

Lezione Fermi 15

Luciano Maiani, AA 14-15

Materia Oscura 2

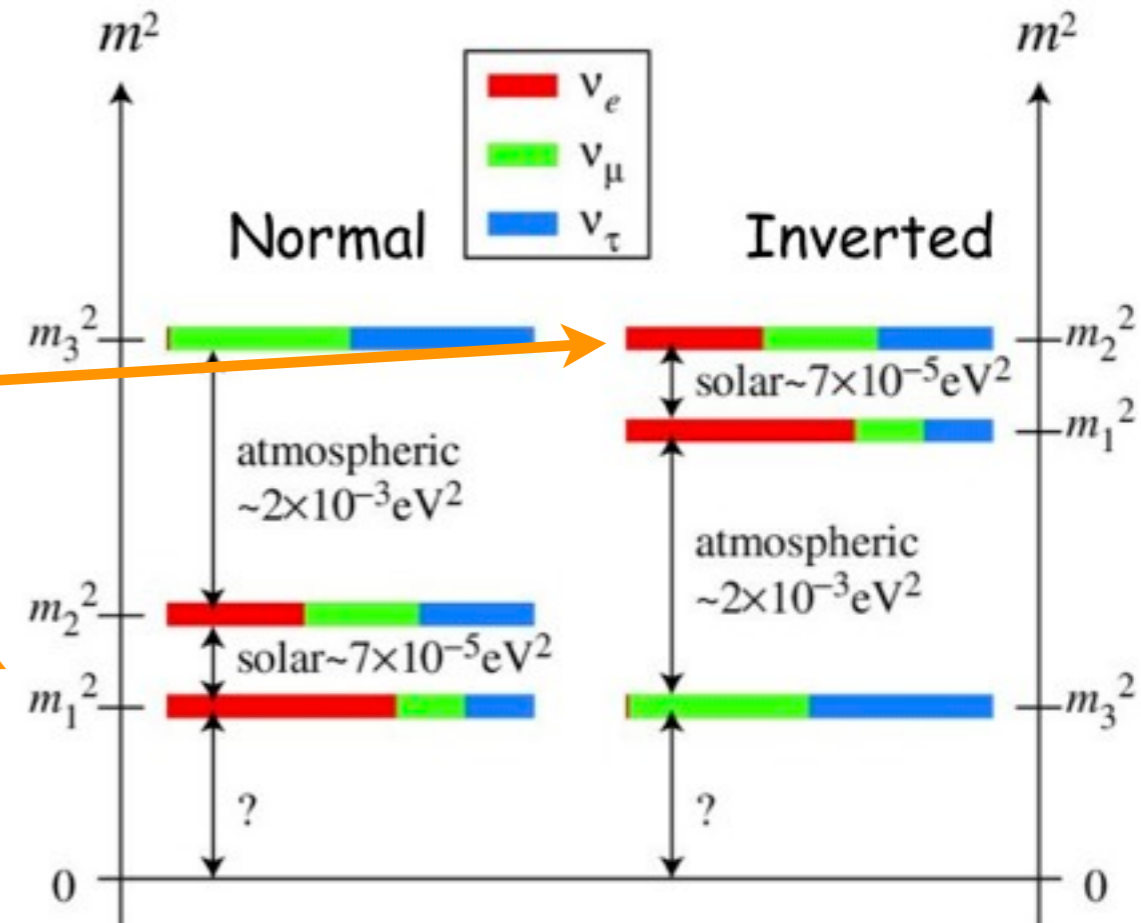
Sommario

1. Hot Dark Matter: i neutrini leggeri
2. La potenza spettrale $P(k)$
3. WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles)
4. WIMPS e Supersimmetria
5. Neutrini massivi sterili
6. Antimateria da annichilazione o decadimento di WIMP
7. WIMP a LHC ?
8. Assioni, un mondo da esplorare
9. Conclusioni

1. Hot Dark Matter: i 3 neutrini leggeri

- L'osservazione delle oscillazioni dei neutrini determina la composizione dei neutrini fisici, in termini dei neutrini con sapore definito ν_e , ν_μ , ν_τ e le differenze di (massa)²
- Sulla scala assoluta delle masse abbiamo indicazioni dal decadimento beta del Trizio, $m_\nu < 2$ eV e da indicazioni cosmologiche sulla massa totale dei tre neutrini leggeri

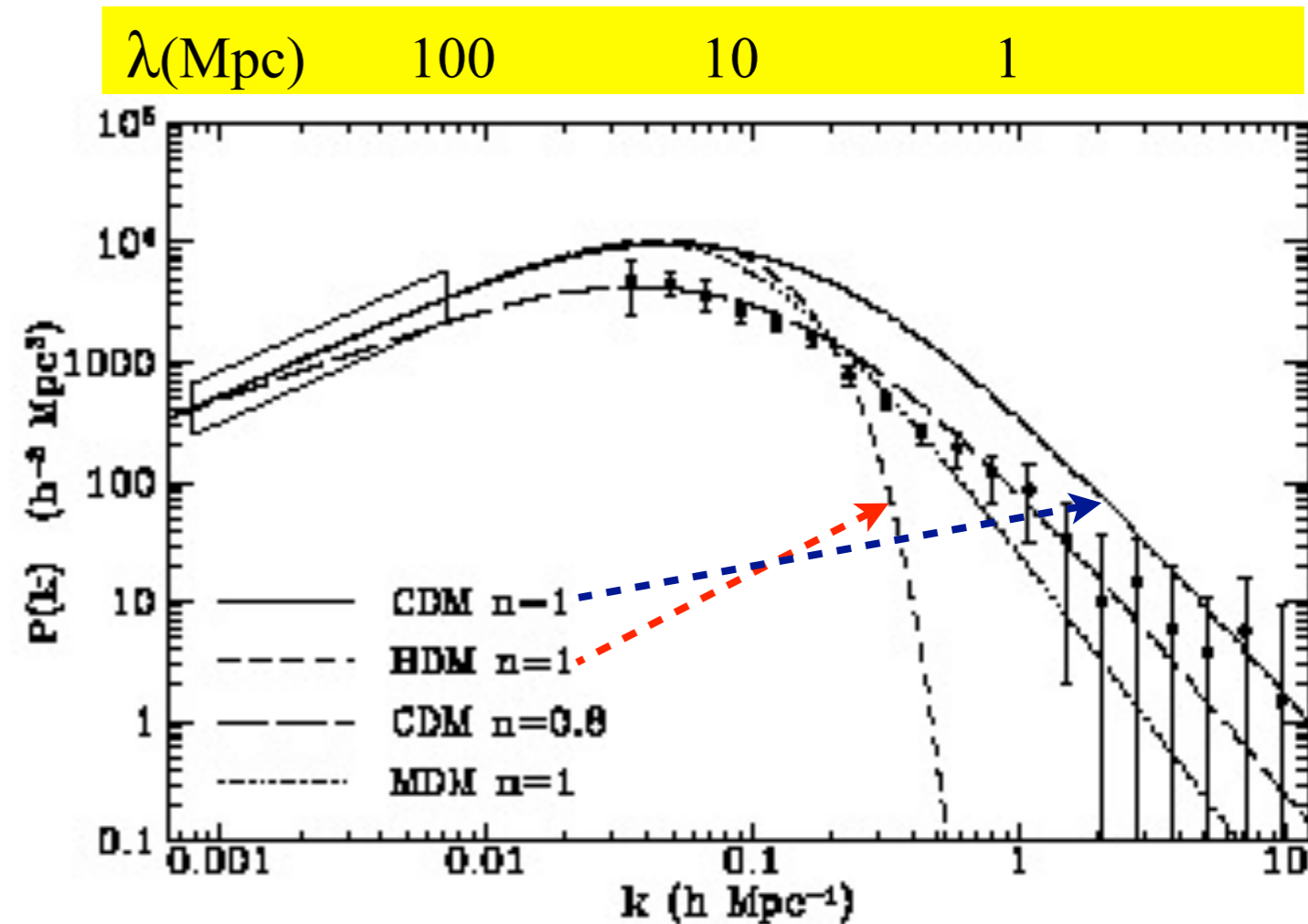
$$\sum m_\nu < 0.7 eV$$



- I neutrini prodotti nel Big-Bang non interagiscono con la materia quando la temperatura dell'Universo scende al di sotto di $T = 1 \text{ MeV}$.
- A questa temperatura (di disaccoppiamento) i neutrini sono particelle relativistiche: Materia Oscura "Calda" (HDM)
- Nella DM si generano fluttuazioni di densità gravitazionali solo quando le particelle sono diventate non-relativistiche
- nel frattempo i neutrini coprono distanze considerevoli (free-streaming) e questo fa sì che le strutture generate per condensazione gravitazionale siano "grandi", dell'ordine di 100 Mpc
- questo è in contrasto con l'osservazione della distribuzione delle dimensioni dei cluster di galassie, determinata da numerose campagne di osservazione di galassie lontane, come la Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

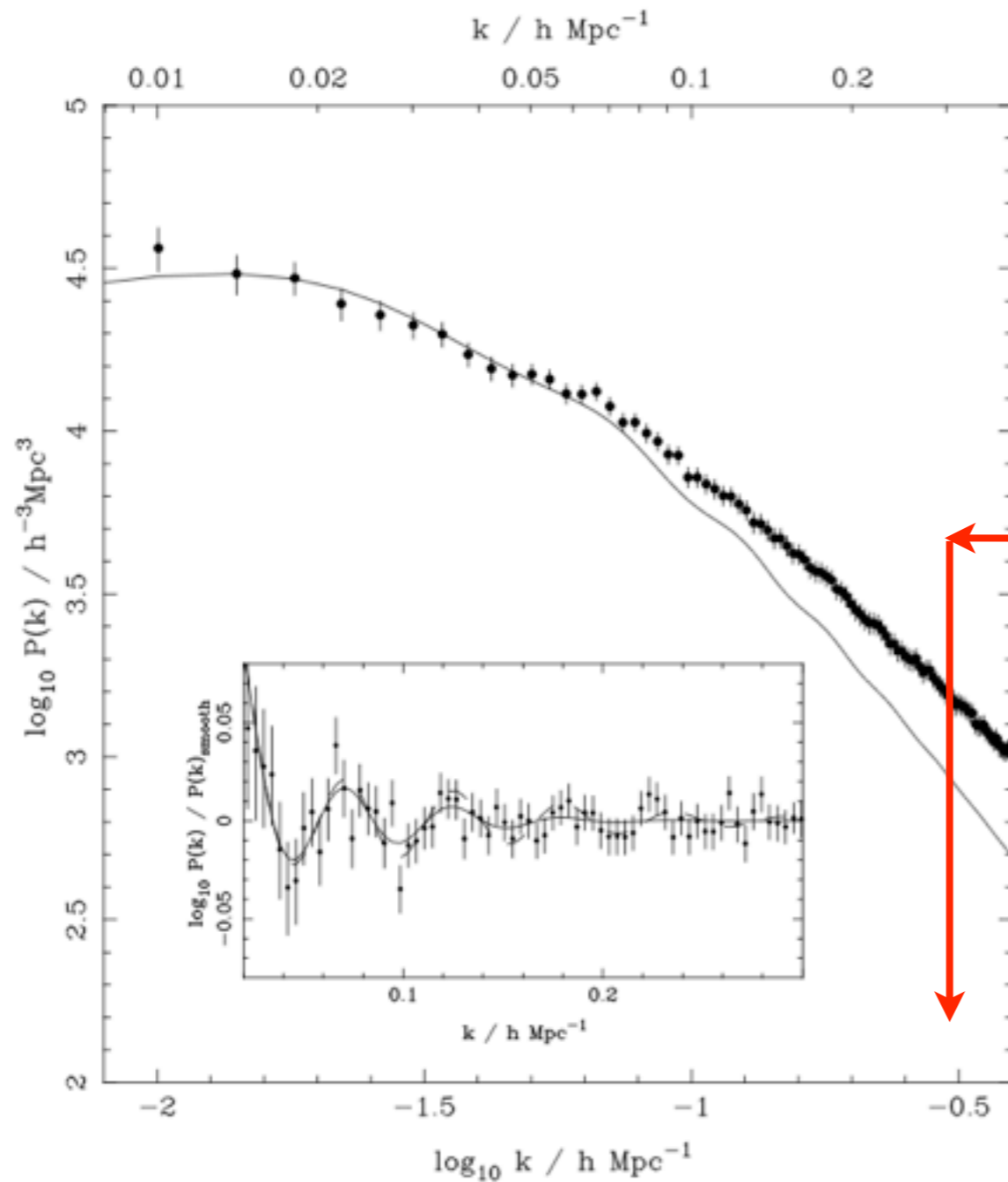
2. La “potenza spettrale” $P(k)$ confrontata con HDM e CDM

- La funzione $P(k)$ rappresenta la frequenza con cui osserviamo strutture con dimensioni lineari $\lambda=2\pi/k$
- Si deduce dalla distribuzione in 3D delle galassie, fornita ad es. dalla Sloan Digital Sky Survey (SDSS, 2006)
- ha un picco intorno a $\lambda \sim 30-50$ Mpc e decresce verso valori più piccoli di λ



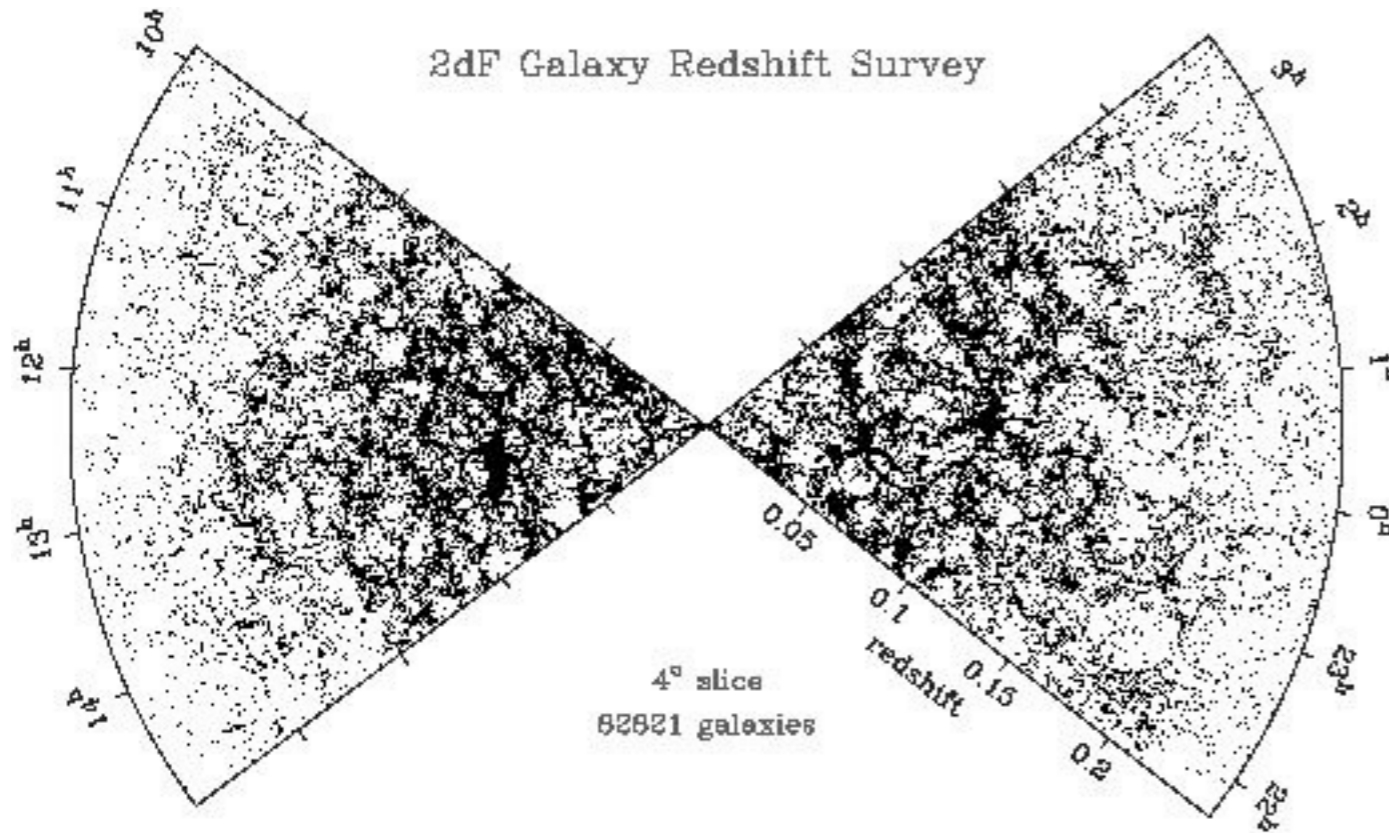
- Se la HDM fosse la componente dominante della DM, la formazione di strutture di piccole dimensioni sarebbe impedita dal free-streaming: di qui il crollo precipitoso sotto i 10 Mpc della potenza prevista per 100% di HDM
- ogni tipo di materia che è già non relativistica quando cessa di interagire con la materia del plasma primordiale, si indica come: Cold Dark Matter, CDM, e permette di formare strutture di scala molto inferiore, Cluster di galassie o anche singole galassie
- CDM riproduce meglio di HDM la funzione $P(k)$, anche se non perfettamente.

