

# Nello spazio alla ricerca di Materia Oscura

Incontri di Fisica Area Pontecorvo  
16 ottobre 2019

Marco Incagli – INFN Pisa

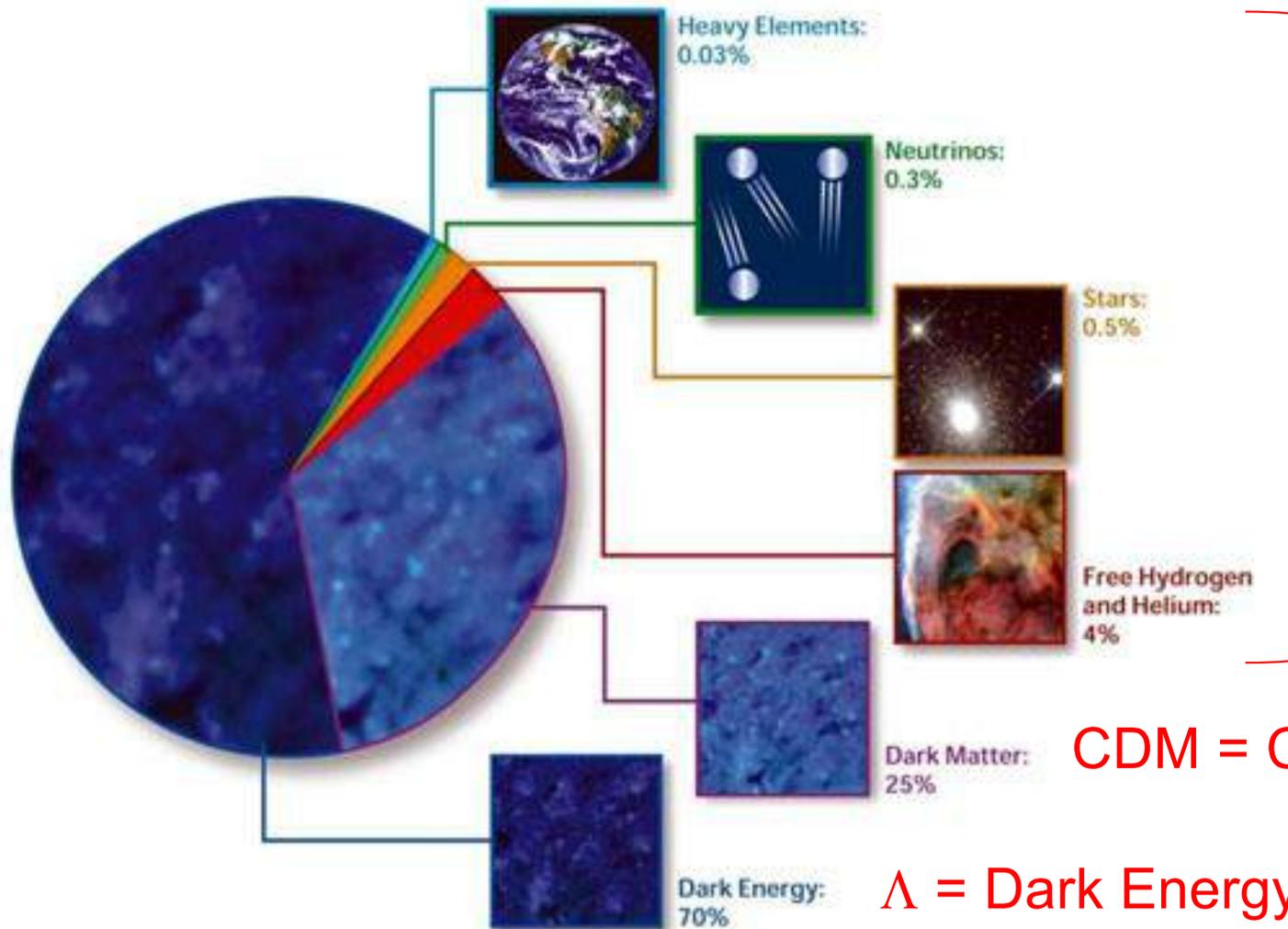
1. Evidenza della Materia Oscura
2. Candidati di Materia Oscura
3. Nello spazio alla ricerca di Materia Oscura
4. Evidenza di Materia Oscura?

# 1 - Evidenza della Materia Oscura



# Il Modello Cosmologico: $\Lambda$ CDM

## COMPOSITION OF THE COSMOS

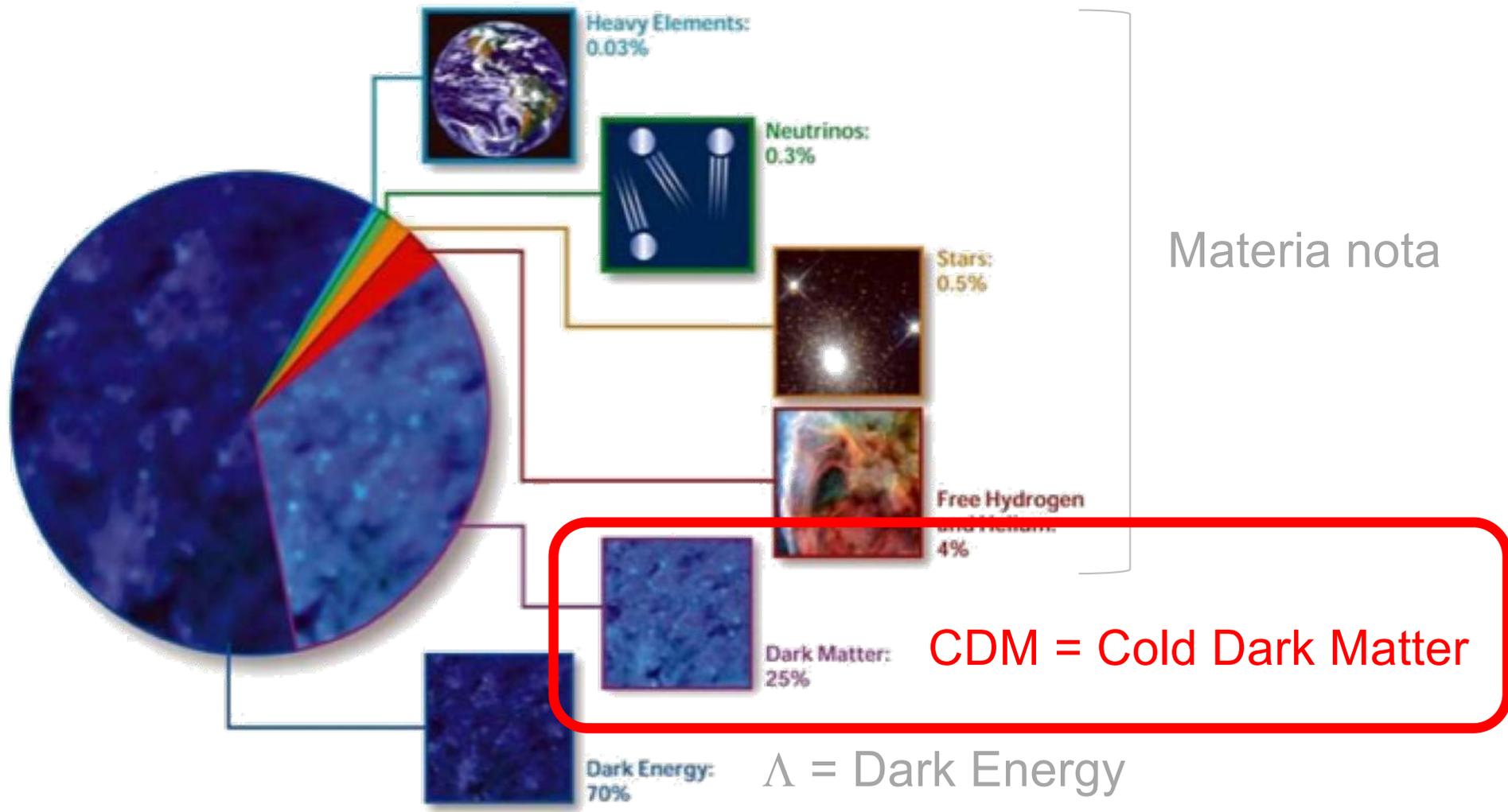


Materia nota

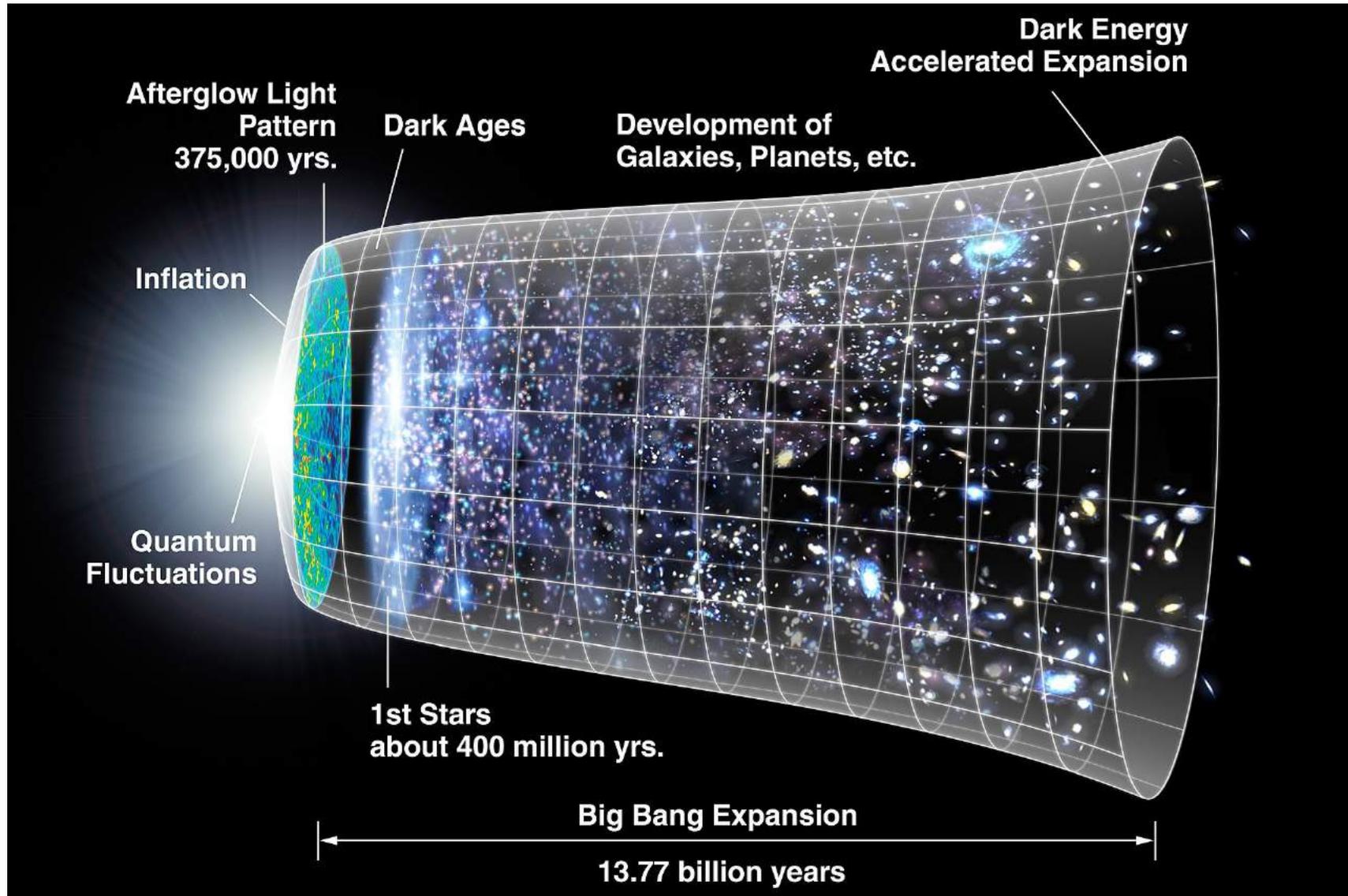
CDM = Cold Dark Matter

$\Lambda$  = Dark Energy

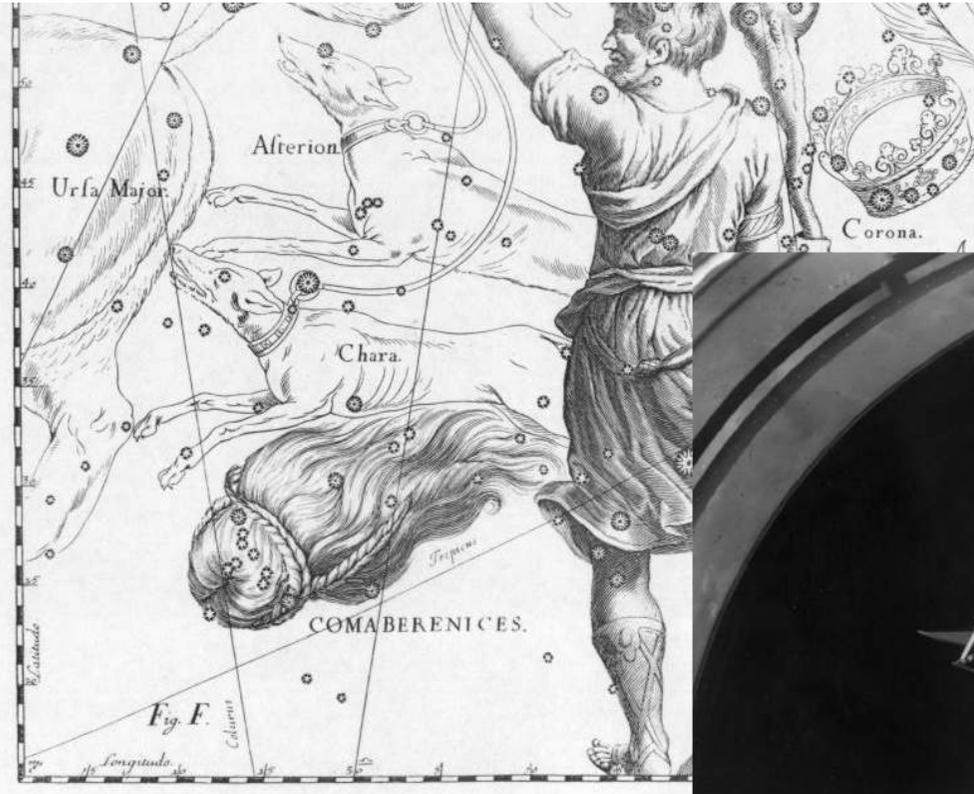
## COMPOSITION OF THE COSMOS



# Dark Energy: espansione accelerata



# Chioma di Berenice



- Prima evidenza della esistenza di Materia Oscura

- 1937: Fritz Zwicky studia le galassie dell'ammasso «Chioma di Berenice»



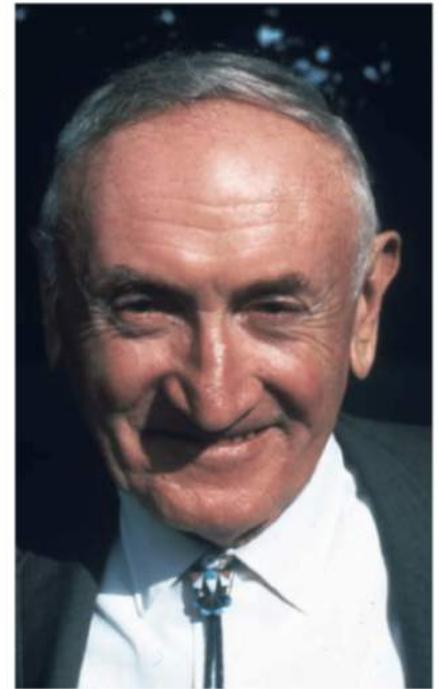
$$\overline{\sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2} = \overline{\sum_i \sum_{j < i} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}}}$$

$$M v^2 \simeq \frac{G M^2}{R}$$

$$M \simeq \frac{v^2 R}{G}$$

Fritz Zwicky al telescopio da 18 pollici del Palomar Observatory negli anni trenta.

