

Il Nostro Universo: Dal Big Bang a oggi

Fiorenza Donato

Dipartimento di Fisica, Università' di Torino and INFN
Scuola di Fisica 2017 - Cavallerizza Reale, Torino
11 aprile 2017

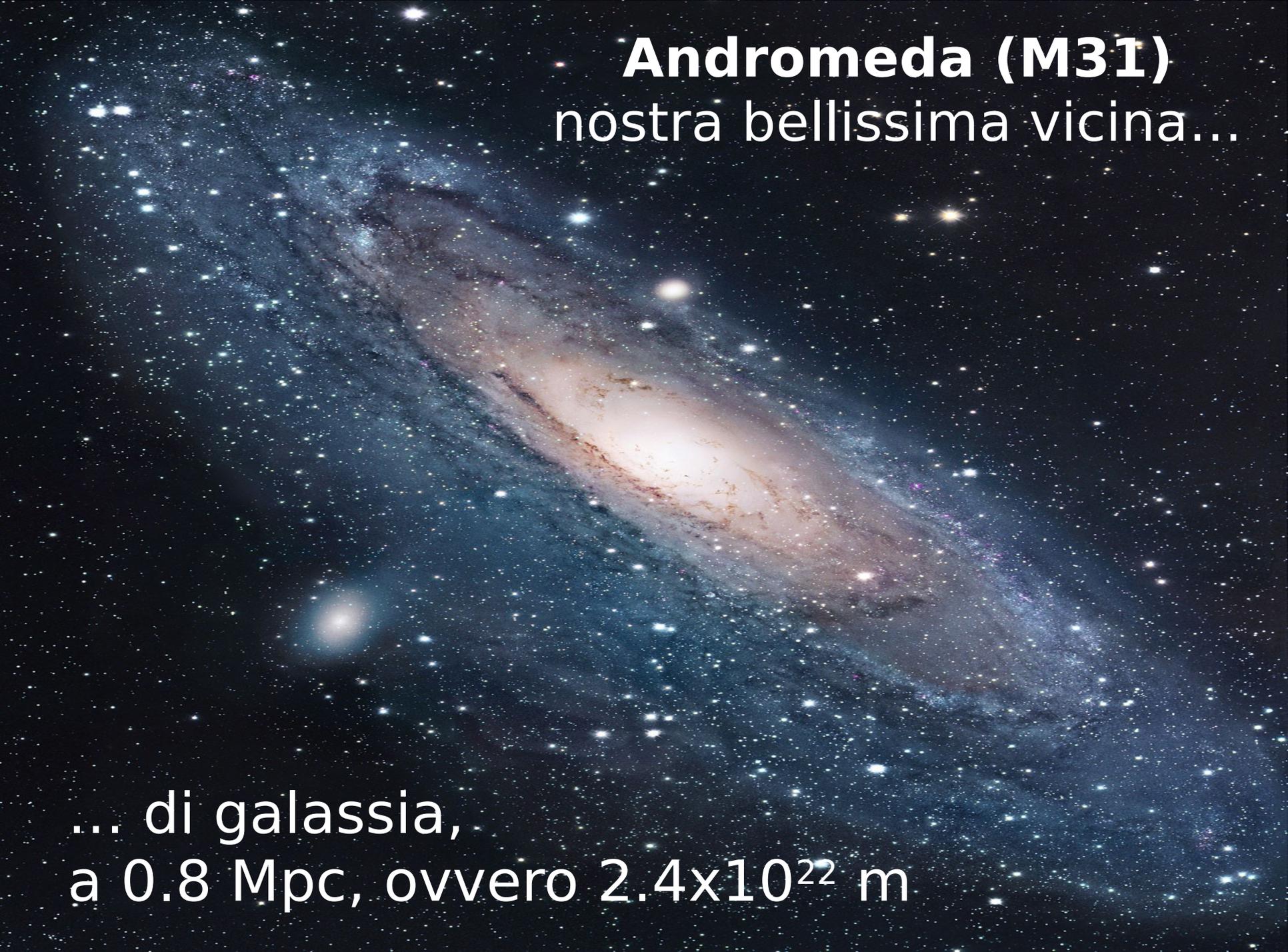
Con gli occhi



Una rappresentazione della nostra Galassia



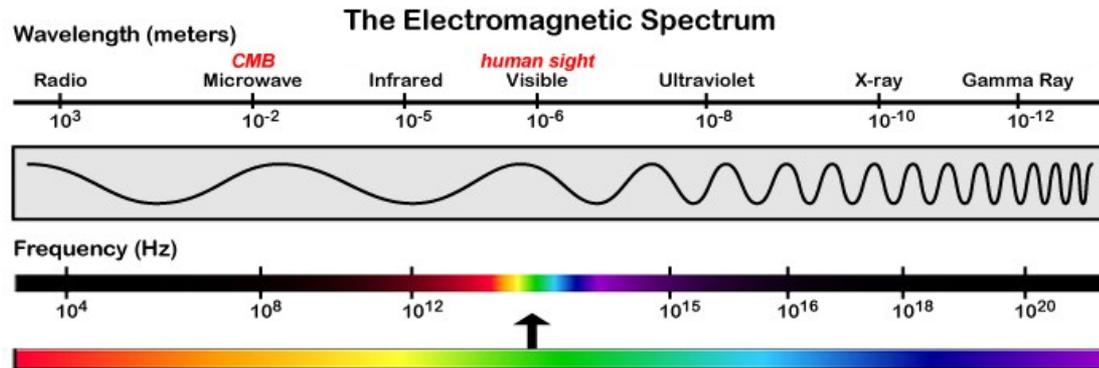
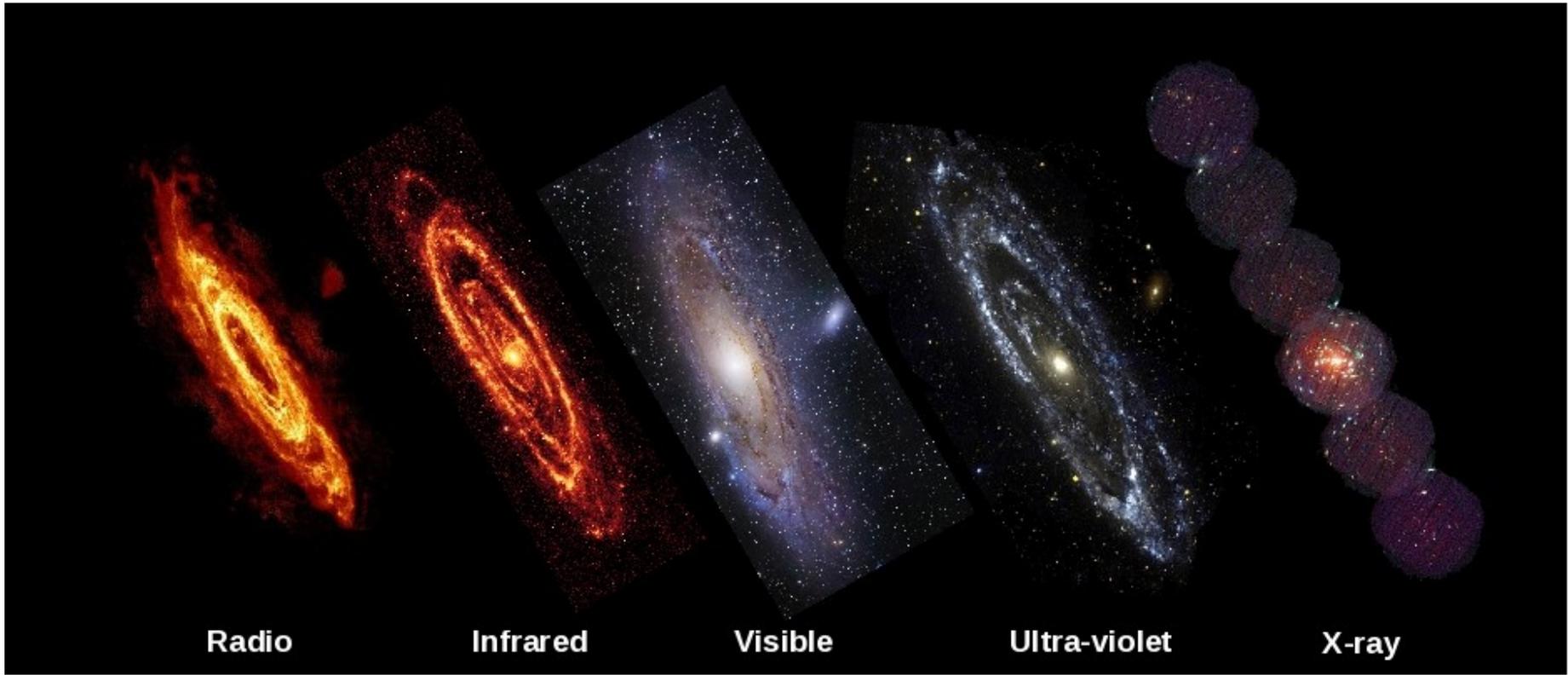
Che noi non possiamo vedere dall'esterno,
come in figura, essendoci dentro ...

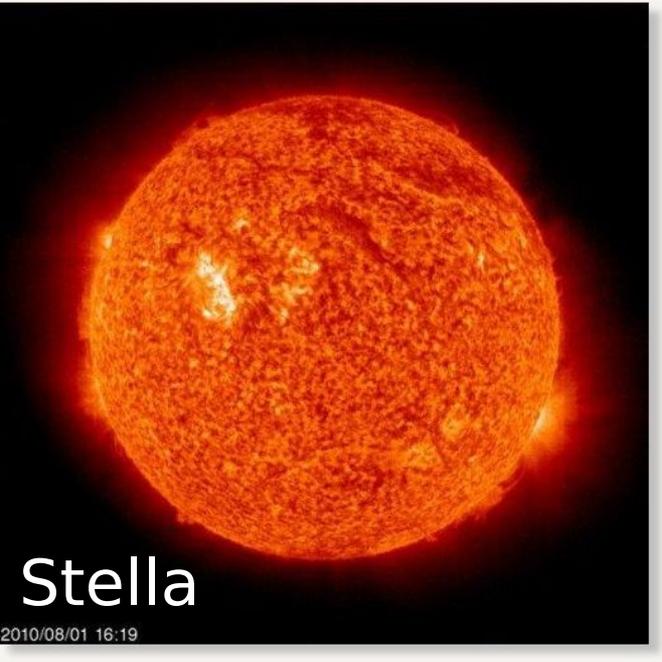


Andromeda (M31)
nostra bellissima vicina...