SDSS-spettro di potenza delle galassie

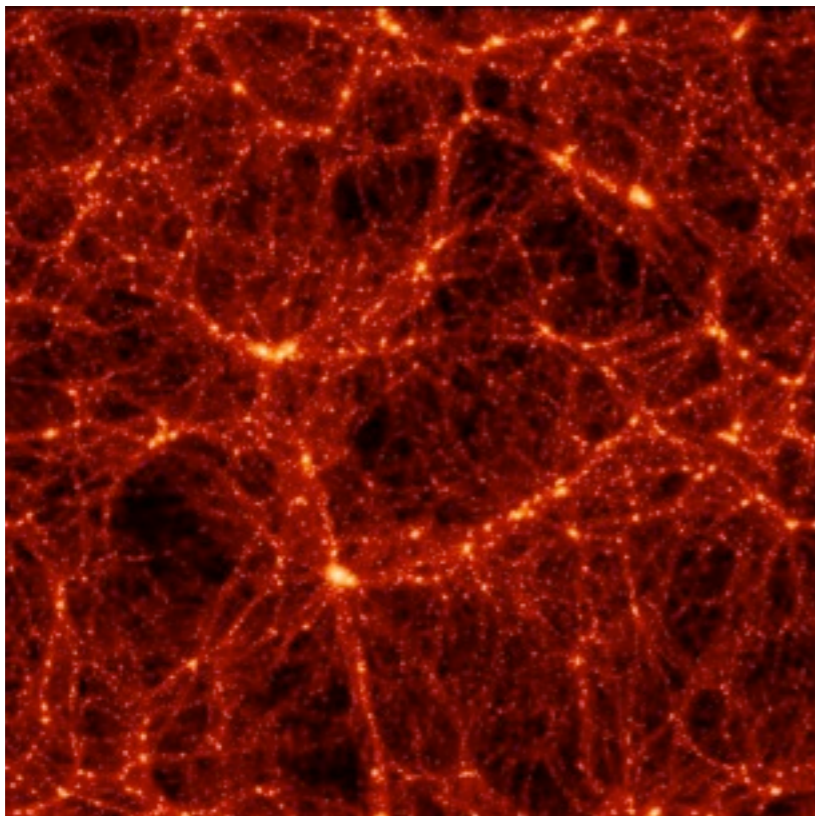


- Lo spettro di SDSS (2006)
- lo spettro di Hot Dark Matter (neutrini leggeri) finisce qui

Cataloghi 2D (direzione e red-shift)



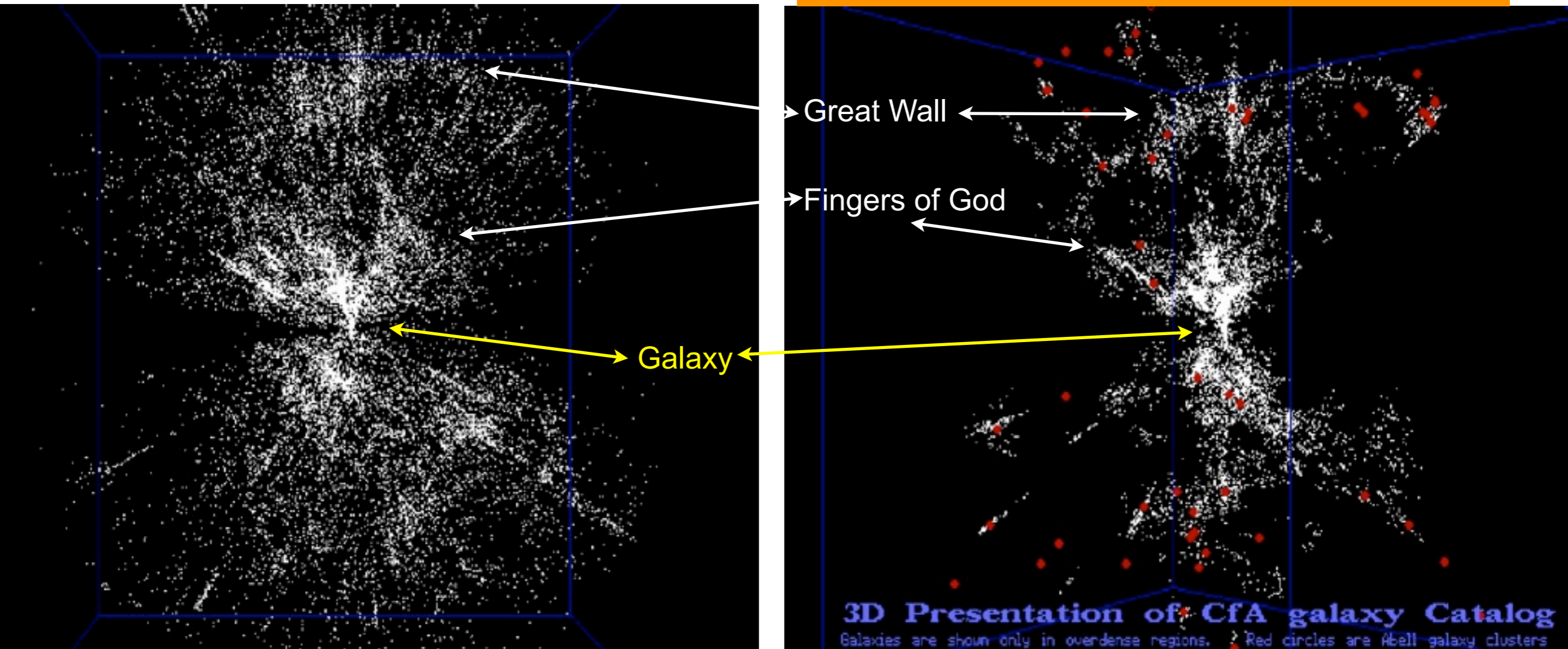
- The distribution of galaxies as obtained by the 2 degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS). Each galaxy is represented by a black dot. The observer on Earth is located at the center of this ``butter-fly'' shaped diagram. The radial distance from this center indicates the redshift of each galaxy, while the angle corresponds to the position on the sky. The challenge for astrophysicists is to link this distribution of galaxies to that of dark matter halos shown in Figure 1.



The distribution of dark matter obtained from a large numerical simulation. Note how the dark matter is clustered into dark matter halos, which are connected by a large filamentary network. It is from simulations like these that astrophysicists have obtained a detailed understanding of the abundance and clustering of dark matter halos. This particular simulation is performed by the Virgo consortium, including scientists from the Max-Planck Institute for Astrophysics (see Jenkins et al. 1998, Astrophysical Journal, 499, 20-40)

Distribuzione su larga scala delle galassie

On this plot only galaxies from overdense regions are shown.



- 3D distribution of approximately 30000 galaxies from CfA Catalog. The Milky Way is in the center of the plot. Its plane is horizontal which can be seen as so-called zone of avoidance - dark empty horizontal cones. **The vertical scale of the plot is 160 Mpc** ($q_0=0.5$, $H_0=100$). Note the numerous "fingers of God" - the chains of galaxies which pointing to the Milky Way (the well know artefact which is explained by velocity dispersion in galaxy clusters. See next plot). Note also the long curved chain of galaxies in the upper part of the plot - the famous Great Wall.

per chi vuol essere essere preciso

- dal catalogo delle galassie in funzione della distanza, si ottiene la densità media $\langle \rho \rangle$, e si considera la fluttuazione frazionaria di densità $\delta(\mathbf{x})$:

$$\delta(x) = \left[\frac{\rho(x)}{\langle \rho \rangle} - 1 \right]$$

- si costruisce poi la funzione di correlazione:

$$\begin{aligned} \xi(\mathbf{x}', \mathbf{x}) &= \langle \delta(\mathbf{x}') \delta(\mathbf{x}) \rangle = \\ &= \xi(\mathbf{x}' - \mathbf{x}) \text{ (Principio Cosmologico)} \\ &= \xi(|\mathbf{x}' - \mathbf{x}|) \text{ (Isotropia)} \end{aligned}$$

- La “potenza spettrale “ e’ la trasformata di Fourier della funzione di correlazione:

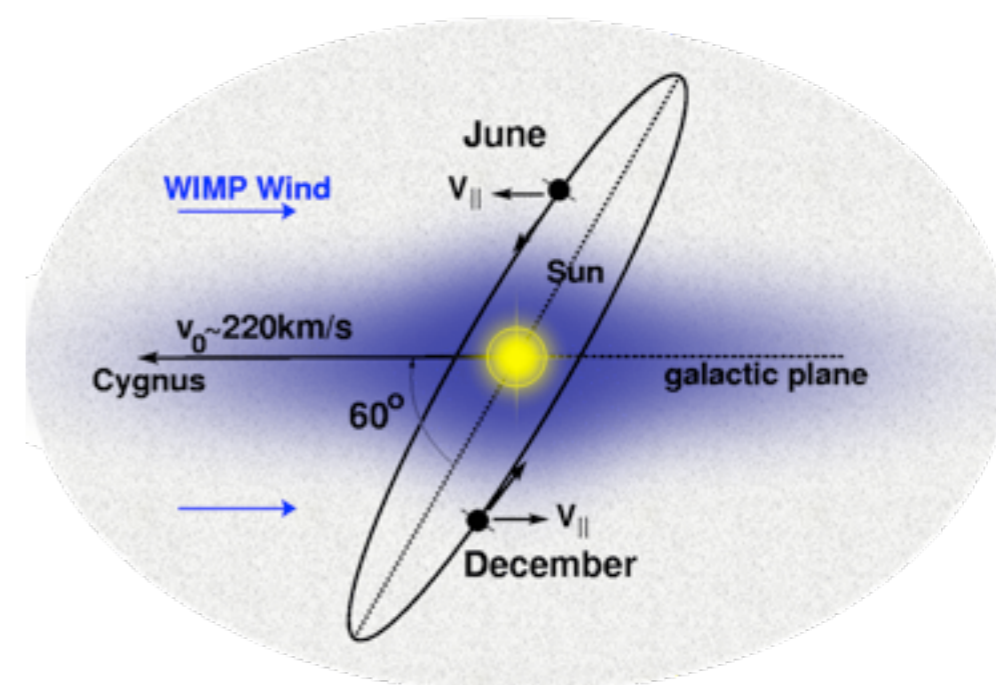
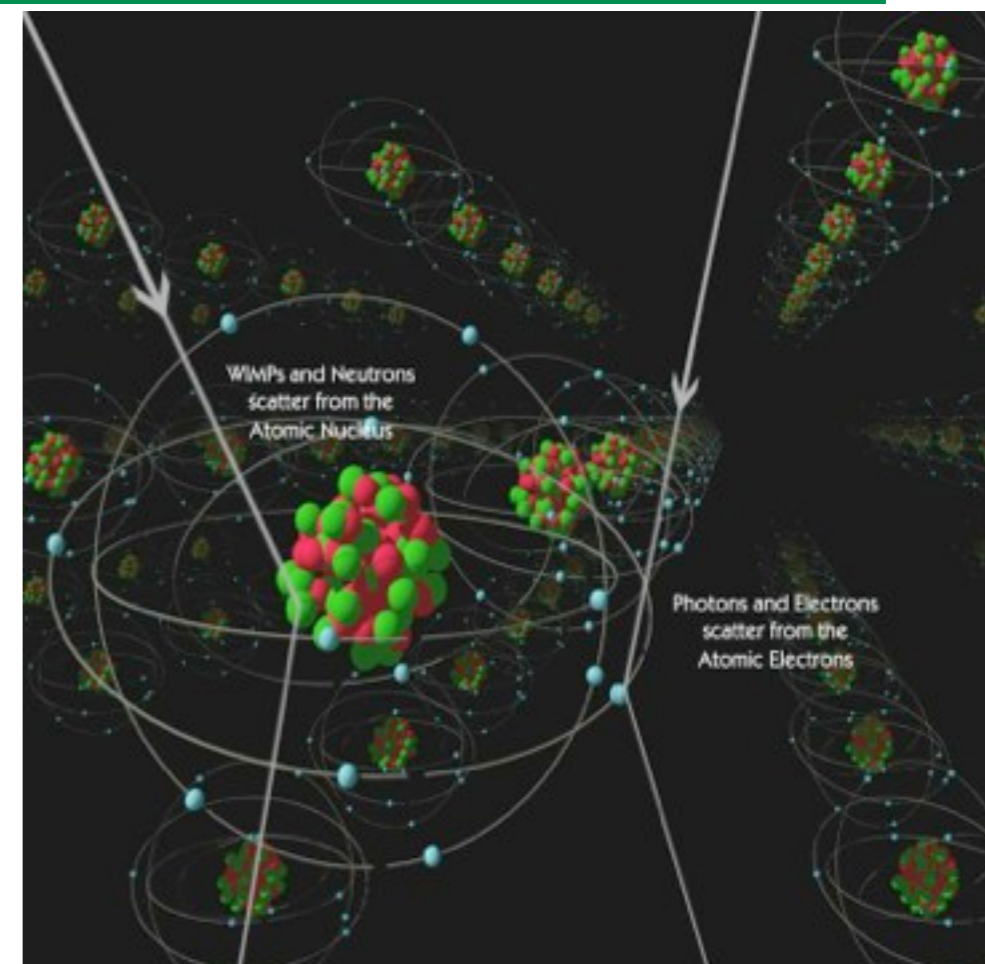
$$P(\mathbf{k}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \xi(r) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} d^3\mathbf{x} = \frac{1}{4\pi^2} \int \xi(r) e^{ikr \cos \theta} r^2 dr d \cos \theta = \frac{1}{2\pi^2} \int \xi(r) \frac{\sin kr}{kr} r^2 dr = P(k)$$

3. WIMPS (Weak Interactive Massive Particles)

- Particelle che hanno solo interazioni di intensità confrontabile alle interazioni deboli ma sono pesanti, $M > 1 \text{ GeV}$, o molto pesanti, $M > 1 \text{ TeV}$
- si assume che almeno una di esse sia stabile, o con vita media > 10 Miliardi di anni
- Wimps sono il prototipo di Cold Dark Matter, ma non l'unico esempio (cfr. Assioni)
- originano nei primi istanti del Big Bang. Quando la temperatura scende sotto un valore critico, $T \ll M$, si disaccoppiano dal plasma caldo primordiale
- Nubi di Wimps possono collassare generando strutture su scale di 10 Mpc, tipo cluster di galassie, che poi frammentano in galassie
- Wimps presenti nell'alone della nostra galassia formano un fondo su cui la Terra scorre a circa 200 km/sec, quindi possono urtare un nucleo dei nostri rivelatori, producendo neutroni e altre particelle osservabili.
- Witten e Goodman sono stati i primi a proporre la rivelazione diretta di urti “spontanei” in blocchi di materia **Detectability of certain dark-matter candidates, M. W. Goodman and E. Witten Phys. Rev. D 31, 3059 (1985)**
- per schermare dal fondo (raggi cosmici, radioattività naturale) questi esperimenti sono fatti in laboratori sotterranei. Gran Sasso è uno dei laboratori più importanti.

