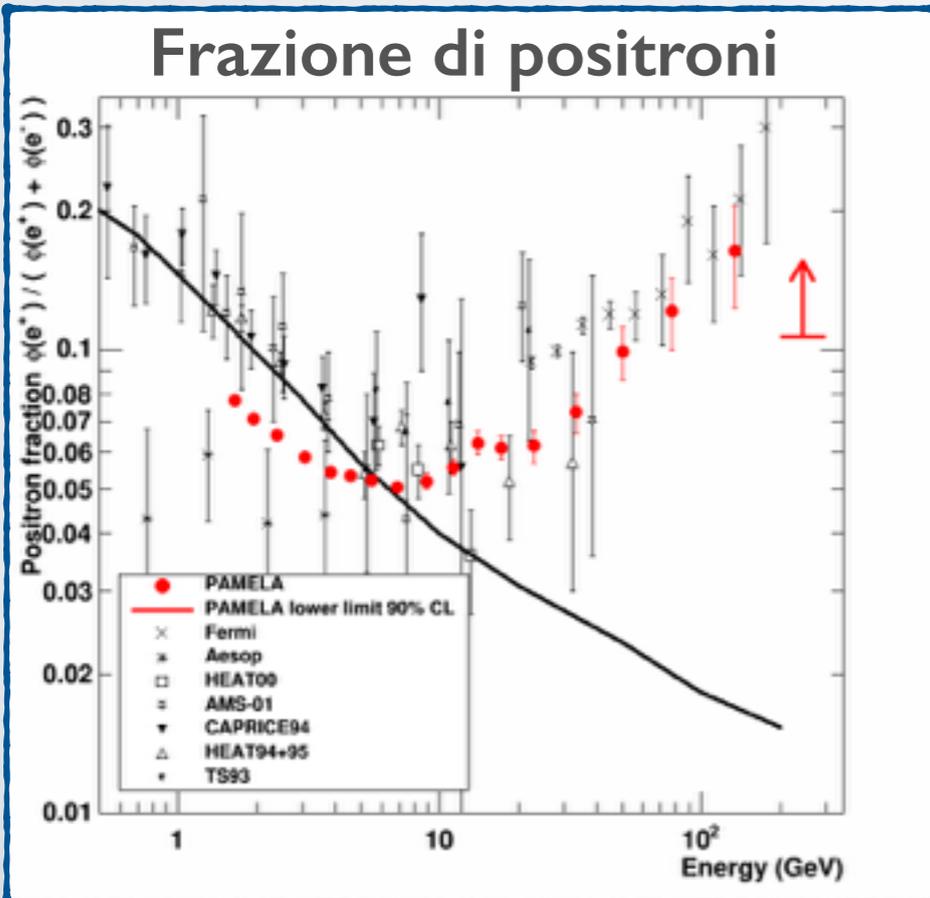
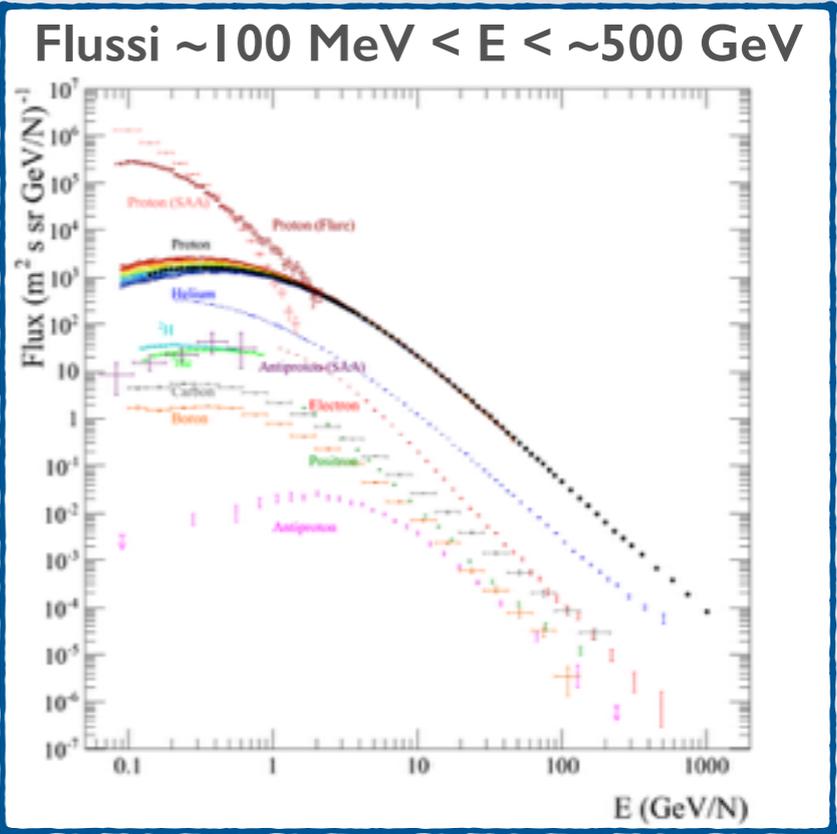
- In preparazione o R&D o sogni per il futuro:
  - **Onde gravitazionali e relatività generale:** LISA-PF (2015) LISA(>2025), MOONLIGHT-2 (2015)
  - **Radiazione cosmica:** DAMPE (2016), GAMMA-400 (~2020), PANGU (?)
  - **EECR in atmosfera:** JEM-EUSO (?)
  - **Cosmologia:** LSPE (2016, pallone), EUCLID (>2020)



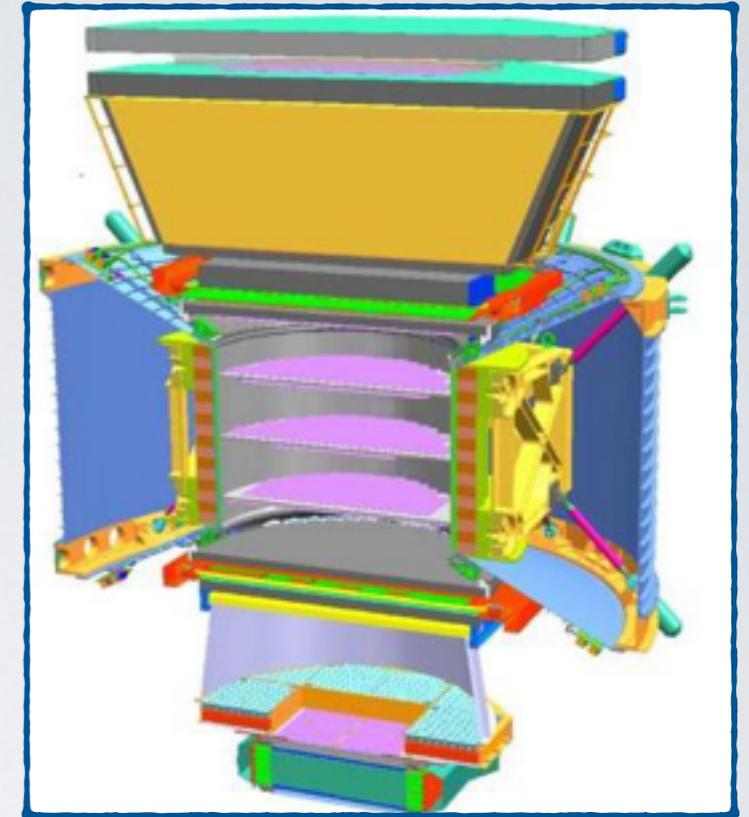
Un piccolo rivelatore da  
 fisica delle particelle, volante  
 $h=1.3$  m     $W=470$  kg     $P=360$  W

6 tracciatori al silicio ( $300 \mu\text{m}$ )  
 Scintillatori plastici  
 Campo magnetico  $B=0.43$  T  
 $dE/dx$   
 TOF 300 ps  
 Cal. Si+W (44 piani,  $16.3 X_0$ )

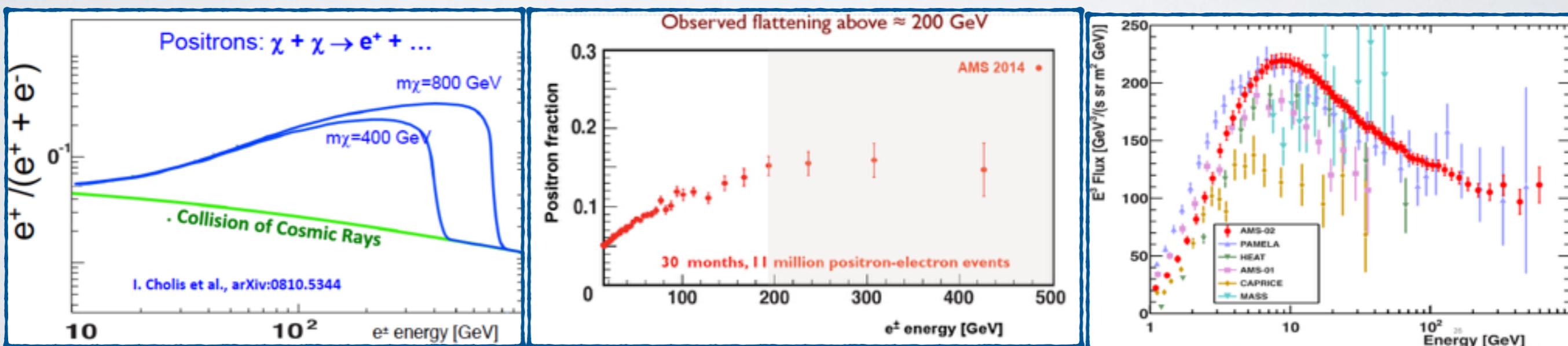
O. Adriani et al., PRL 111 (2013) 081102.



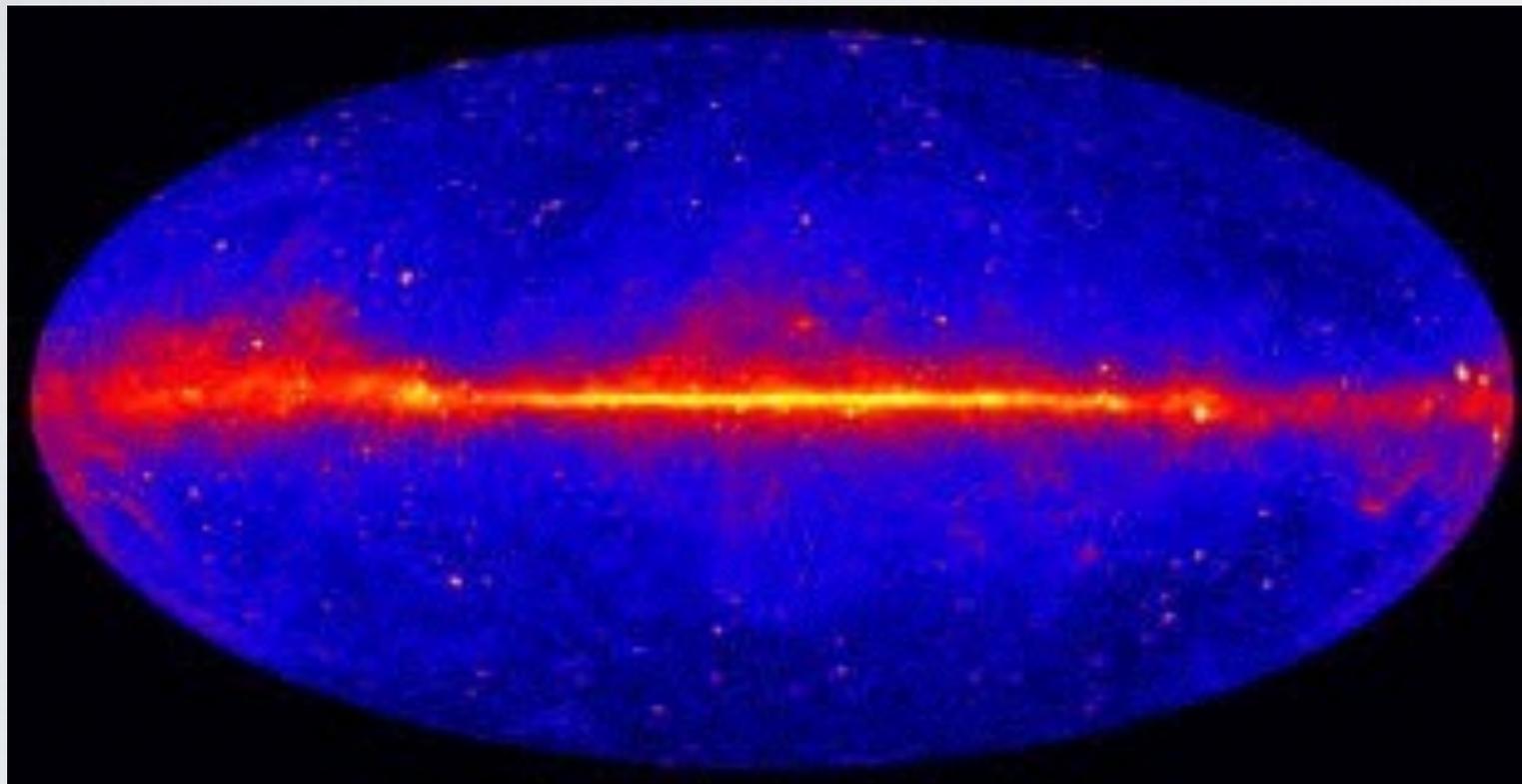
- Tracciatore + calorimetro + PID di ultima generazione
  - 3 anni di dati circa
    - Eventi:  $55 \cdot 10^9$  raccolti, 80% analizzati
    - Controllo attivo molto accurato: allineamento rifatto ogni pochi minuti a causa dei gradienti termici
- Nuove misure della frazione di positroni e di protoni
  - Materia oscura, astrofisica, cosmologia