... di galassia,
a 0.8 Mpc, ovvero 2.4×10^{22} m

Andromeda, cambiando telescopio





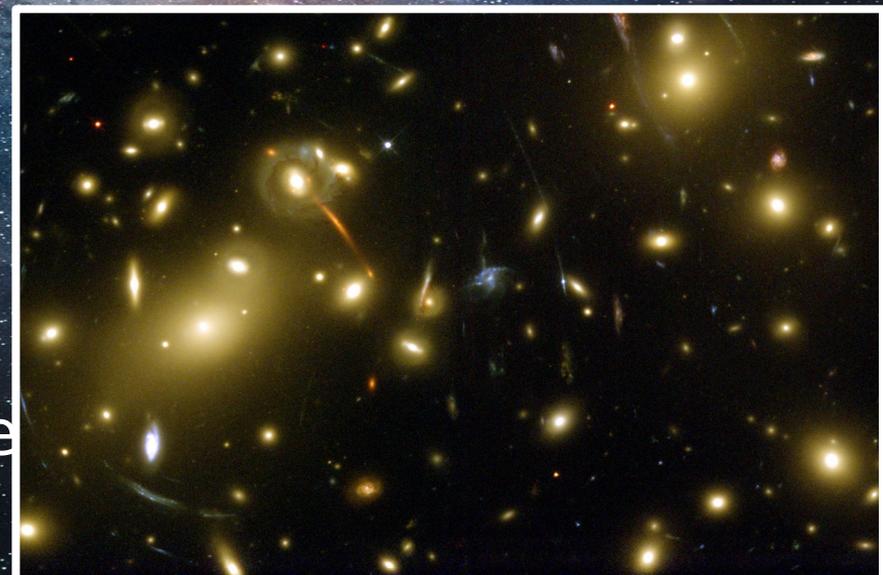
Stella

2010/08/01 16:19

Una galassia contiene 100-1000 MILIARDI di stelle



Un ammasso di galassie
contiene 100-1000 galassie



Contiamo gli oggetti nel cielo grazie alla alla radiazione
elettromagnetica che emettono a diverse frequenze
(visibile, infrarosso, ultravioletto, radio, raggi X,
raggi gamma)

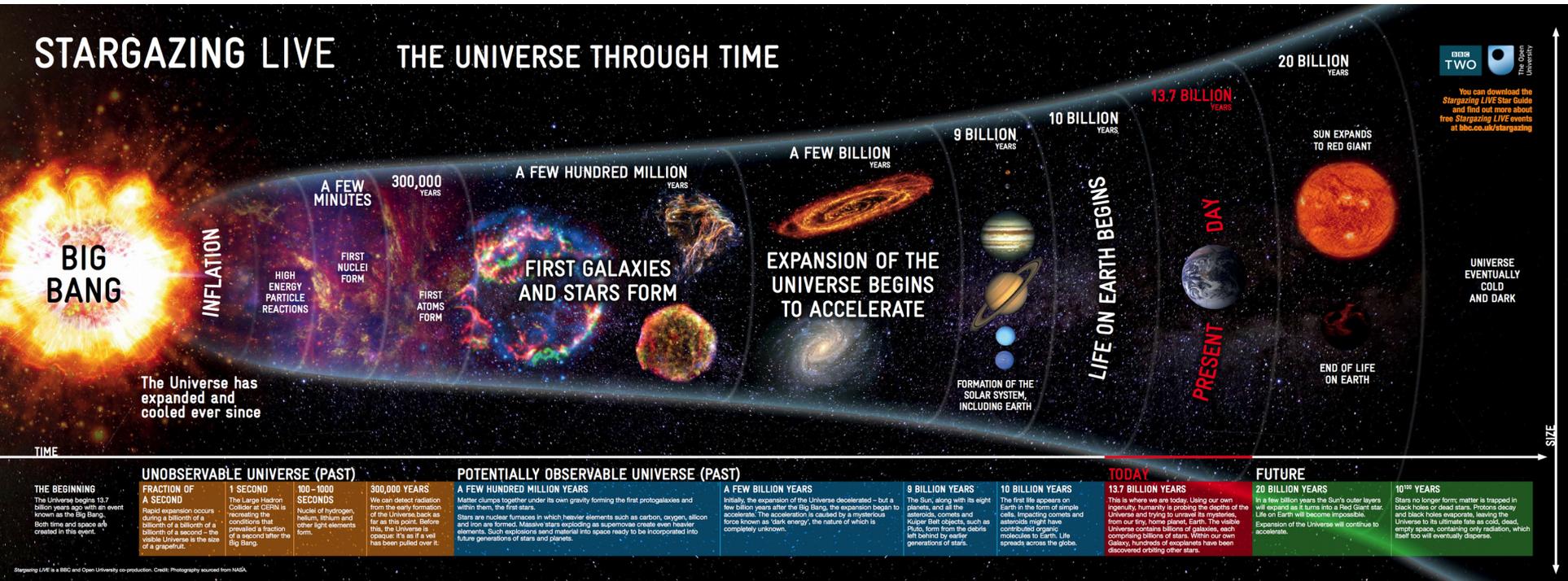


E' TUTTO QUI?

I nostri ultimi 14 miliardi di anni

STARGAZING LIVE

THE UNIVERSE THROUGH TIME



L'universo e' in espansione, accelerata

Come si misurano le proprietà dell'Universo primordiale??

Un metodo molto potente: la radiazione di fondo a microonde

Sono onde radio, rilasciate solo 380.000 anni dopo il Big Bang

(14 miliardi di anni fa), impronta dell'Universo primordiale

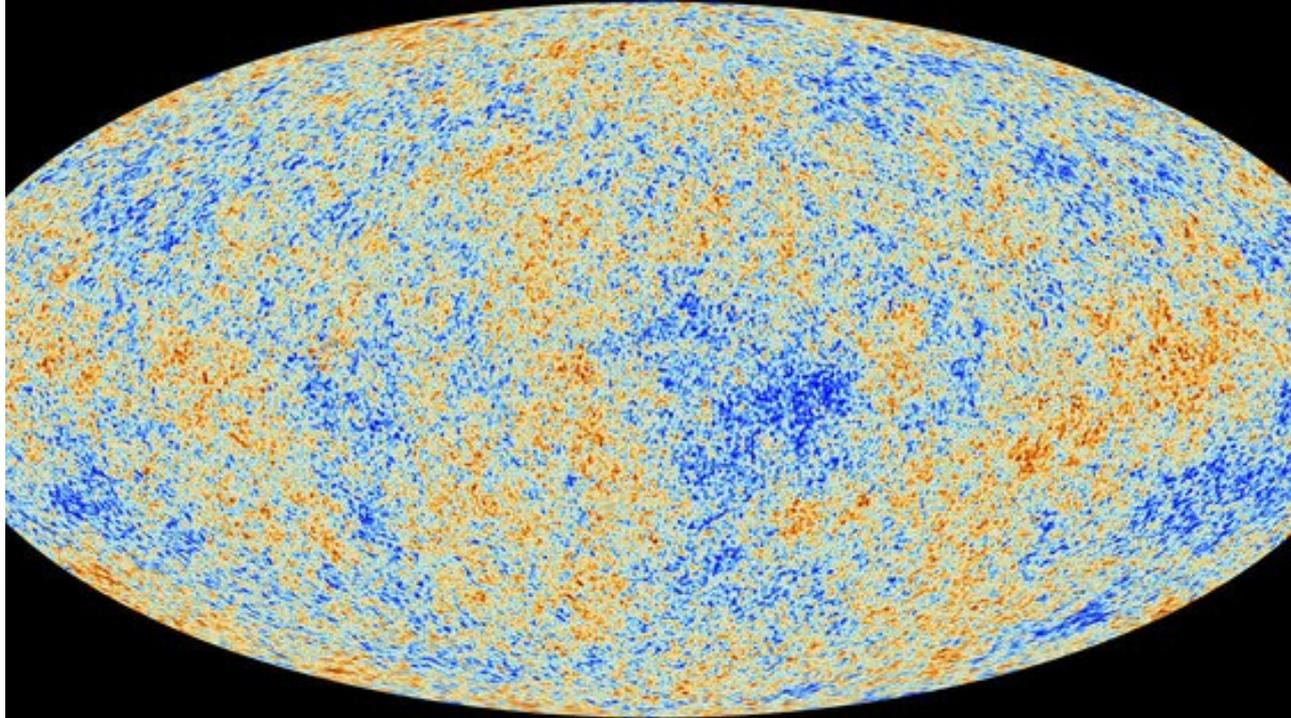


Penzias e Wilson, 1964



Satellite Planck, 2014
(ESA=European Space Agency)

CMB – Cosmic Microwave Background Radiation



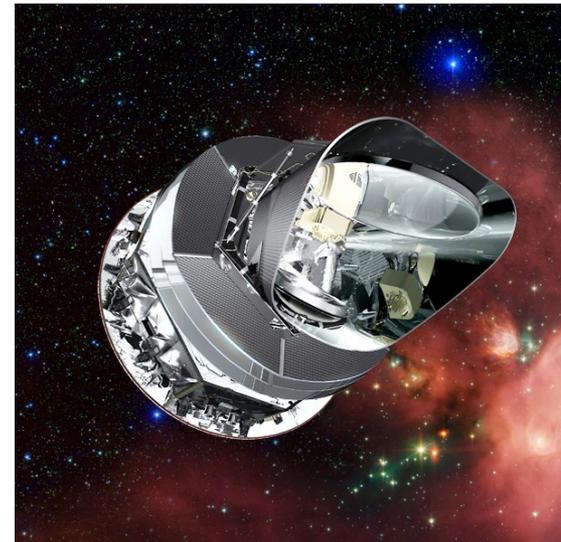
Il cielo visto da Planck

Ha la stessa temperatura, 2.7K,
ovunque.