La ricerca di Wimps nei laboratori sotterranei

- si possono rivelare urti di Wimps su nuclei discriminandoli dal fondo dalla forma del segnale
- se la sezione d'urto e' indipendente dallo spin del nucleo, si ottengono limiti piuttosto stringenti sulla massa/sezione d'urto, da confrontare con teorie specifiche dei Wimp, es. Supersimmetria
- la probabilita' di interazione dipende dalla velocita' relativa Wimp-nucleo, quindi ha una modulazione stagionale
- l'esperimento DAMA, al Gran Sasso, che osserva le interazioni attraverso la luce prodotta dalle particelle finali, ha riportato da diversi anni un segnale positivo
- se si ripetesse DAMA nell'emisfero australe si potrebbe controllare se la modulazione segue la stagione (che e' opposta, il segnale sarebbe spurio) o la velocita' della Terra (che e' la stessa, segnale reale)



- Le curve indicano i limiti superiori ottenuti dagli esperimenti indicati
- le aree indicano segnali positivi ottenuti da DAMA (cristalli di NaI), da CRESST (esperimento criogenico al Gran Sasso) e da CDMS (germanio criogenico, Soudan Mine, USA) ma non confermati dagli altri esperimenti

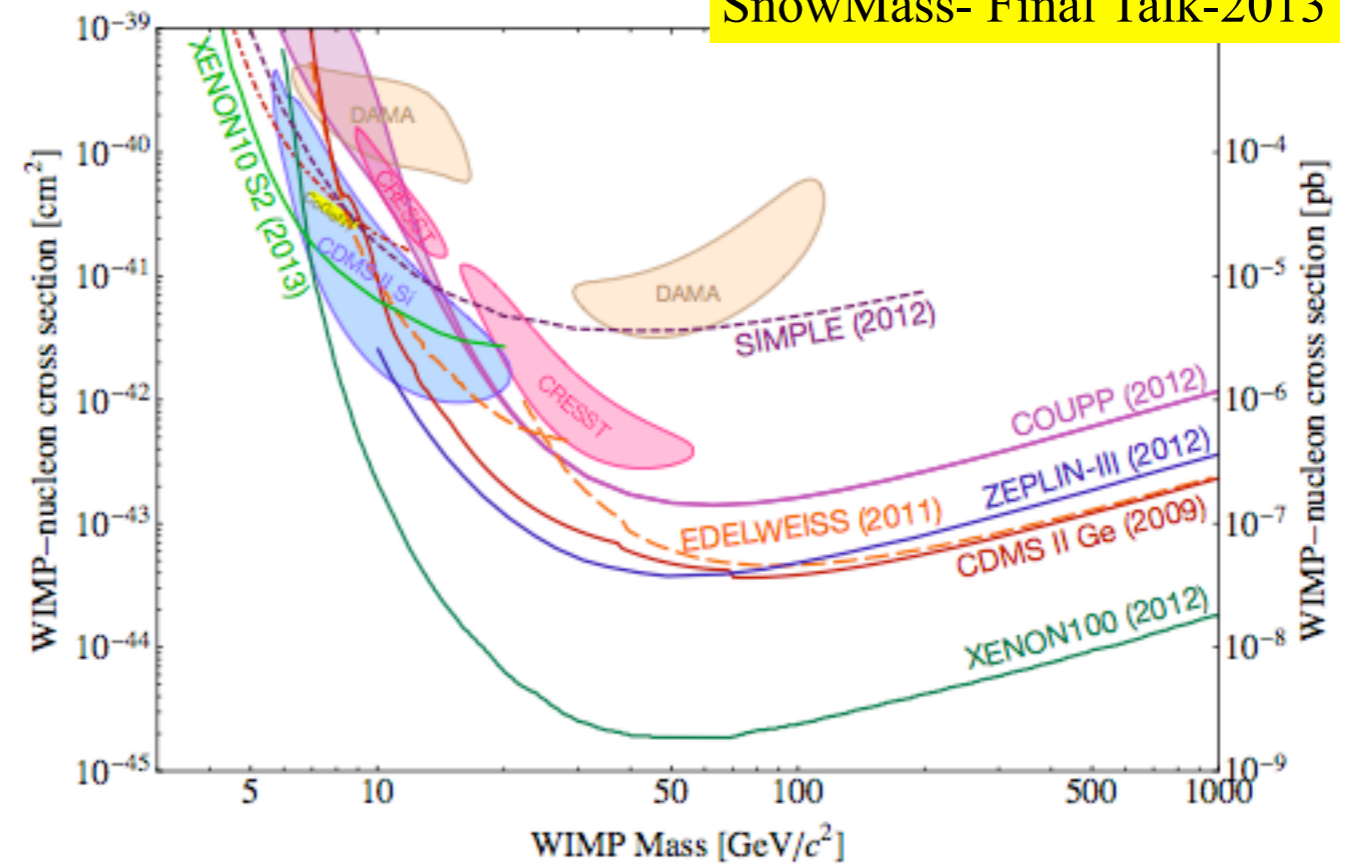


Figure 7. Spin-independent WIMP-nucleon cross section limits vs WIMP mass as of summer 2013. Experimental limits referenced [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]

- La nuova frontiera: rivelatori capaci di segnalare la direzione del WIMP iniziale, che e' correlata al moto della Terra
- nuovi metodi, nuovi materiali (cristalli, nanotubi...)

Grandi apparati criogenici per rivelare rarissimi eventi di collisione



Collaboration
Internal Page
(Restricted)
Publications
Presentations
Education &
Outreach
Photo Gallery
News

XENON100 Experiment

Collaboration
Expected
Signal
Background
Photo Gallery

External Resources

Dark Matter
Portal
Dark SUSY
Dark Matter
Limit Plot
Dark Matter
Online Tools

Collaboration

Columbia University, USA



Rice University, USA



University of California, Los Angeles, USA



University of Zurich, Switzerland



University of Coimbra, Portugal



Gran Sasso National Laboratories, Italy



INFN Turin, Italy



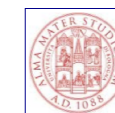
Shanghai Jiao Tong University, China



Johannes Gutenberg University Mainz, Germany



University of Bologna, Italy



SubaTech, France



University of Münster, Germany



National Institute for Subatomic Physics, the Netherlands



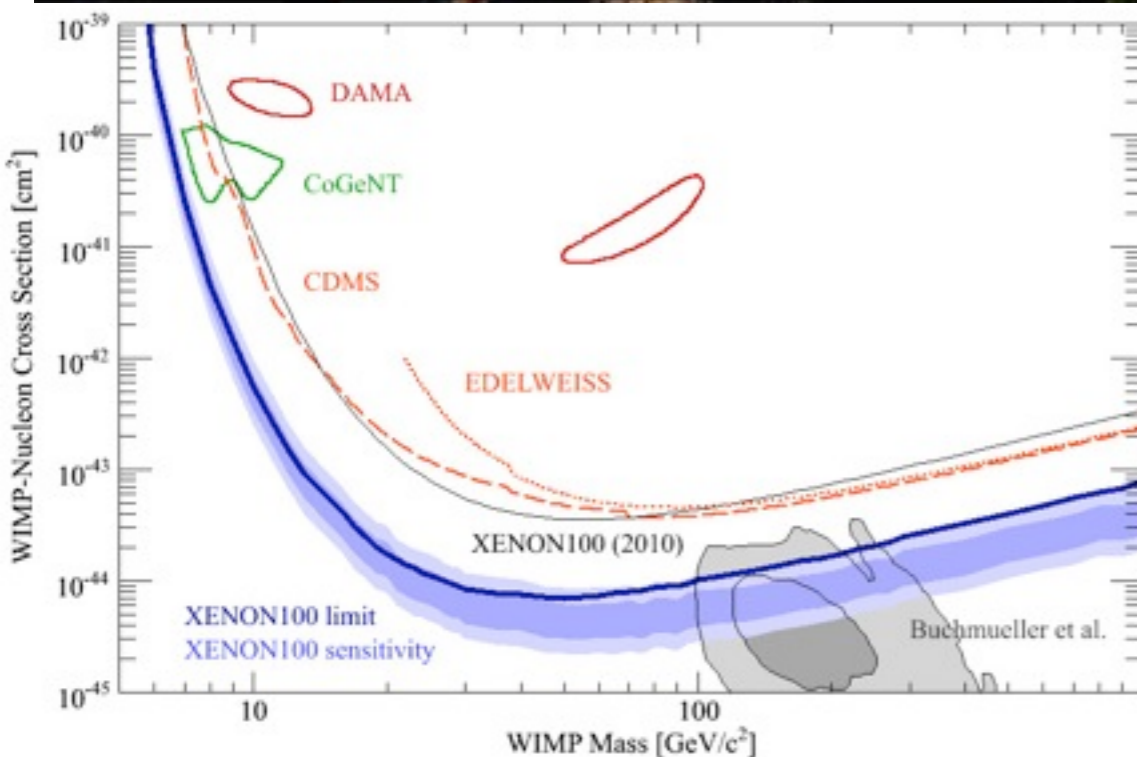
The Max Planck Institute for Nuclear Physics, Germany



Weizmann Institute of Science, Israel



Purdue University, USA



La sensibilita' del rivelatore Xenon-100 ai Laboratori del Gran Sasso dell'INFN (fascia blu), sta per raggiungere la zona dove dovrebbe incontrare il segnale previsto dalla Supersimmetria, tenuto conto dei risultati finora negativi di LHC (zona grigia)

4. WIMPs e Supersimmetria

- La particella vista al CERN è relativamente leggera: 125 in unità di massa del protone:
 - buona notizia per la Supersimmetria, che prevede che la massa sia inferiore a 135;
 - meno buona per i modelli alternativi, che avrebbero preferito una massa tra 600 e 800

Un intero mondo di nuove particelle da scoprire

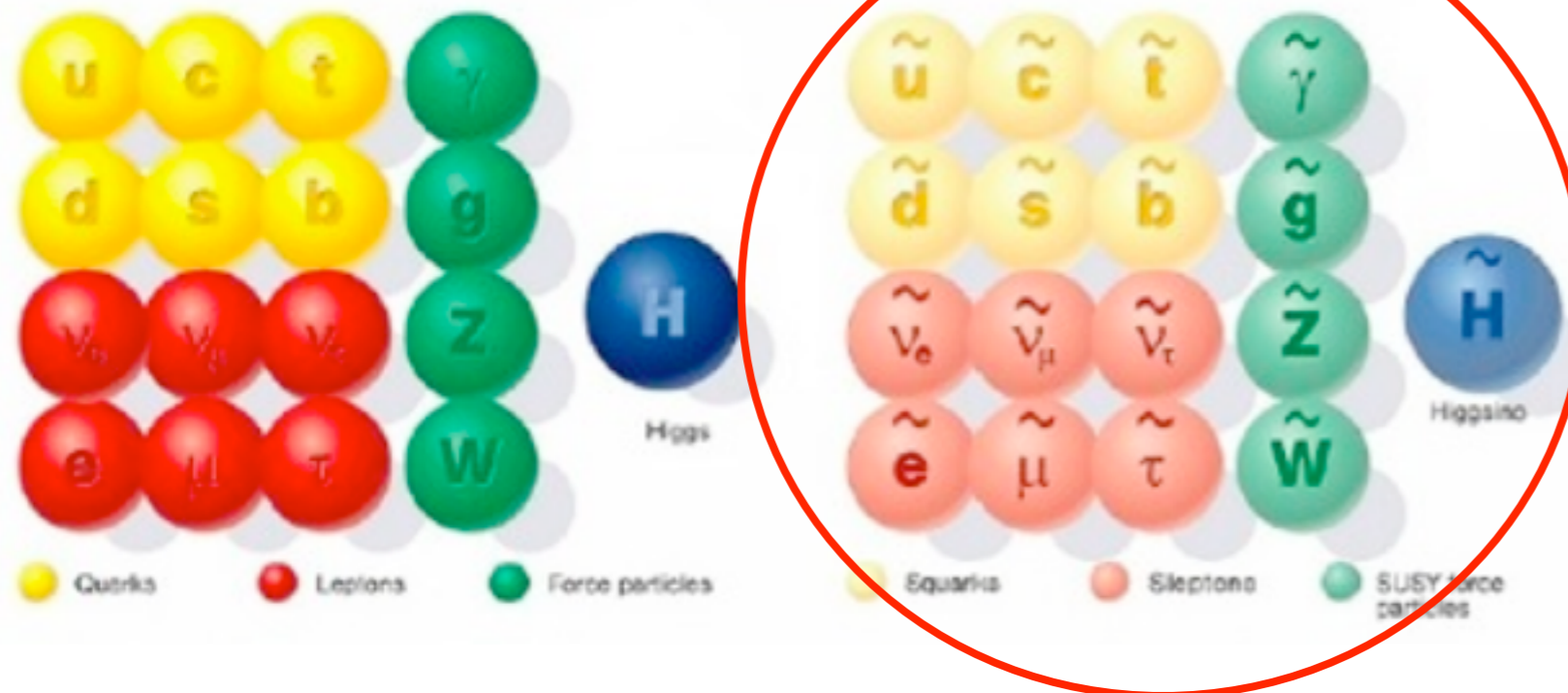
La più leggera potrebbe essere stabile

se è di tipo s-neutrino o s-higgs/s-z sarebbe il candidato ideale per la materia oscura