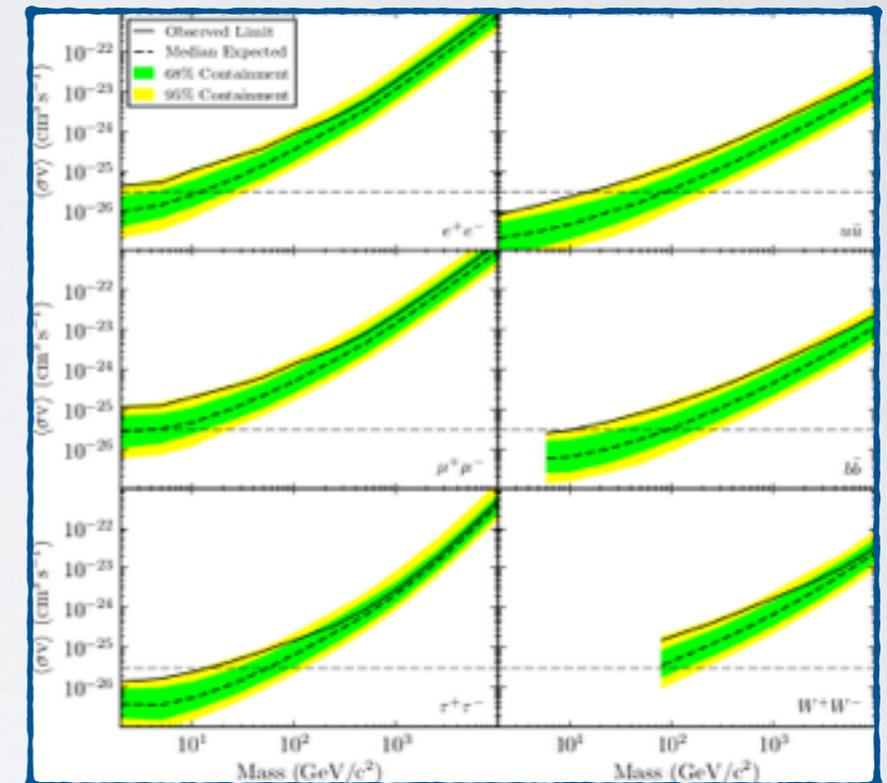
Electron flux after AMS02



- **Fermi** ha cambiato la nostra conoscenza del **cielo  $\gamma$** 
  - Un amplissimo programma scientifico e una missione di grande successo
    - ~ 350 articoli di collaborazione,  $h_{\text{index}} \sim 50$
  - Contributo INFN molto significativo



Ackermann et al., PRD 89, 42001 (2014)



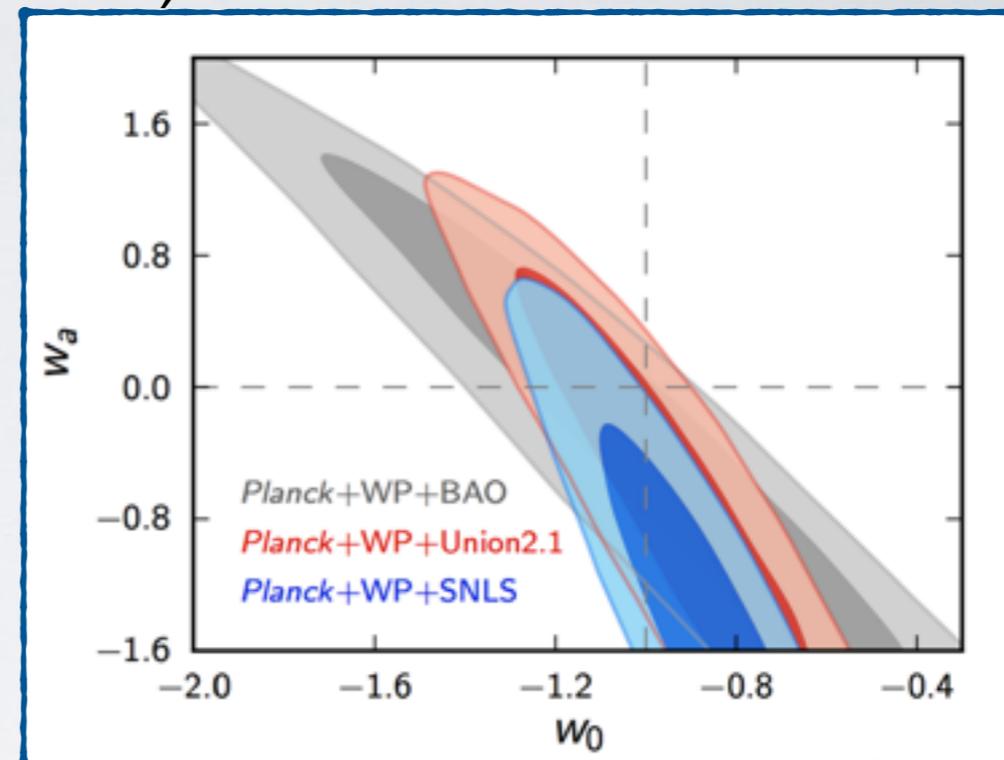
- **EUCLID**: mappa l'Universo con precisione sufficiente a distinguere diversi modelli dark energy (e molto altro)

$$w(a) = w_0 + w_a (1 - a)$$

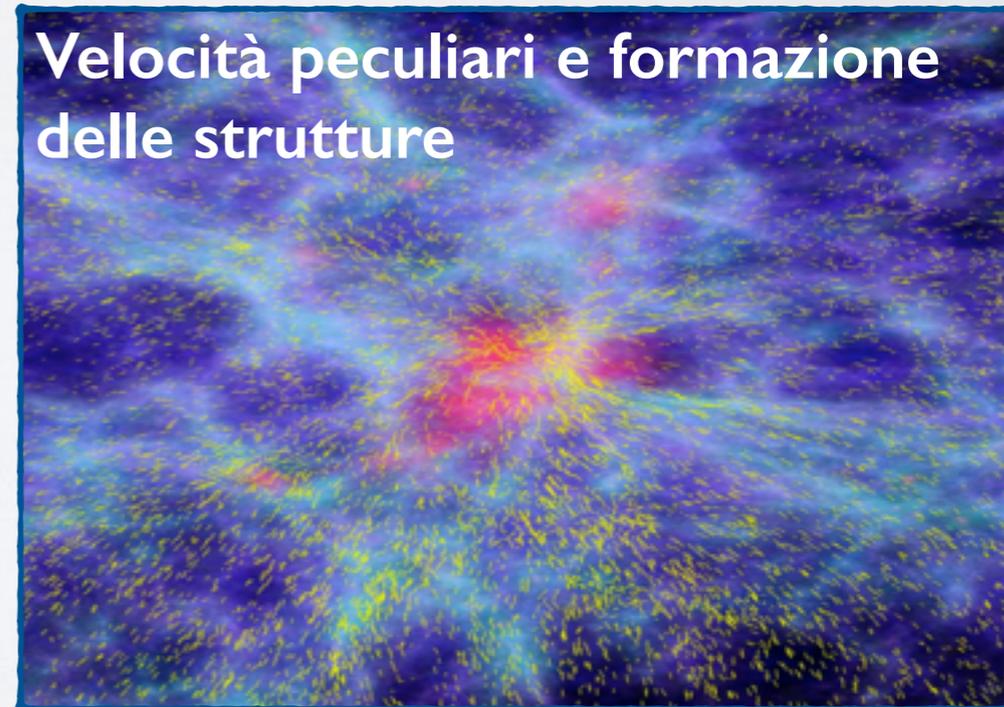
- Barionic Acoustic Oscillations ad alta precisione
- Weak Gravitational Lensing di precisione
- Misura la crescita delle strutture
- Lancio: ~ 10 anni

- **Una delle questioni scientifiche cruciali della prossima decade**

- INFN vuole avere un ruolo, consapevole di esplorare una strada nuova
- Un piccolo gruppo sta aprendo la strada (PD e BO per ora)

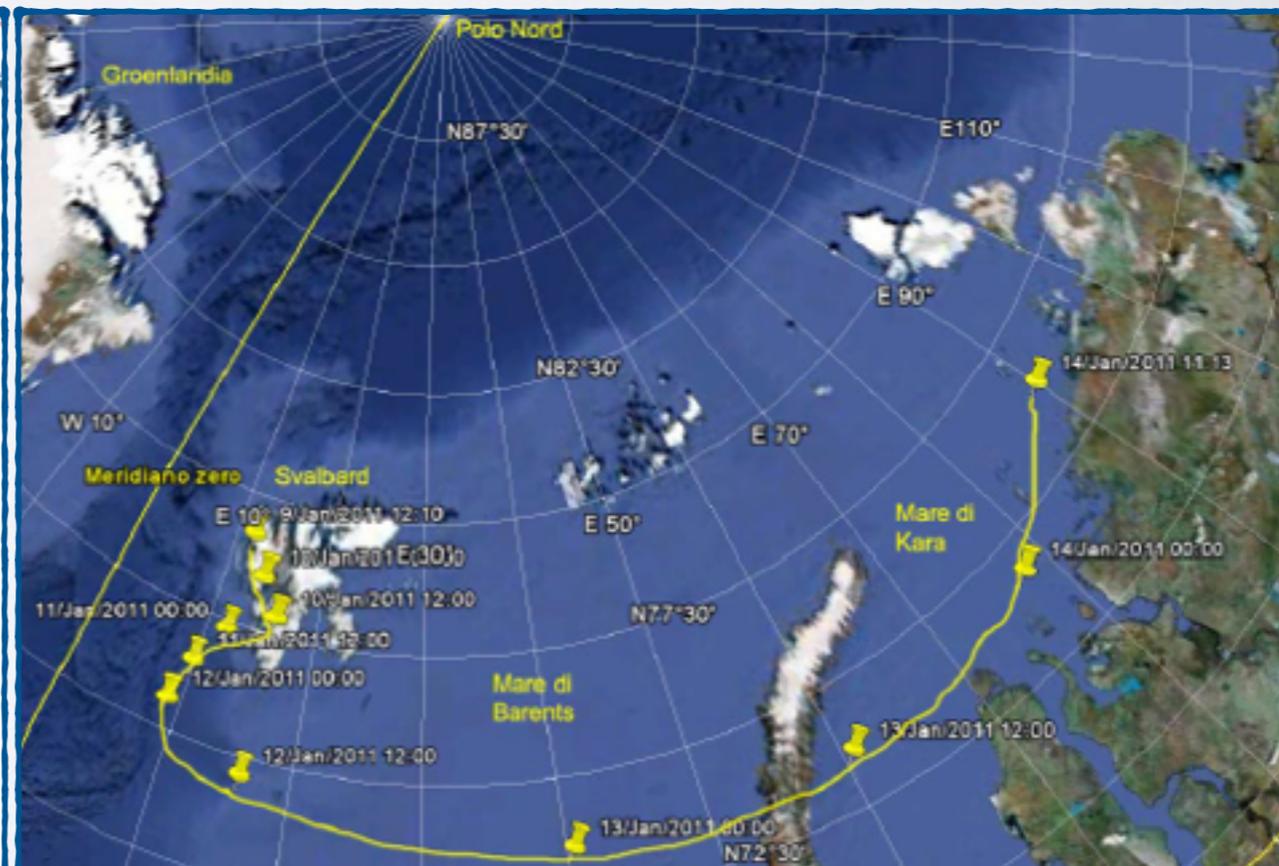
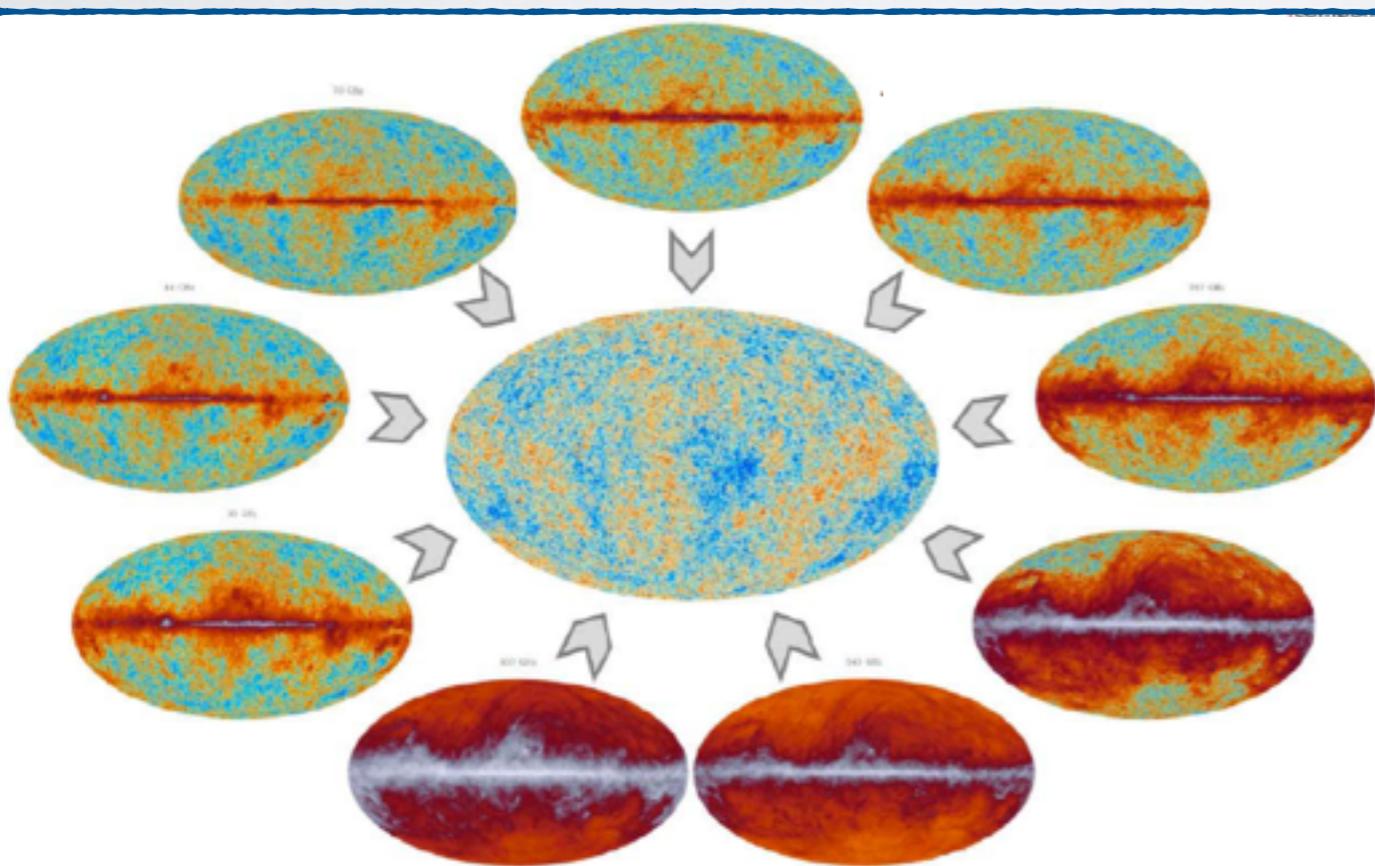
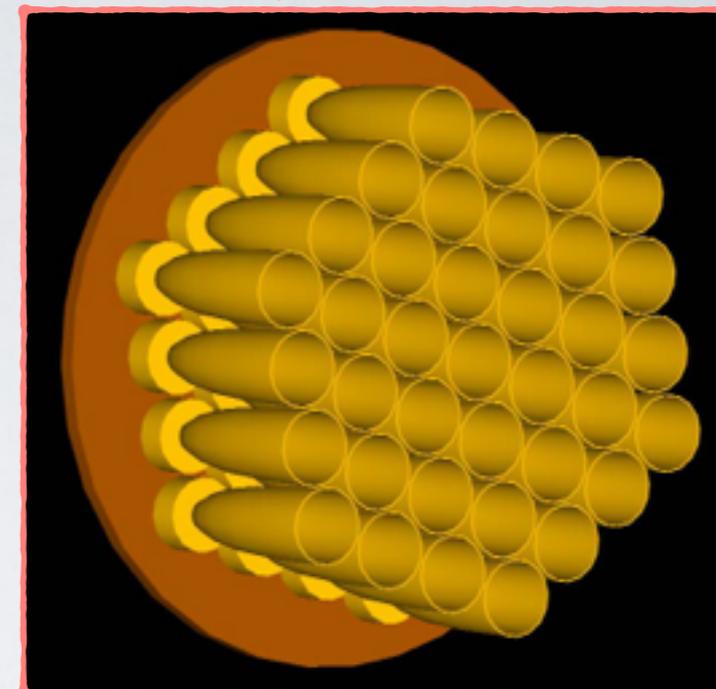