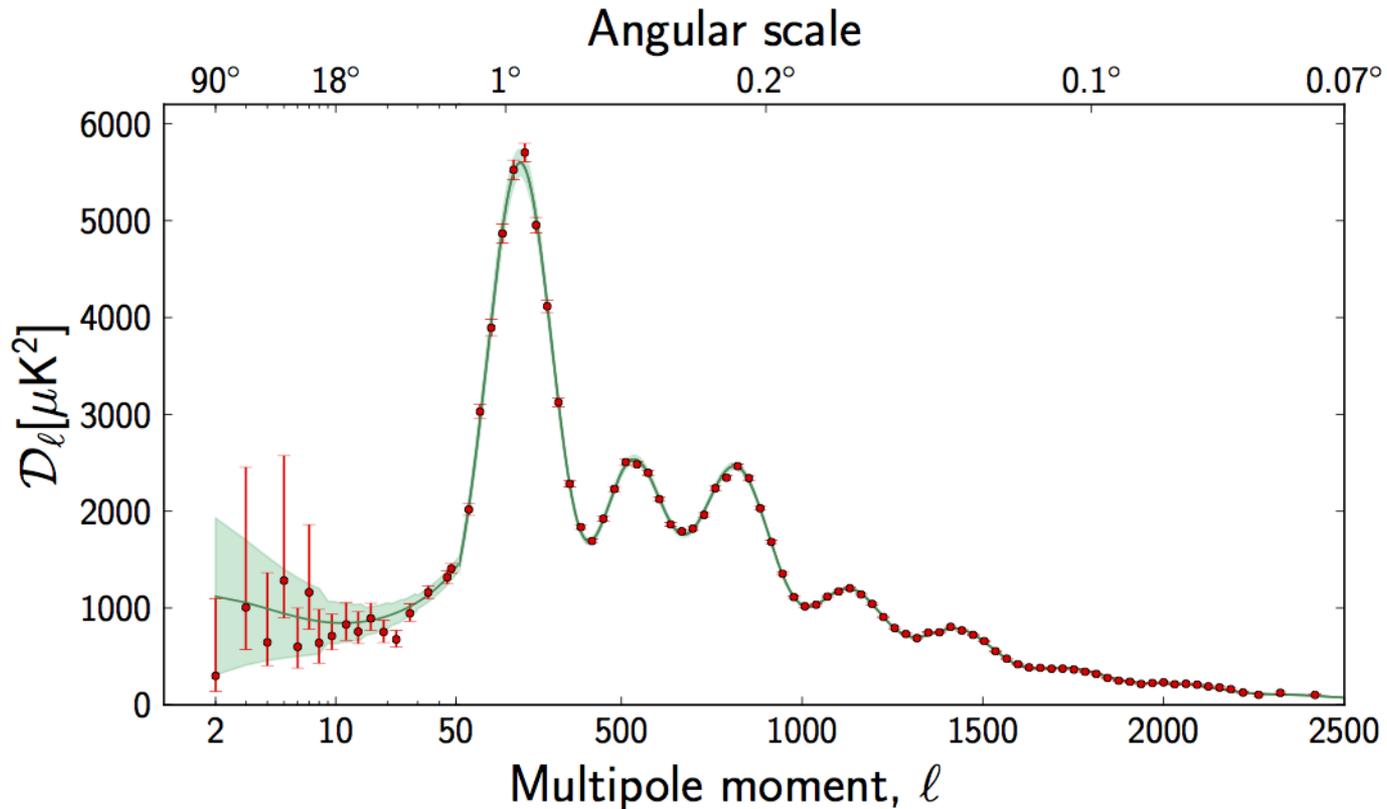
Quasi.

Ci sono differenze di 1/100000.

Molto (molto!) informative



Lo spettro delle anisotropie della CMB



Un modello complesso di formazione ed evoluzione dell'Universo e' rappresentato dalla curva verde
Il Big Bang e' stato caldo, l'Universo e' in espansione, la maggior parte della materia NON e' luminosa, e una grande quantita' di energia e' "oscura"



La prima volta la materia oscura

F. Zwicky, 1933

Studiò il moto delle galassie nell'ammasso della Chioma (> 1000 galassie identificate).

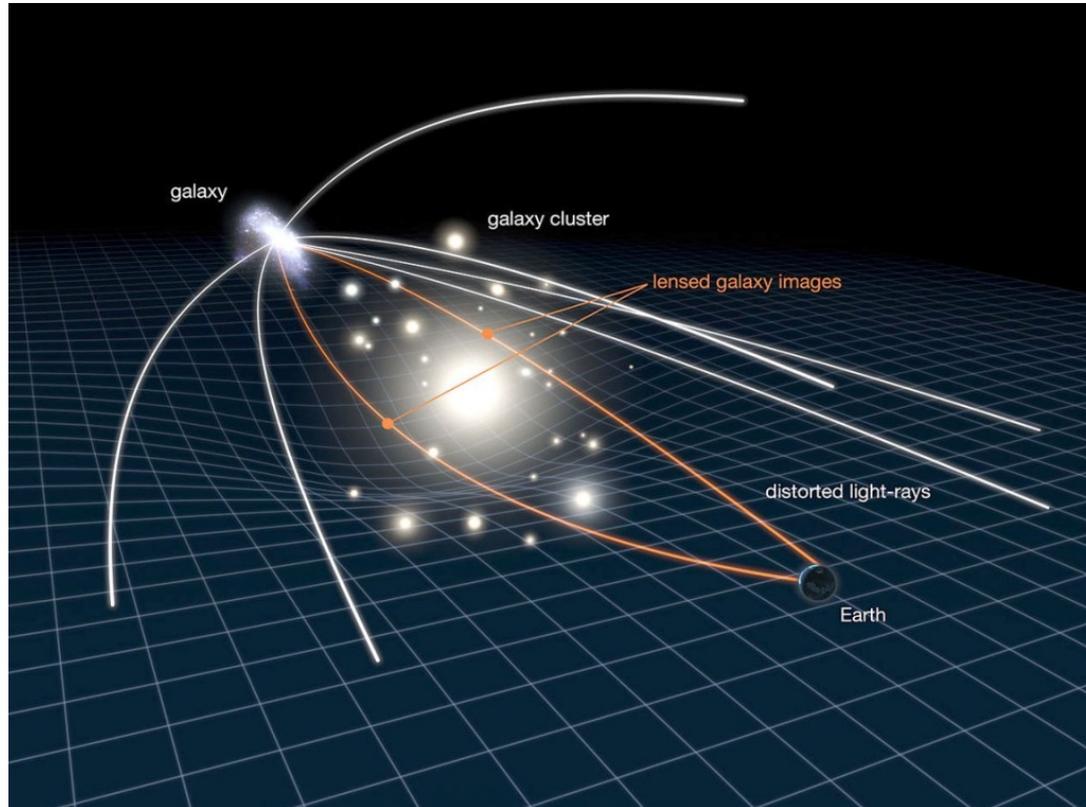
La velocità delle galassie nell'ammasso e' troppo grande, non è giustificata dalla massa delle galassie osservate.

E le galassie, a quella velocità, dovrebbero "evaporare"

$$M_{\text{dyn}}/M_{\text{lum}} \sim 100$$



Lente Gravitazionale



La teoria della relatività generale di Einstein prevede la distorsione della LUCE ad opera di oggetti molto massivi.

Dalla misura della distorsione di un immagine, possiamo risalire alla massa sullo sfondo che l'ha causata

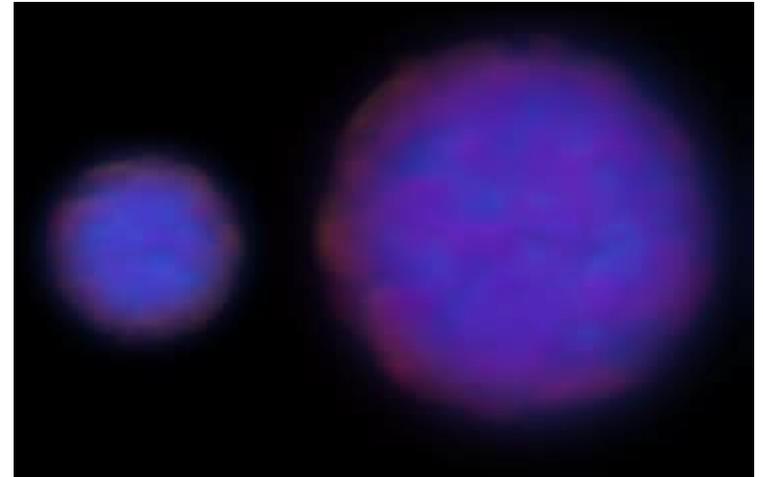
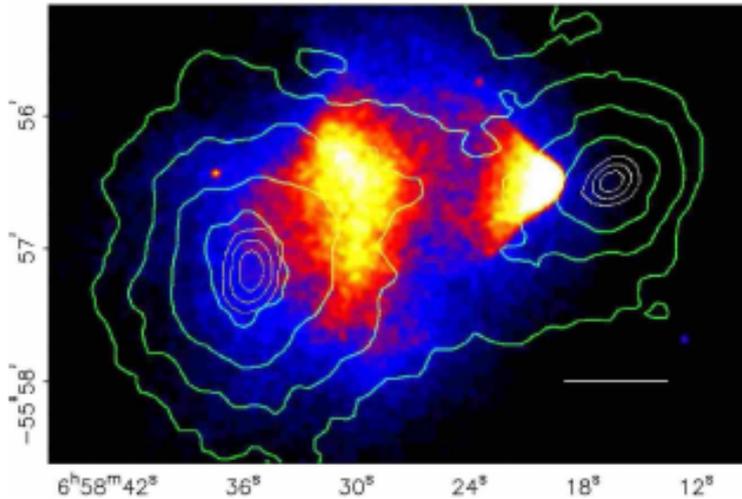
Ammassi di galassie: Abell_NGC2218