in questo caso,

$M=100-1000 \text{ GeV}$

SUPERSYMMETRY



Update on the direct detection of supersymmetric dark matter

J. Ellis, K. A. Olive, Y. Santoso, V. C. Spanos
Physical Review D, vol. 71, Issue 9, id. 095007 (2005)

Supersymmetric dark matter

K. Griest, M. Kamionkowski
Phys. Rep. 333 (2000) 167-182

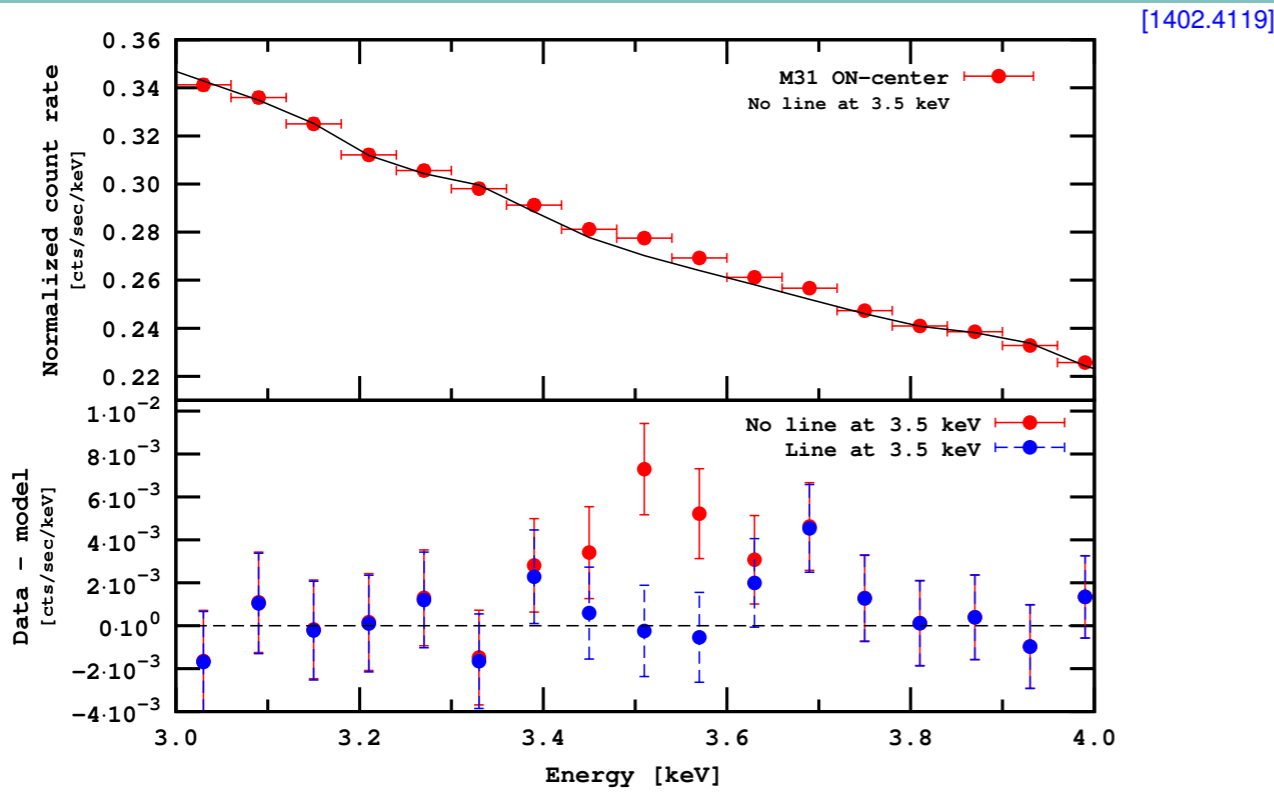
A brief review incl. direct detection and indirect detection with neutrinos and cosmic rays:

Supersymmetric dark matter

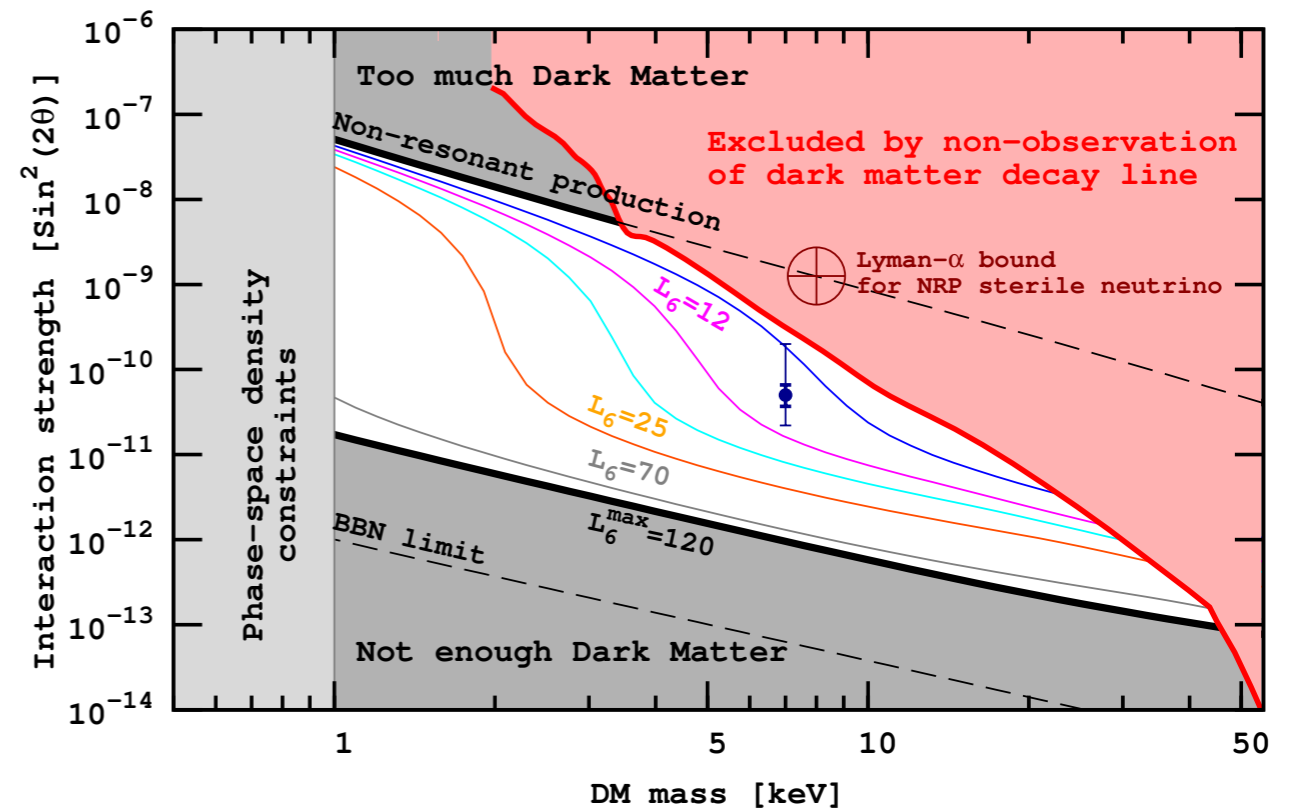
G. Jungman, M. Kamionkowski, K. Griest
Phys. Rep. 267 (1996) 195-373,

5. Neutrini massivi sterili: una forma di CDM

The unexpected 3.5 KeV line in Andromeda (una delle sensazioni del 2014)



Sterile neutrino and 3.5 keV line

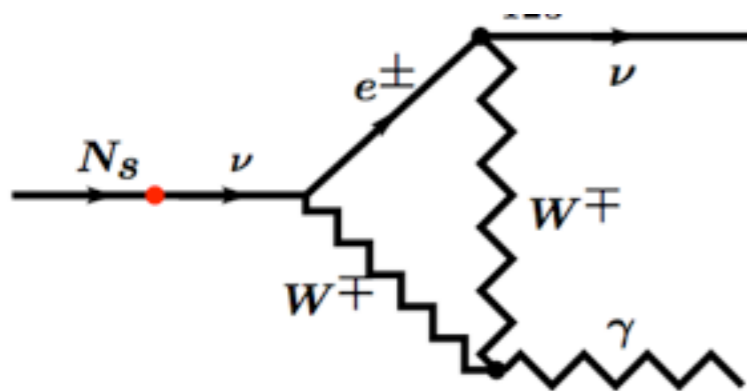


Sterile neutrino DM with such parameters is not completely cold and would leave its imprints in the formations of structures

Oleg Ruchayskiy

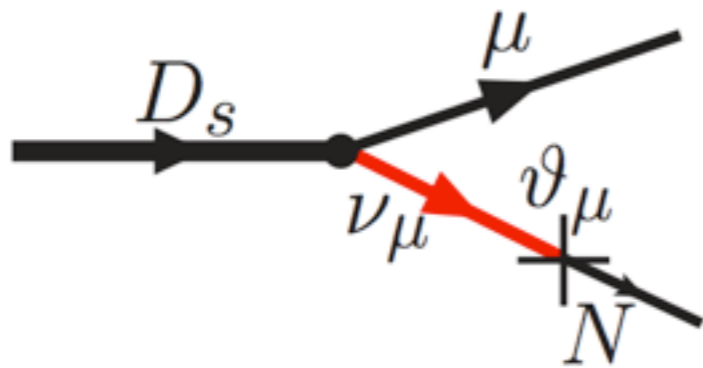
HNL IN COSMOLOGY

$$\theta^2 \approx 10^{-11}$$



SHIP proposal @ CERN

- LHC Beam dump experiment:
 - proton beam dumped into a very thick target;
 - negative pions and kaons absorbed, positive pions release ν s within nanosec. delay;
 - charmed and heavier particles release “prompt” neutrinos, with picosec. delay or shorter;
 - prompt ν s transform into N ;

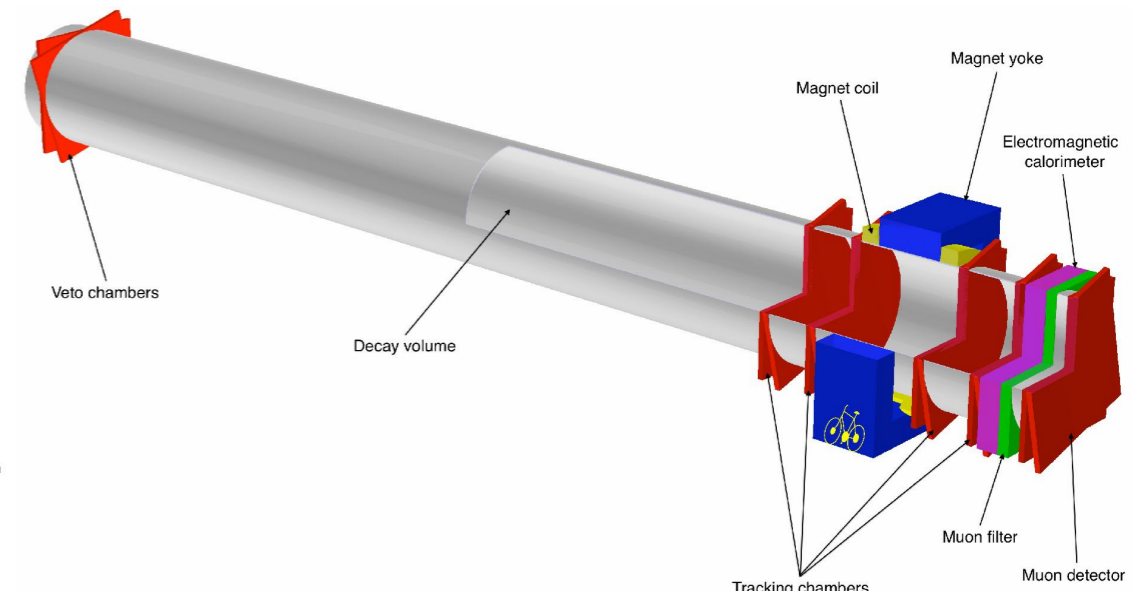


A dedicated experiment

W. Bonivento, A. Boyarsky, H. Dijkstra, U. Egede, M. Ferro-Luzzi, B. Goddard, A. Golutvin, D. Gorbunov, R. Jacobsson, J. Panman, M. Patel, **O. Ruchayskiy**, T. Ruf, N. Serra, M. Shaposhnikov, D. Treille

Proposal to Search for Heavy Neutral Leptons at the SPS

Expression of Interest. Endorsed by the CERN SPS council



- $N \rightarrow \nu + \gamma$ in the tube;
- gamma revealed.

A high risk experiment even if line exists:
 N only one of several possibilities

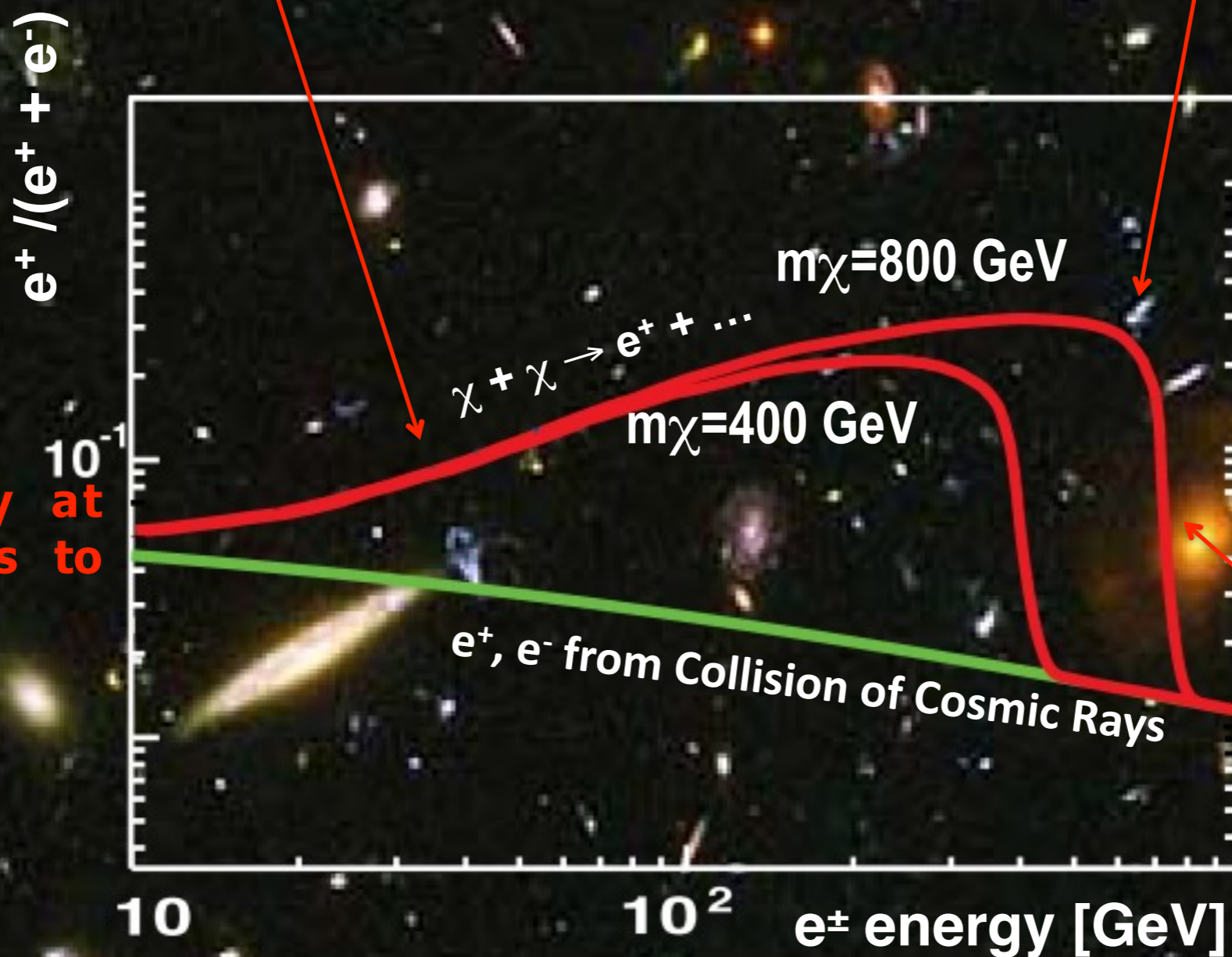


6. Antimateria da annichilazione o decadimento di WIMPS

- L'antimateria e' rara nel nostro Universo, non ci sono "isole" di AM
- positroni e antiprotoni sono prodotti nelle collisioni di raggi cosmici sul gas interstellare, con distribuzione di energia decrescente
- positroni e antiprotoni di alta energia potrebbero provenire dal decadimento di WIMP a lunga vita media oppure da processi di annichilazione tra WIMP
- e gli andamenti con l'energia dovrebbero presentare una struttura intorno alla massa dei Wimp
- esperimenti su satellite mostrano qualche segnale nello spettro dei positroni, ma di origine ancora controversa:
 - PAMELA (Italo-Russo) e' stato il precursore e ha visto una prima "anomalia" dei positroni
 - AMS (collab. internazionale con importante partecipazione italiana: INFN, ASI) installato sulla International Space Station, ha raccolto un'impressionante messe di dati, con indicazioni piu' precise sulla crescita dello spettro e sul suo punto di turn-over.