**Velocità peculiari e formazione delle strutture**



- **LSPE: Large Scale Polarisation Explorer**
  - Missione su pallone per studiare la **polarizzazione del CMBR**
  - Ricerca dei B-modes con un approccio **multi-frequenza**
  - Tecnologia sviluppata per la misura della massa del neutrino (micro-bolometri) + TES + KIDs
    - 5 canali (**40 - 250 GHz**) su un rivelatore rotante
    - Risoluzione angolare  $1.5^\circ$ - $2.3^\circ$  Copertura cielo: 20-25%
    - Sensibilità: circa **10  $\mu$ K** rumore equivalente

P. De Bernardis  
 A. Baldini, F. Gatti

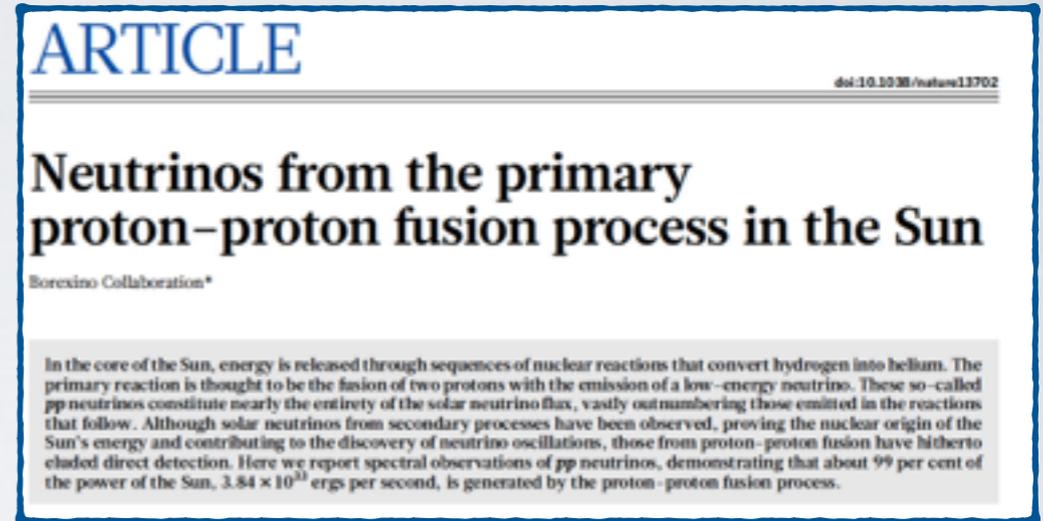


## Neutrini

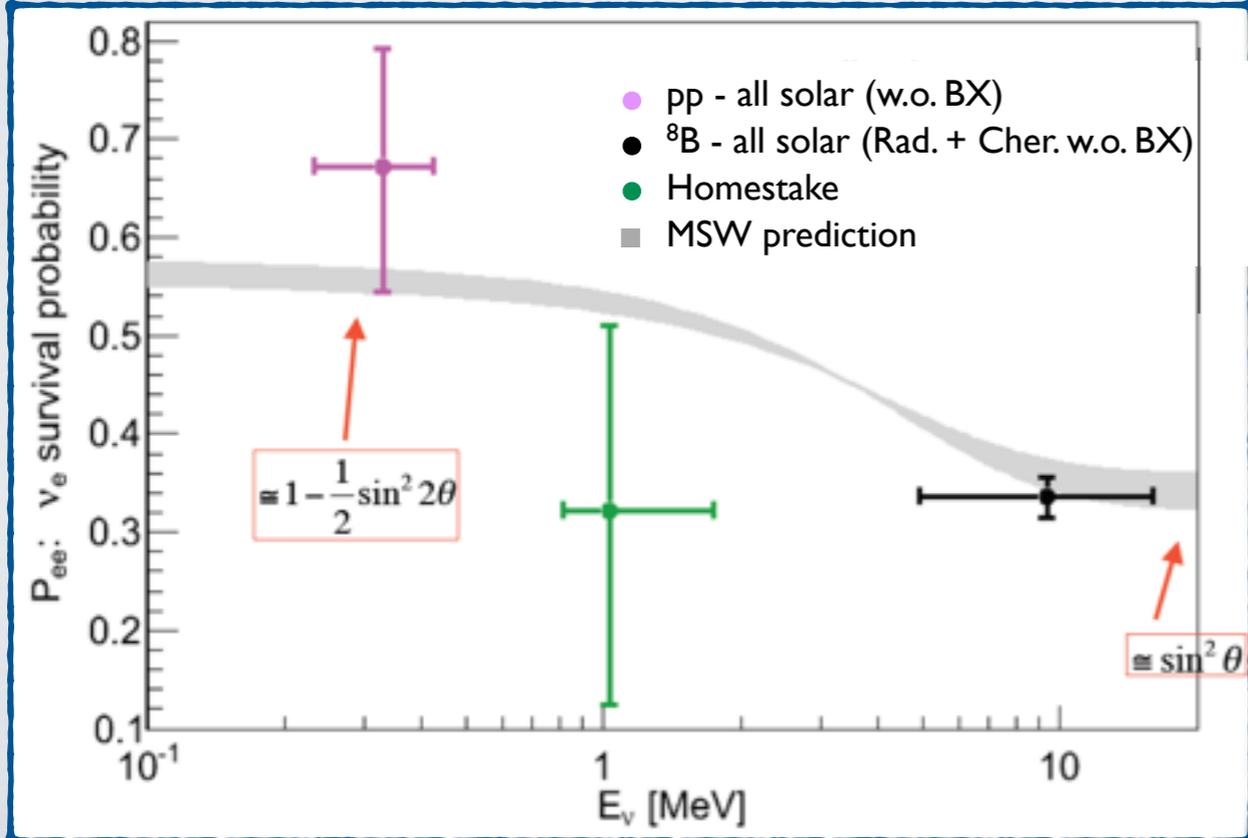
Solari, SN, Astrofisici,  
 $0\nu\beta\beta$  e Misure dirette di massa  
Oscillazioni con acceleratori,  
reattori e sorgenti artificiali

- Solari e SN
  - BOREXino, LVD
- Doppio Decadimento Beta
  - CUORE, GERDA
- Oscillazioni
  - T2K, JUNO, OPERA, ICARUS-SBL, SOX
- Misura diretta della massa
  - Holmes

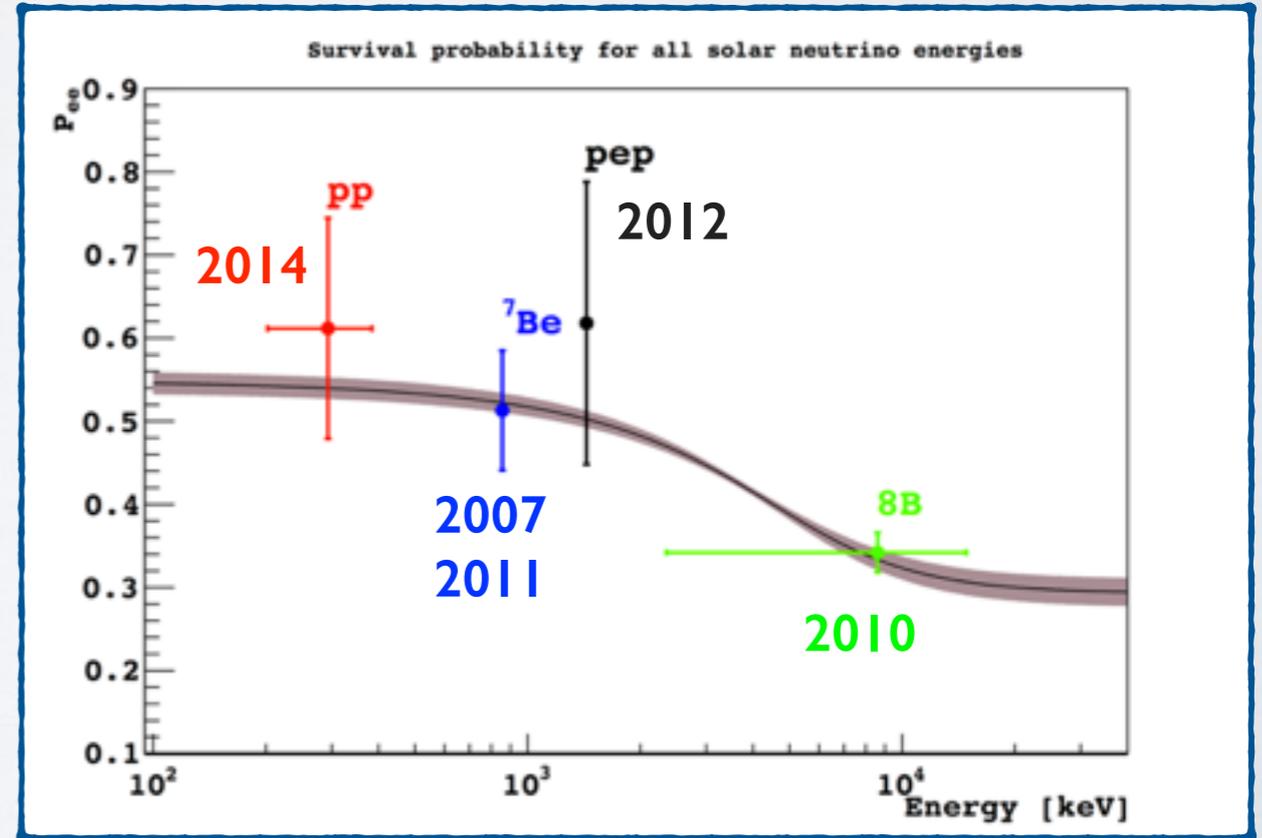
- Prima misura in tempo reale dei neutrini pp
- Nature, 512, 28-Aug-2014
  - pp rate misurato:  $144 \pm 13 \pm 10$  cpd/100 t
  - previsto:  $131 \pm 2$  cpd/100 t