# L'Interpretazione di Zwicky



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND  
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME 86

OCTOBER 1937

NUMBER 3

ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF  
CLUSTERS OF NEBULAE

F. ZWICKY

$$\overline{\sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2} = \overline{\sum_i \sum_{j<i} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}}}$$

$$M v^2 \simeq \frac{G M^2}{R}$$

$$M \simeq \frac{v^2 R}{G}$$

Combining (33) and (34), we find

$$M > 9 \times 10^{46} \text{gr} . \quad (35)$$

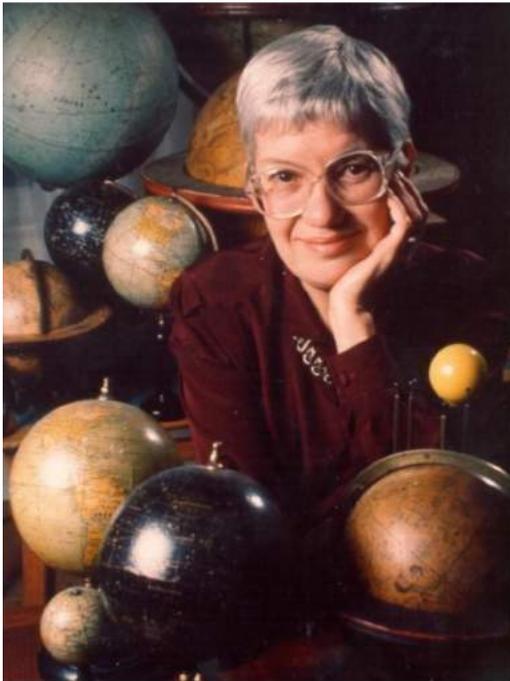
The Coma cluster contains about one thousand nebulae. The average mass of one of these nebulae is therefore

$$\bar{M} > 9 \times 10^{43} \text{gr} = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot} . \quad (36)$$

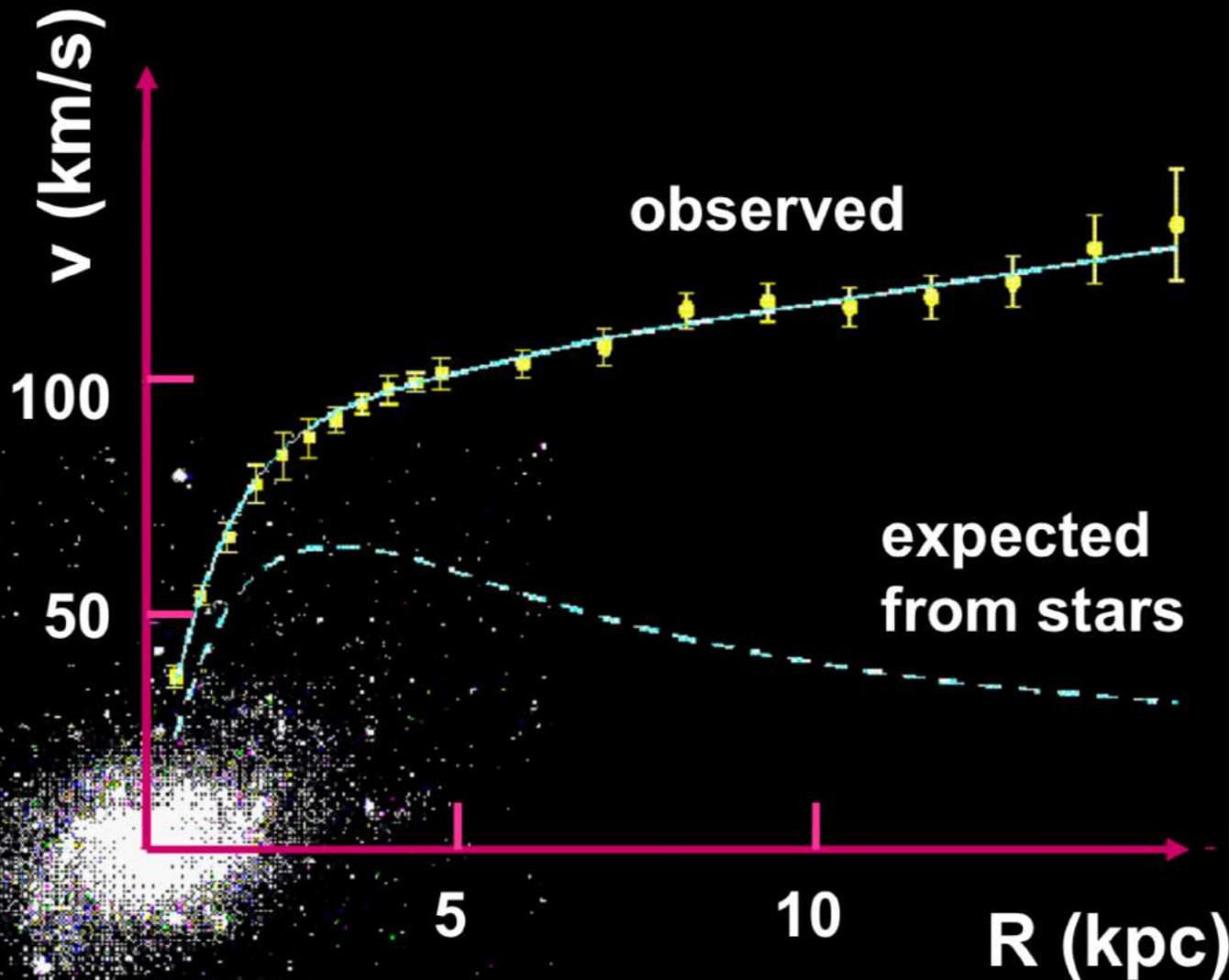
[...]

This result is somewhat unexpected, in view of the fact that the luminosity of an average nebula is equal to that of about  $8.5 \times 10^7$  suns. According

# The Dark Universe



Vera Rubin



M33 rotation curve

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, **238**:471–487, 1980 June 1

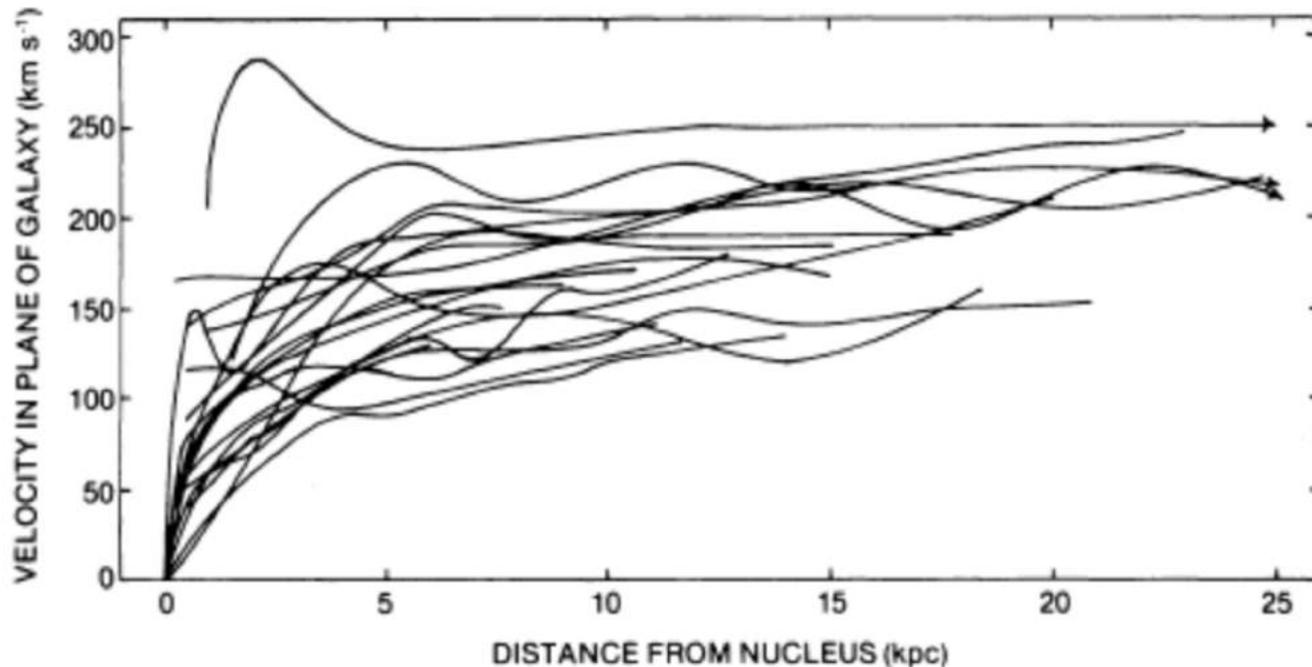
©1980. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## ROTATIONAL PROPERTIES OF 21 Sc GALAXIES WITH A LARGE RANGE OF LUMINOSITIES AND RADII, FROM NGC 4605 ( $R = 4$ kpc) TO UGC 2885 ( $R = 122$ kpc)

VERA C. RUBIN,<sup>1,2</sup> W. KENT FORD, JR.,<sup>1</sup> AND NORBERT THONNARD

Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington

*Received 1979 October 11; accepted 1979 November 29*



- Misurando le curve di rotazione di molte galassie, si osserva un andamento non spiegabile con la materia «luminosa»

# Le galassie non sono fatte così ...



## The Dark Universe

- *Simulazione numerica della struttura di una galassia dominata dalla Materia Oscura*

# Modified Newtonian Dynamics (MOND)



... si cercano anche spiegazioni alternative ad una nuova forma di materia!

- Nel 1981, Mordehai Milgrom propone di *modificare la legge di Gravitazione Universale di Newton*, verificata su scale molto più piccole rispetto alle dimensioni di una galassia
- Questo implica modificare in maniera coerente la teoria della Relatività Generale

# Modified Newtonian Dynamics (MOND)



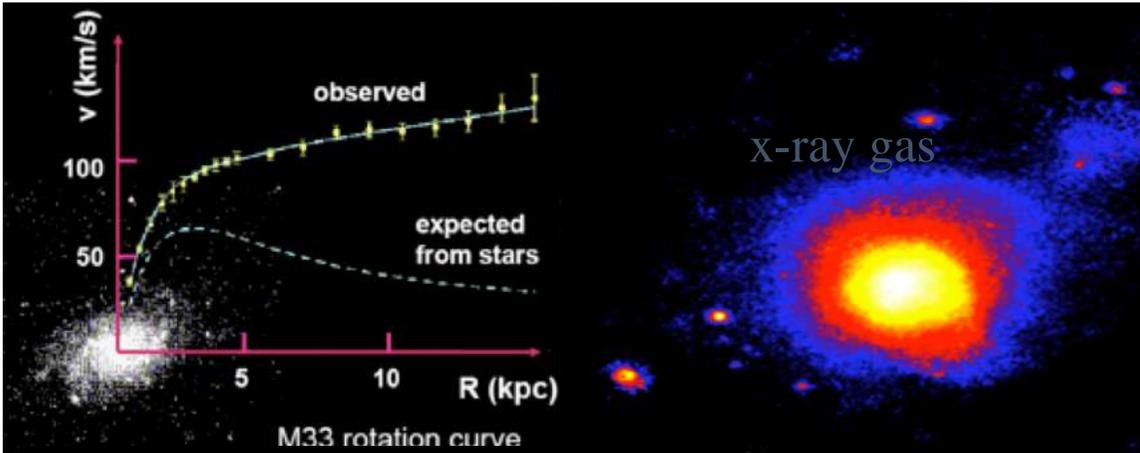
- Nel 1981, Mordehai Milgrom propone di *modificare la legge di Gravitazione Universale di Newton*, verificata su scale molto più piccole rispetto alle dimensioni di una galassia
- Questo implica modificare in maniera coerente la teoria della Relatività Generale

**Velocity = Mass  
x Acceleration**

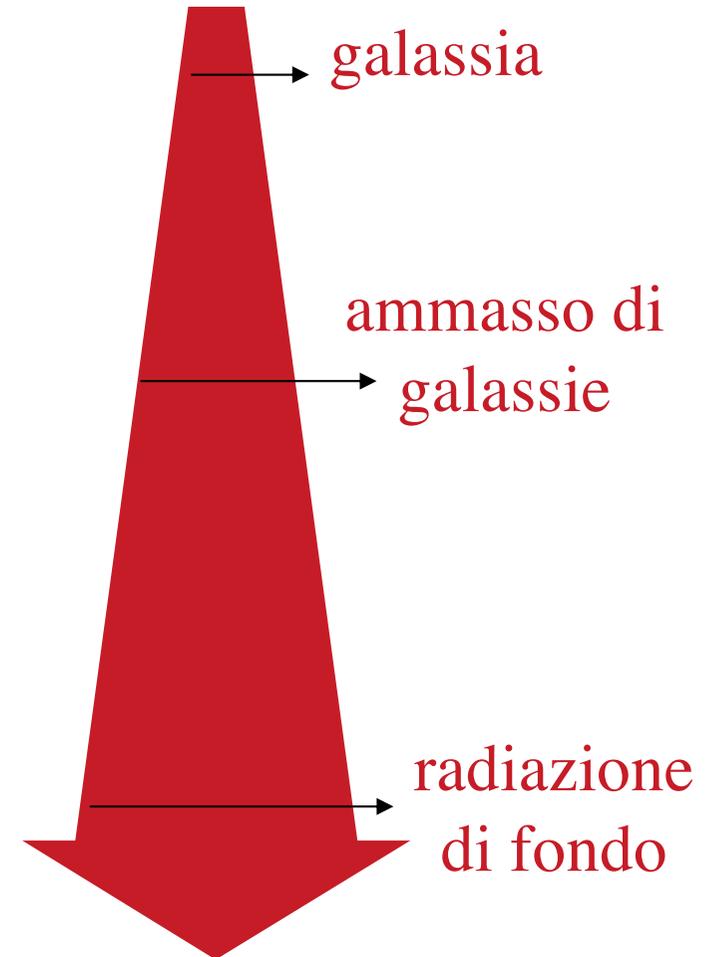
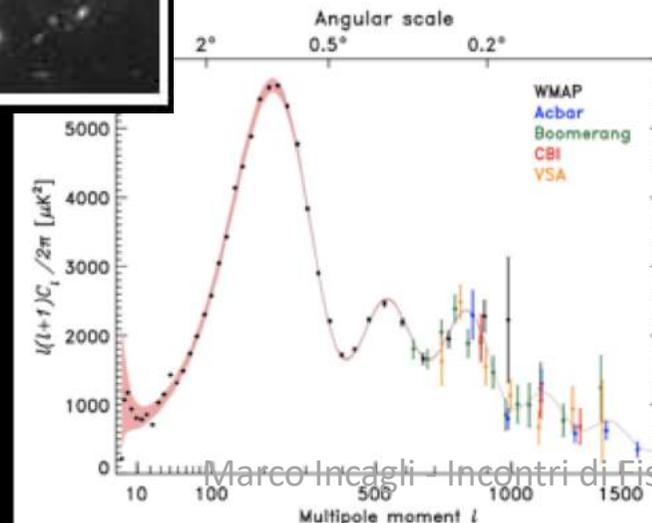
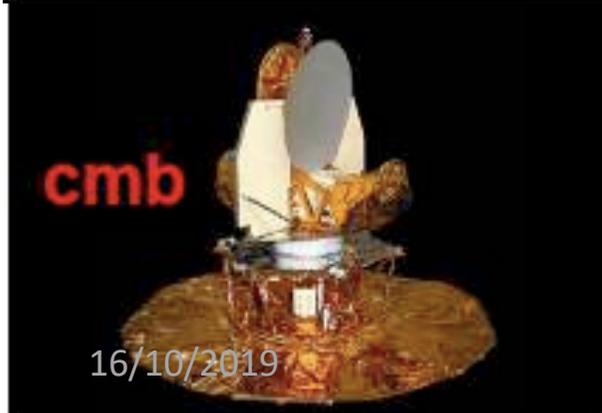
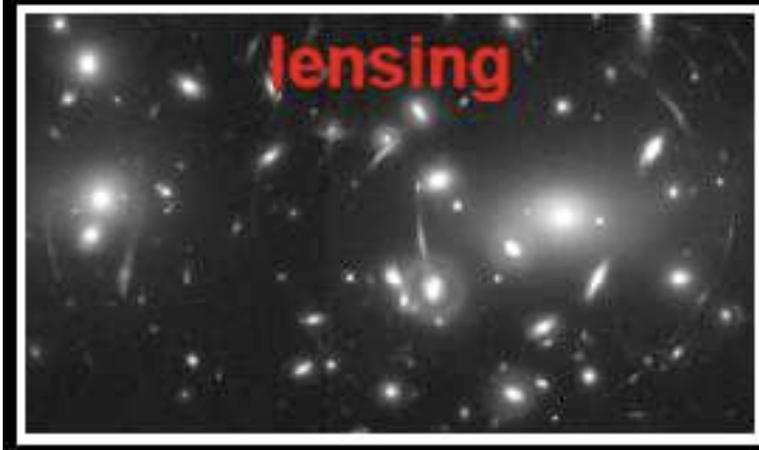
*The time has come to greet exhilaration and accomplishment at the bottom of this mountain. Decades of experience have lead you to the edge. Each moment must be precise and confident. At this point there is one direction; forward.*

Mathey-Tissot®

# Evidenze della Materia Oscura



Esistono evidenze della presenza di materia oscura a varie scale:



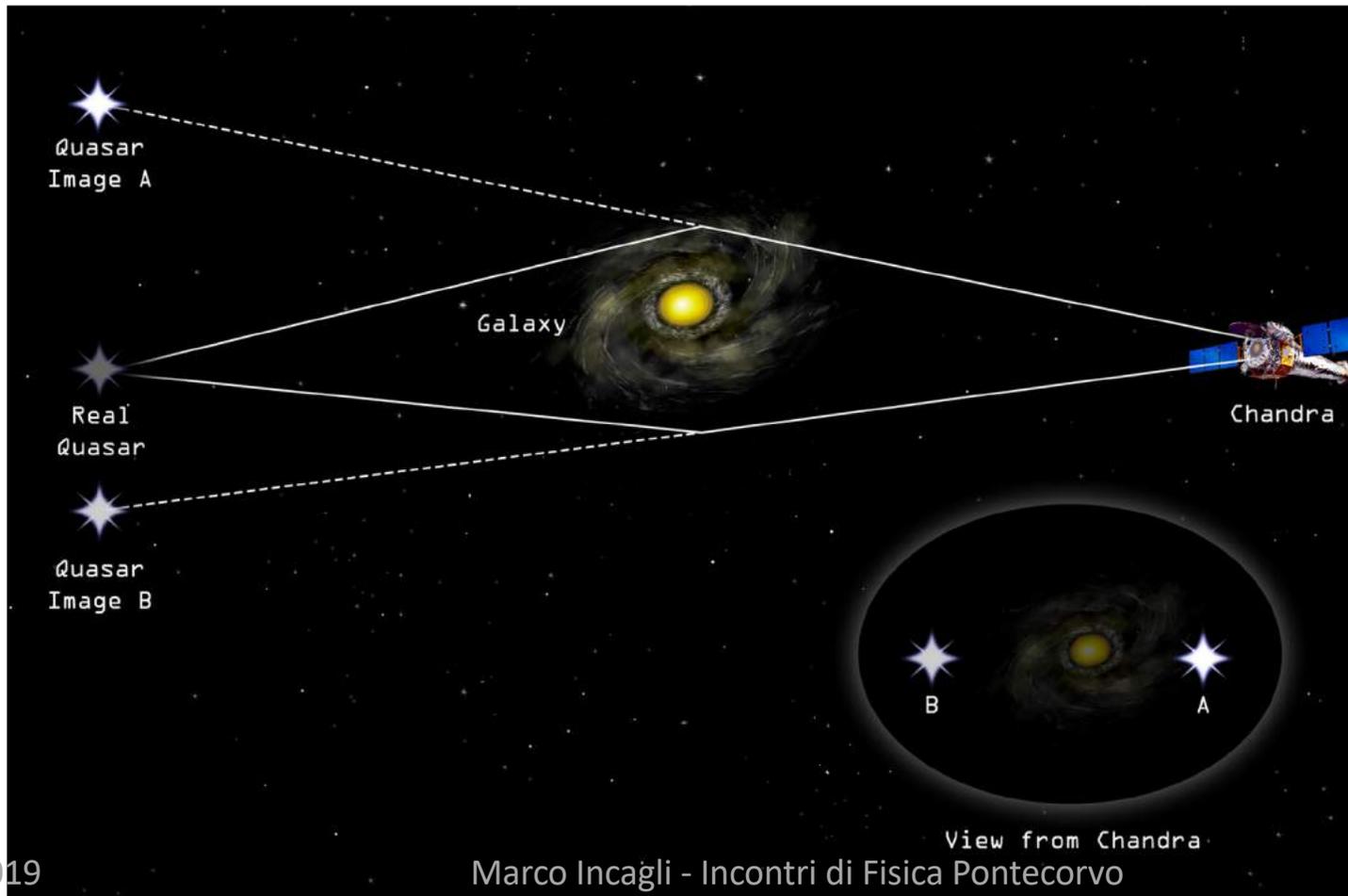
Principio di Fermat: la luce segue il cammino che richiede il tempo più breve



Photographer Shawn Malone captured this Fata Morgana of an ore boat on Lake Superior on May 22, 2015 in Marquette, Michigan.