Galassie ~ 1%
Gas ~ 9%
Materia oscura ~ 90%

Evidenza diretta di MO: il bullet cluster

Clowe et al. 2006



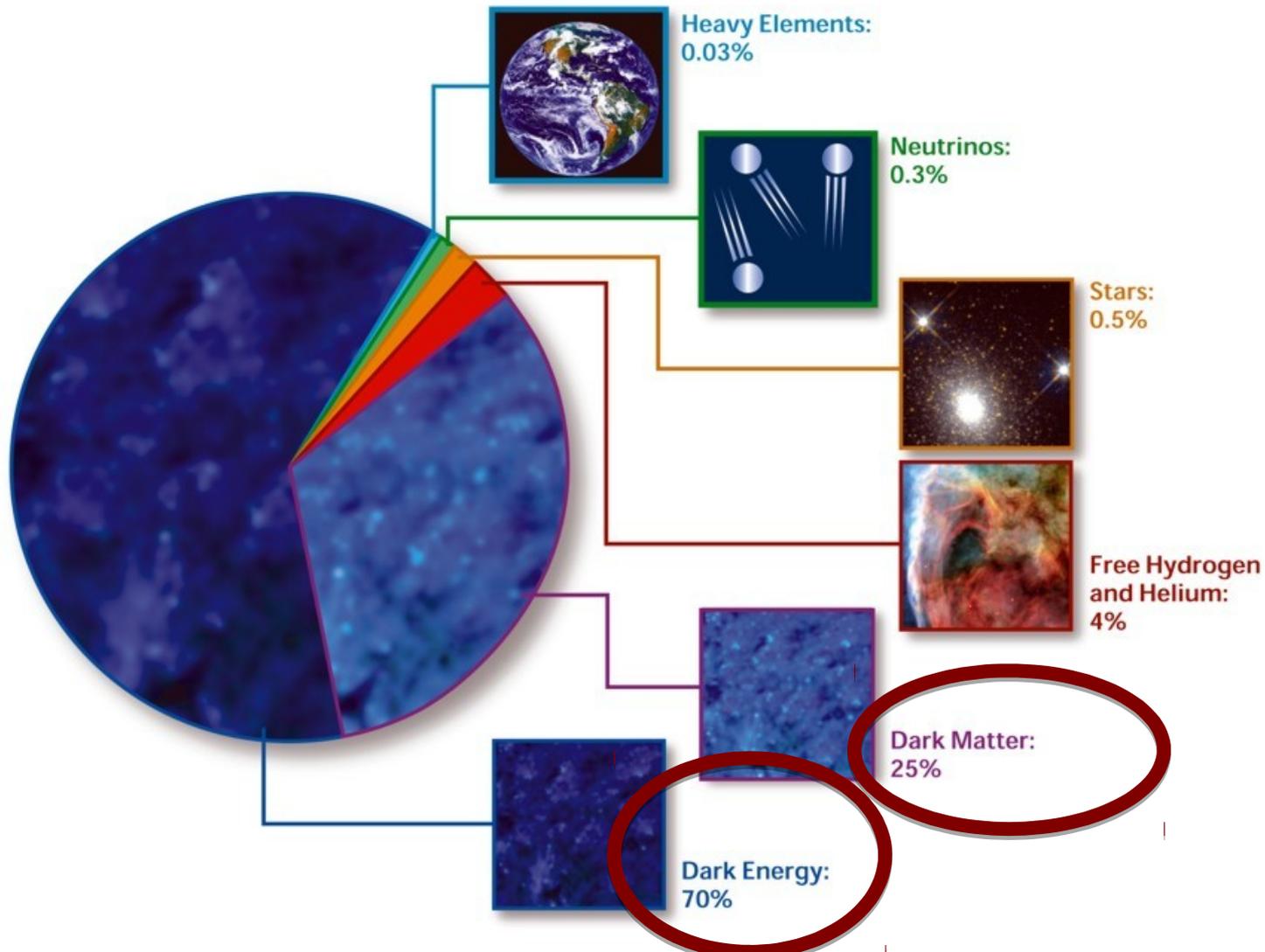
Collisione di due ammassi di galassie (a circa 4500 km/sec):

- le galassie (nel visibile) non collisionali
- gas (in X-rays) si comporta come un fluido
- lente gravitazionale debole: mappa del potenziale gravitazionale

**Il potenziale gravitazionale segue la distribuzione delle galassie (1-2%) ed è sfasato rispetto al gas (5-15%).
Le galassie dei due ammassi devono avere aloni di materia oscura**

La composizione dell'Universo

COMPOSITION OF THE COSMOS



La materia oscura
nelle

Galassie

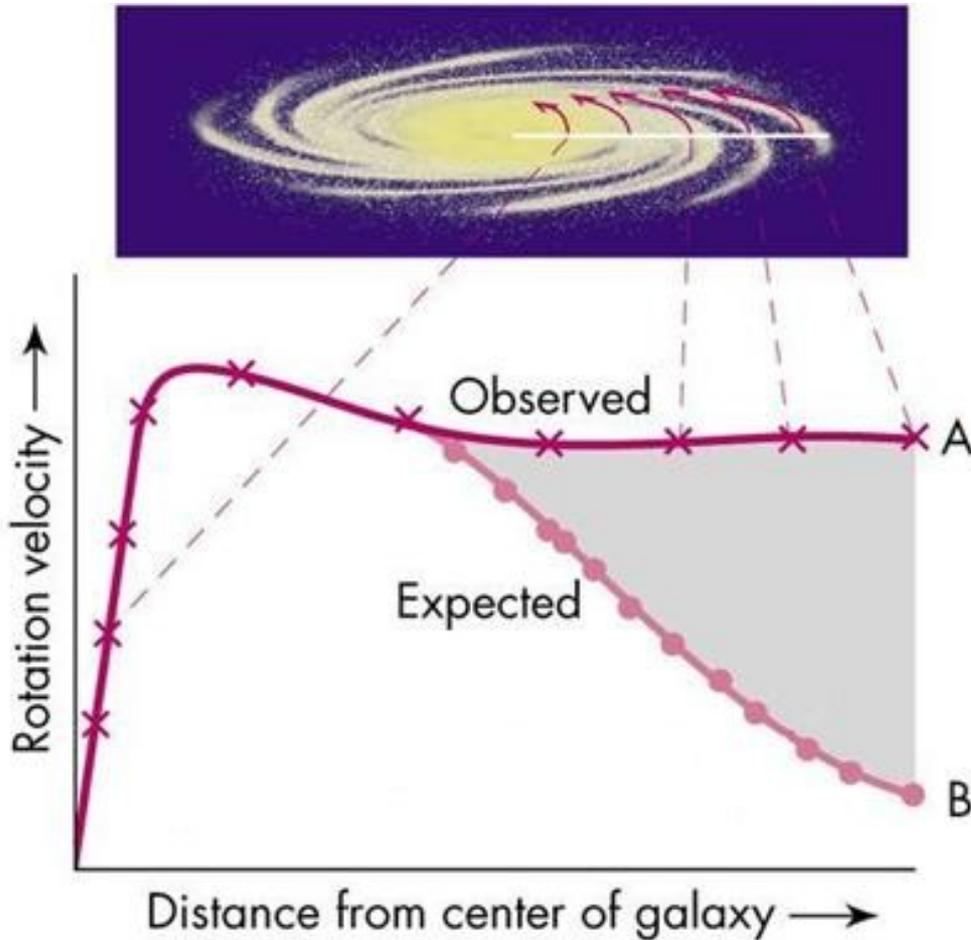
La velocità' di rotazione nelle galassie



1970-80: Vera Rubin e collaboratori misurarono la velocità' orbitale di STELLE e di GAS a diverse distanze dal centro galattico, per decine di galassie a spirale.