## Prima di Borexino



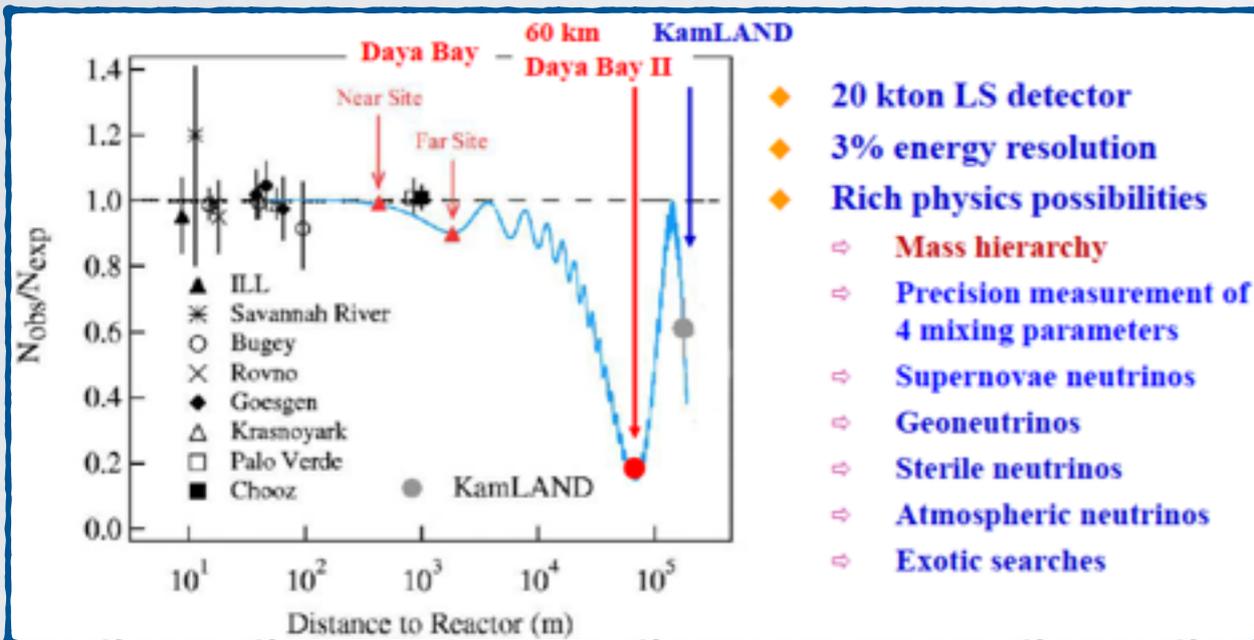
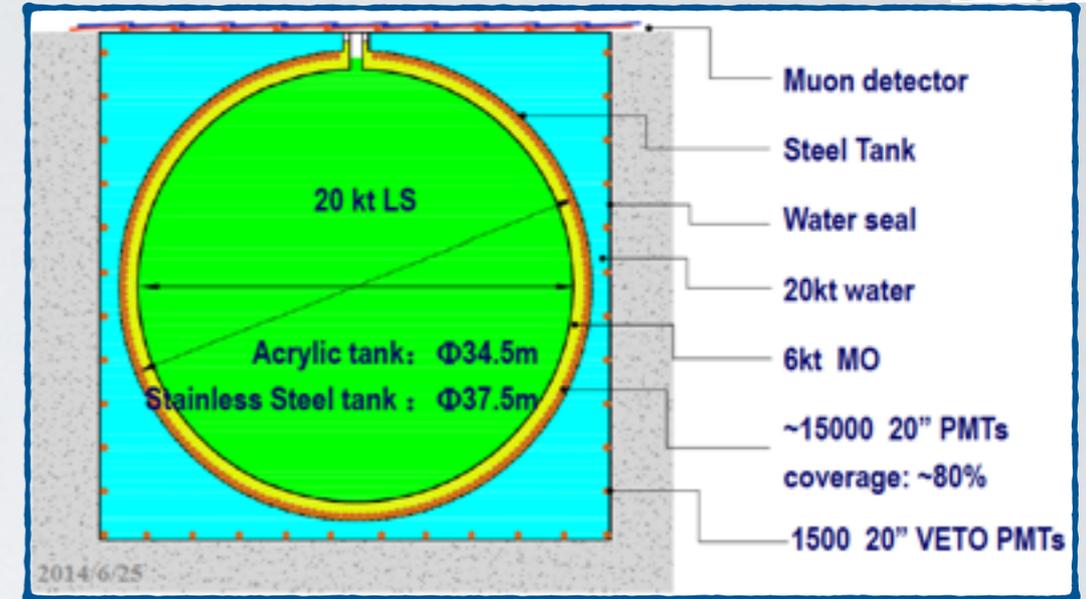
## Borexino 2014



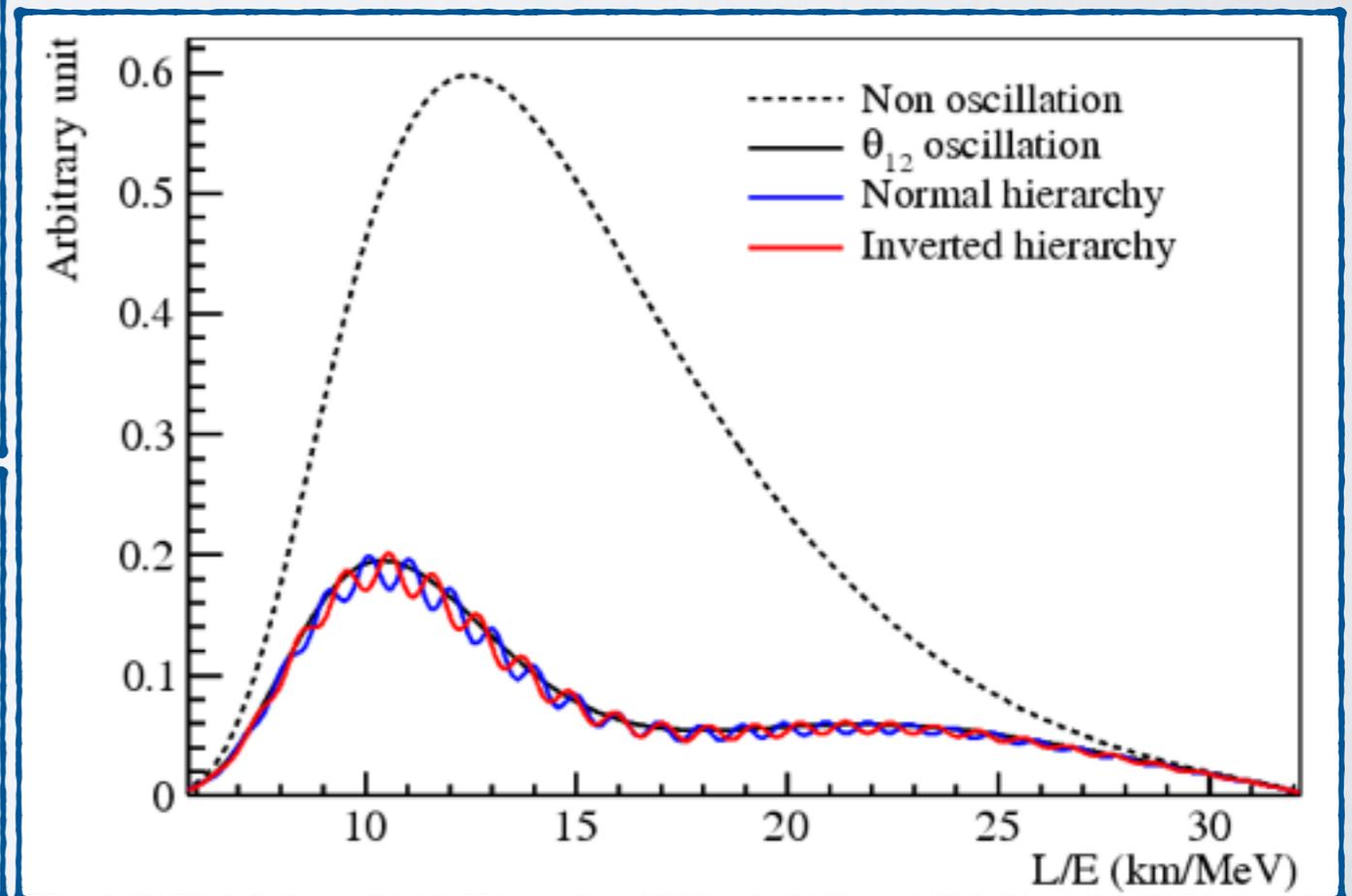


Approvato  
nel 2015

Run ~ 2020



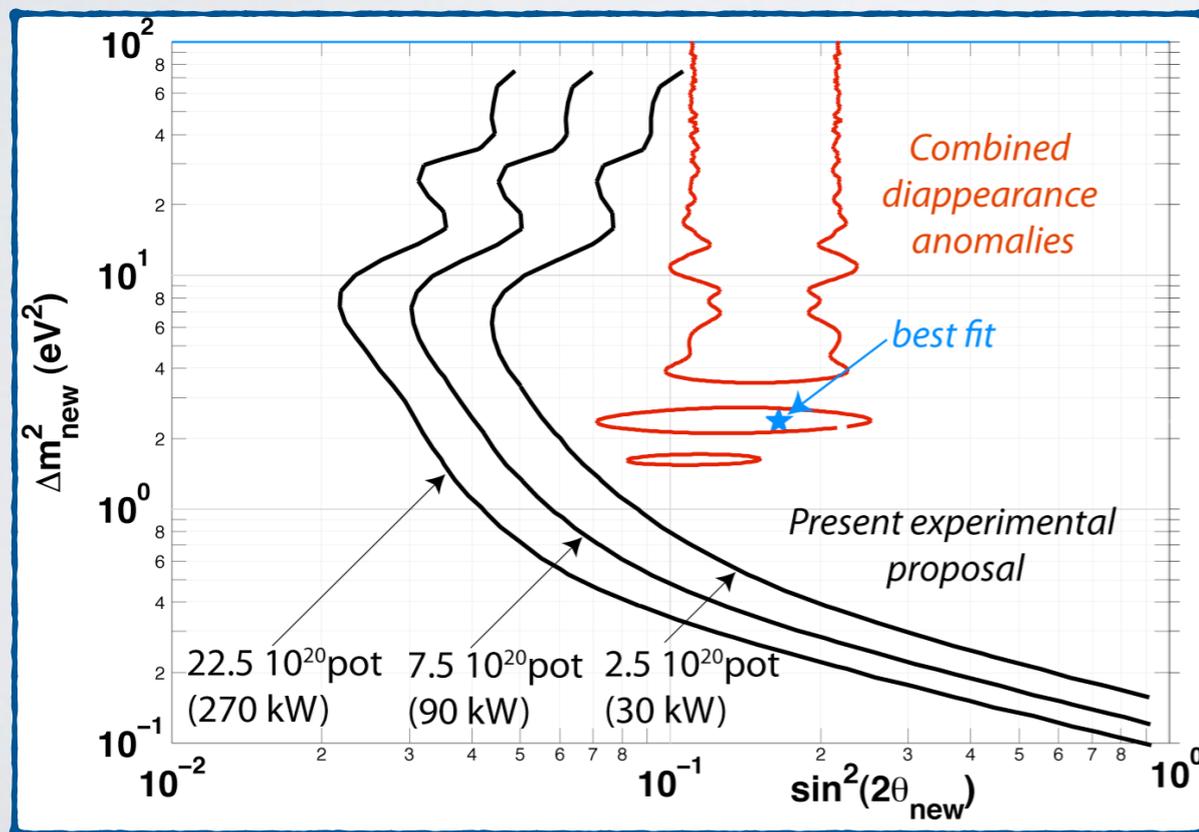
Obiettivo ambizioso: gerarchia di massa



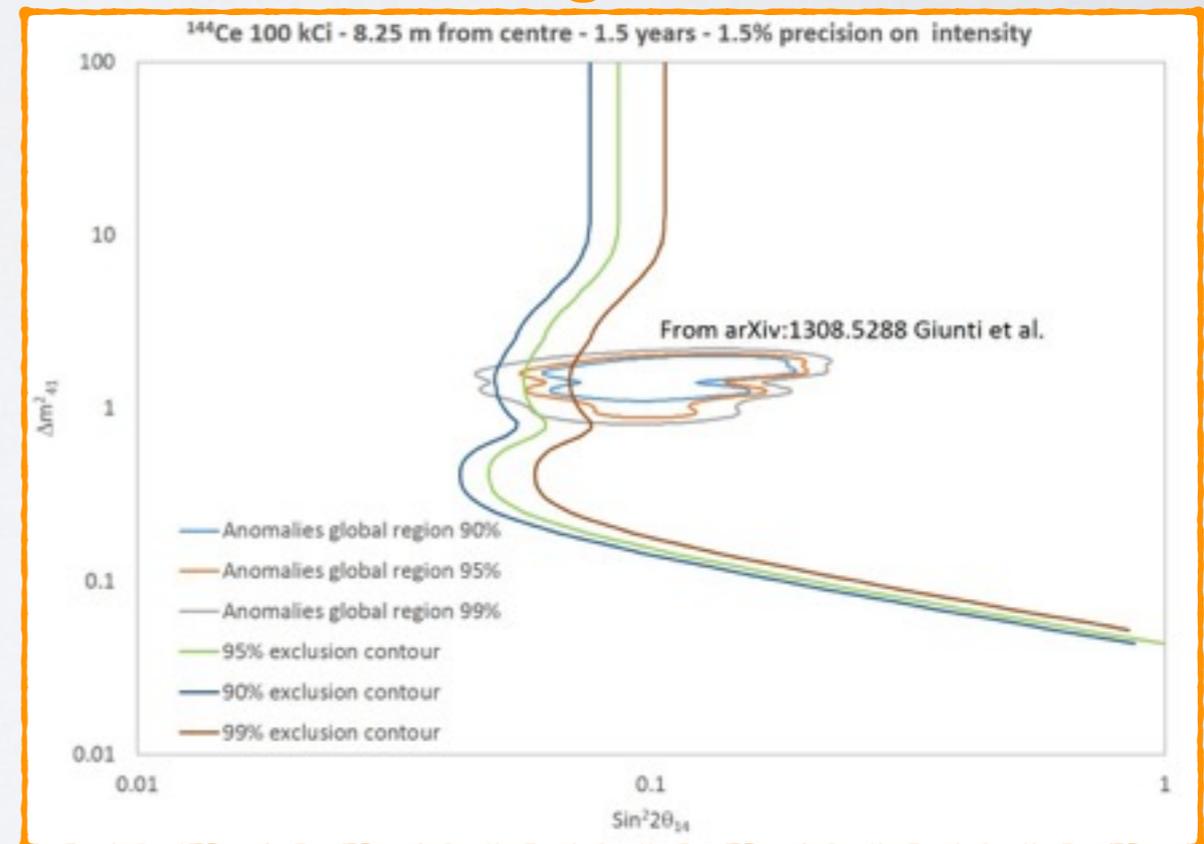
	Current	Daya Bay II
$\Delta m^2_{12}$	3%	0.6%
$\Delta m^2_{23}$	5%	0.6%
$\sin^2\theta_{12}$	6%	0.7%
$\sin^2\theta_{23}$	14%	N/A
$\sin^2\theta_{13}$	10% → 4%	~15%