2. The rate of increase with energy
3. The existence of sharp structures.

4. The energy beyond which it ceases to increase.



5. Isotropy.

1. The energy at which it begins to increase.

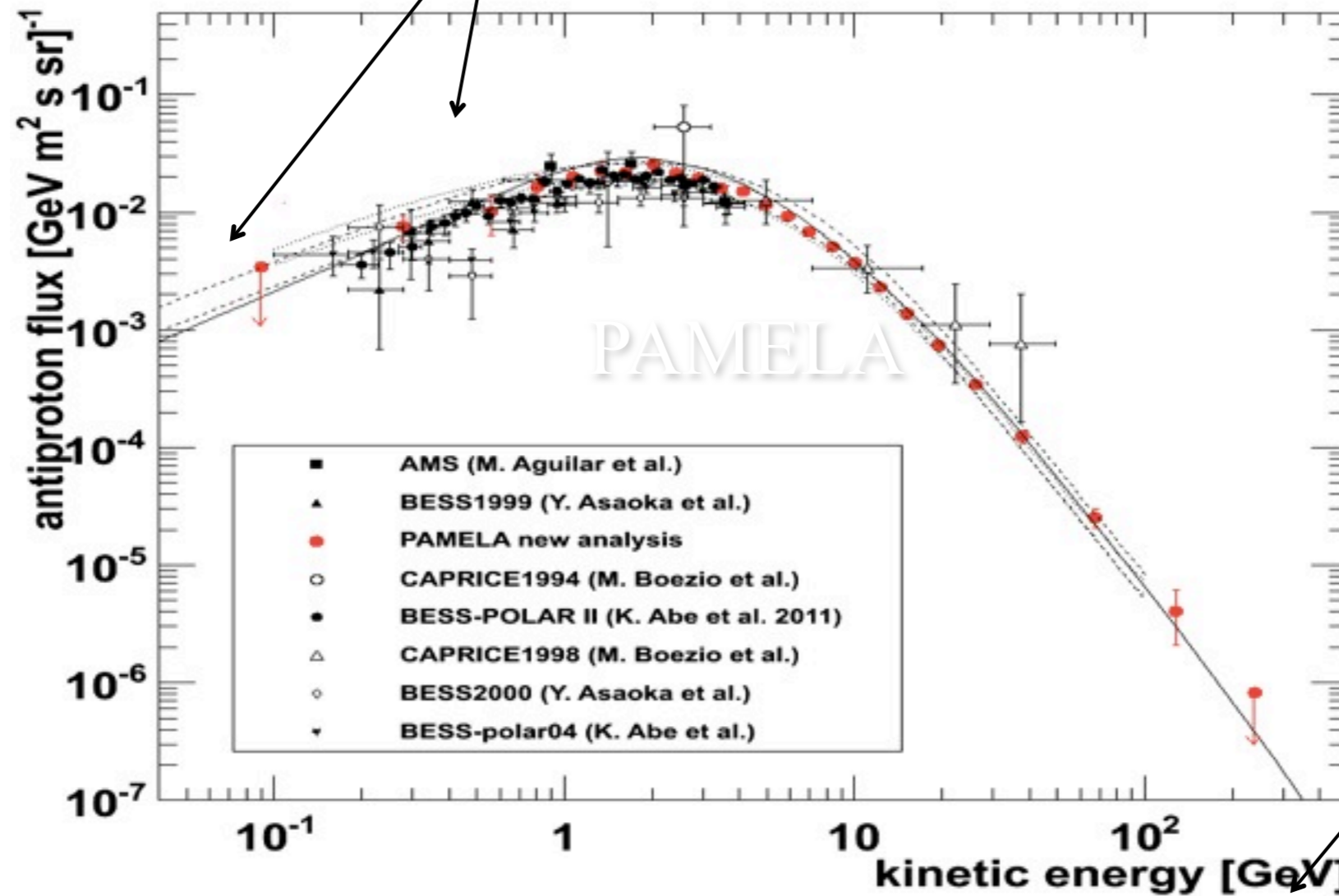
6. The rate at which it falls beyond the turning point.

Antiproton Flux

PAMELA
cortesia di P.G. Picozza



Donato et al. (ApJ 563 (2001)
172)



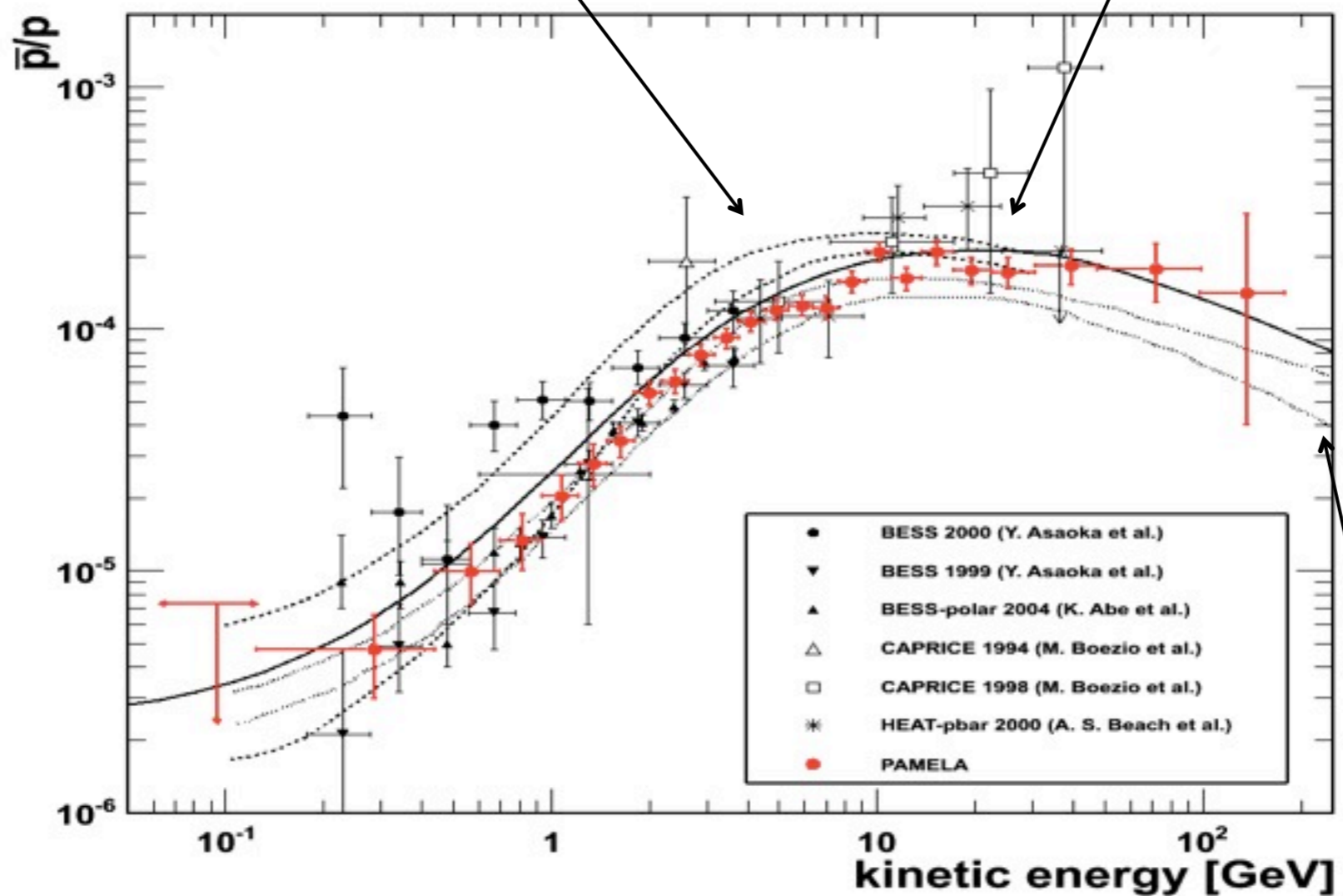
Ptuskin et al. (ApJ 642 (2006) 902)

Antiproton to proton ratio (0.06 GeV - 180 GeV)

PAMELA
cortesia di P.G. Picozza

Simon et al. (ApJ 499 (1998)
250)

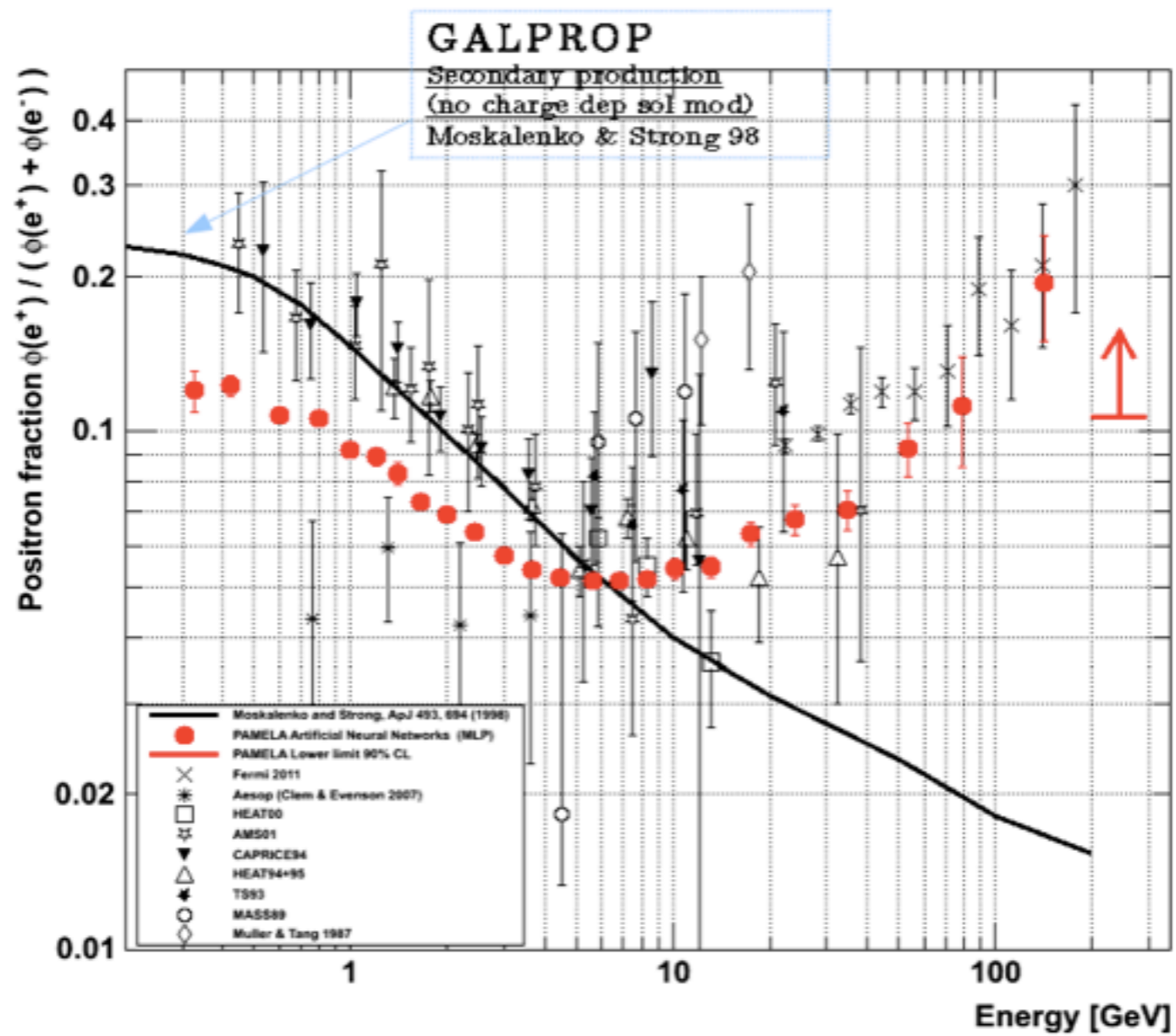
Ptuskin et al. (ApJ 642 (2006)
902)



Donato et al. (PRL 102 (2009) 071301)

Positron fraction

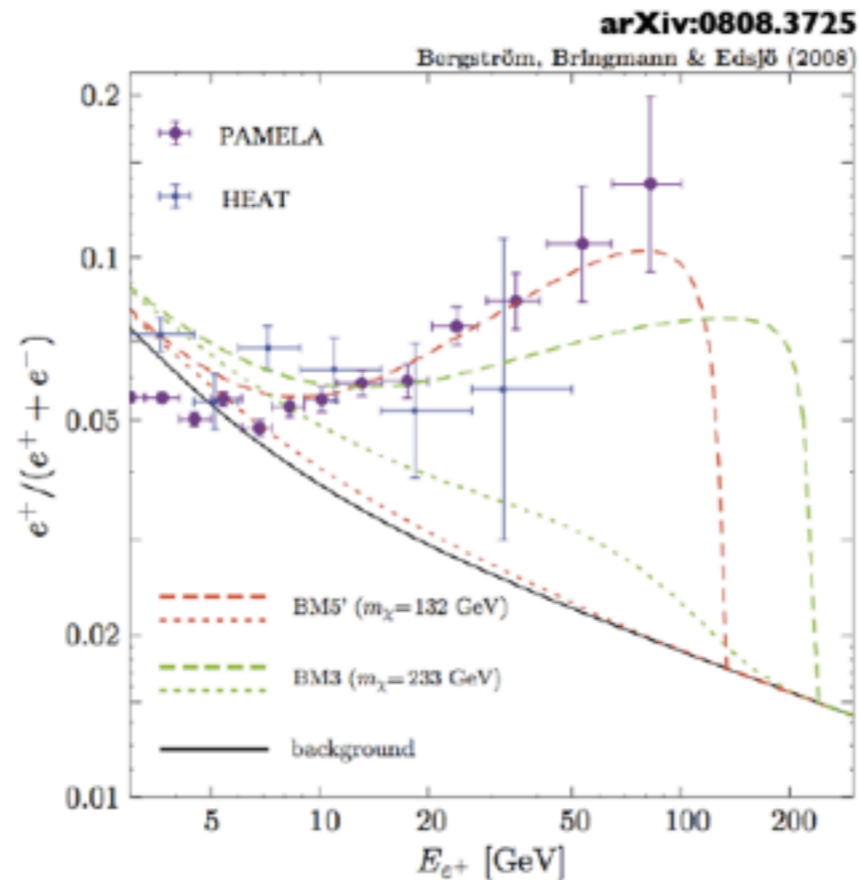
un segnale?