# Lensing gravitazionale

- In campo gravitazionale la luce segue le geodetiche che possono essere linee curve a causa della presenza di massa
- Si possono osservare immagini sdoppiate o multiple o, addirittura, anelli («anelli di Einstein»)





# A DARK CORE IN ABELL 520<sup>†</sup>

ANDISHEH MAHDAVI, HENK HOEKSTRA, ARIF BABUL, DAVID D. BALAM  
Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, Victoria, BC V8W 3P6, Canada

AND

PETER L. CAPAK

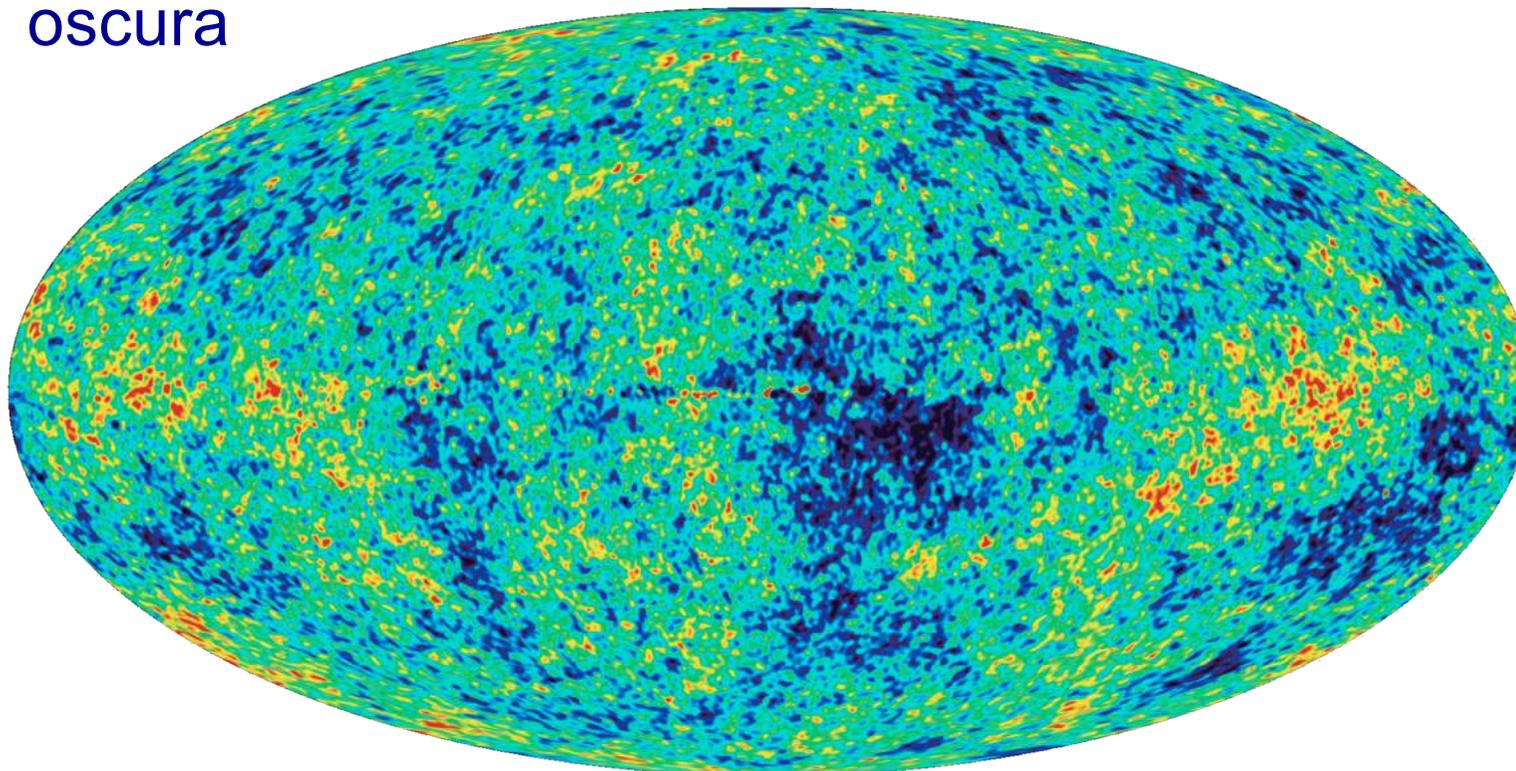
California Institute of Technology, MC 105-24, 1200 E California Boulevard, Pasadena, CA 91125

*Submitted February 12, 2007; Accepted June 18, 2007 for publication in The Astrophysical Journal*



- **Rosa** = emissione di raggi X osservati con CHANDRA: misura il gas diffuso
- **Blu+contorni** = distribuzione della massa ricavata da misure di *lensing gravitazionale* : non coincide né con il gas diffuso né con le galassie visibili

- Premio Nobel 2019 a James Peebles per i suoi studi sul modello  $\Lambda$ CDM, in particolare per la connessione fra misure di Cosmic Microwave Background (CMB) e la presenza di materia (e energia) oscura



mappa CMB:  
misure del  
satellite ESA  
PLANCK

Planck Collaboration Cosmological parameters <sup>[17]</sup>		
Description	Symbol	Value
Hubble constant	$H_0$	$67.74 \pm 0.46 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
Baryon density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_b$	$0.0486 \pm 0.0010^{[e]}$
Dark matter density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_c$	$0.2589 \pm 0.0057^{[f]}$
Matter density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_m$	$0.3089 \pm 0.0062$
Dark energy density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_\Lambda$	$0.6911 \pm 0.0062$
Critical density	$\rho_{\text{crit}}$	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$
The present root-mean-square matter fluctuation averaged over a sphere of radius $8h^{-1} \text{ Mpc}$	$\sigma_8$	$0.8159 \pm 0.0086$
Redshift at decoupling	$z_*$	$1\,089.90 \pm 0.23$
Age at decoupling	$t_*$	$377\,700 \pm 3200 \text{ years}^{[g]}$
Redshift of reionization (with uniform prior)	$z_{\text{re}}$	$8.5^{+1.0}_{-1.1}^{[21]}$

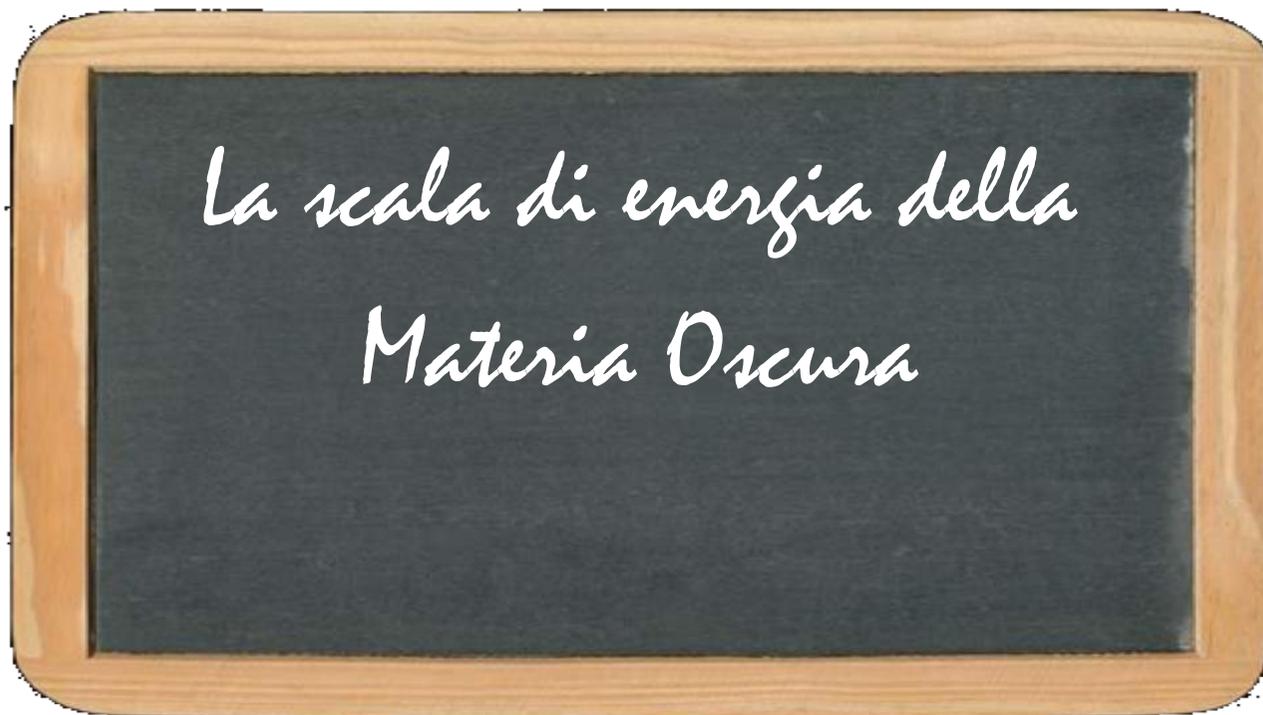
$(4.86 \pm 0.10) \%$

$(25.89 \pm 0.57) \%$



$\Omega_b \sim 0.05$  frazione materia barionica (protoni)  
 $\Omega_\chi \sim 0.26$  frazione materia oscura

## 2 – Candidati per la Materia Oscura



- **neutrinos** (hot dark matter)
- **sterile neutrinos, gravitinos** (warm dark matter)
- **LSP (neutralino, axino, ...)** (cold dark matter)
- **LKP (lightest Kaluza-Klein particle)**
- **axions, axion clusters**
- **solitons (Q-balls; B-balls; Odd-balls, ...)**
- **supermassive wimpzillas**