- I neutrini sterili, se esistono, potrebbero avere profonde implicazioni astrofisiche, oltre che naturalmente essere di enorme interesse in sé
- Due progetti approvati:
  - **SOX**: Borexino come rivelatore dei neutrini emessi da una sorgente
  - **SBL-ICARUS**: Icarus come rivelatore lontano sulla linea Short Base Line di Fermilab

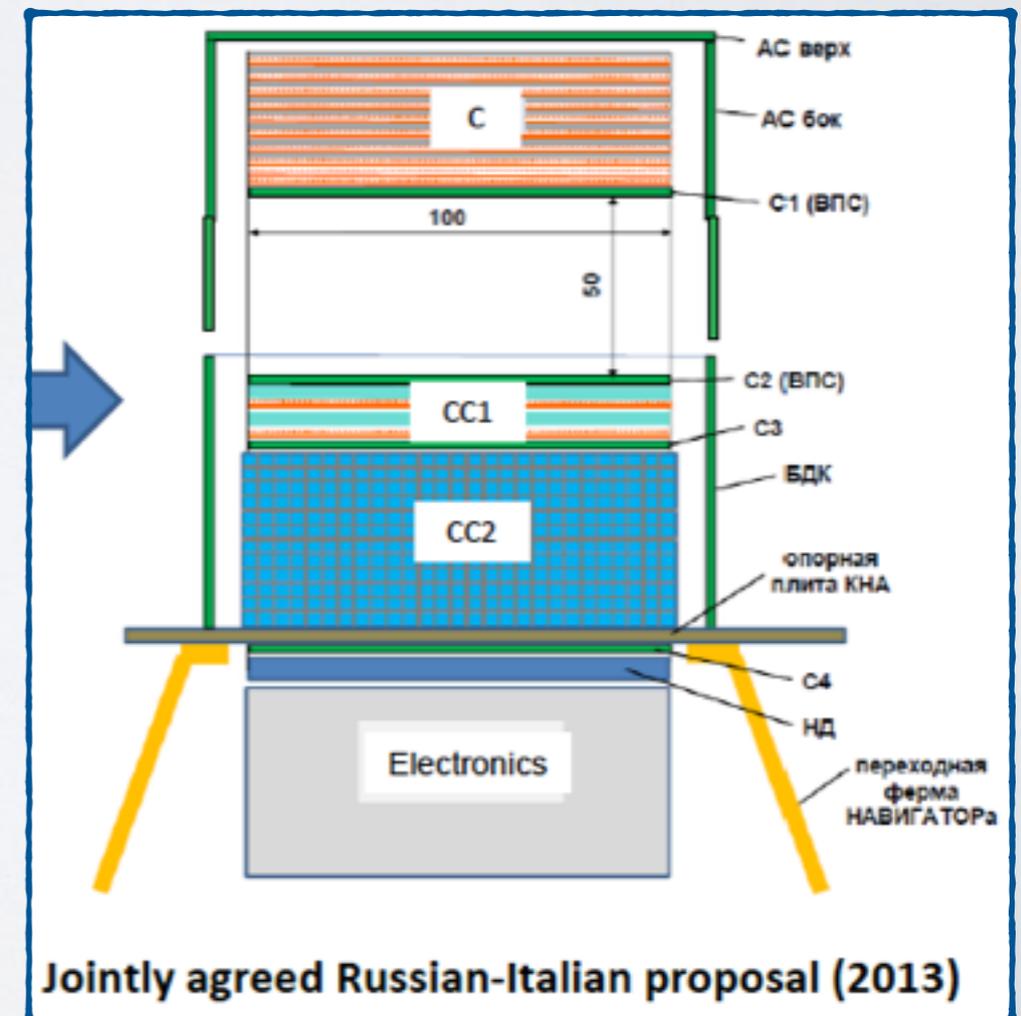
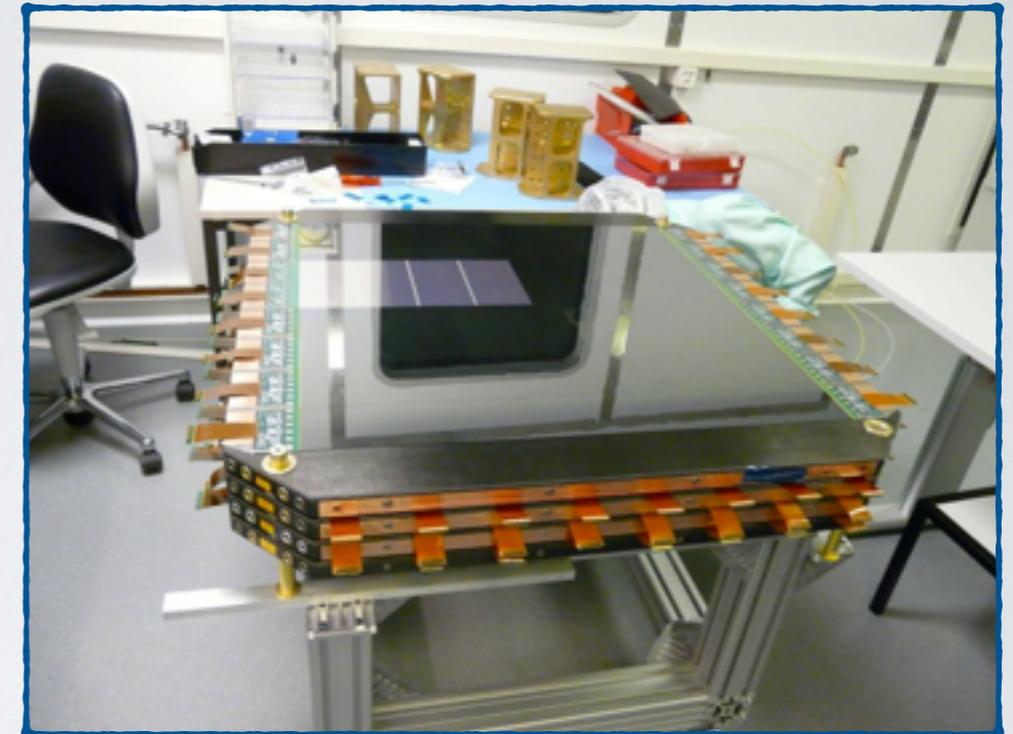
## SBL-Icarus sensibilità



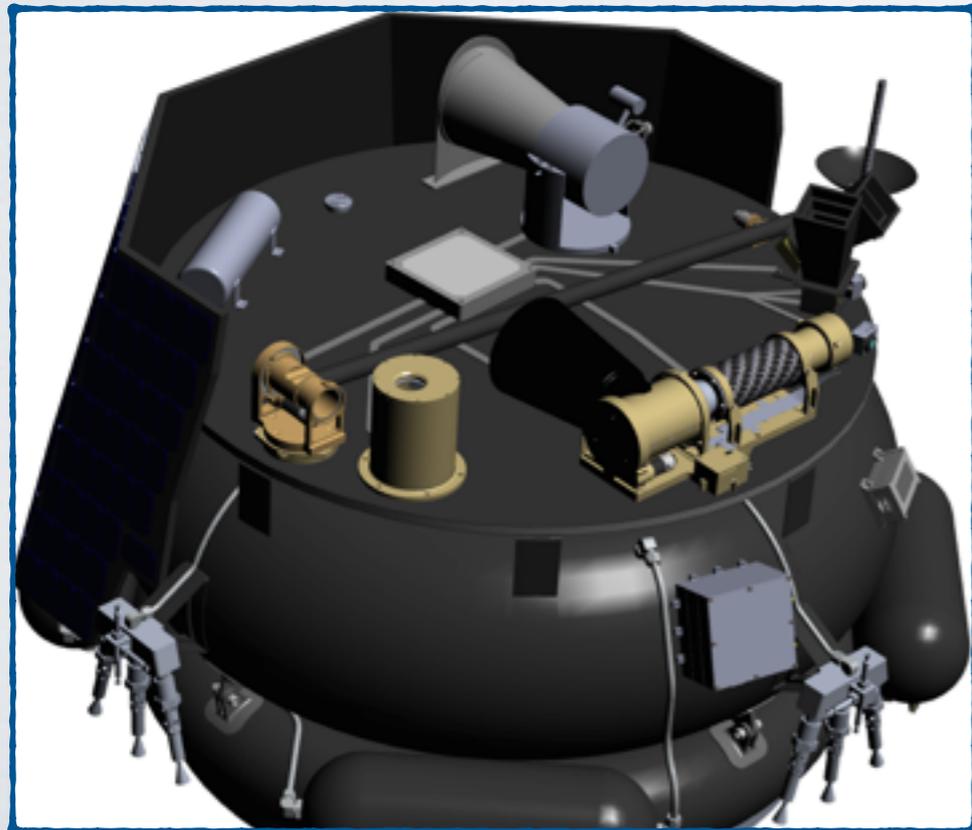
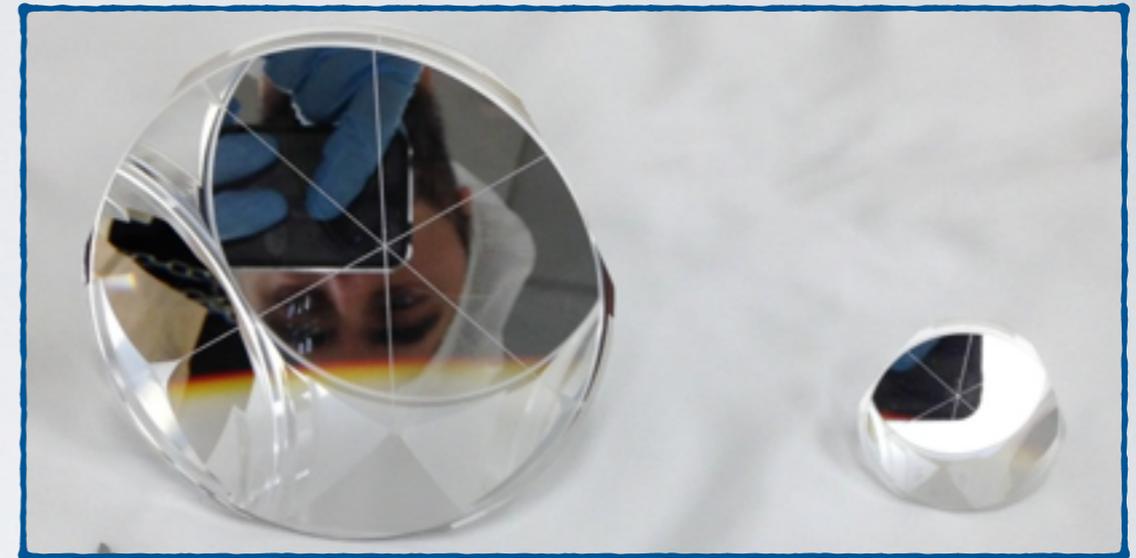
## SOX con sorgente di Ce-144