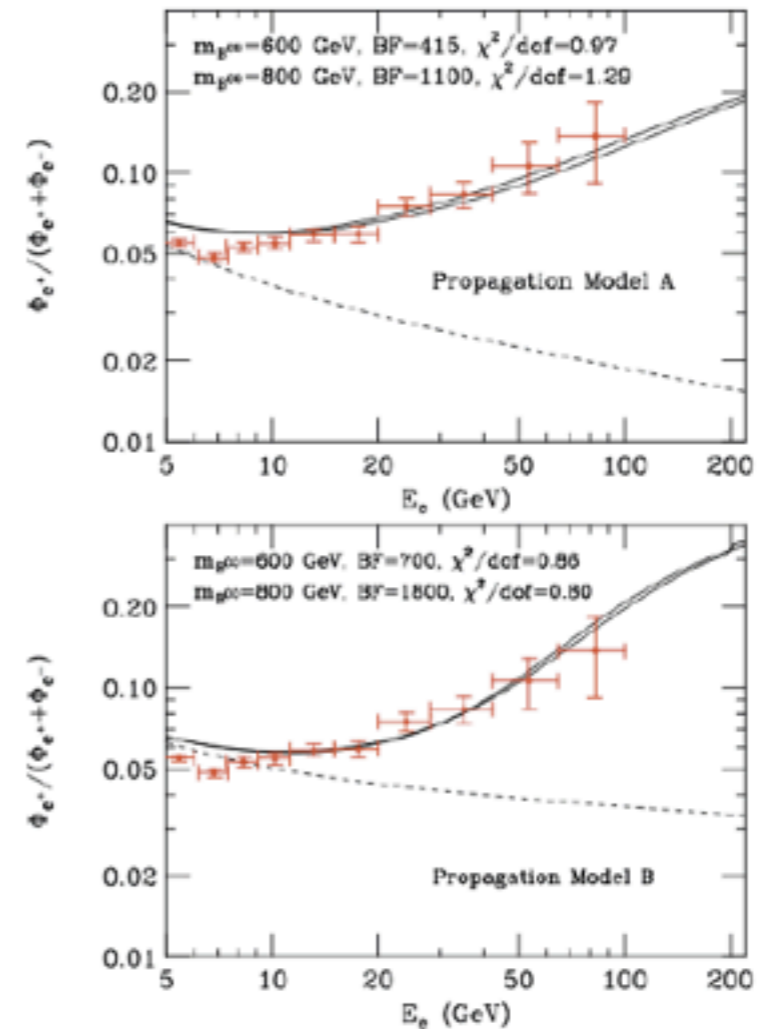
Example: Dark Matter

Phys.Rev.D8:103520,2008

Phys.Rev.D79:103529,2009



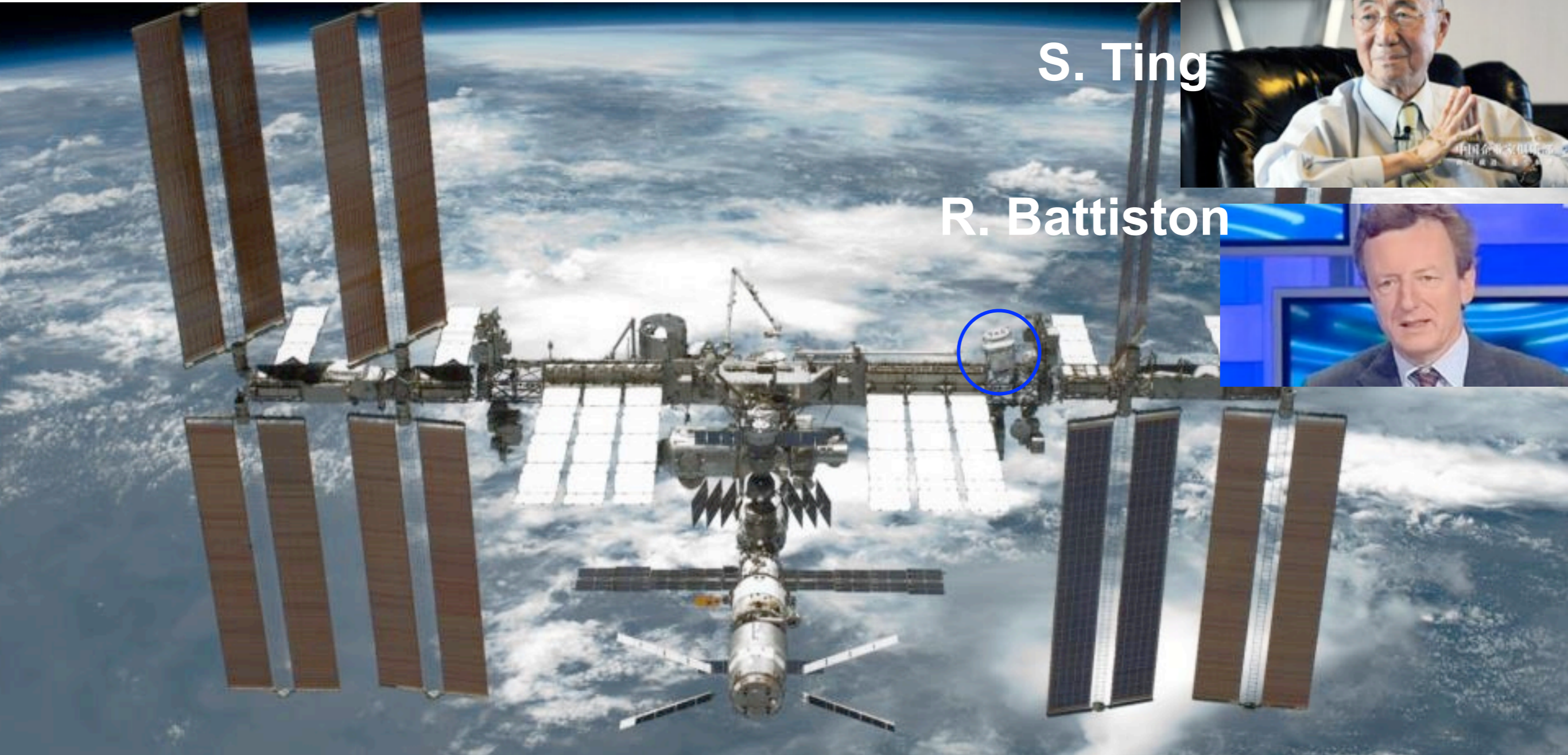
Majorana DM with **new** internal bremsstrahlung correction. NB: requires annihilation cross-section to be 'boosted' by > 1000 .



Kaluza-Klein dark matter

The Cosmos is the Ultimate Laboratory.

Cosmic rays can be observed at energies higher than any accelerator.



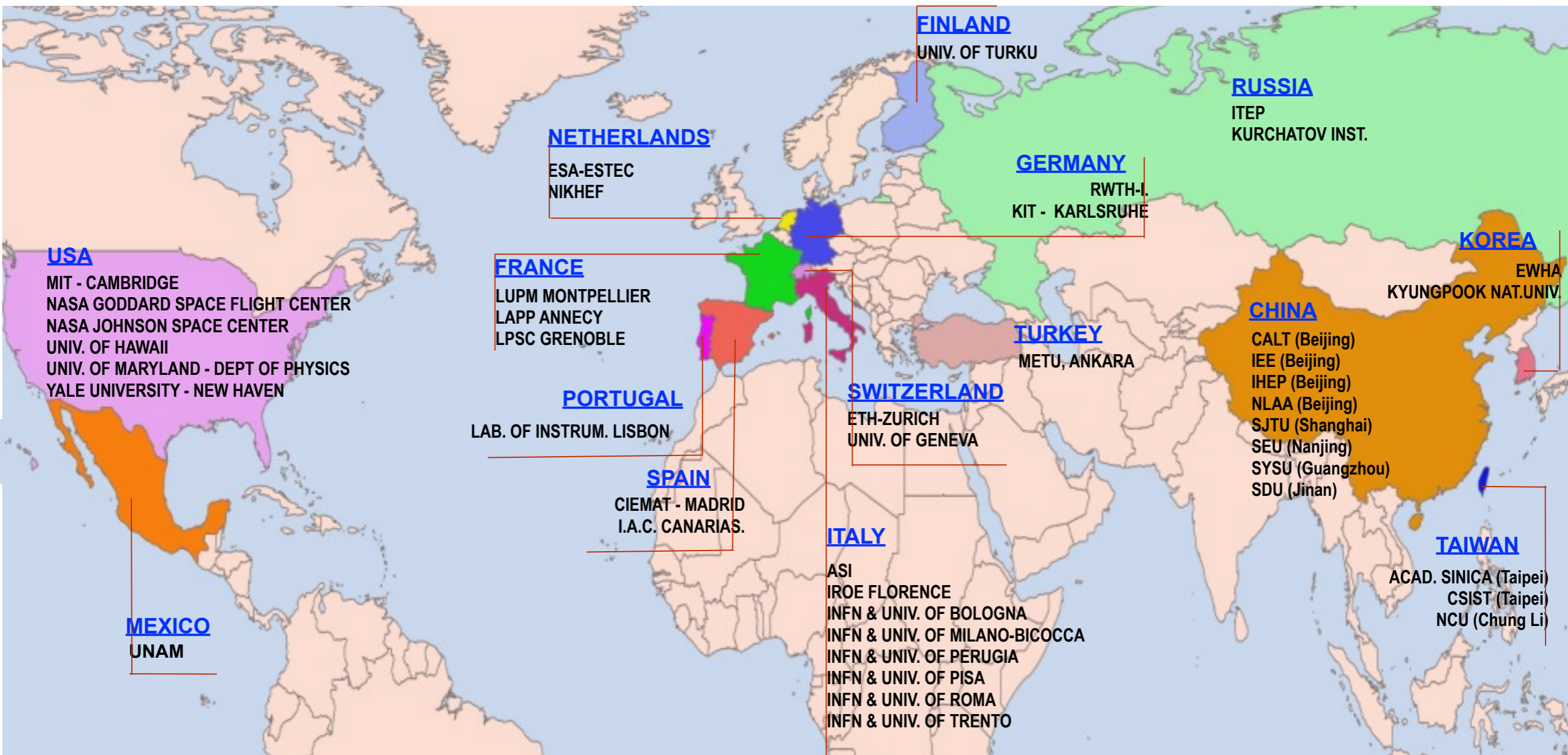
S. Ting

R. Battiston

The most exciting objective of AMS is to probe the unknown; to search for phenomena which exist in nature that we have not yet imagined nor had the tools to discover.

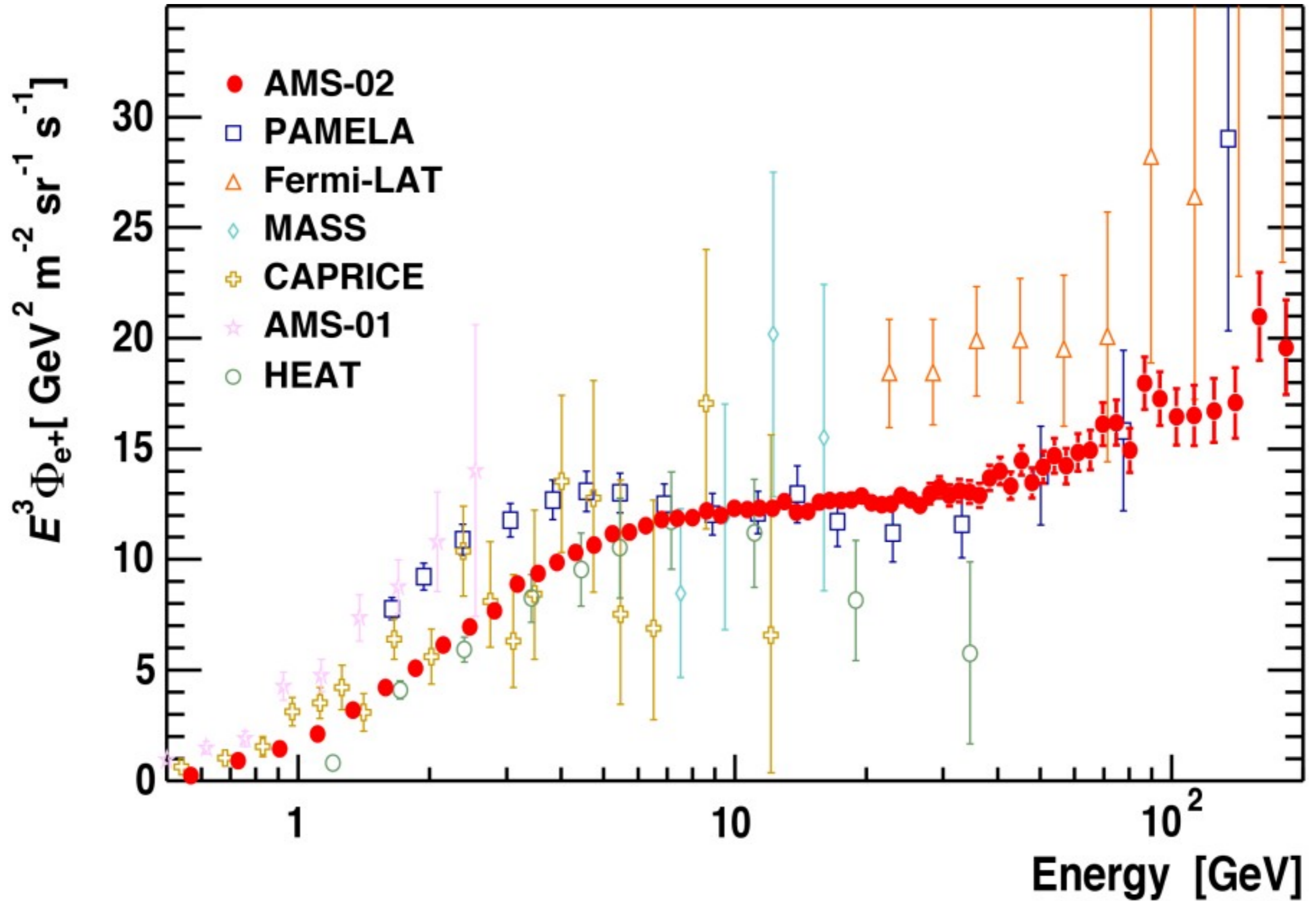
AMS is a U.S. DOE sponsored international collaboration