Iniziarono con M31, la galassia di Andromeda ... bellissima

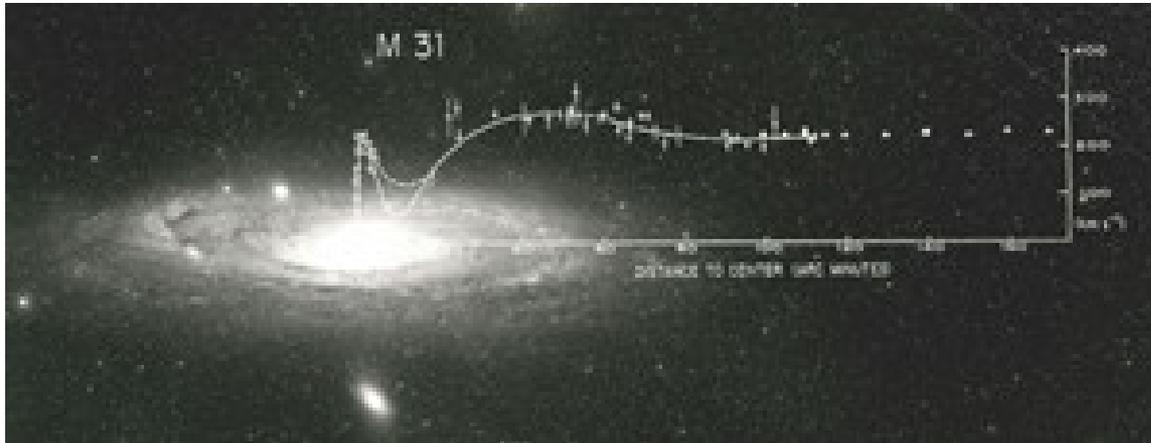
Le curve di rotazione: $v(R)$



$$v(R) = \sqrt{\frac{G \cdot M(<R)}{R}}$$

Andando verso l'esterno del disco la velocità di rotazione dovrebbe diminuire

Le curve di rotazione: $v(R)$



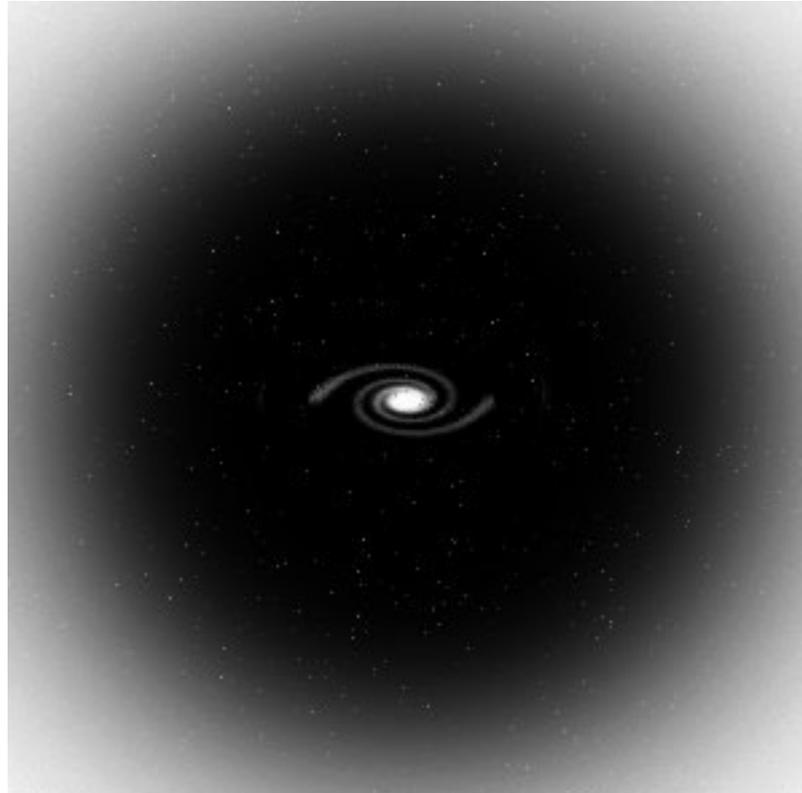
$$v(R) = \sqrt{\frac{G \cdot M(<R)}{R}}$$

Si MISURA che gli oggetti lontano dal centro galattico si muovono con velocità simile a quelli vicini

$$M(<R) \sim R$$

Ci dev'essere una gran quantità di materia NON VISIBILE, che contribuisce gravitazionalmente alla velocità della materia visibile

Una tipica galassia, dopo averla pesata



Credit: Jose Wudka

Il disco luminoso delle galassie è circondato da un alone oscuro che contribuisce al 90% della massa della galassia

La Materia Oscura

- La forza di gravità non è ben compresa?
- Esiste una **particella** che costituisce gli aloni oscuri attorno alle galassie?

La particella che può costituire
la Materia Oscura nell'Universo
NON è una particella NOTA

WIMP = Weakly Interacting Massive Particle

Come si cerca la MATERIA OSCURA?

- Ricerche di nuove particelle agli **acceleratori** (i.e. CERN)
- Ricerca **diretta** di Materia Oscura (Laboratori sotterranei)
- Ricerca **indiretta** di Materia Oscura (telescopi, esperimenti nello spazio)

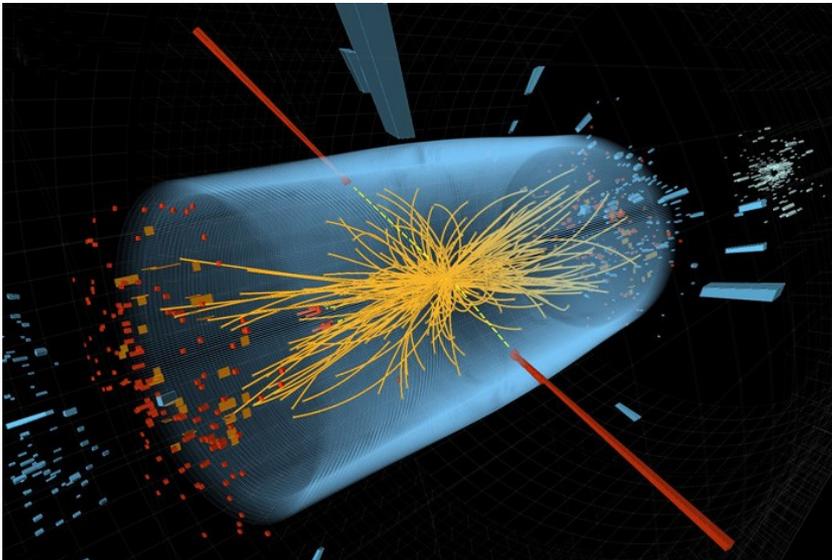
Ricerca di nuove particelle



Principio Fisico 1

Einstein  l'energia si puo' trasformare in massa

Possiamo cercare nuove particelle fra i prodotti delle collisioni di particelle note, ad energie estreme



Collisione protone-protone
a CMS, uno dei grandi rivelatori
Nel LHC (Large Hadron Collider)
al CERN.

Se a LHC/Cern venisse scoperta una nuova particella con le caratteristiche adeguate per essere un candidato di M.O.

NON

Potremmo sicuri che la natura l'abbia scelta per formare la massa mancante nell'Universo

Dobbiamo cercare evidenze astronomiche:

- essere un relitto del Big Bang
 - costituire gli aloni delle galassie
- +
- Avere una velocità bassa (~ 300 km/s)
 - Interagire (al più) debolmente

Nomina sunt consequentia rerum

La materia oscura è tale perché non ha interazione forte né elettromagnetica

Se le avesse la osserveremmo

Ma prima ancora di osservarla, si sarebbe dissipata, e non formerebbe gli aloni delle galassie

E quindi non potremmo vederla

C'è una via d'uscita???

Ricerca DIRETTA di Materia Oscura

Un vento di particelle di Materia Oscura,
che circondano la galassia,
può colpire (oltre a noi!) anche
un sofisticatissimo apparato sperimentale

Principio Fisico 2



Misc

ENERGIA depositata da una ipotetica
particella

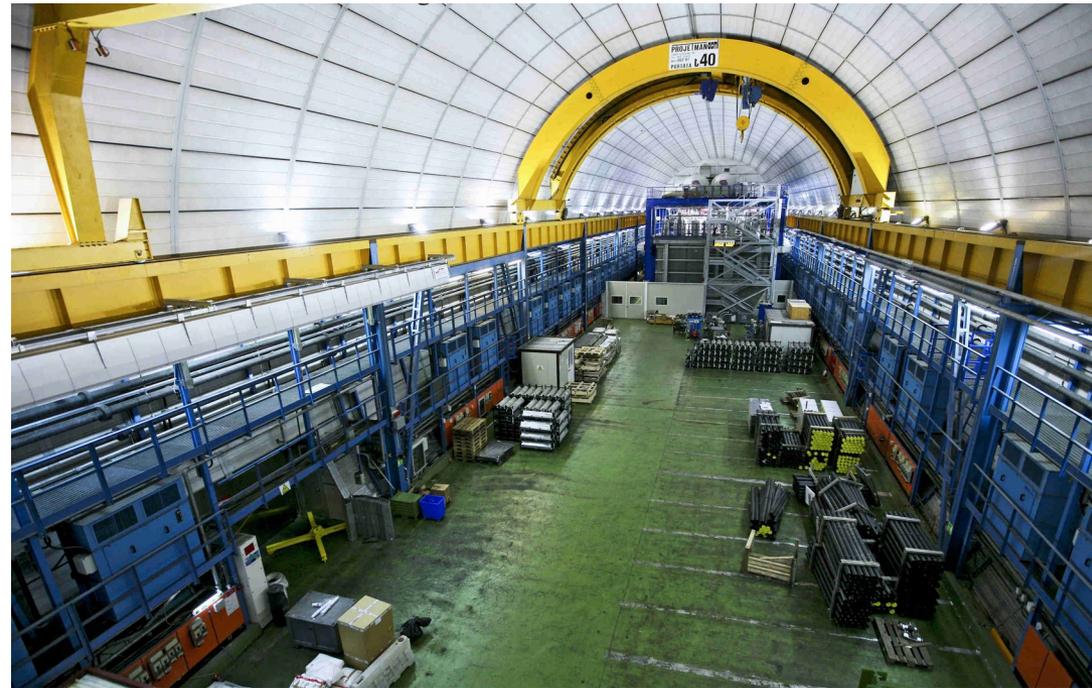
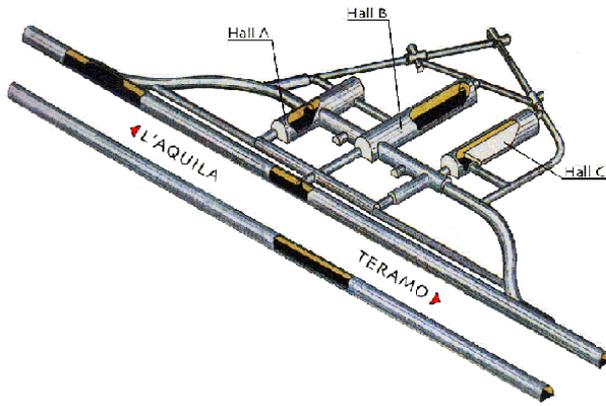
di Materia Oscura nell'urto con un nucleo di un
rivelatore

Ricerca di Materia Oscura nei laboratori sotterranei

La montagna assorbe (buona parte) delle particelle
cosmiche,
che impedirebbero di vedere i segnali molto (molto!!) deboli
lasciati dalla materia oscura



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Esperimenti: Dama, Xenon, Cresst,
+ molti altri nel mondo!!