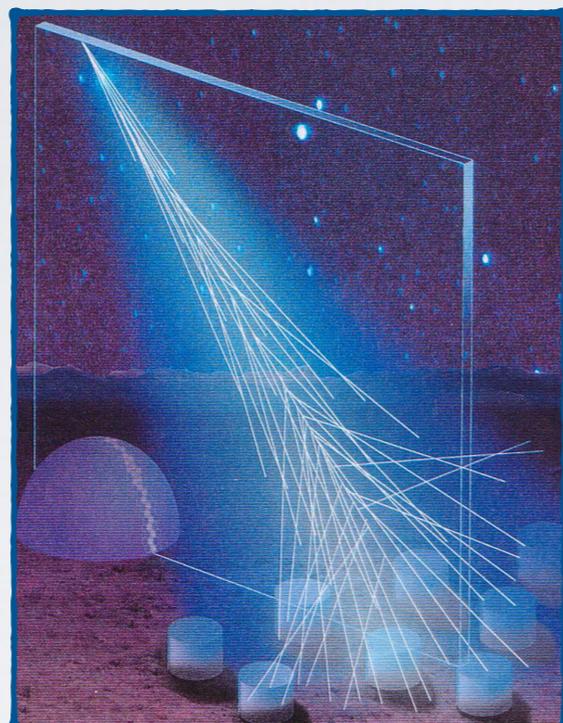
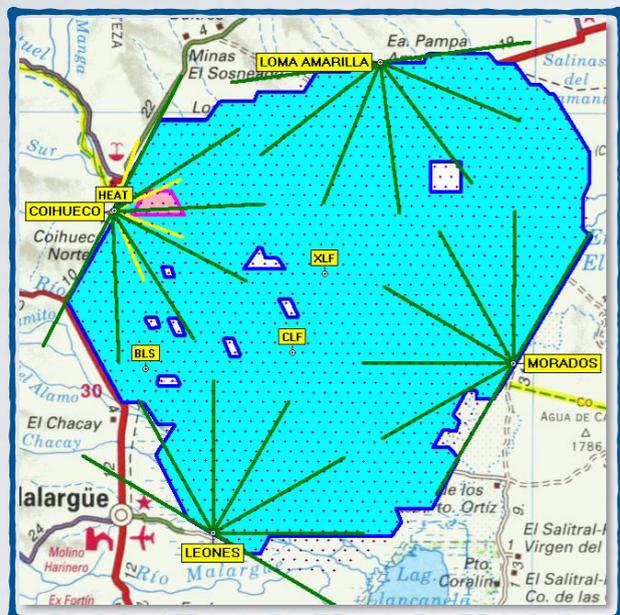
- Due missioni spaziali in preparazione, evoluzione di Pamela-Fermi-AMS02
- **Dampe:** fotoni, elettroni e carichi (evoluzione di Fermi and AMS02)
  - **2 GeV - 10 TeV e/ $\gamma$     30 GeV - 100 TeV CR**
  - Una nuova via finanziaria: partecipiamo come scienziati ma siamo anche partner industriali dell'Agencia Spaziale Cinese (che ci paga!)
  - Costruzione in stato avanzato. Ottimi risultati dai test beams
- **Gamma-400:** Missione approvata dall'agenzia Russa ROSCOMOS per lancio nel 2020
  - 100 MeV - 1 TeV e/ $\gamma$     2% risoluzione in energia  
 Elettroni 10 TeV  
 Nuclei leggeri fino al ginocchio **1000 TeV**
    - **Eccellente separazione elettrone/adrone**



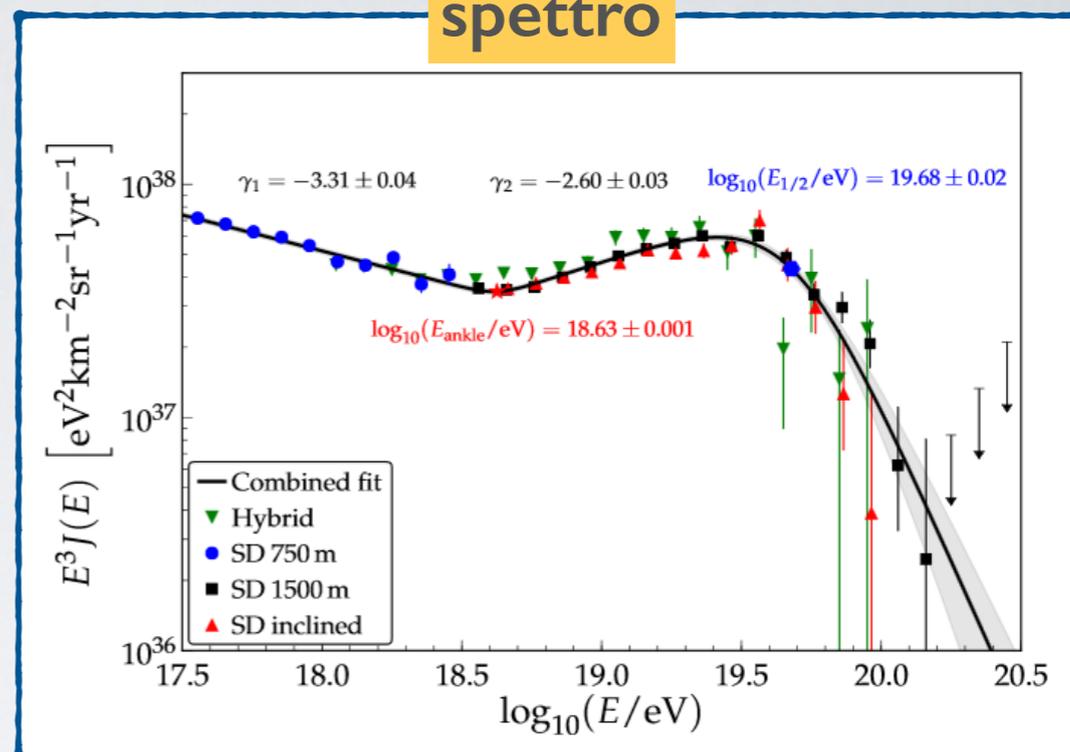
- Test della **Relatività Generale** con Laser Retroriflettori Laser (Luna, Marte, satelliti)
  - Accordo INFN/NASA per NASA-SSERVI
  - Retroriflettore sulla LUNA
    - Effetti di RG sull'orbita della Luna
    - Geo-fisica. Scienza fondamentale.
    - INRRI: **IN**strument for landing-**R**oving laser **R**etroreflector **I**nvestigations (MARTE)



- Rivelatore per UHECR (Argentina)
  - 3000 km<sup>2</sup>, ibrido (carichi + fluorescenza)
  - 1660 taniche, 4 FD

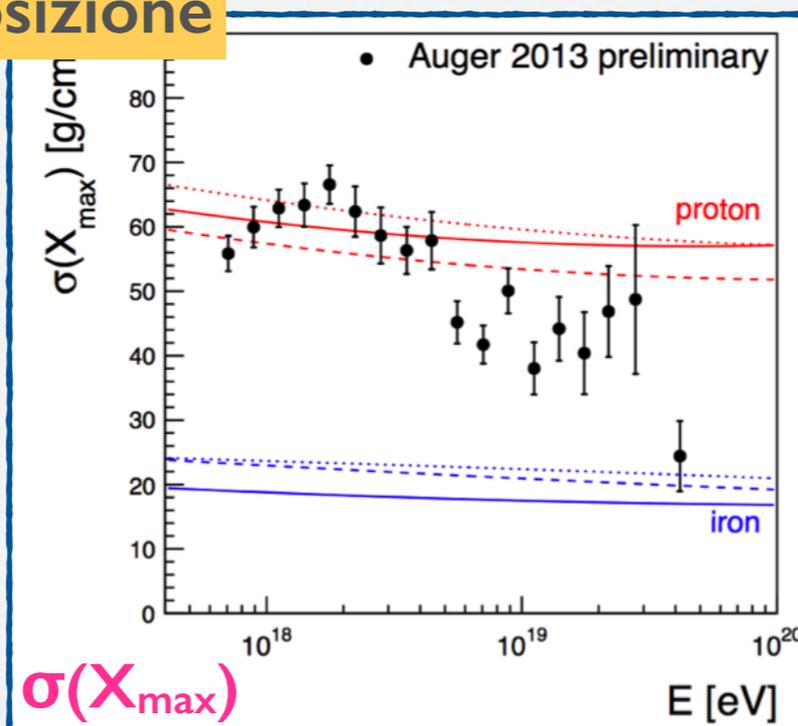
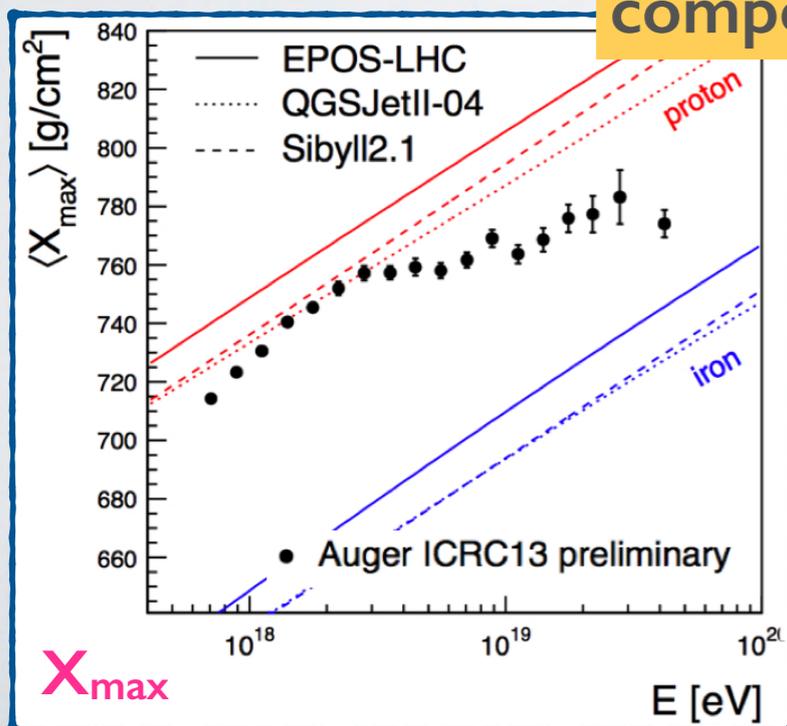