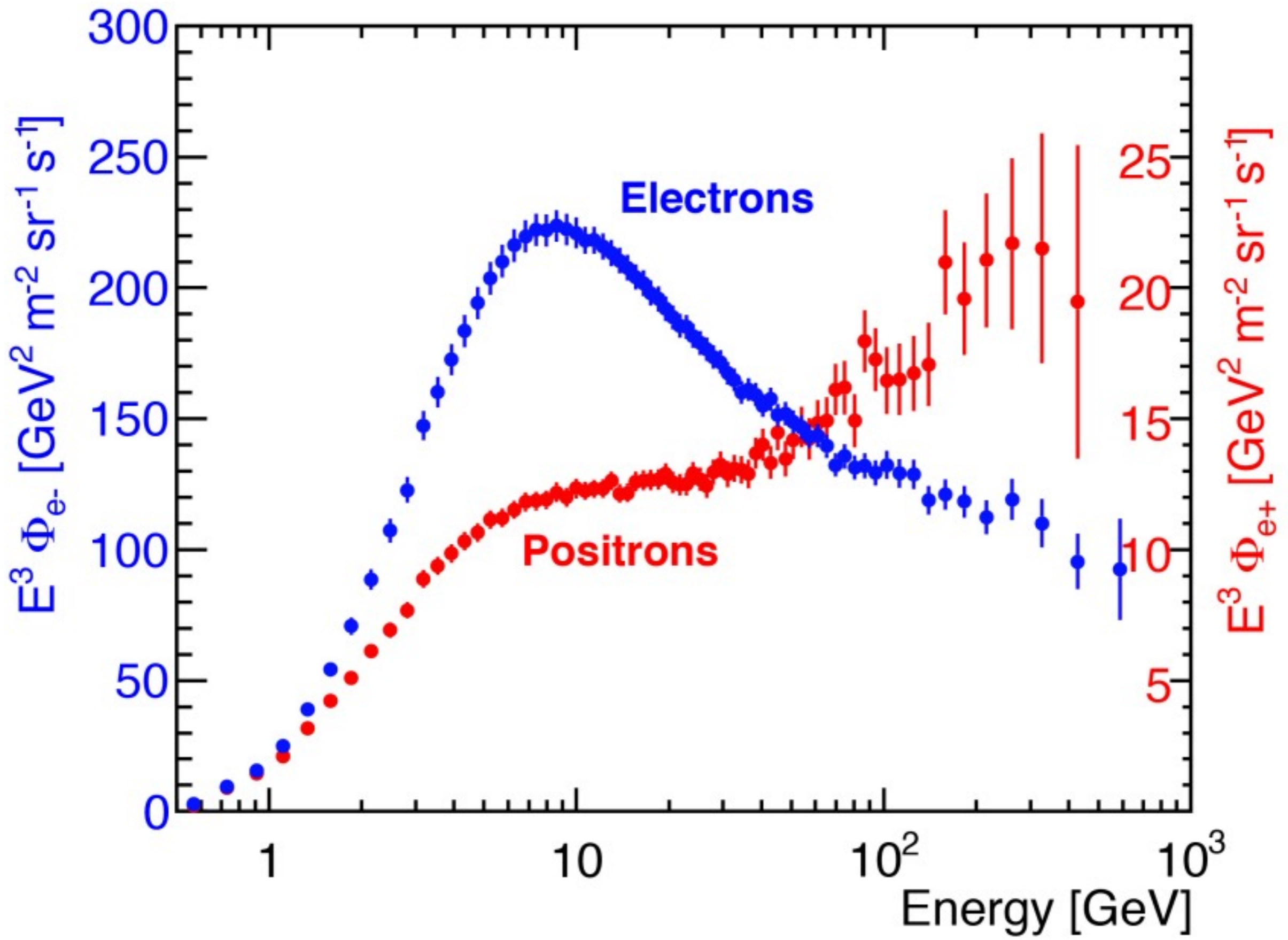
Many countries participated in the construction of AMS.
CERN provided assembly, testing and the Control Center.
ESA provided Space Qualification tests.



Strong support from
NASA (D. Goldin, C. Bolden, G. Abbey, W. Gerstenmaier, M. Sistilli, T. Martin, K. Bollweg, ...),
DOE (J. Siegrist, M. Salamon, D.Kovar, S. Gonzalez, R. Staffin, ...),
CERN (R. Heuer, R. Aymar, S. Lettow, S. Bertolucci, S. Myers, A. Siemko, ...), and
Government agencies and universities worldwide.

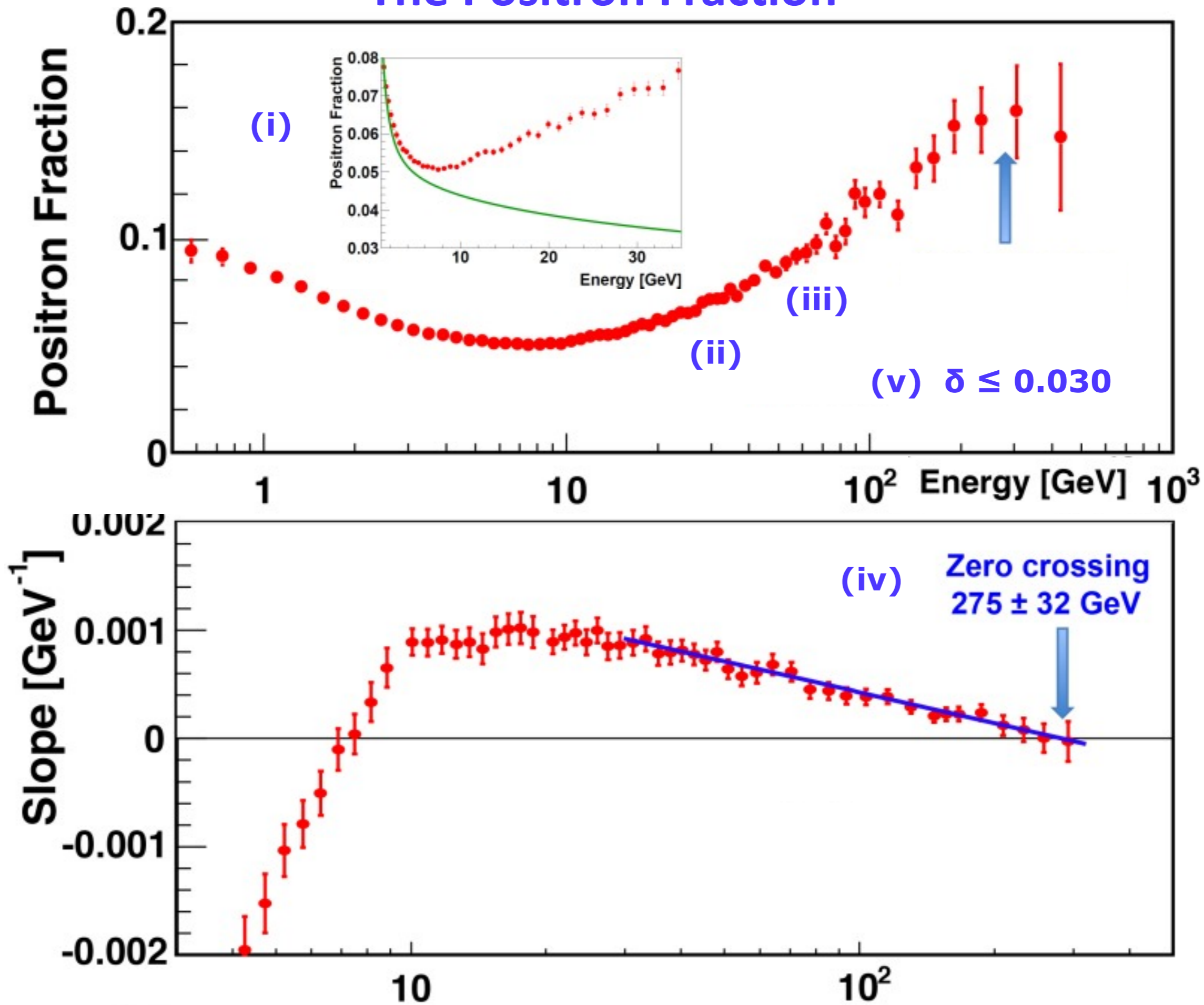
Positron Flux



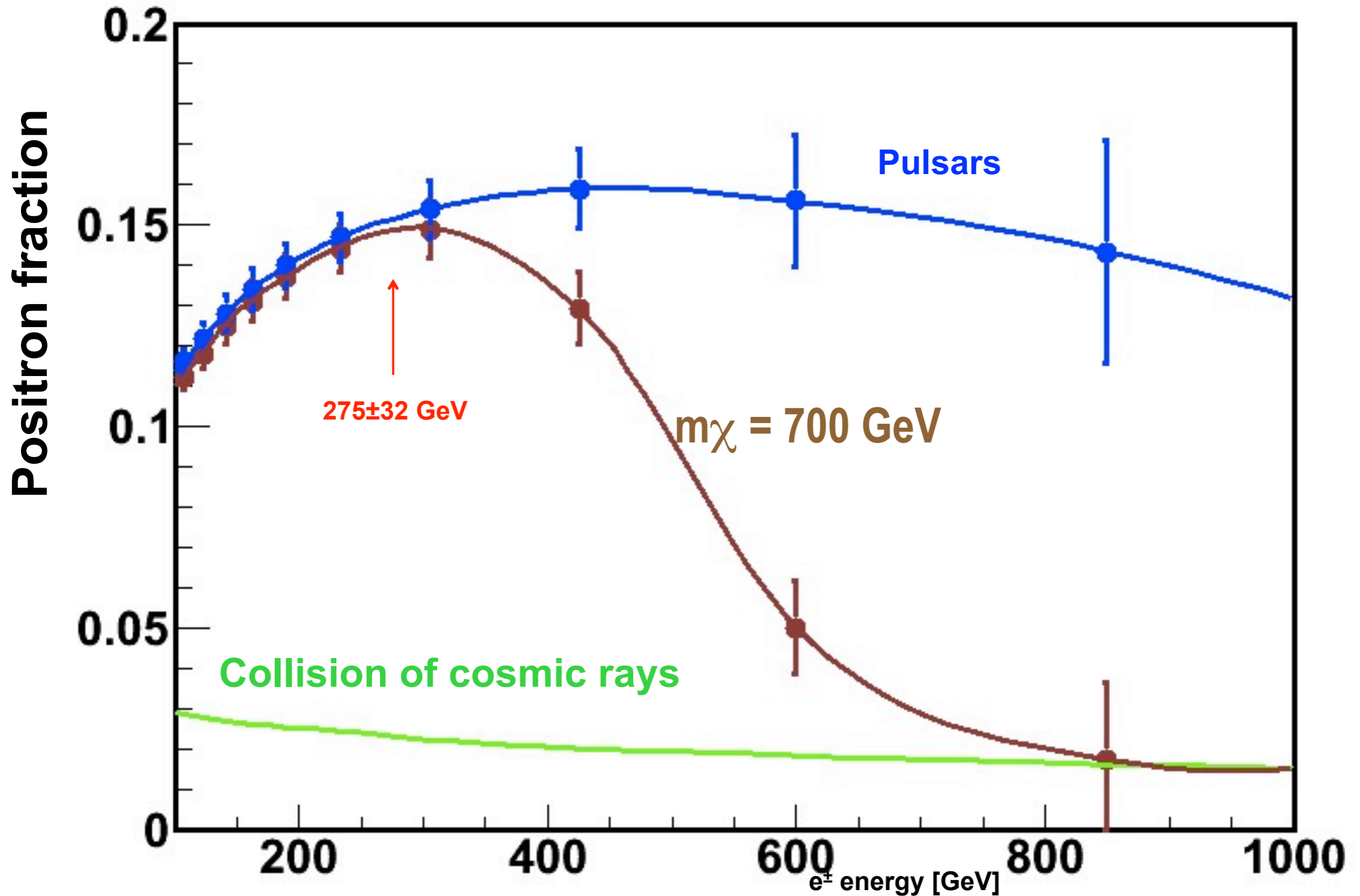


Conclusion: The electron flux and the positron flux are different in their magnitude and energy dependence.

The Positron Fraction



**(vi) The expected rate at which it falls
beyond the turning point.**



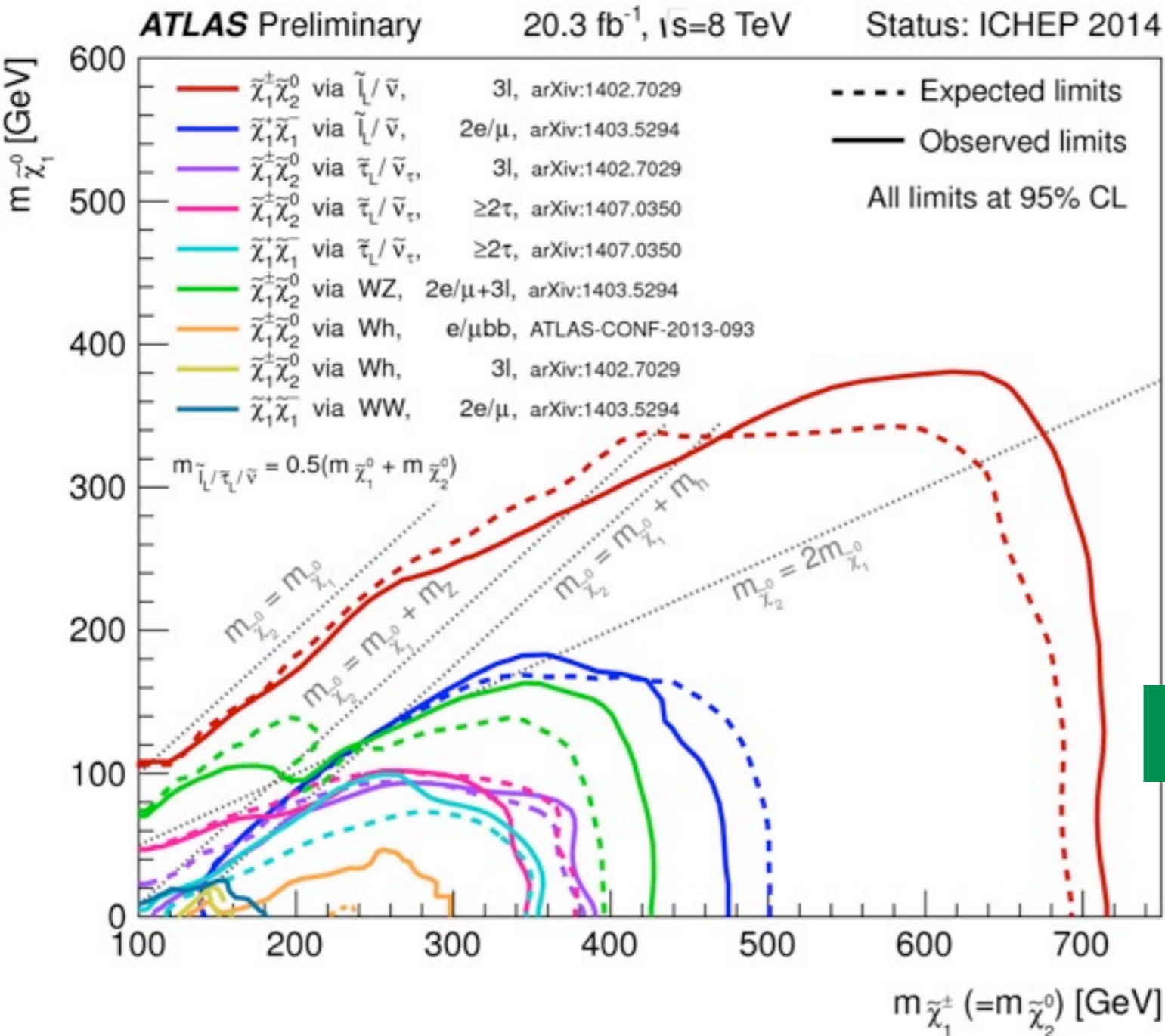
7. WIMP a LHC ?