Mass range

$10^{-6}$  eV ( $10^{-40}$  g) axions

$10^{-8} M_{\odot}$  ( $10^{25}$  g) axion clusters

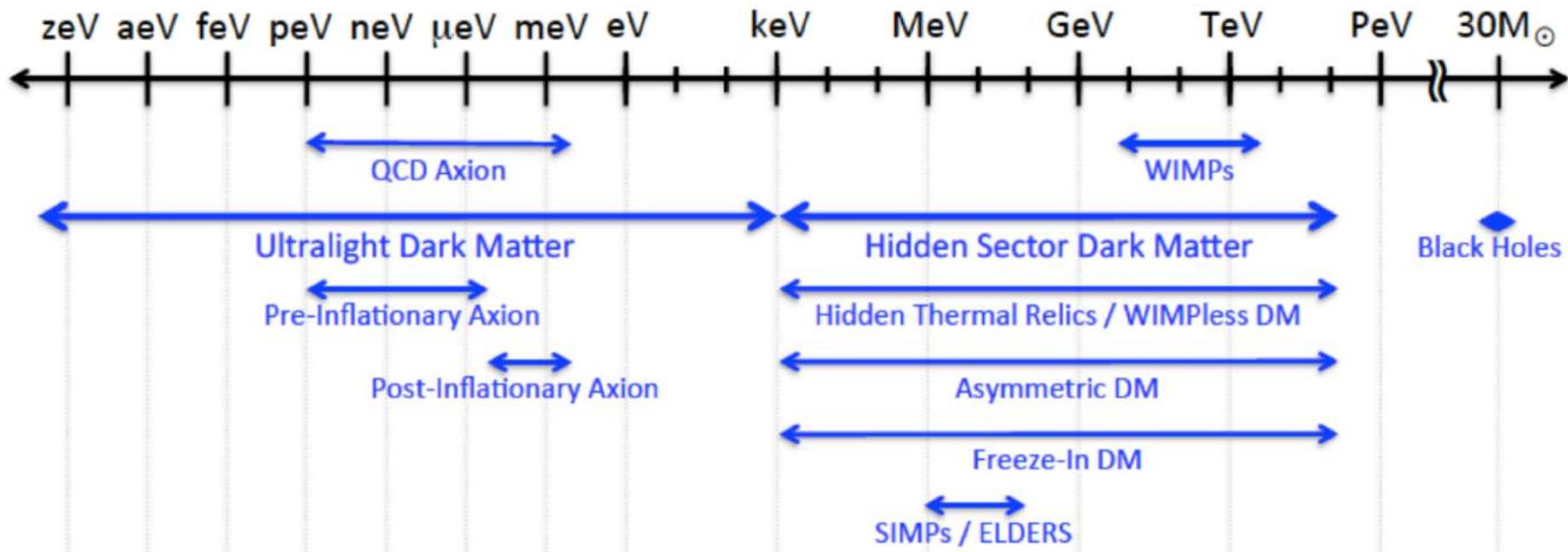
Interaction strength range

Noninteracting: wimpzillas

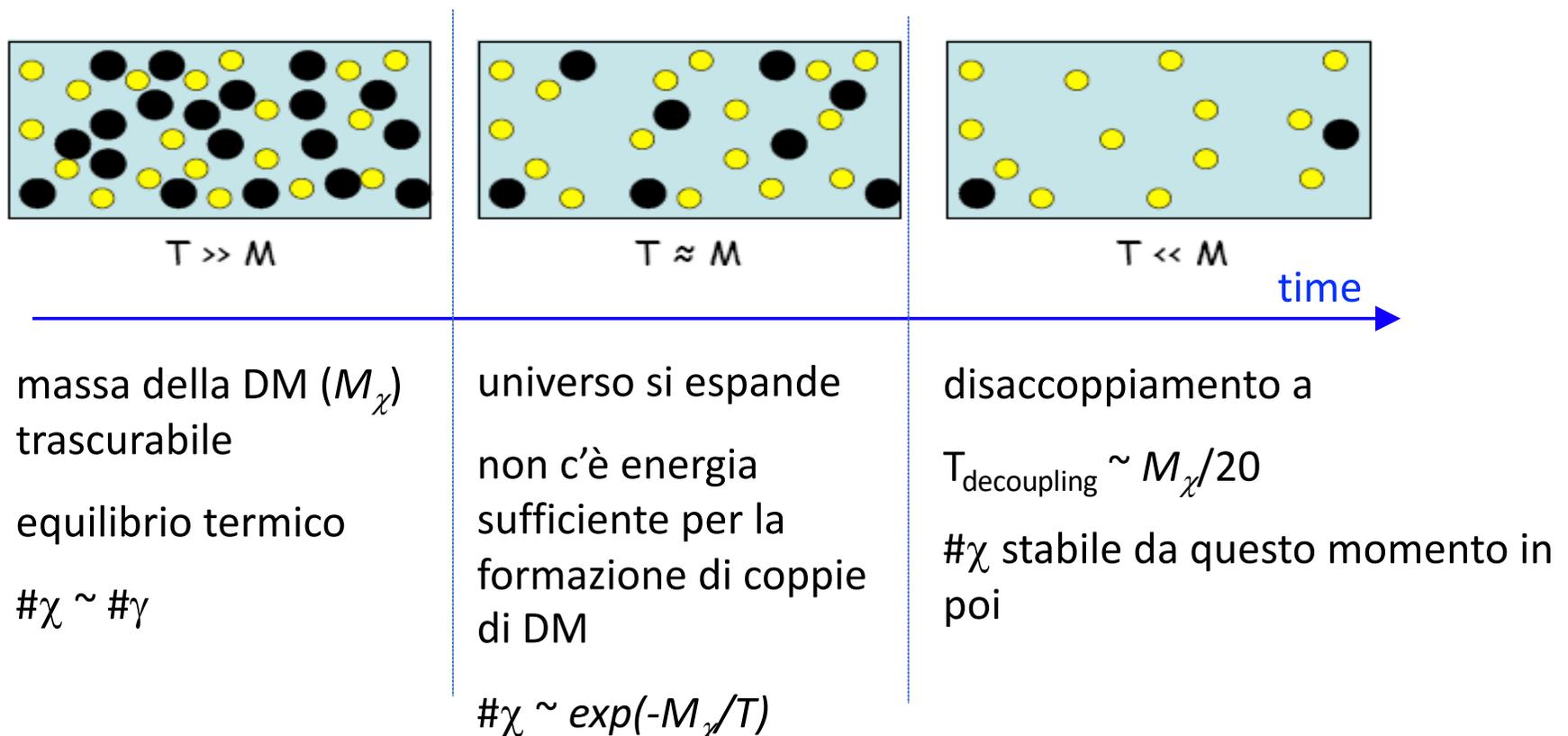
Strongly interacting: B balls

# La scala di energia

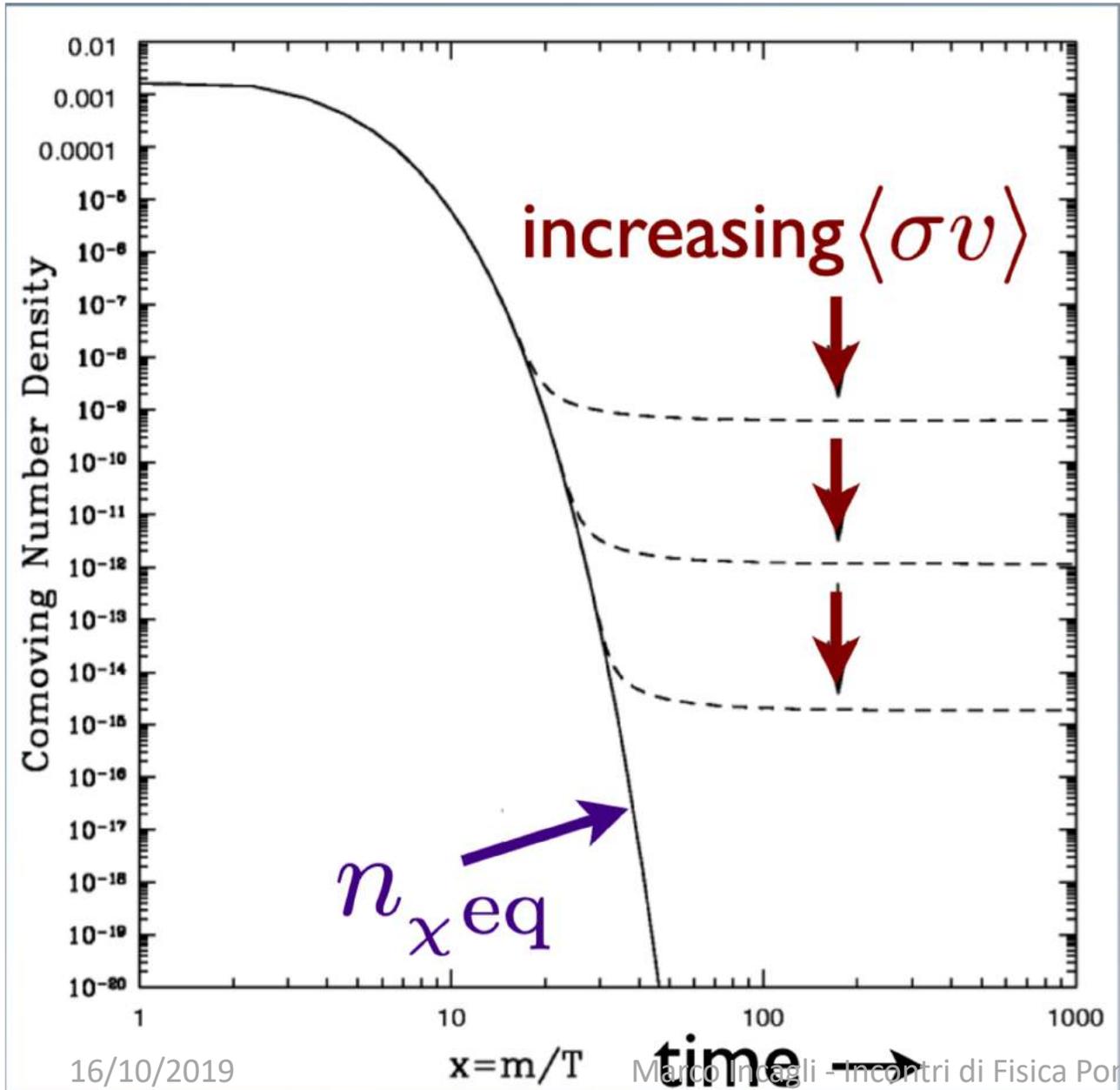
- Le evidenze dell'esistenza della Materia Oscura sono solamente di tipo gravitazionale
- I possibili candidati per la Materia Oscura coprono più di 60 ordini di grandezza in massa!



- **relic = reliquia = oggetto di venerazione (!!!)**
- Si assume che le particelle di materia oscura siano in equilibrio termico con il plasma nell'universo primordiale in espansione



# Densità di Materia Oscura attuale

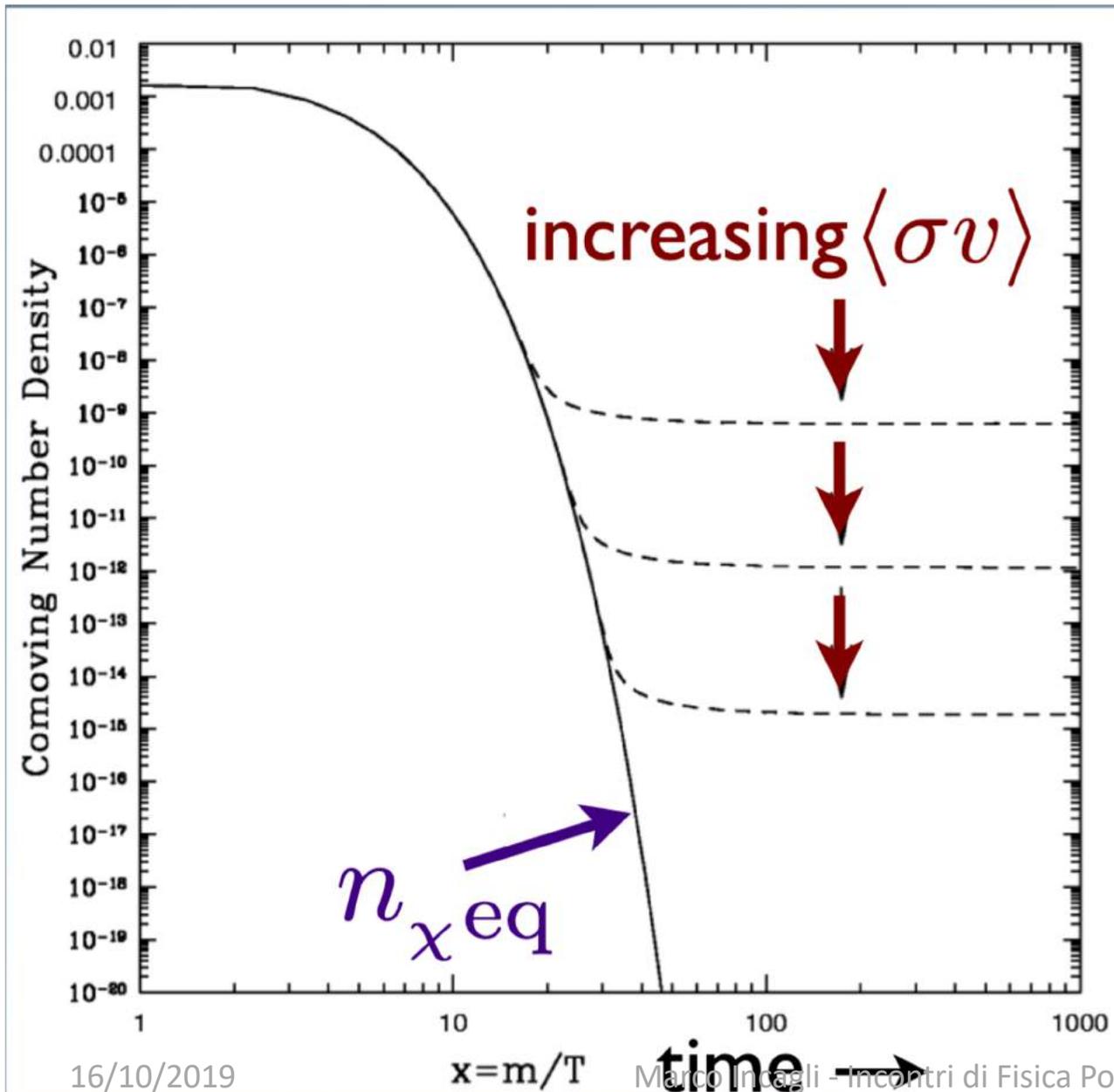


Sezione d'urto:

Debole

Media

Forte



- In questo semplice modello, la frazione di DM residua dipende dalla sezione d'urto di annichilazione
- «I deboli ereditano l'Universo; non la Terra, è evidente, ma l'Universo sí!»  
R. Kolb

La frazione di DM presente oggi dipende da parametri cosmologici e particellari che, in questo semplice modello, convergono su un valore della massa e della sezione d’urto tipica delle interazioni deboli!

$$\Omega_\chi \approx \frac{10^{-3}}{\underbrace{\langle \sigma_{annih} v_\chi \rangle}_{\sim \alpha^2 / M_\chi^2} TeV^2}$$

From  $T^0 M_{Planck}$

**COSMO – PARTICLE  
CONSPIRACY**

$$M_\chi \sim 10^2 - 10^3 \text{ GeV (weak interaction)} \quad \rightarrow \quad \Omega_\chi \sim 10^{-1} !!!$$

- Questa categoria di candidati sono detti WIMP = Weakly Interactive Massive Particles

# Alcuni candidati sono più uguali degli altri!

Table 1. Properties of various Dark Matter Candidates

Bergstrom

Type	Particle Spin	Approximate Mass Scale
Axion	0	$\mu\text{eV}$ - $\text{meV}$
Inert Higgs Doublet	0	50 GeV
Sterile Neutrino	1/2	keV-GeV
Neutralino	1/2	10 GeV - 10 TeV
Kaluza-Klein UED	1	TeV

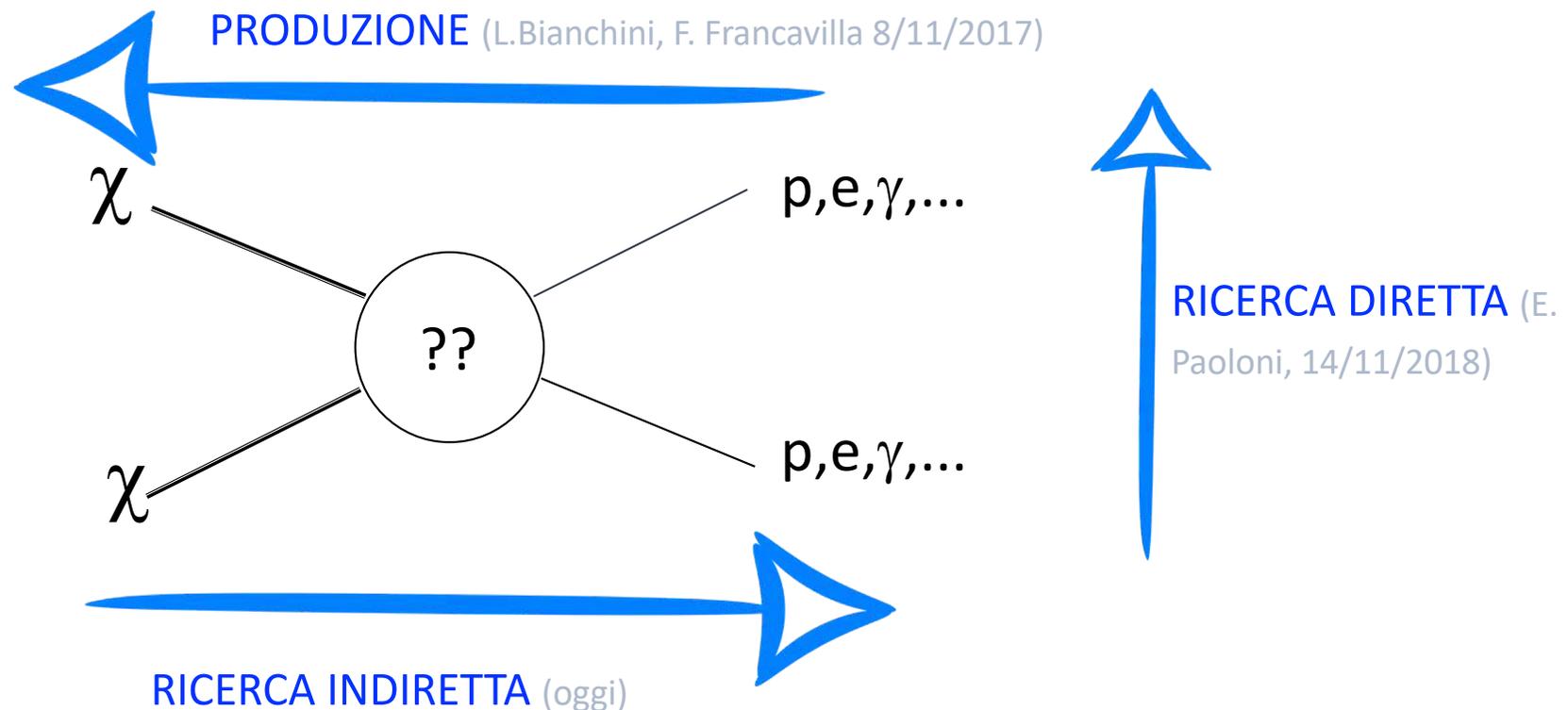
**Singolare coincidenza tra i parametri dei MODELLI STANDARD  
particellare e cosmologico per dare validi candidati di DM alla scala  
elettrodebole (GeV-TeV)**

## 3 – Sulle tracce della Materia Oscura



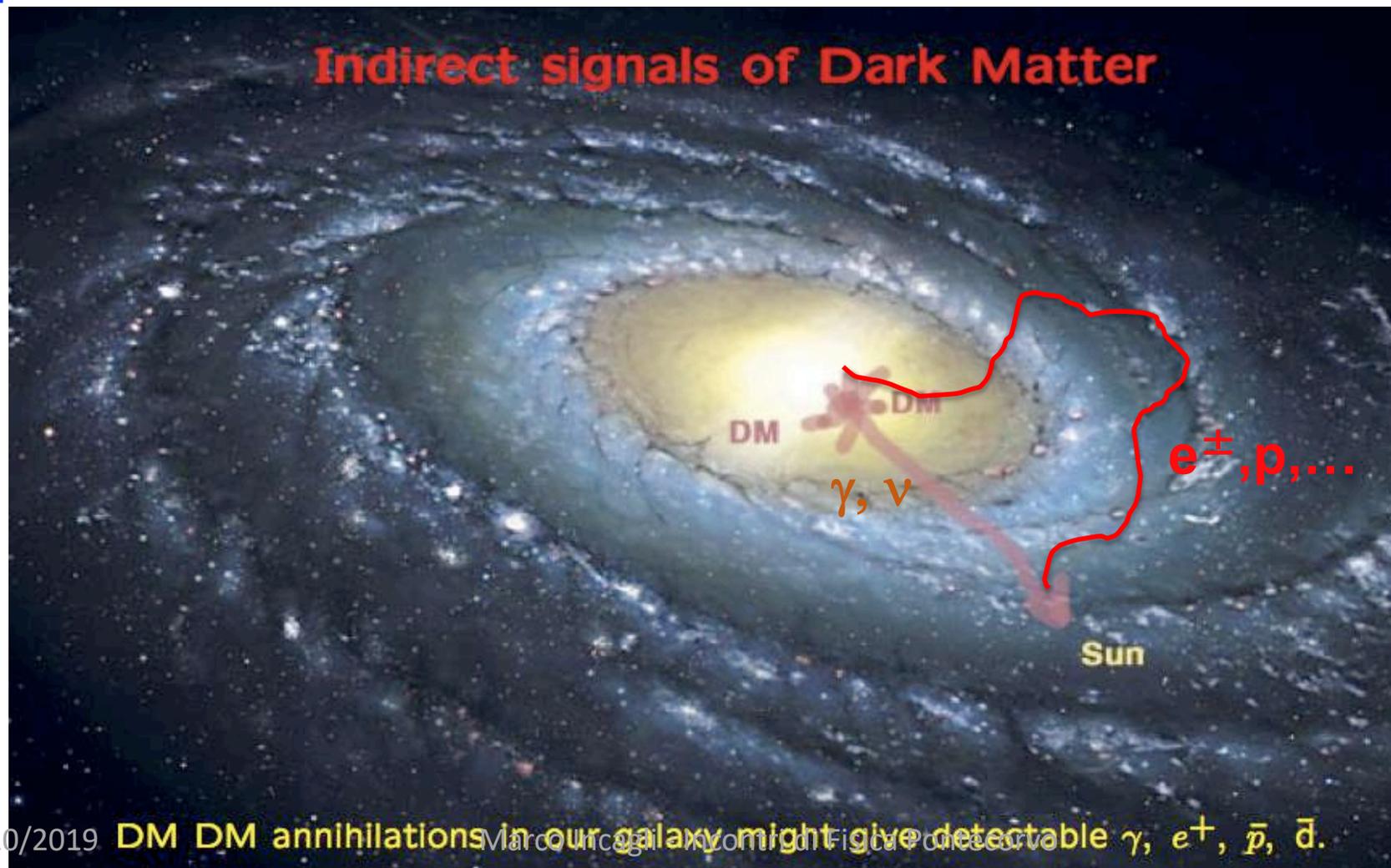
# Alla ricerca delle WIMPs

- Ipotesi: la Materia Oscura interagisce debolmente con quella ordinaria ed ha una massa GeV-TeV
- 3 tipologie di esperimenti, a seconda di come scorre «l'asse dei tempi», discussi in altre presentazioni