## spettro

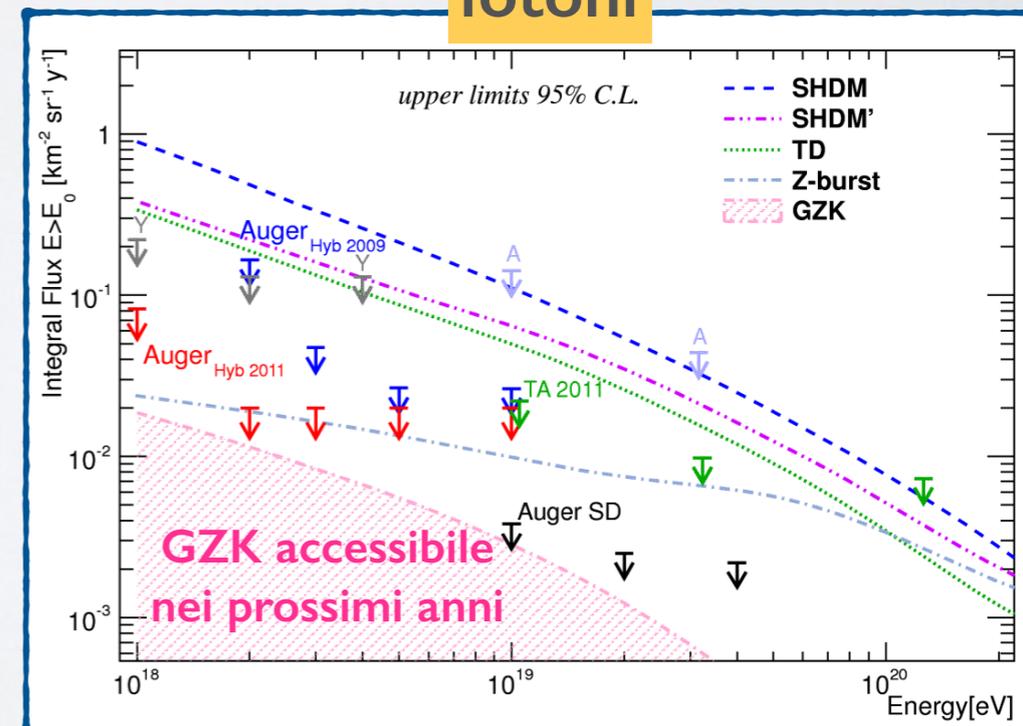


L'esistenza della caviglia e del cut-off è dimostrata

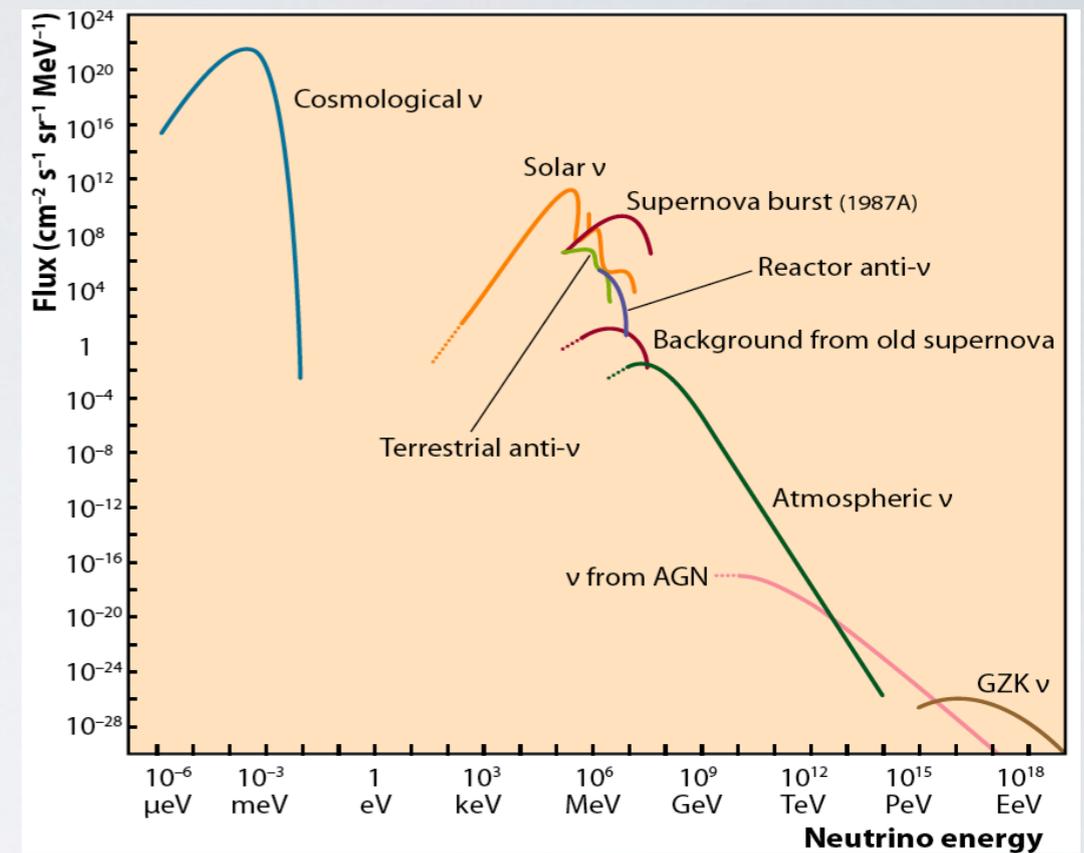
## composizione



## fotoni



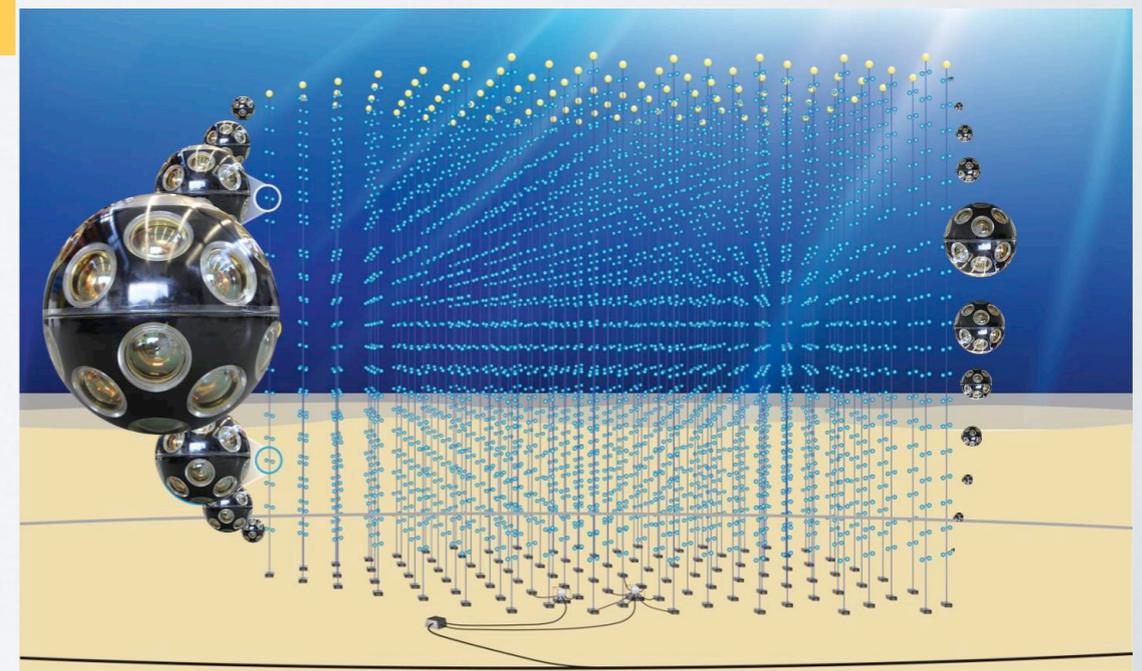
- **Obiettivo:**
  - Astronomia e astrofisica con neutrini di alta energia
  - Due tecniche fondamentali:
    - Ghiaccio (Ice-Cube) e Acqua (Antares, Km3-Net)
- **Antares: prototipo di Km3-Net**
  - Prima dimostrazione di operare con continuità un rivelatore sottomarino (dal 2006)
- **Km3-Net**
  - Finanziamento Ministeriale per un primo pezzo di rivelatore
    - Installazione nel 2015



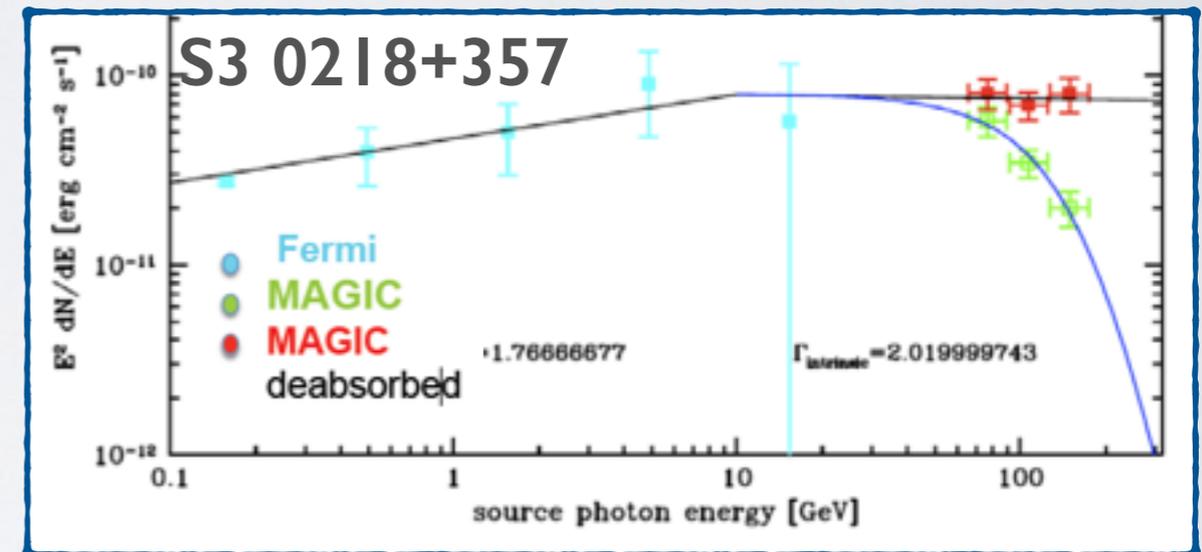
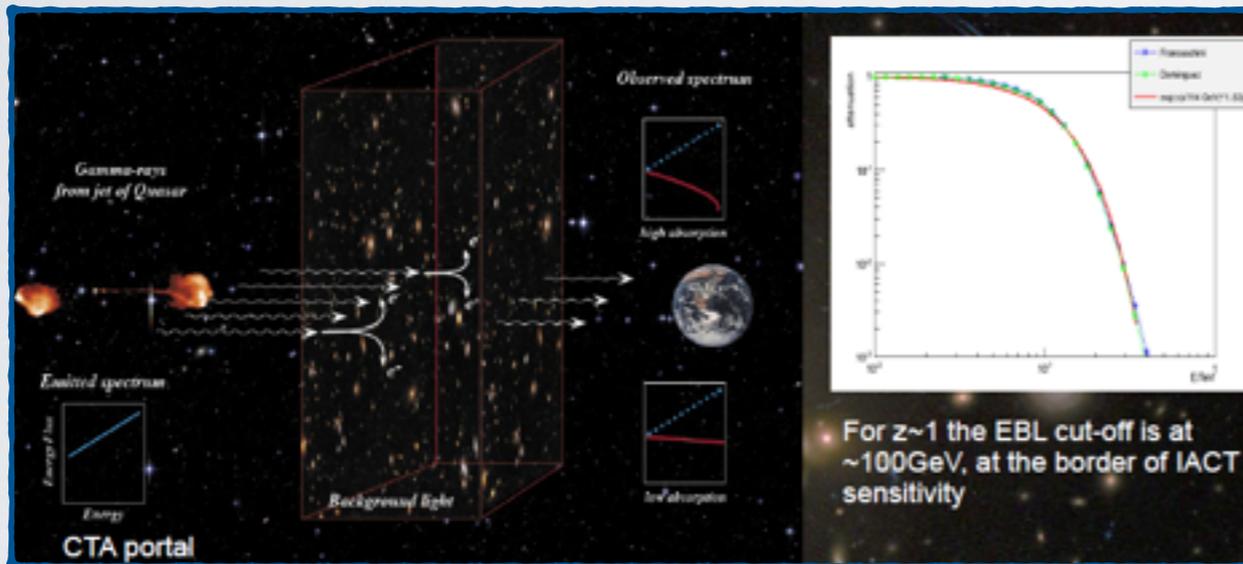
## Torre in Acqua (2014)



## Modulo ottico



- Il presente: MAGIC (2 telescopi, Canarie)
  - Due telescopi Cherenkov per  $\gamma$  di  $E > 30$  GeV
  - Esempio: la più distante sorgente  $\gamma$  di alta energia
    - Prima misura a  $z > 0.6$
    - Prima misura di grave. lensing con  $\gamma$  di alta energia



- Il futuro: Cherenkov Telescope Array
  - Due siti: uno Sud (Cile, Namibia), uno Nord (Canarie, Messico)
  - Decisioni nei prossimi mesi
  - Prototipo specchi grandi a La Palma