- Nelle collisioni di LHC si producono in modo abbondante i neutrini: come?
 - con interazioni forti si producono quark metastabili che decadono in neutrini, e.g $b \rightarrow c + e + \nu$
 - con interazioni elettrodeboli si producono $W \rightarrow e + \nu$
- Analogamente, nelle collisioni ad LHC si possono produrre (se esistono a masse raggiungibili da LHC) particelle supersimmetriche con interazione forte (gluini) o elettrodebole (chargini) nei cui prodotti di decadimento si trova la particella supersimmetrica stabile
- La prima campagna dati a LHC ha prodotto solo limiti inferiori sulla masse, dell'ordine di qualche centinaia di GeV
- LHC e AMS stanno entrando nella regione di massa interessante?

Produzione elettrodebole di neutralini a LHC

- esempio di produzione a LHC:

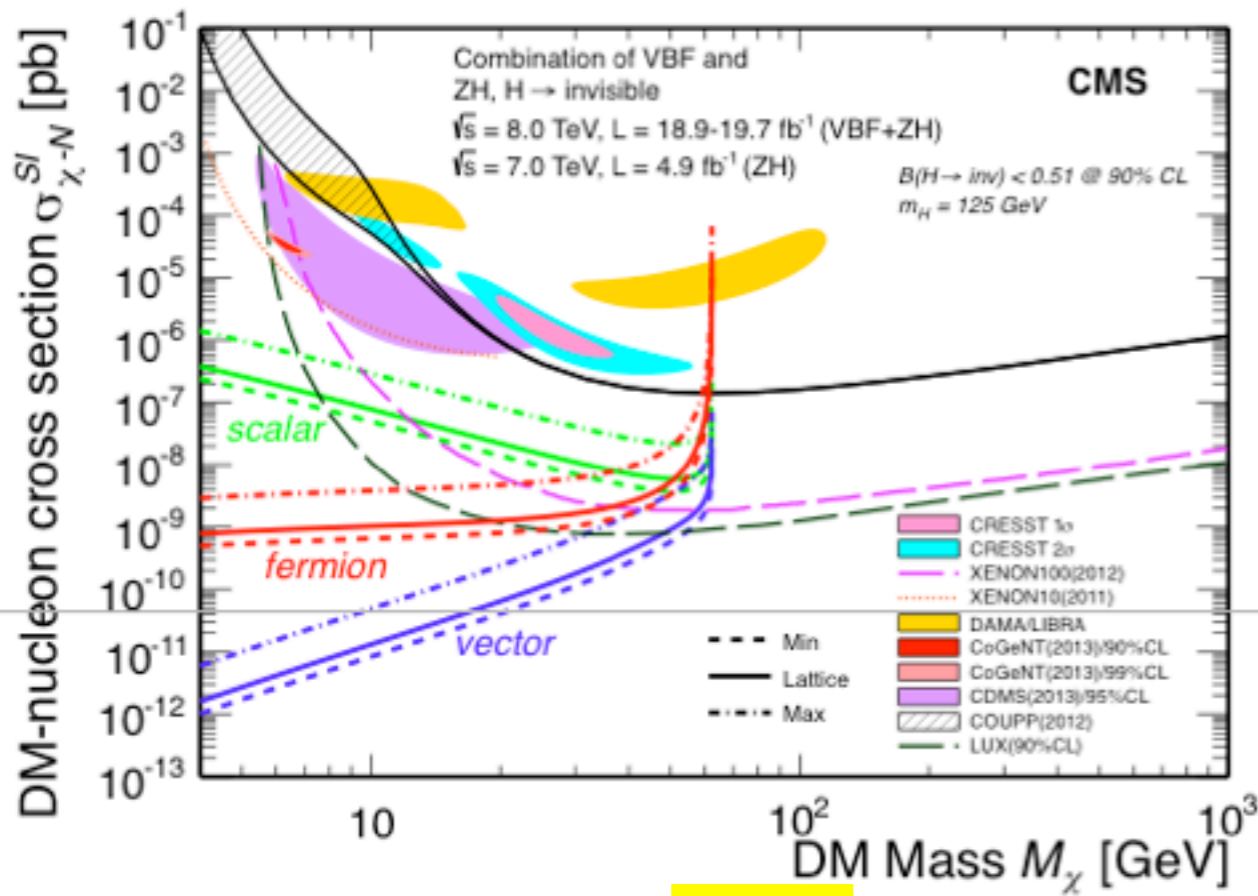
$$p + p \rightarrow W^\pm + \dots \rightarrow \chi^\pm + \chi^0 + \dots$$



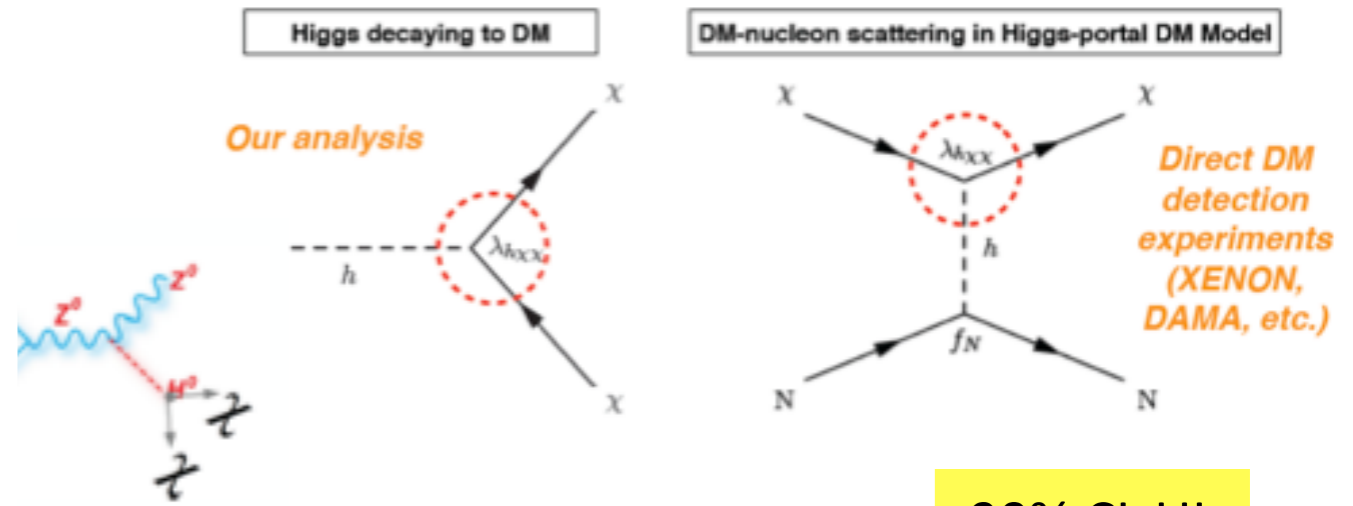
- Summary of ATLAS searches for electroweak production of charginos and neutralinos based on 20/fb of pp collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV. Exclusion limits at 95% confidence level are shown in the $m(C1)$, $m(N1)$ plane. The dashed and solid lines show the expected and observed limits, respectively, including all uncertainties except the theoretical signal cross section uncertainties.

NO GOOD NEWS, SO FAR !

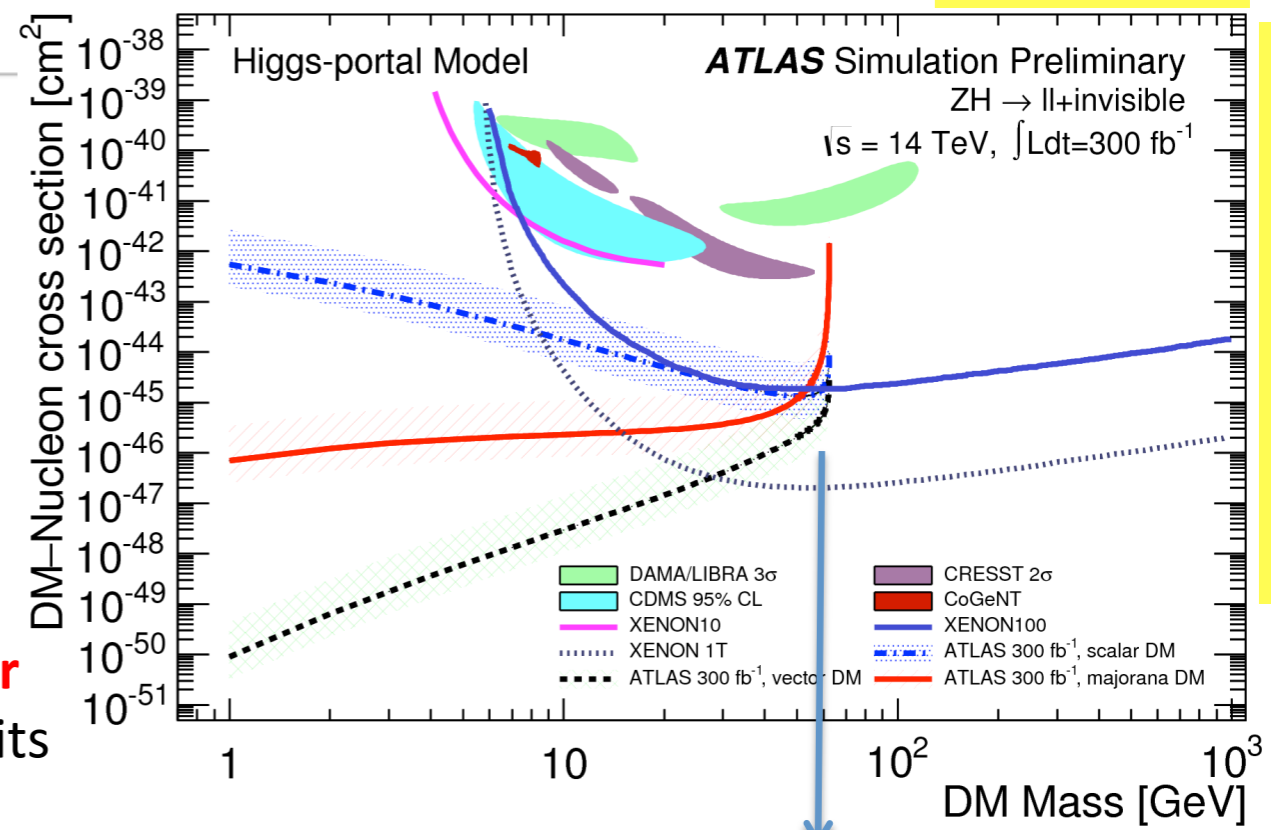
Invisible Higgs as a portal to Dark Matter



NOW



90% CL UL



ATL-PHYS-PUB-2013-014

- matter on a nuclei
- comparison with direct searches
- Limits from ATLAS at low mass better than those from direct detection limits
- degrade as m_{χ} approaches $m_h/2$

N. De Filippis

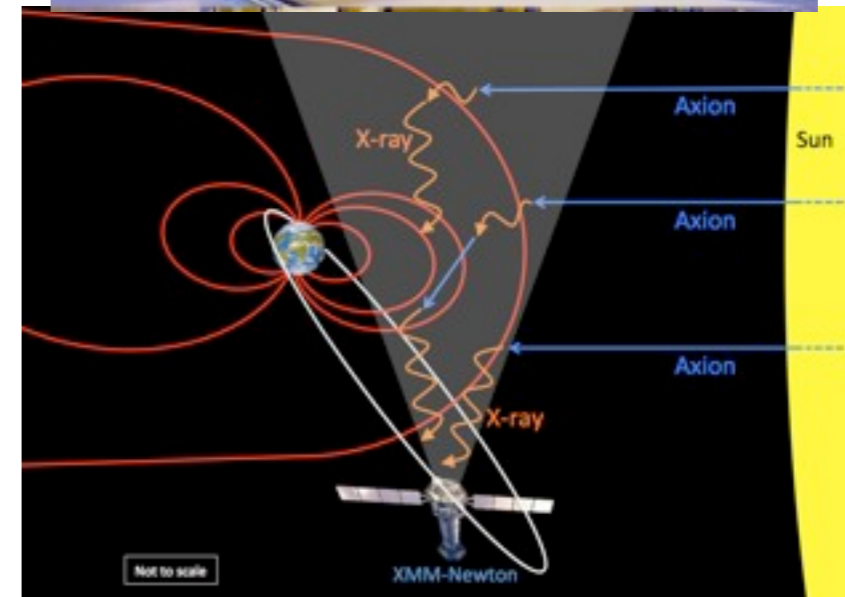
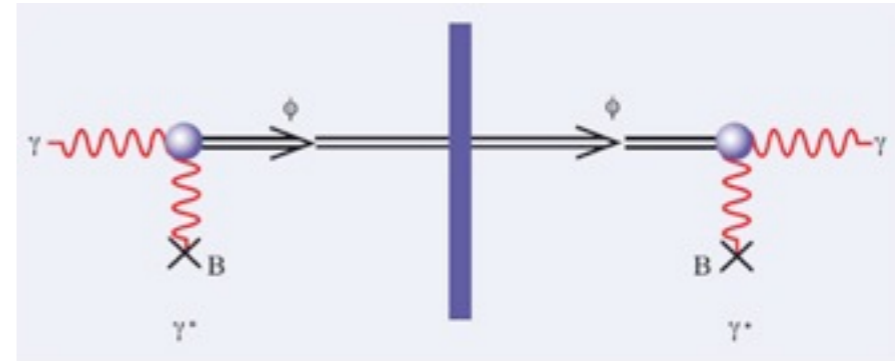
Higgs Hunting, Orsay, July 21-23, 2014

3000 fb⁻¹

26

8. Assioni: un mondo (ancora) inesplorato

- Materia oscura= Assioni
- Assioni= particelle di spin 0, leggere o superleggere ma con interazione debolissima
- quindi non sono prodotti nel plasma caldo del Big Bang, ma vengono prodotti “freddi” da campi che si generano nel vuoto
- potrebbero essere una sorgente di CDM
- l’interazione di assioni con fotoni:
 - $a \rightarrow \gamma\gamma$ implica che in un forte campo magnetico si possa avere la trasformazione di assione in fotone (shining throught the wall)
 - nella ricerca di assioni da dark matter, l’assione c’è già’ e si cercano fotoni apparire dal “nulla” dopo il muro, esp. ADMX
 - si cercano anche raggi gamma per trasformazione di assioni dal Sole, in laboratorio, esp. CAST-CERN, o nello spazio,, esp. X-ray Multi Mirror satellite (XMM-Newton), forse visti ????



9. Conclusioni

- Svelare la natura del 90% della materia presente nell'Universo e', forse, il problema piu' acuto della fisica moderna
- le osservazioni puramente astronomiche, grav lensing, spettro di potenza delle galassie, e, vedremo, le fluttuazioni primordiali, hanno dato molte informazioni ma sembrano arrivate al limite
- Esperimenti per una rivelazione positiva della DM continueranno nei prossimi anni sui fronti che abbiamo appena visto
 - rivelazione nei laboratori sotterranei, verso masse maggiori, rivelazione direzionale, etc.
 - rivelatori nello spazio per lo studio dell'antimateria nei raggi cosmici
 - LHC (run2, upgrade luminosita') e macchine future per la produzione in laboratorio
- E' una sfida intellettuale di prima grandezza per la nostra scienza e le nostre tecnologie