# Ricerca indiretta

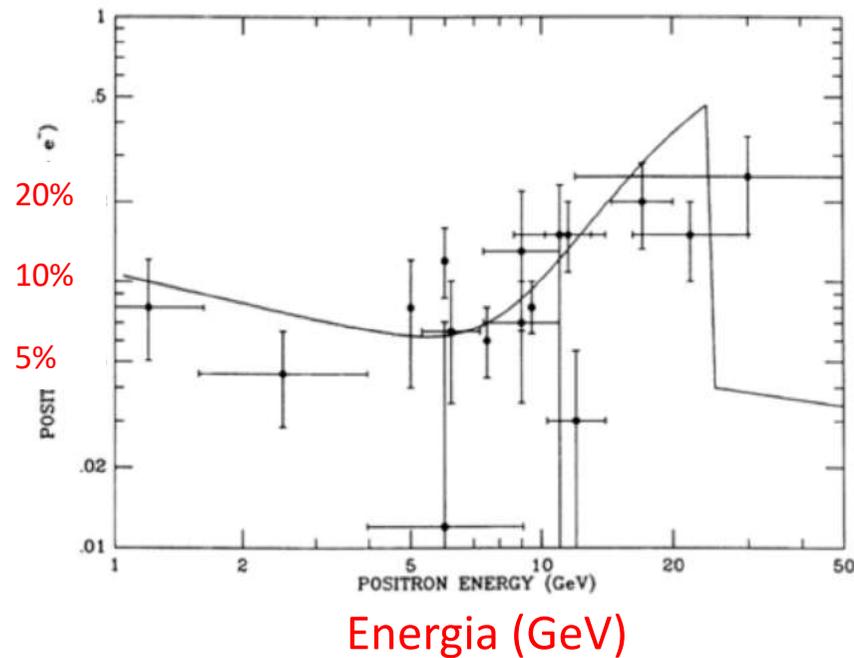
- Annichilazione di Materia Oscura nella galassia con produzione di particelle standard osservate da esperimenti posti fuori dall'atmosfera



## Positron line radiation as a signature of particle dark matter in the halo

Frank Wilczek Michael S. Turner

Frazione di positroni:  $e^+/(e^++e^-)$



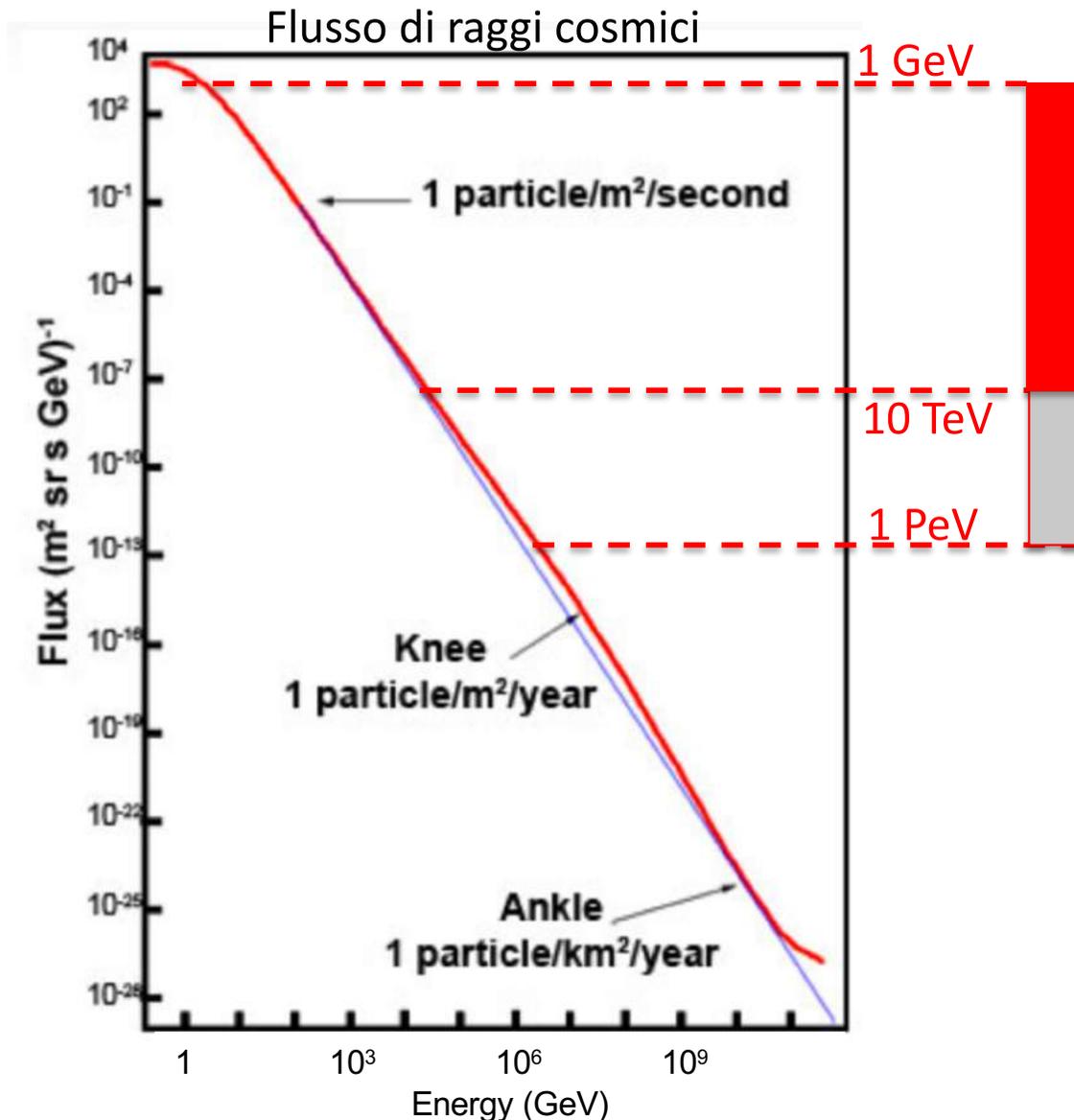
- Le coppie  $e^+e^-$  prodotte dall'annichilazione di Materia Oscura modificano lo spettro atteso dalla «normale» propagazione di raggi cosmici nella galassia
- Dati: esperimenti su pallone

- Nota: antiparticelle (positroni, anti-protoni) sono prodotte da radiazione cosmica primaria che interagisce con il mezzo interstellare

# Perché nello spazio?

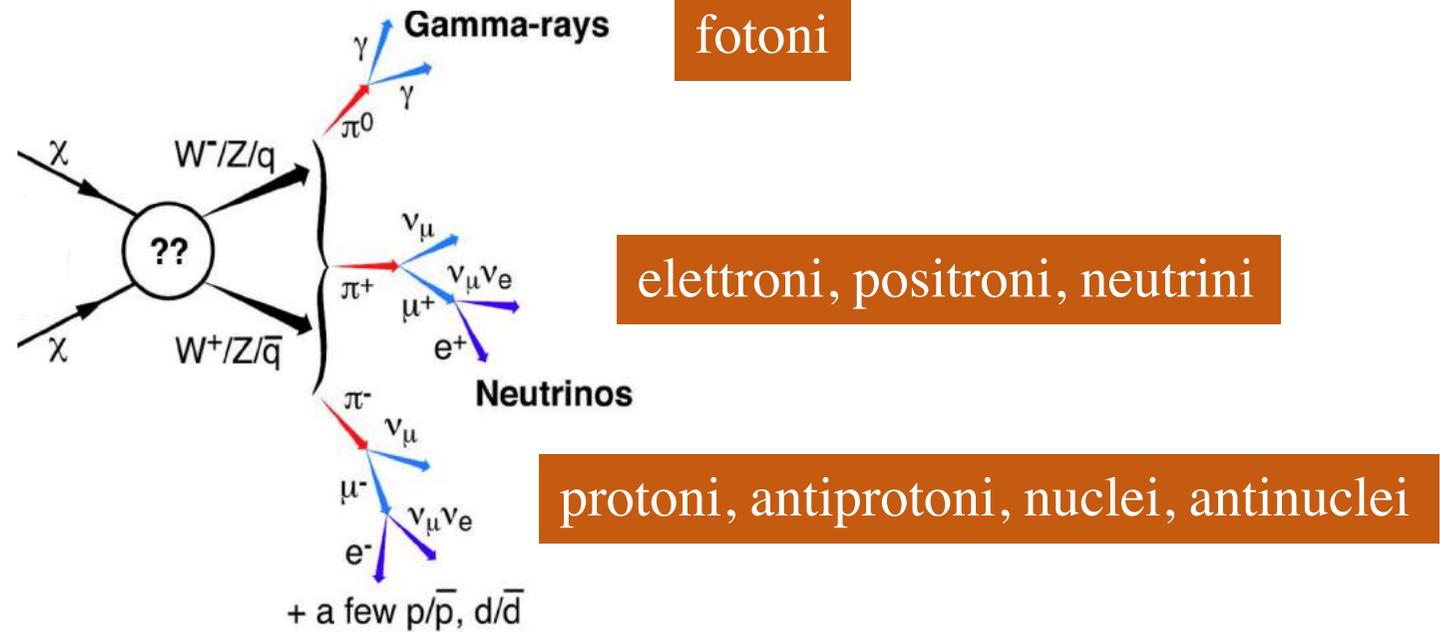
- + Apparato sensibile alla radiazione cosmica, prima di interagire con l'atmosfera
- + Con magneti → accesso alle anti-particelle
- + Lungo periodo di continua raccolta dati
  
- Massa limitata
- Accettanza geometrica limitata
- Alto costo

# Intervallo in energia accessibile



- Intervallo in energia dipende dal flusso entrante e dalle dimensioni dell'apparato
- Il flusso diminuisce rapidamente ( $\phi \sim E^{-2.7}$ )
- Dimensione trasversa «ragionevole»  $\sim 1\text{m}^2$
- *Range: GeV – TeV* → *intervallo rilevante per la ricerca delle WIMPs*

Materia Oscura  
tipo WIMP



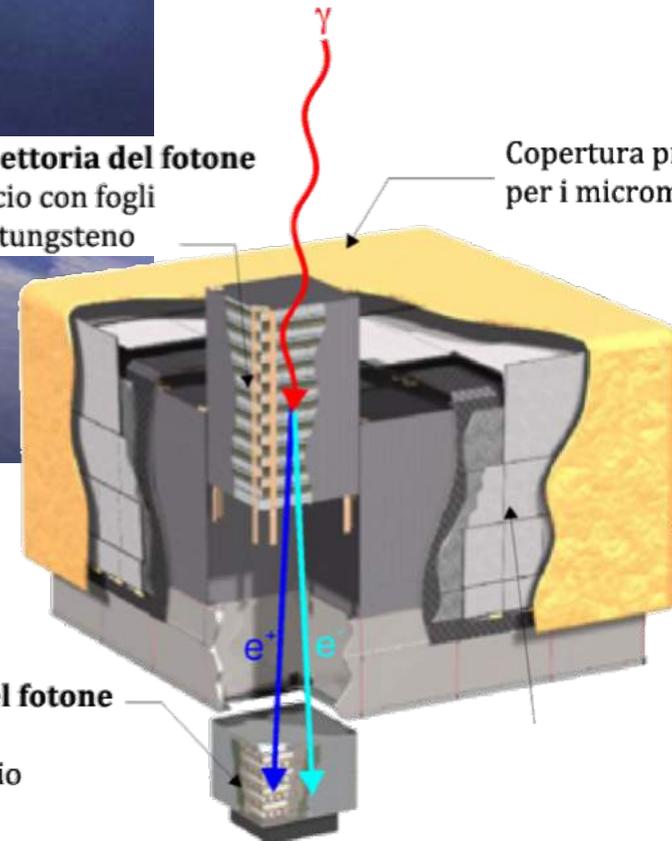
- Diverse tipologie di apparati sperimentali:
  1. **fotoni** : «telescopi a conversione in coppie» → FERMI
  2. **anti-particelle** : «spettrometri magnetici» → AMS02
  3. **elettroni + nuclei** : «calorimetri» → CALET (in futuro HERD)

# Conversione in coppie: FERMI



**Misura della traiettoria del fotone**  
Tracciatore al silicio con fogli  
di conversione in tungsteno

Copertura protettiva  
per i micrometeoriti

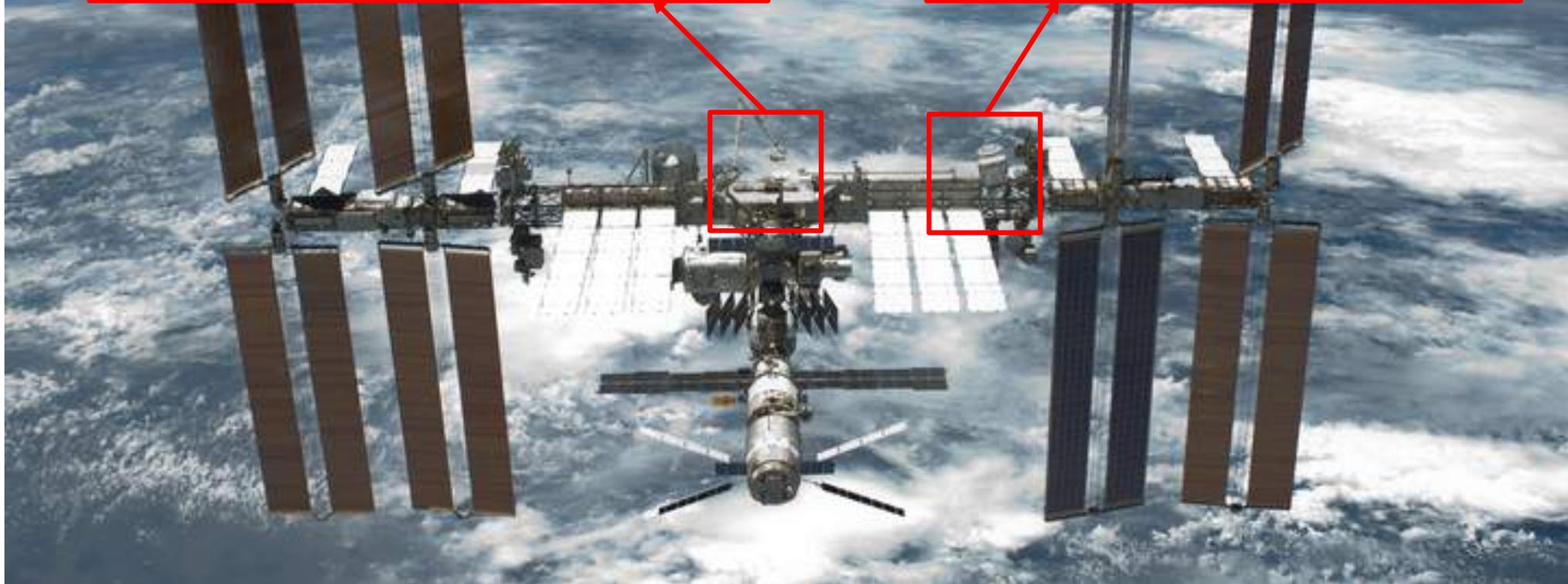
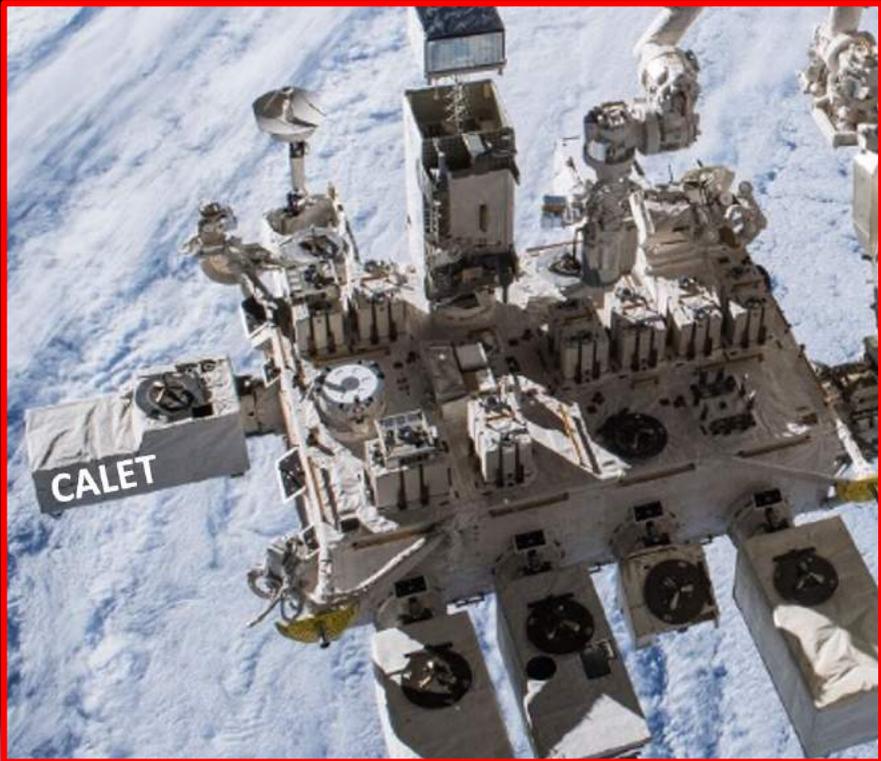


I fotoni di alta energia vengono  
identificati ed accuratamente tracciati  
attraverso la loro conversione in  
coppie  $e^+e^-$ .