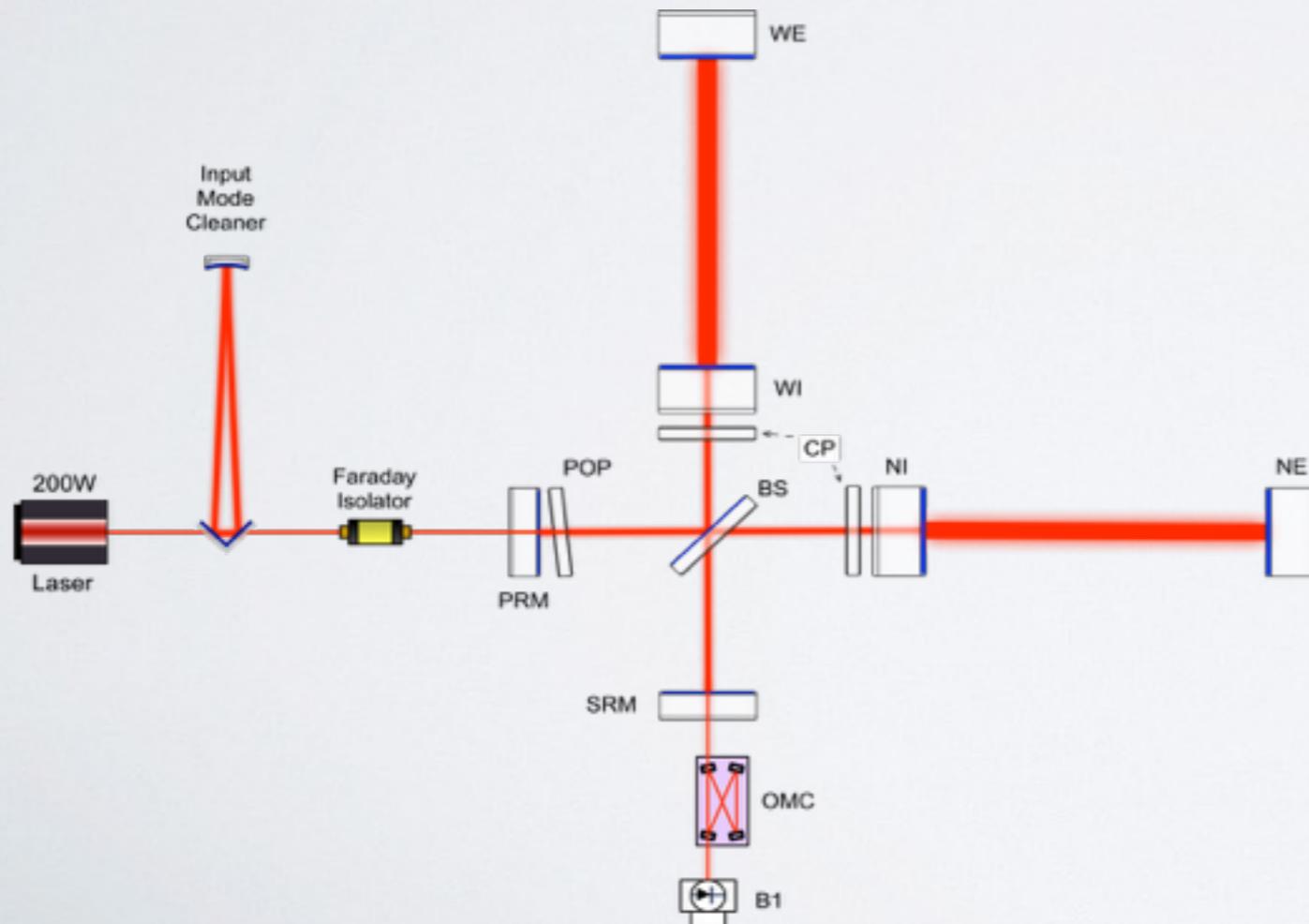


# Gravitazione e Fondamenti

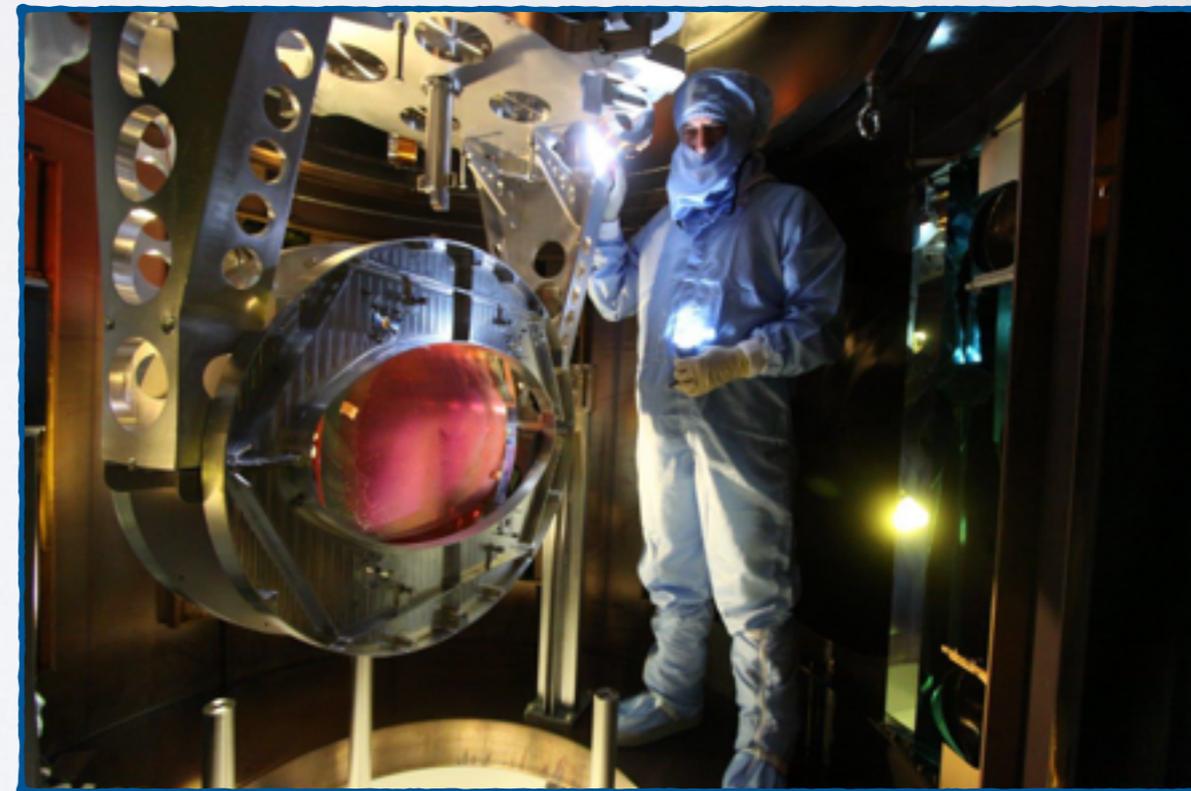
Rivelazione di O.G.  
Test della Relatività Generale  
Fondamenti di M.Q.

- Rivelazione diretta da Terra
  - VIRGO-ADV
- R&D per interferometro spaziale (3 10<sup>6</sup> km)
  - LISA-PF
- Test di relatività generale
  - MOONLIGHT-2, GINGER

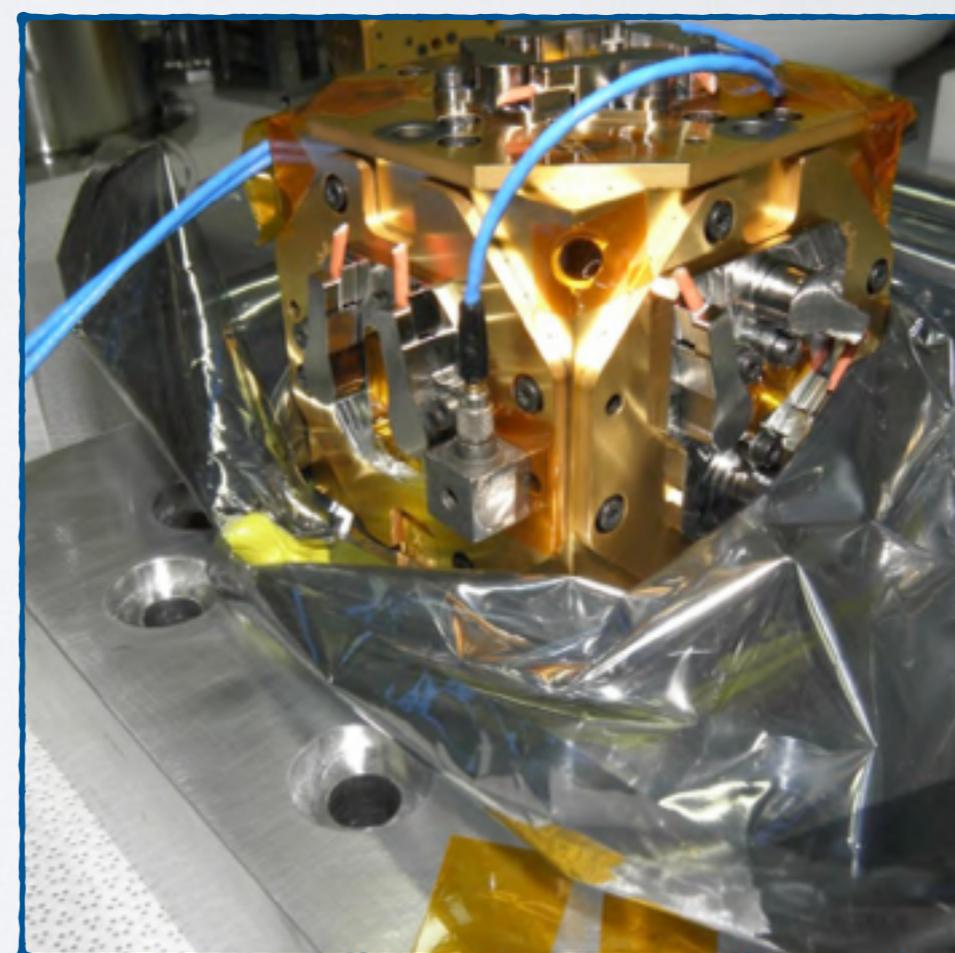
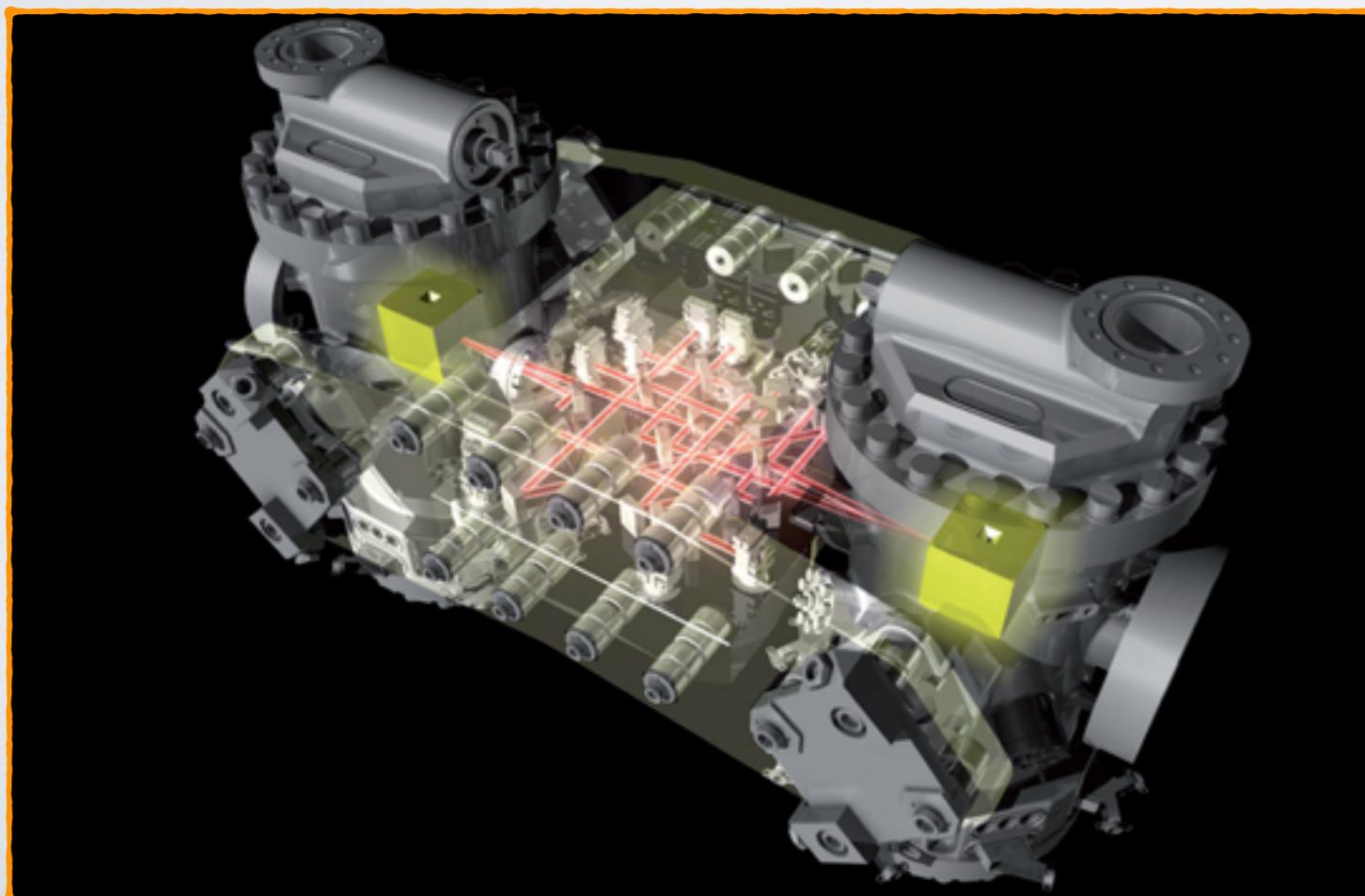
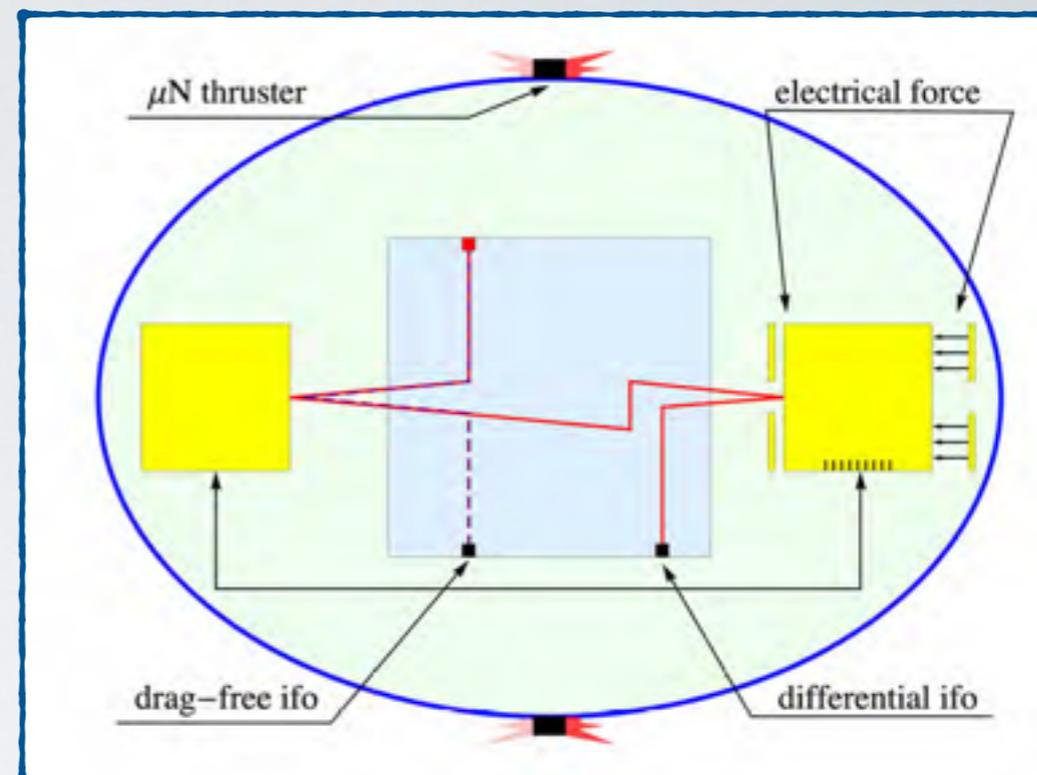
- Interferometro per O.G.
  - Nuova Versione “Advanced” pronta per fine 2015
  - Run di fisica 2016 e seguenti in stretta collaborazione con LIGO (USA)
  - Cauto ottimismo per una prima rivelazione nei prossimi anni



Test del nuovo Input Mode Cleaner



- **Obiettivo di LISA-PF**
  - Test del concetto di “**non-contacting satellite**”, elemento chiave del futuro LISA
- **Due masse Au-Pt nello stesso satellite**
  - Una in caduta libera, l'altra controllata a bassa frequenza da un sistema elettrostatico
  - Un braccio di LISA in un singolo satellite
  - **Lancio: Settembre 2015**



- La fisica delle astroparticelle è un settore vivace che ha di fronte alcuni dei problemi fondamentali della fisica di oggi
- Le attività dell'INFN sono in espansione, per quanto possibile con le risorse disponibili (soprattutto umane ma anche naturalmente finanziarie)
- Nuove linee sono state recentemente attivate in cosmologia
  - LSPE
  - EUCLID
    - Due nuove avventure, in terreni finora inesplorati
- Un grande momento per chi volesse avvicinarsi al settore!