Rivelazione diretta di Materia Oscura

I segnali provenienti da urto WIMP - nucleo sono

RARISSIMI e AMBIGUI

- ❖ Gli esperimenti devono essere condotti in ambienti estremamente puri
- ❖ Controllo pressoché totale di ogni altro segnale simile (neutroni)
- ❖ Elevata stabilità dell'apparato nel tempo (anni)

Rivelazione INDIRETTA di Materia Oscura

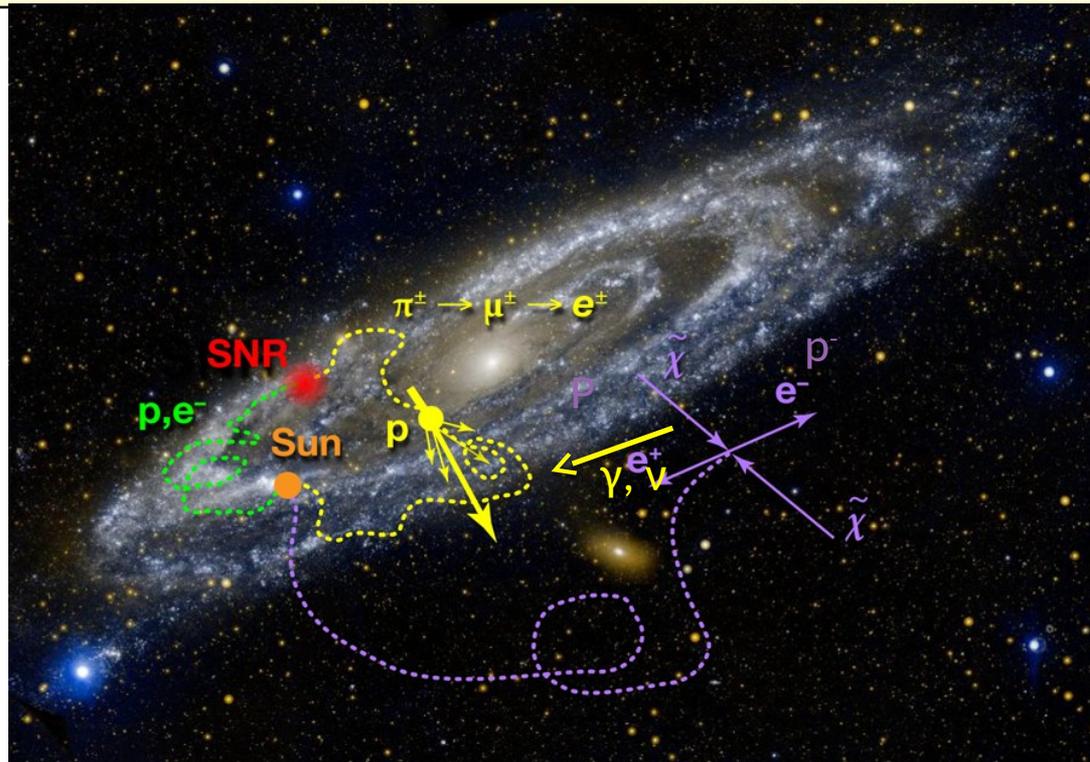


Principio Fisico 3

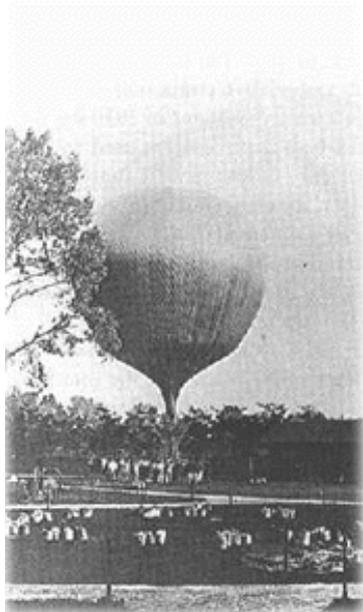
Due particelle di Materia Oscura nell'alone della Galassia possono annichilire e originare particelle note, tra cui antimateria e raggi gamma

Antimateria: esiste, ma e' rara

Raggi gamma: fotoni (onde elettromagnetiche) ad altissima energia



CR discovery: Victor F. HESS 1912



1912 VF Hess embarked on 7 flights onboard hot-air balloon.
August 7, 1912 reached 5200m height!

In the data he collected, the radiation was increasing with the altitude: the opposite of what expected for radiation originating in the Earth crust.

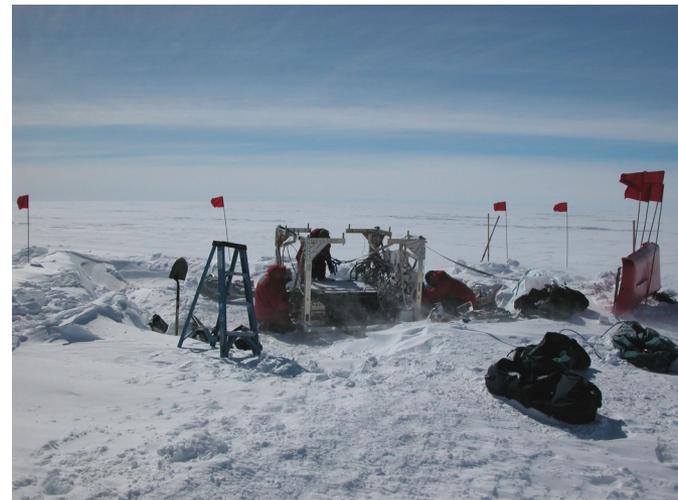
There is a “rain” of particles pervading the sky, called cosmic rays (CRs).



Misura di particelle cosmiche in alta atmosfera



Esperimenti su
Pallone
in Antartico



Misura di particelle cosmiche nello spazio

AMS-02 sulla
stazione spaziale
internazionale

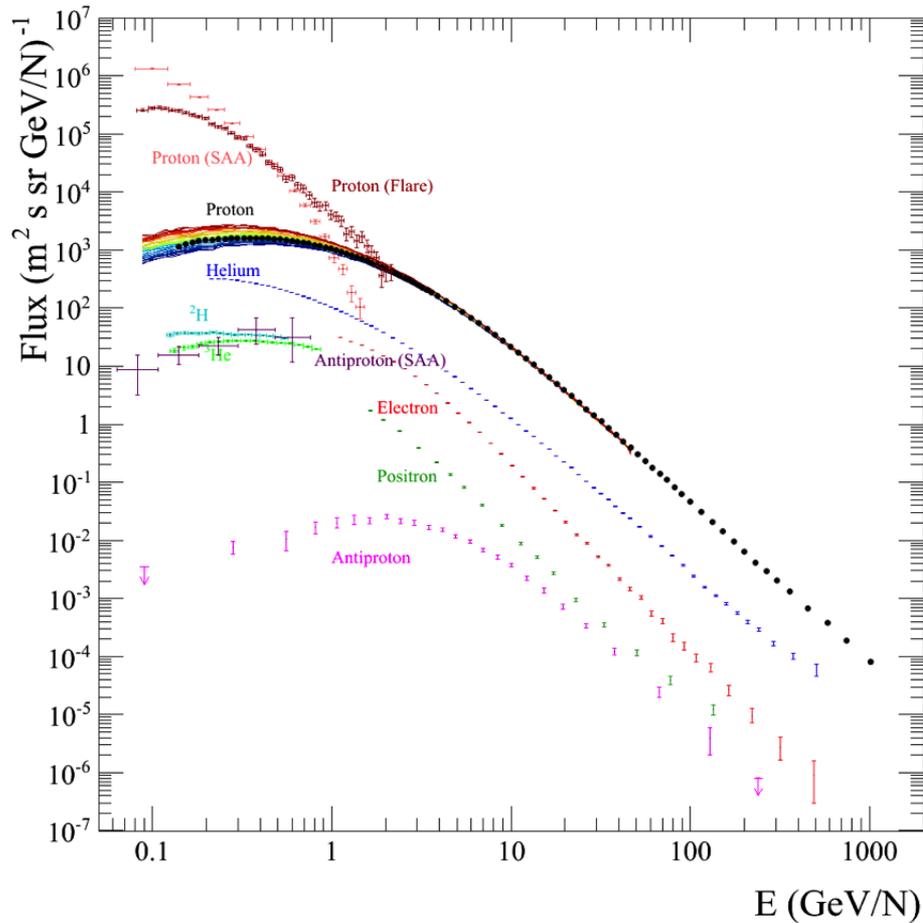


ps: La stazione spaziale e'
Visibile ad occhio nudo

Pamela, su satellite
(INFN)



Risultati dallo spazio: Pamela

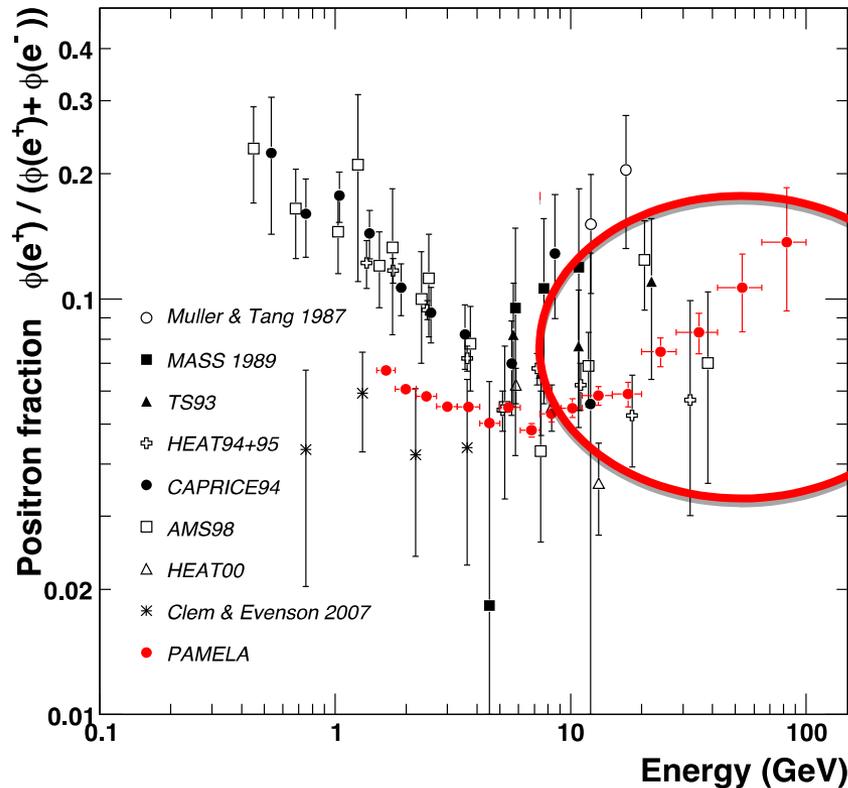


Vengono misurati
FLUSSI di particelle.