**Misura dell'energia del fotone**  
Calorimetro  
Cristalli di ioduro di cesio

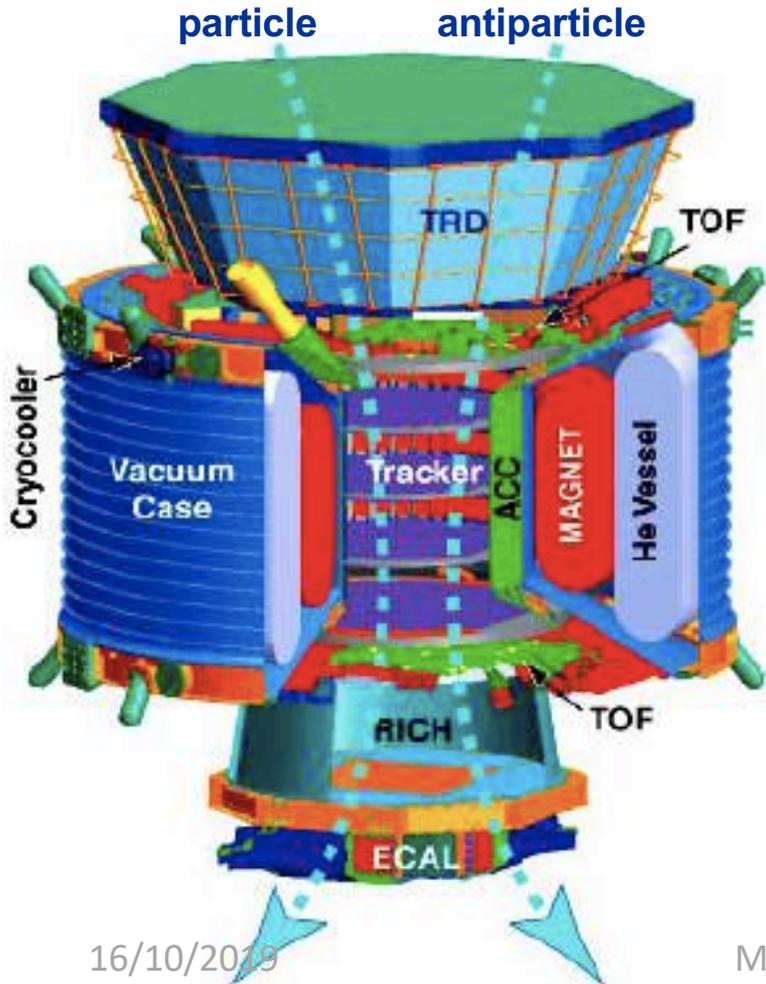
# La prima torre del tracciatore!





# Particelle e antiparticelle: AMS

- Il magnete permette di distinguere il segno della carica; il Calorimetro, costruito a Pisa, misura l'energia di elettroni, positroni e fotoni



0.3 TeV	$e^-$	$e^+$	P	$\bar{He}$	$\gamma$
TRD					
TOF					
Tracker					
RICH					
Calorimeter					



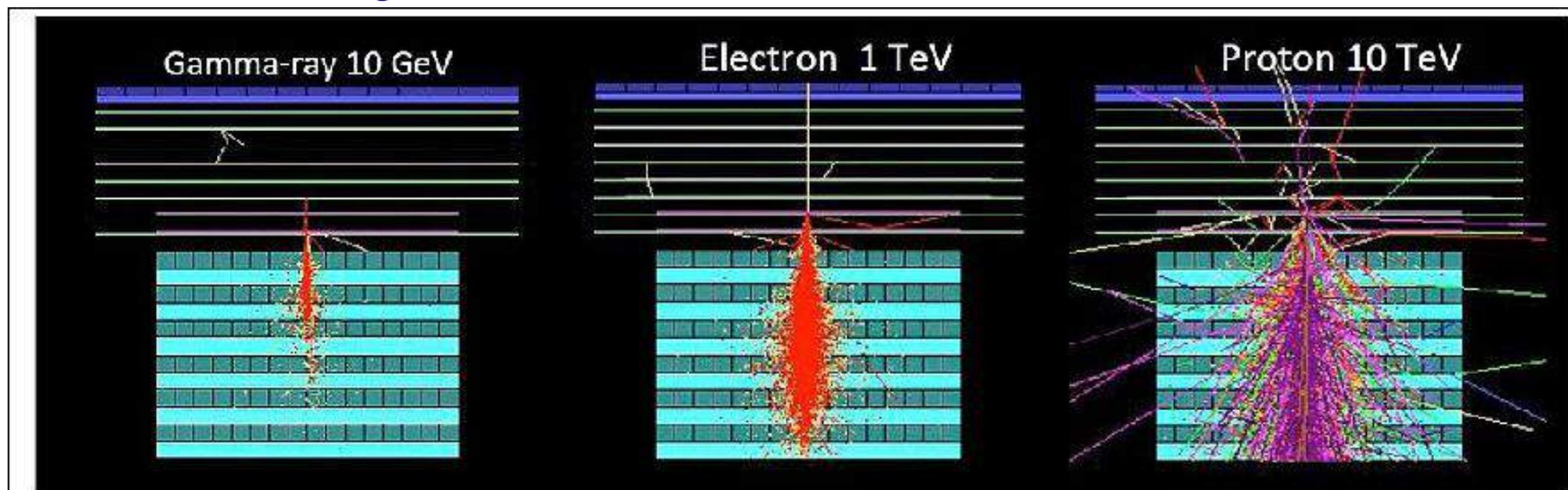
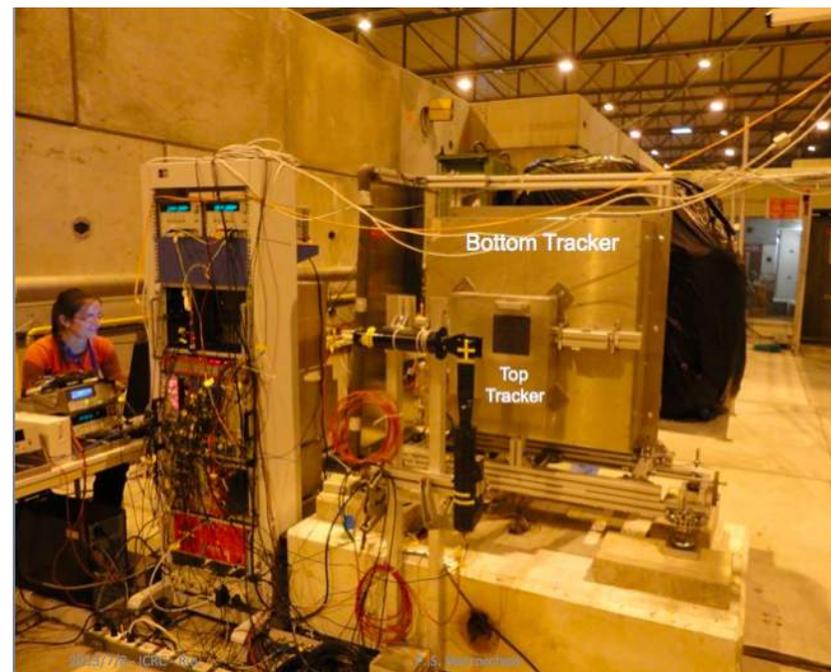
16/10/2019

Marco Incagli - Incontri di Fisica Pontecorvo

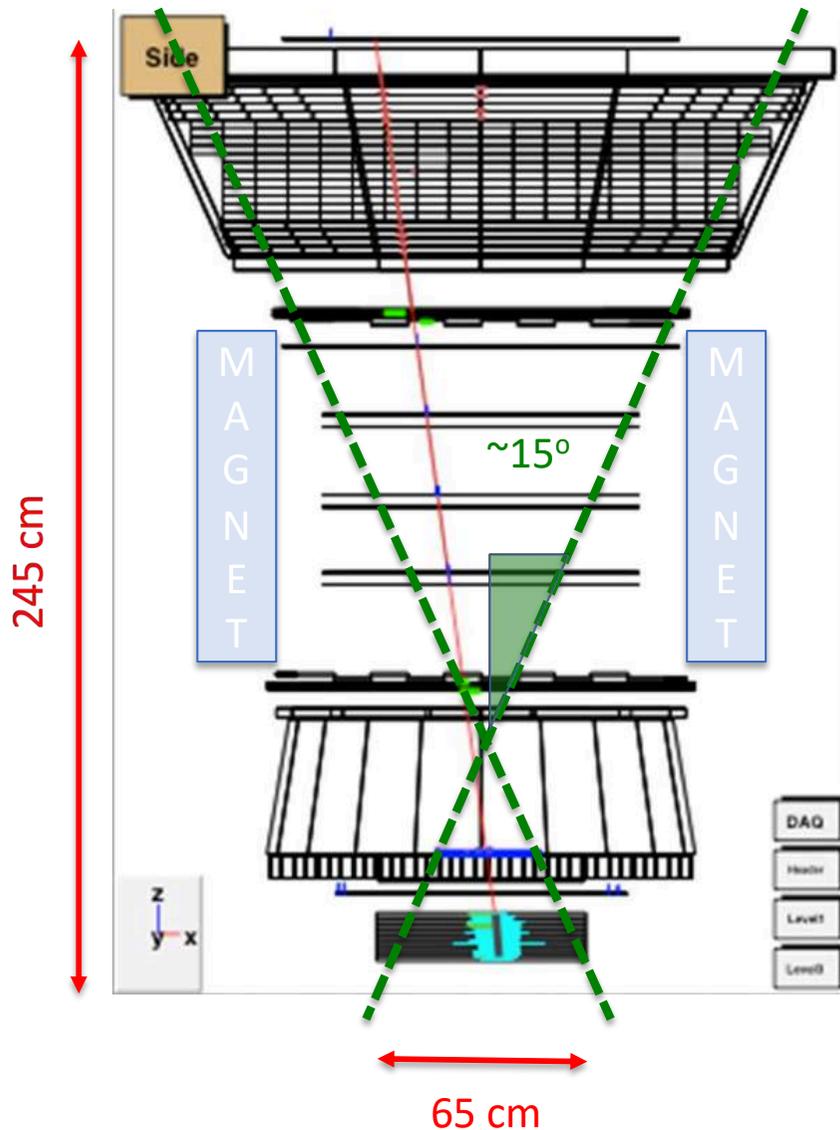
1 2:50 PM

# Calorimetri: CALET (DAMPE, HERD)

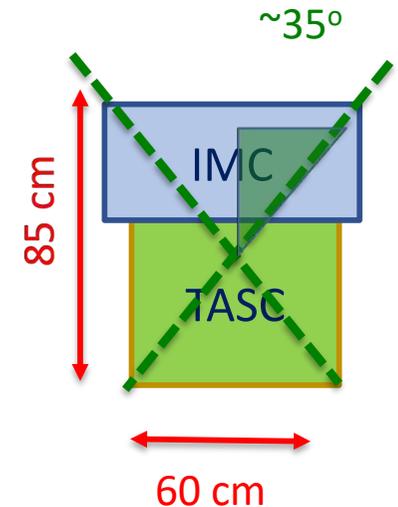
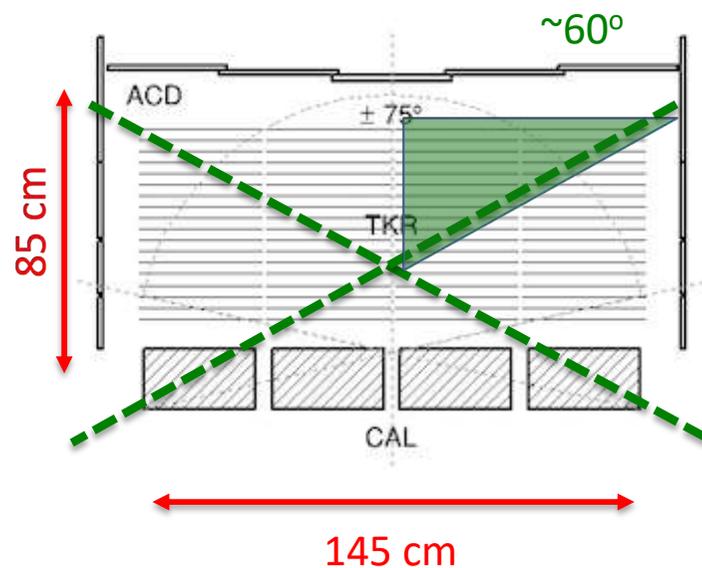
- Rivelatori di grosso spessore (calorimetri) che assorbono e misurano l'energia di fotoni, elettroni, nuclei di idrogeno (=protoni), elio, ecc.
- Non essendoci un magnete, consentono una maggiore accetanza geometrica



# AMS – FERMI – CALET



- La diversa scelta tecnologica ha conseguenze sulla accettazione angolare, e quindi sulla statistica raccolta (fondamentale per un flusso che diminuisce rapidamente con l'energia)



## 4 – Evidenza di Materia Oscura?

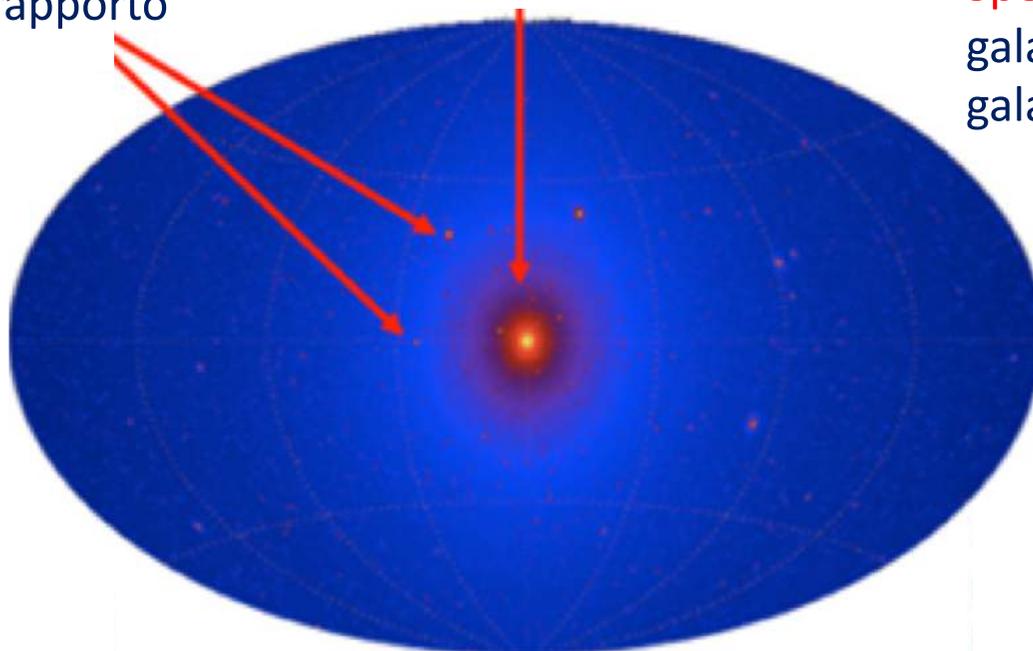


- FOTONI: mantengono la direzionalità
  1. **centro della galassia**: massima intensità, massimo fondo
  2. **galassie satelliti**: bassa intensità, minimo fondo
  3. **spettro diffuso**: la Materia Oscura è ovunque

**Satelliti (*dwarf galaxies*):**  
ottimizzazione rapporto  
segnale/fondo

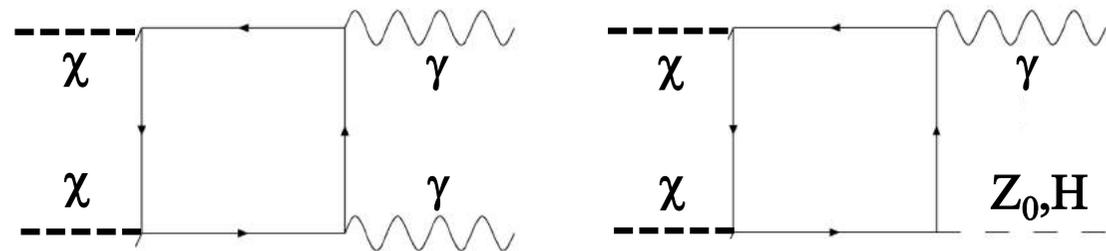
**Centro della Galassia:**  
massima intensità

**Spettro diffuso,**  
galattico ed extra-  
galattico

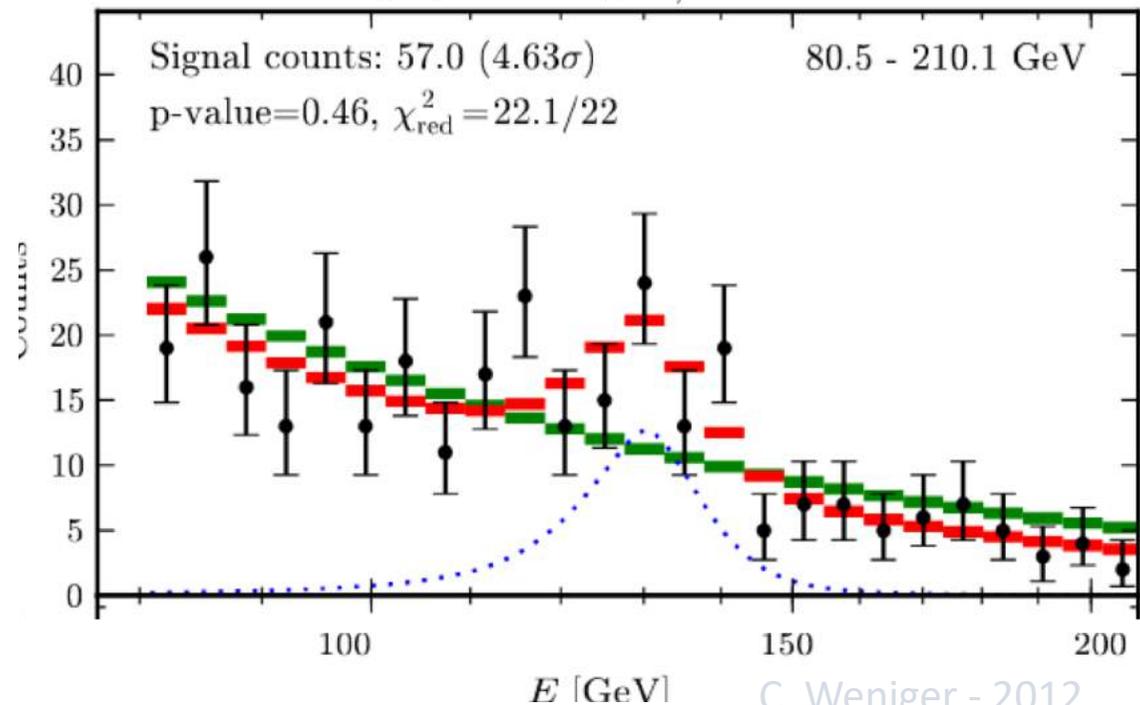


# Segnale più ambito nello spettro diffuso: ricerca di risonanze (=picchi)

- «golden channel» : annichilazione della materia oscura in
  - $\gamma\gamma$  (due fotoni)
  - $\gamma Z_0$  ( $M_{Z_0} = 91$  GeV)
  - $\gamma H$  ( $M_H = 125$  GeV)
- Si osserva un picco alla massa della DM, nel caso  $\gamma\gamma$ , o ad un valore collegato, se la seconda particella di decadimento ha massa
- Accenno di segnale nel 2012, poi scomparso