I protoni sono le particelle
Cosmiche piu' abbondanti

Misurata l'antimateria:
positroni e antiprotoni.

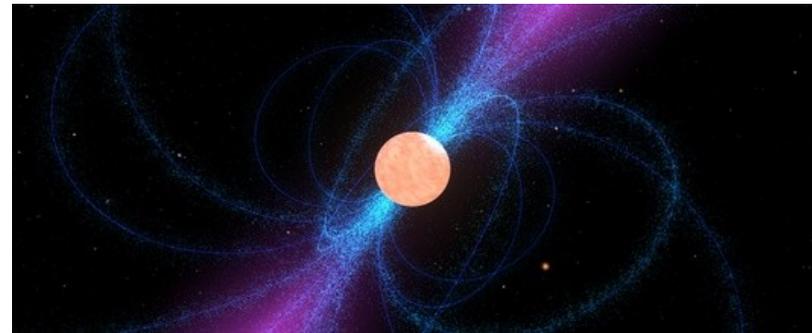
I positroni: e' materia oscura che si annichila?

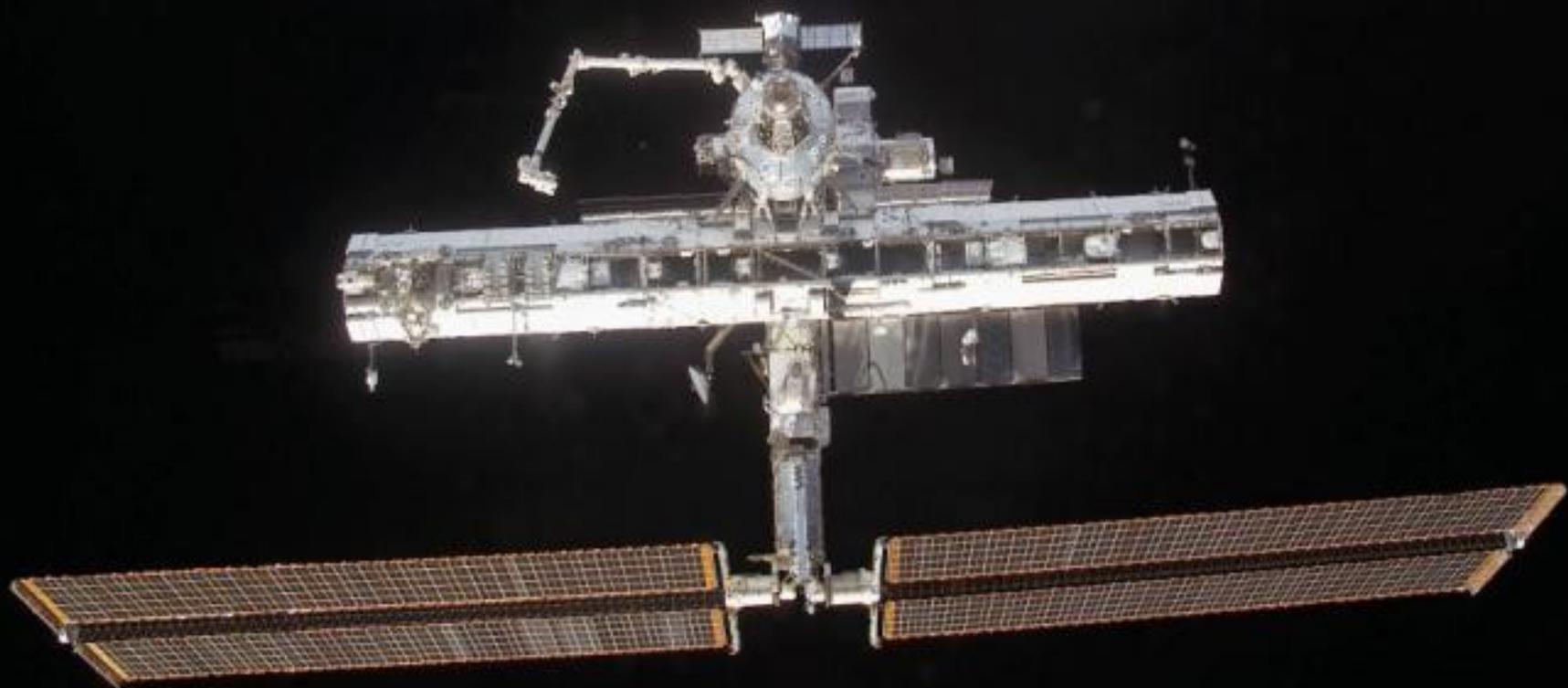


I dati a energie più alte NON sono compresi in termini di reazioni note fra raggi cosmici e mezzo interstellare

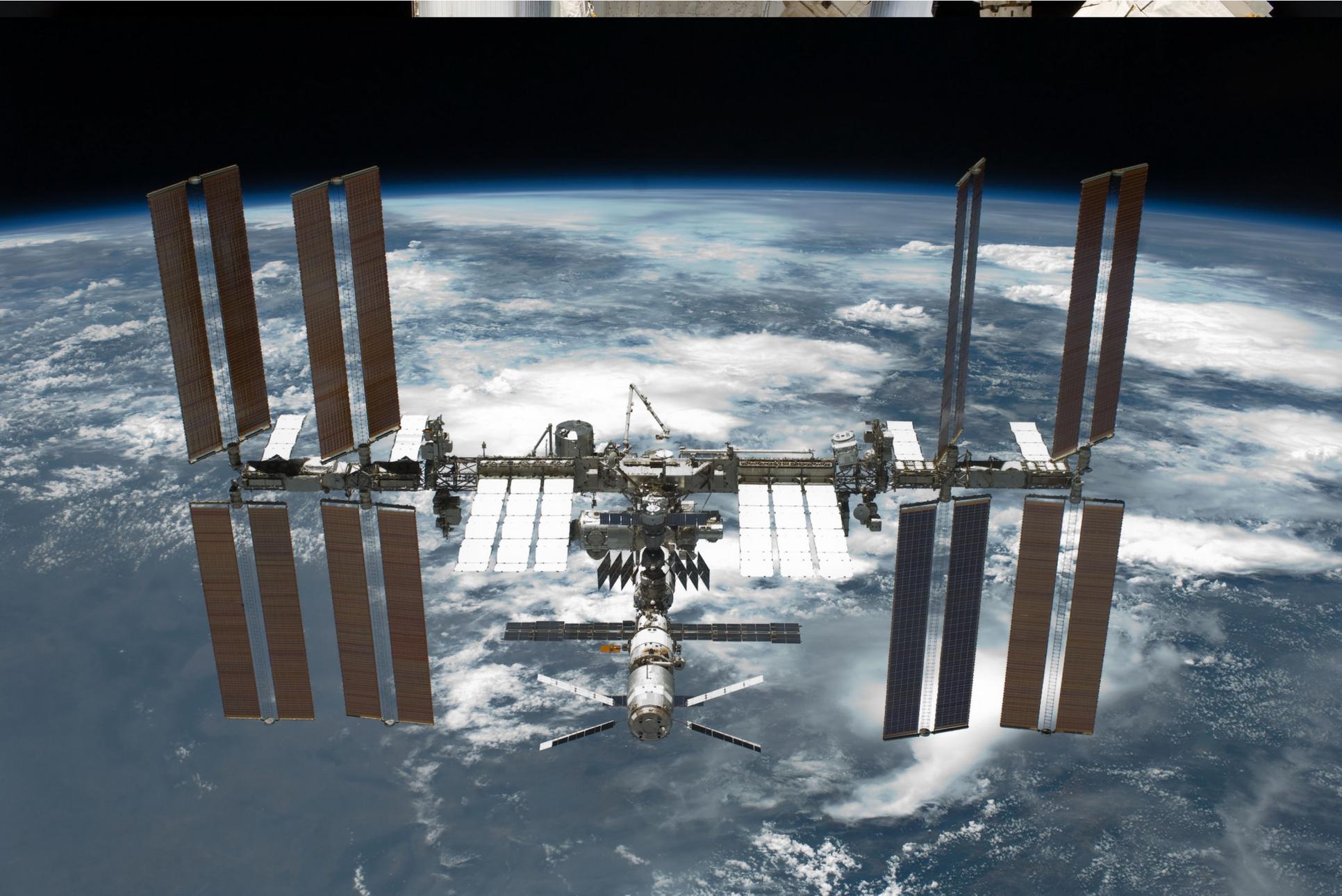
La possibilità' che siano positroni da annichilazione di materia oscura nella galassia è difficile

Potrebbero essere positroni (ed elettroni) emessi da PULSAR, relitti stellari a veloce rotazione.