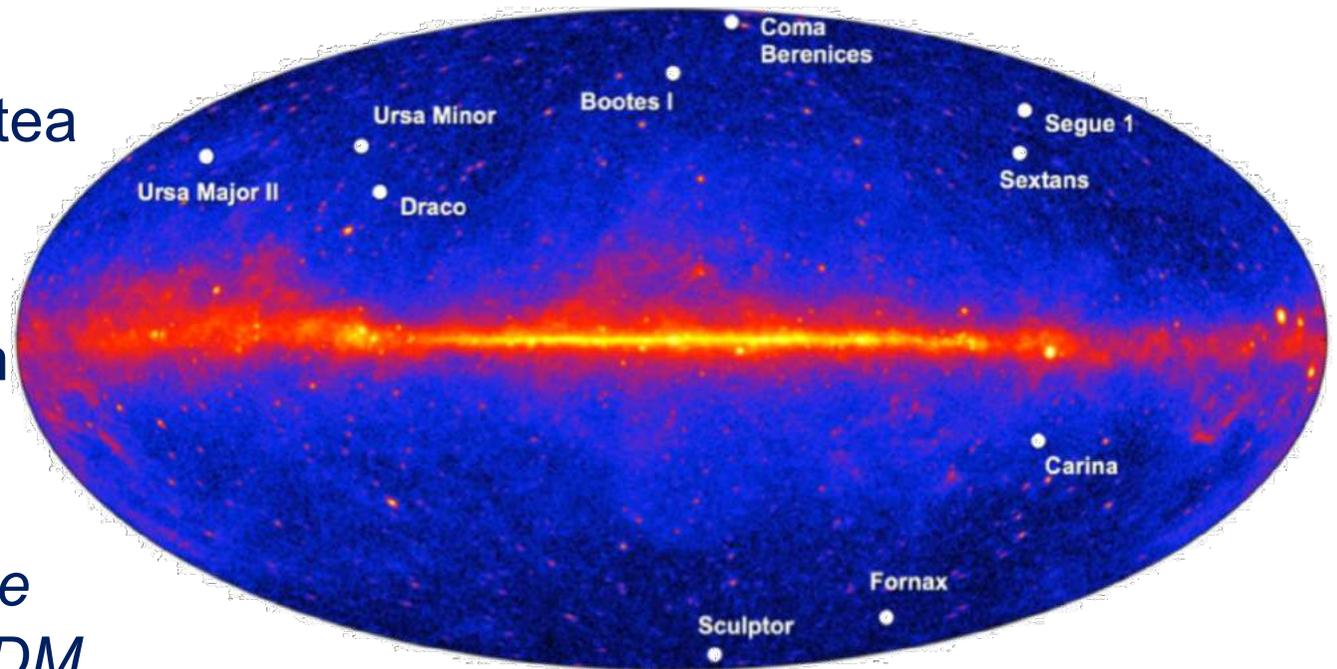


Reg4 (SOURCE),  $E_\gamma = 129.8$  GeV

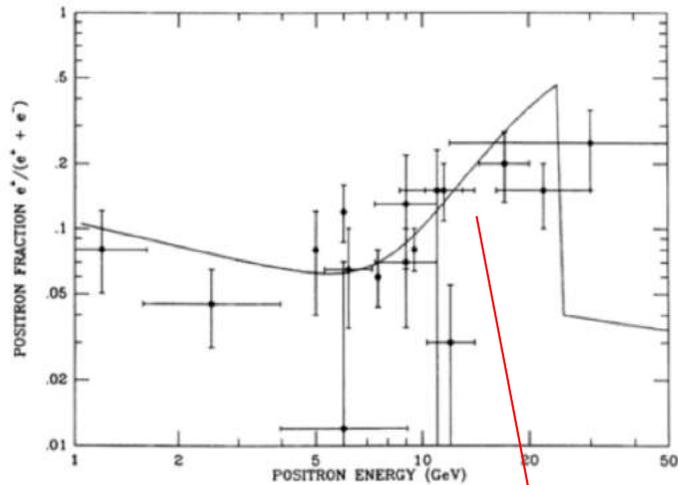


# Un tipo particolare di satelliti : *dwarf spheroidal galaxies*

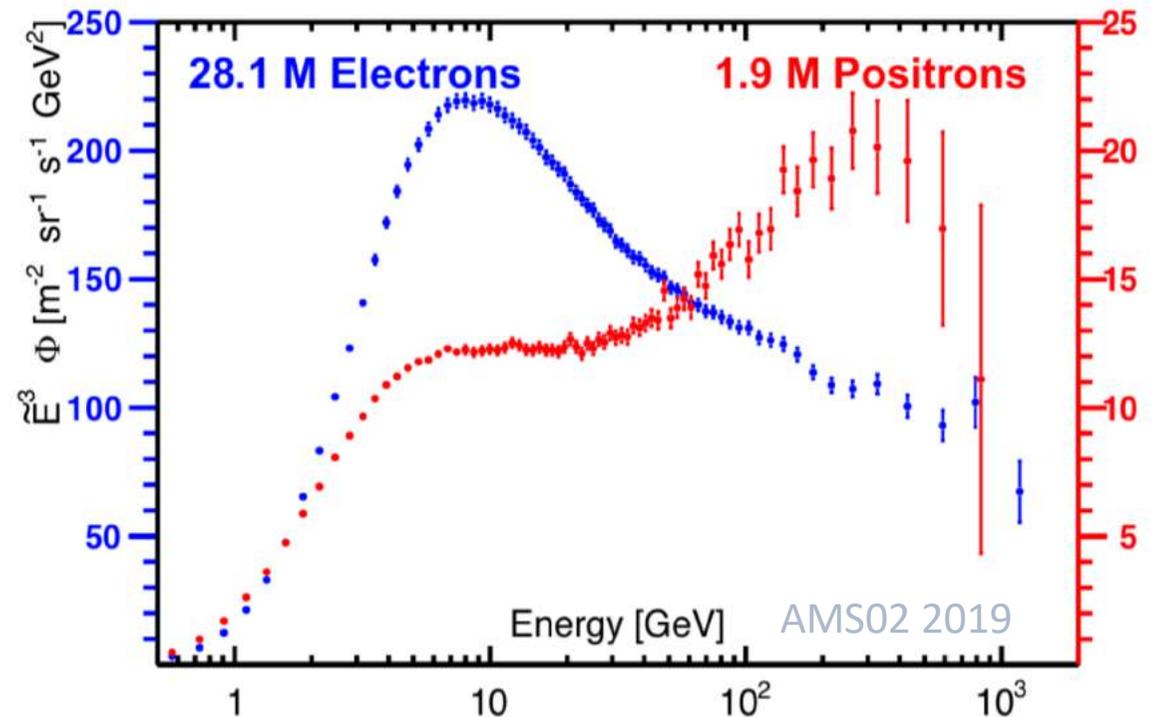
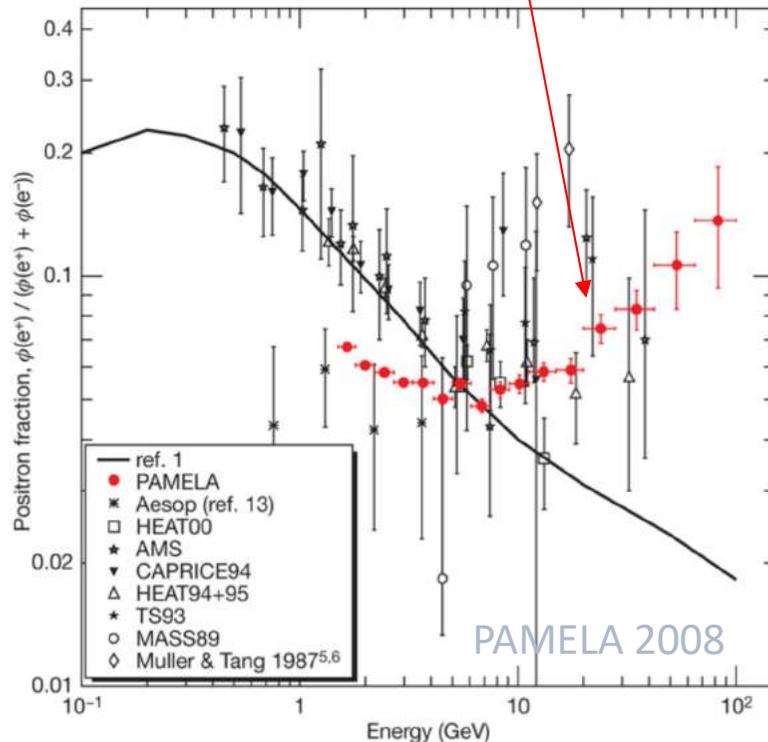
- «*dwarf spheroidal galaxies*»: galassie satelliti della *Via Lattea* con un contenuto di gas molto basso
- L'osservazione di un *eccesso di fotoni* provenienti da esse può essere *il segnale di annichilazione di DM*
- Queste osservazioni vengono fatte anche da terra, in un intervallo di energia spostato a valori più alti
- Nessun eccesso osservato sino ad ora



# Particelle cariche: positroni

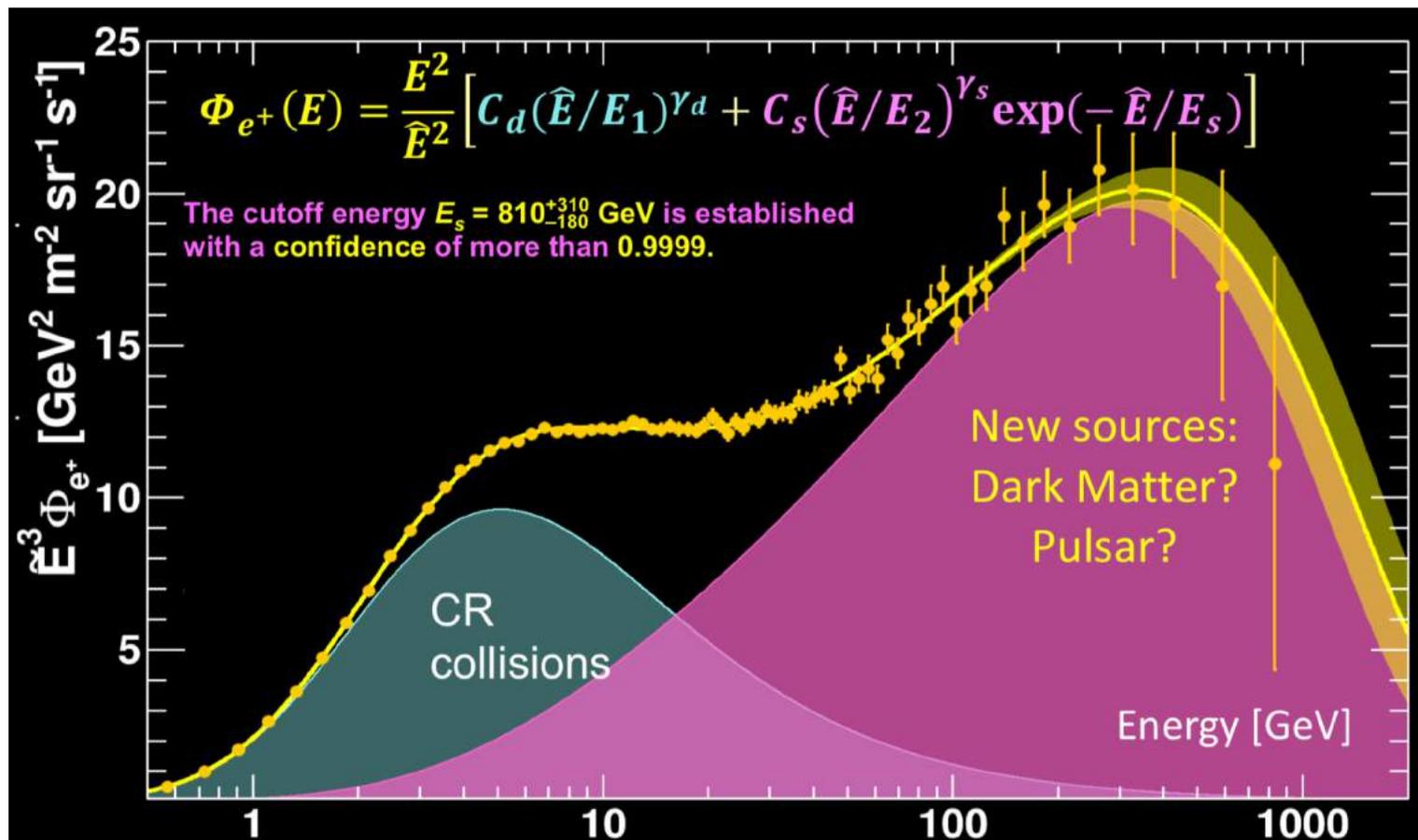


- Aumento della frazione di positroni confermato dall'esperimento italo-russo PAMELA nel 2008
- AMS ha esteso la misura osservando il flusso assoluto (non il rapporto) di elettroni e positroni



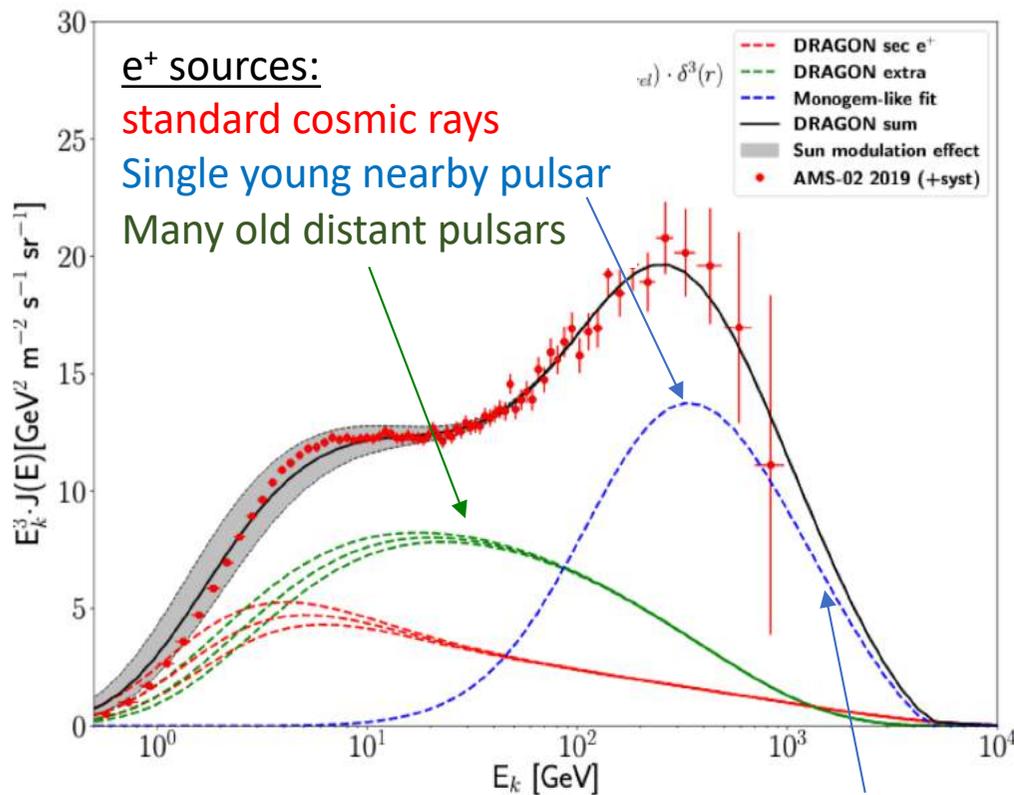
# Una nuova sorgente di positroni

- I positroni mostrano un chiaro eccesso rispetto alle collisioni di raggi cosmici con mezzo interstellare (CR collisions). Dark Matter? Sorgenti astrofisiche?

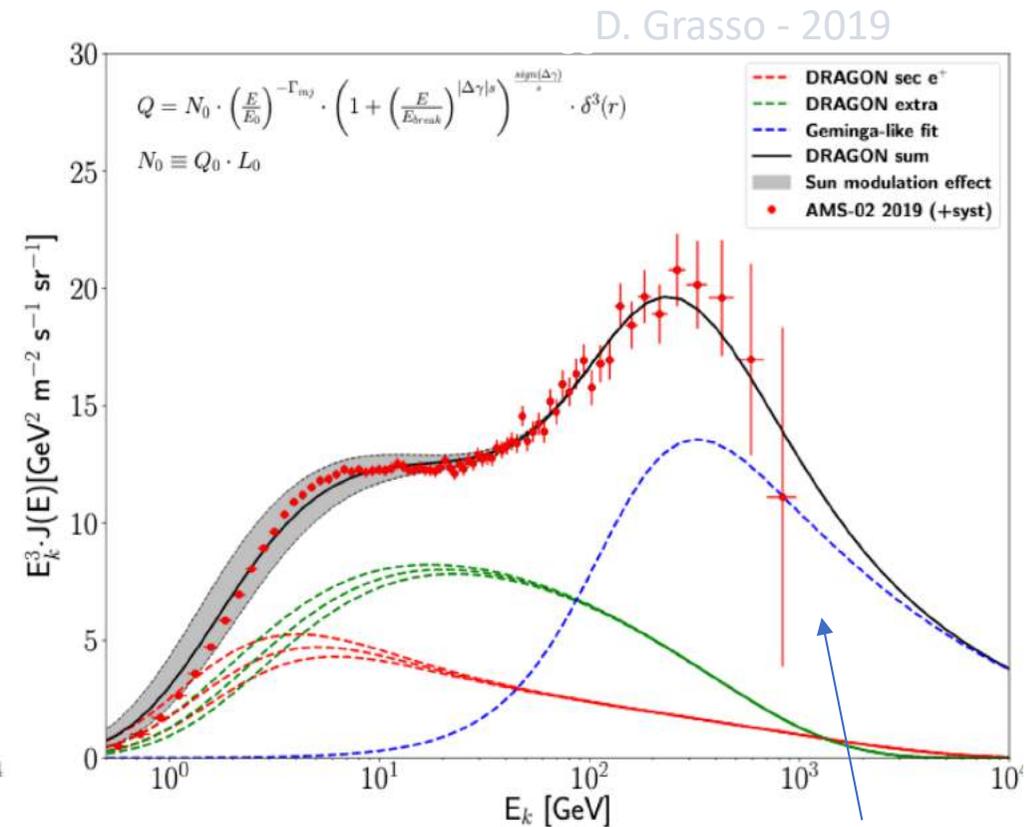


# Sorgenti astrofisiche standard

- La distribuzione dei positroni può essere descritta dalla sovrapposizione di radiazione cosmica, un insieme di vecchie pulsar distanti da noi (>1kpc) ed una sorgente specifica costituita da una pulsar singola giovane e vicina a noi



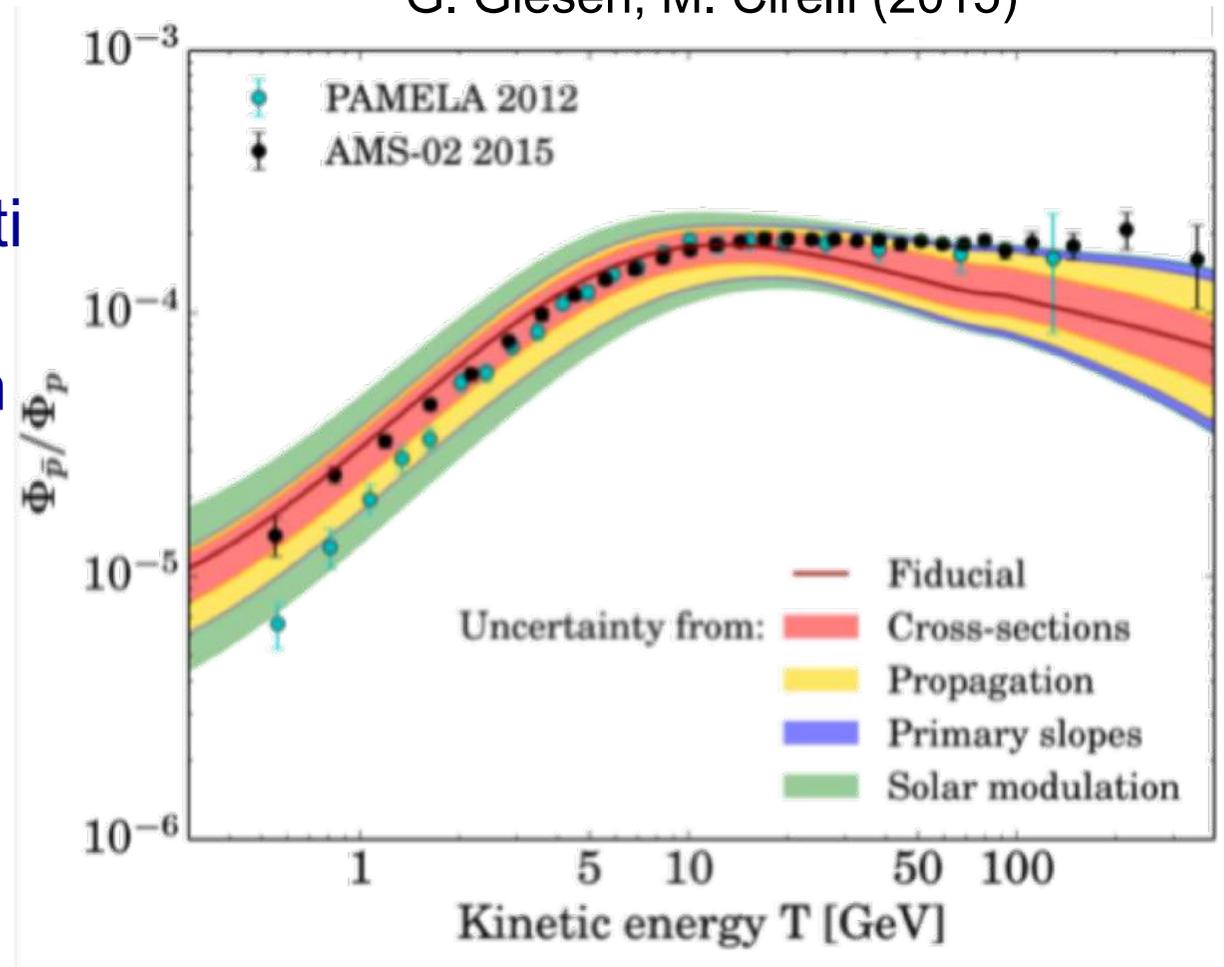
pulsar tipo Monogem



pulsar tipo Geminga

- Lo studio degli antiprotoni è interessante perché possono essere prodotti (probabilmente) dalla Materia Oscura ma non da una pulsar
- Non si osserva un eccesso ad alte energie, ma c'è una certa tensione fra i dati e l'interpretazione fenomenologica

G. Giesen, M. Cirelli (2015)

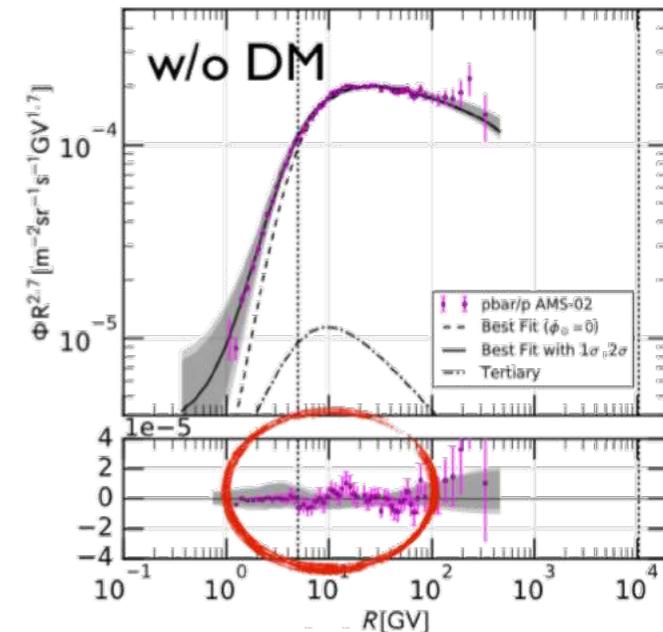
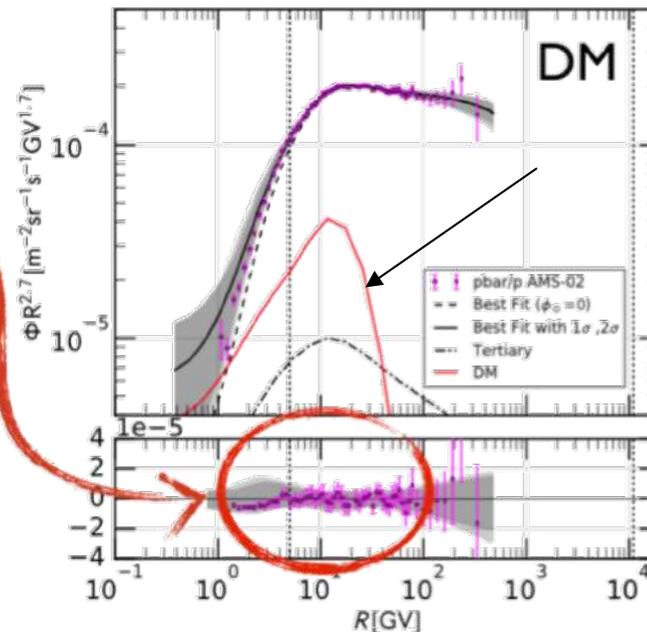


# eccesso nel flusso di antiprotoni?

- Interesse nello spettro di antiprotoni nella zona delle basse energie

Feature  
around 10GV

[see also Cui, Yuan,  
Tsai, Fan, 2017]



Jan Heisig (UCL - CP3)

7

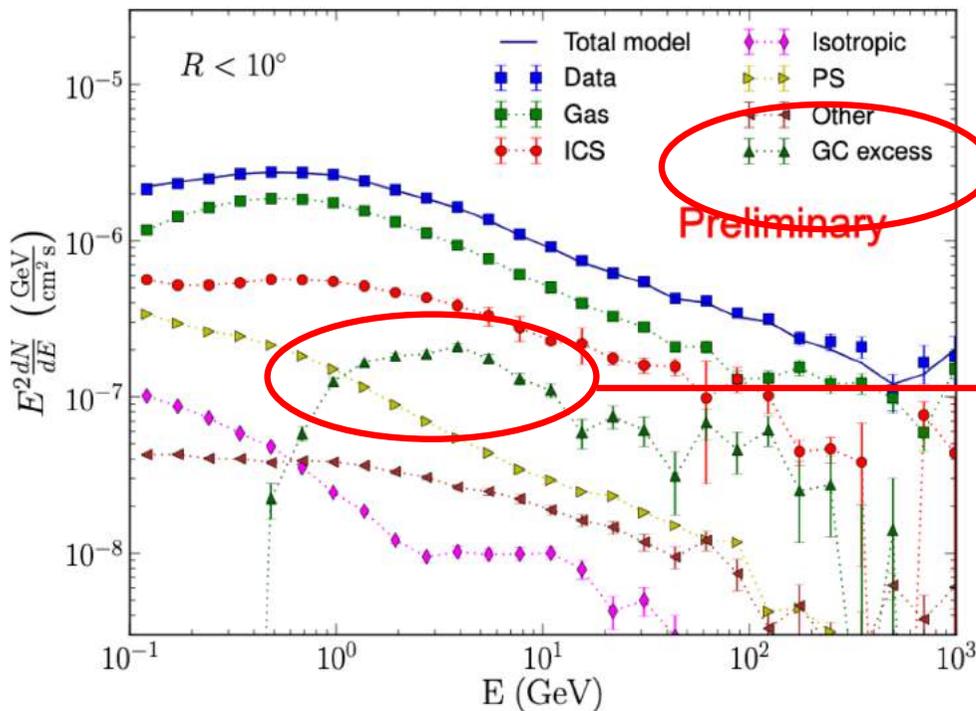
Ghent, July 12, 2019

- Si osserva una «feature» dello spettro intorno ai 10 GeV, in particolare un possibile eccesso di eventi
- Sembra un effetto trascurabile, ma è importante perché ...

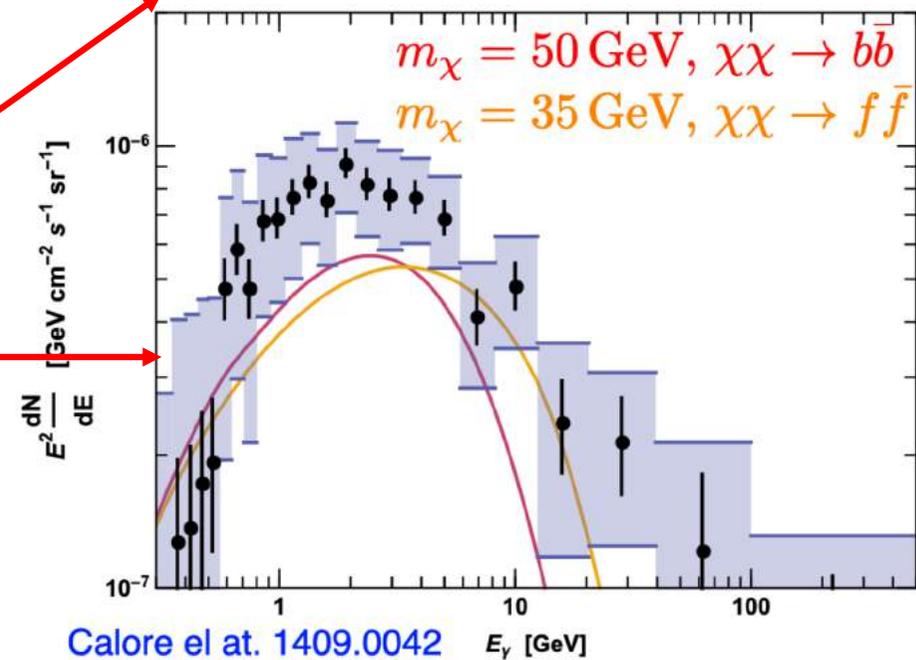
# Galactic center excess

- Tornando alla misura di fotoni dal Centro Galattico, da alcuni anni si osserva un eccesso di radiazione per fotoni di 1-2 GeV
- La misura è complessa in quanto ci sono molte sorgenti di fotoni

Flusso di fotoni dal Centro Galattico

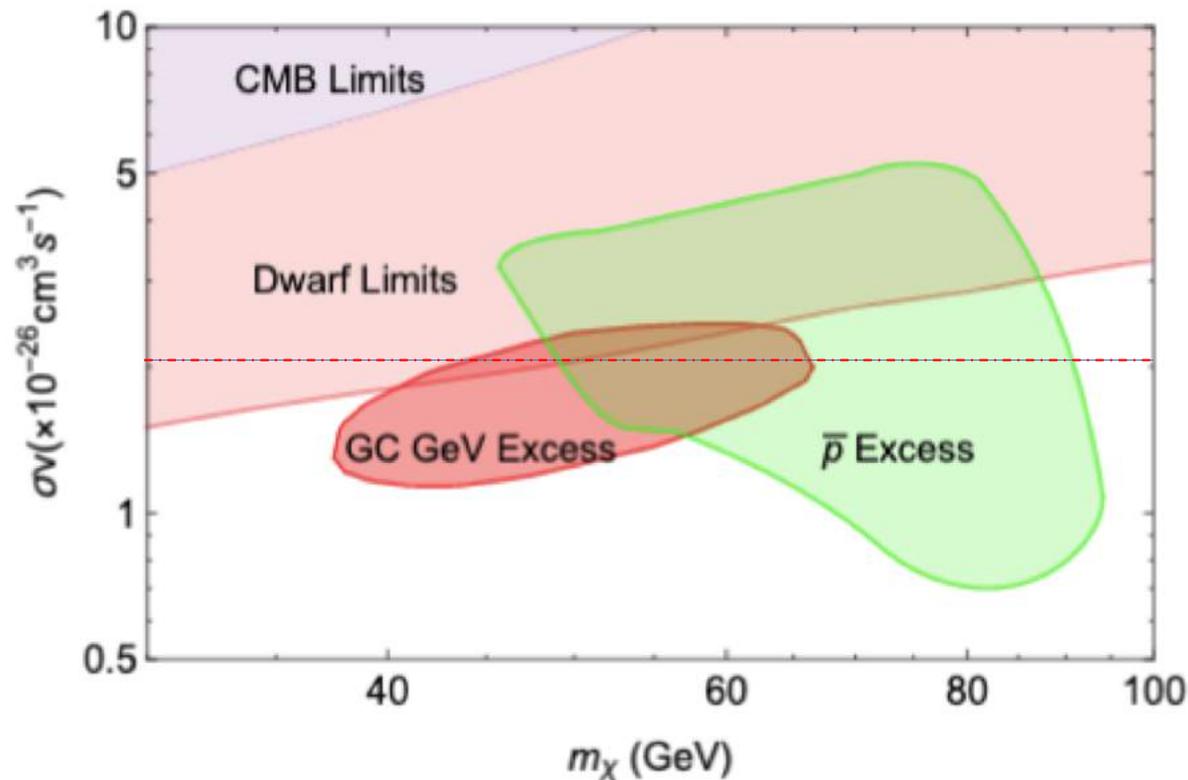


Galactic Center excess



# Antiprotoni + GC excess = DM ?

- I due eccessi *fotoni dal centro galattico* e *spettro antiprotoni* possono essere spiegati ipotizzando una *particella di Materia Oscura di massa  $M_\chi \sim 50$  GeV* che decade con una sezione d'urto compatibile con il modello termico delle WIMP!



D. Hooper 2017,  
A. Cuoco 2017

- Sappiamo di non sapere!
- La scala della Materia Oscura non è nota, per cui è necessario «attaccare» questa ricerca da molti lati
- Gli esperimenti nello Spazio, oltre a produrre risultati riguardo la *radiazione cosmica* e la *astrofisica gamma*, dei quali non ho parlato, consentono di porre limiti importanti alla esistenza di Materia Oscura tipo WIMP
- Esistono alcuni «accenni» all'esistenza di una particella WIMP → importante approfondire
- C'è bisogno di nuove idee per interpretare il lato oscuro dell'Universo ... ne avete alcune?