AMS sulla stazione spaziale orbitale



Oltre le particelle cariche

I fotoni

**nella banda dei raggi gamma,
la più energetica**

Fermi Large Area Telescope

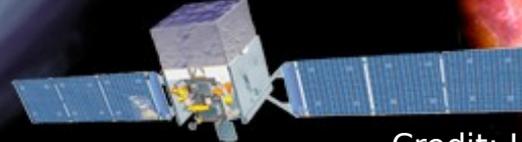


Rivela raggi **gamma dal 2008**, le onde elettromagnetiche di energia estrema, provenienti dalla nostra galassia e da galassie lontanissime



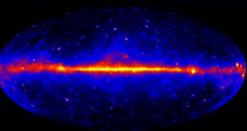
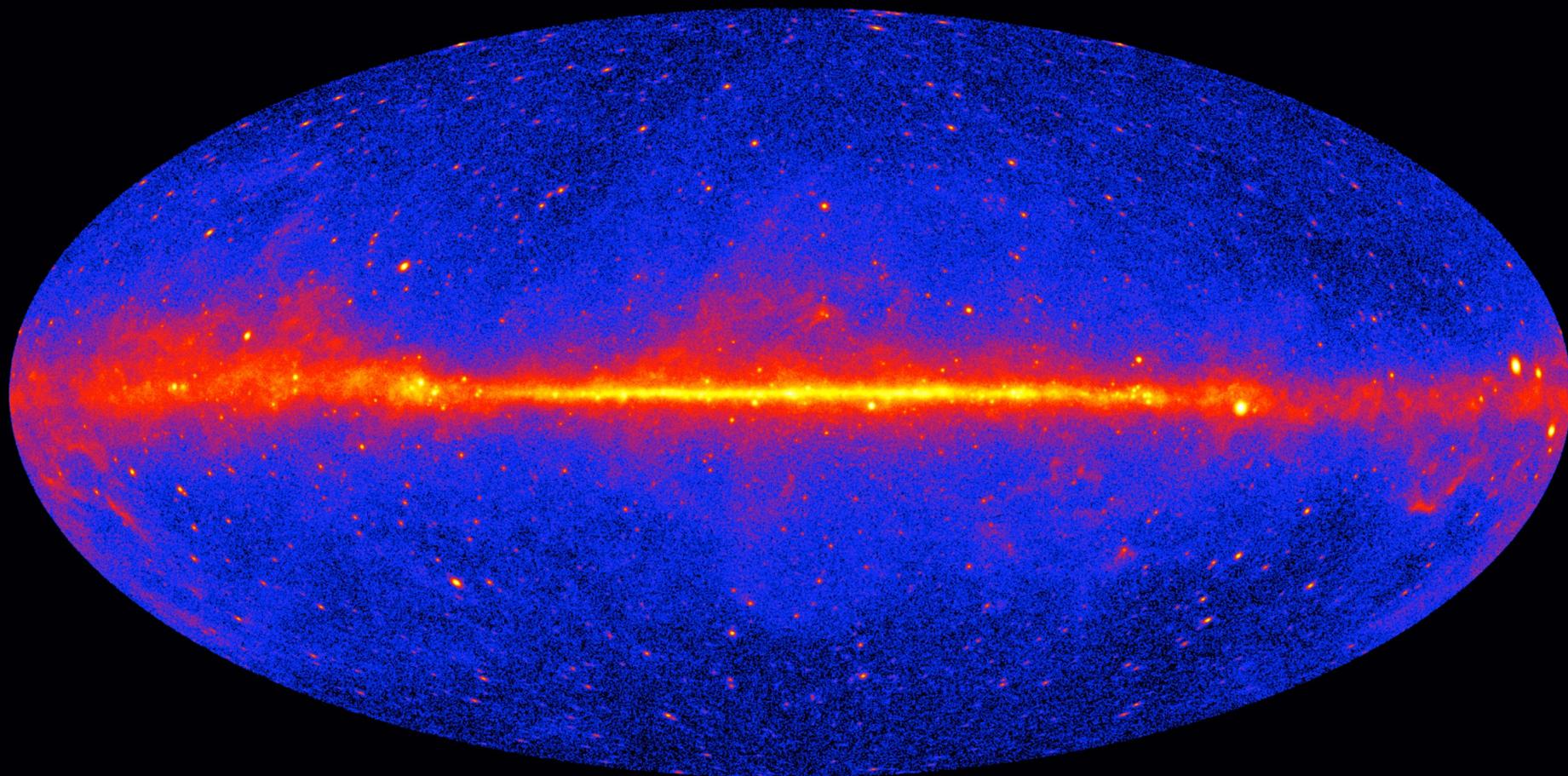
Fermi

Gamma-ray Space Telescope

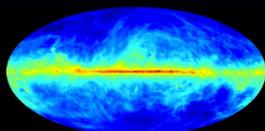


Credit: L. Latronico
2015

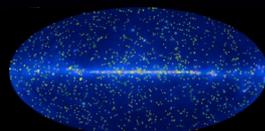
5 years γ -ray skymap showing thousands of sources and Galactic plane glowing in γ -rays



=



+



+



+

???

GeV Sky

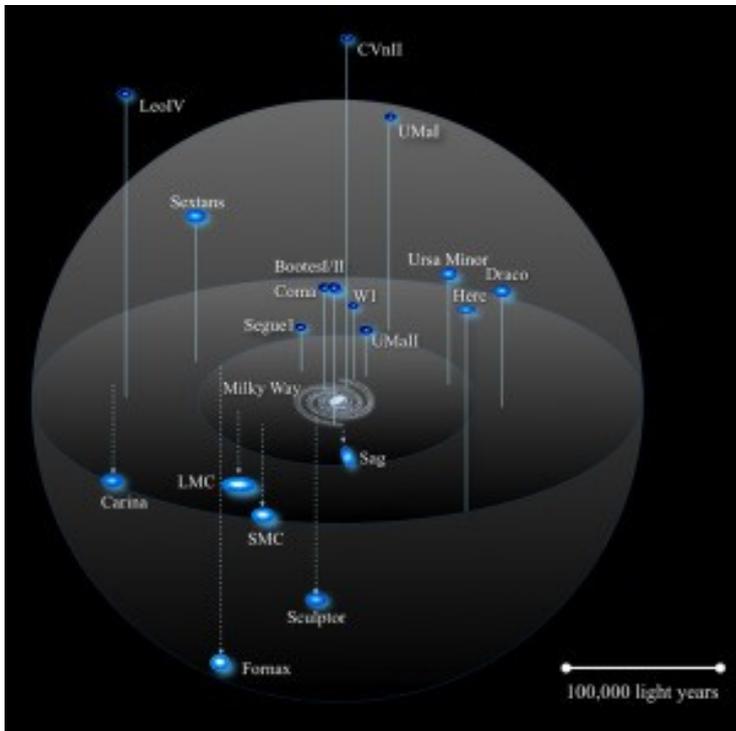
Galactic

Point Sources

Isotropic

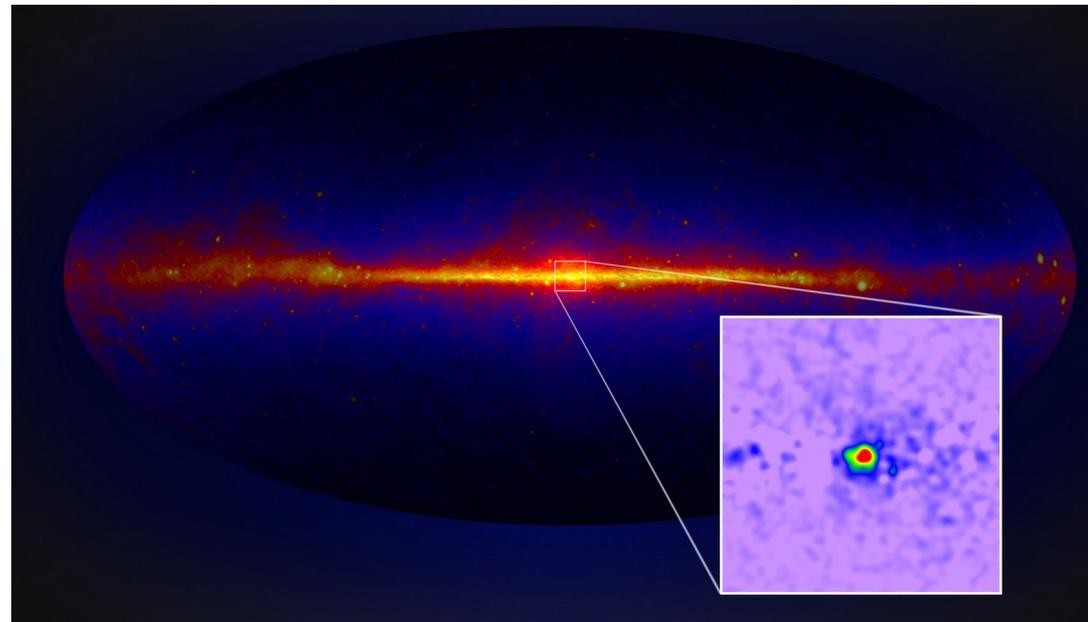
Dark Matter???

Puntando alle galassie
nane sferoidali,
dominate dalla MO



Nessun segnale di MO ...

Analizzando i dati dal
Centro galattico ...



Sembra emergere un segnale
compatibile con MO ...

Riassumendo

- La ricerca di materia oscura impegna un numero considerevole di scienziati, laboratori, tecniche di rivelazione, agenzie finanziatrici, e da molti decenni
- Ricerca di assoluta **frontiera**: acceleratori di particelle, laboratori sotterranei, fisica spaziale, calcolo teorico
- I **segnali** di Materia Oscura che ci aspettiamo sono deboli, spesso ambigui, difficilissimi da identificare (o escludere)
- La scienza è in grado di esplorare potenziali segnali **interessanti**: nessun risultato conclusivo ... per ora!

[...] vorrei dire un grazie più personale alla mia famiglia, ai miei amici, ai miei insegnanti, ai colleghi, a tutti quelli che mi hanno aiutata ad arrivare a questo giorno, sostenendomi o sfidandomi, insegnandomi qualcosa o **semplicemente stando lì per me.**

Samantha Cristoforetti, 23.11.2014



Science is competitive, aggressive,
demanding. It is also imaginative,
inspiring, uplifting.

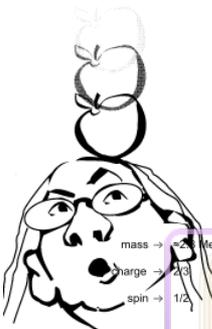
— Vera Rubin —

AZ QUOTES

Matter, and antimatter indeed

Gravitational

Electromagnetic



MATTER is this list of bricks
 These building blocks respect
 “social rules” (on how they can
 cluster, interact, travel, ...) which are
 described by tough mathematics.
 The result is, among other, our
 planet, the light, our bodies ...

LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	GAUGE BOSONS
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 \gamma photon	
	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	
QUARKS	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 \gamma photon	GAUGE BOSONS
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 \gamma photon	
QUARKS	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 \gamma photon	GAUGE BOSONS
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 \gamma photon	
QUARKS	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 \gamma photon	GAUGE BOSONS
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson	
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 \gamma photon	

ANTIMATTER is an individual which
 obeys the same “social rules” but
 with different “moods” (i.e. has the same mass
 but opposite electric charge)

Weak



Quarks glued together \Rightarrow protons, neutrons
 Protons & neutrons stuck with
 electrons \Rightarrow atoms

Strong

Di che cosa e' fatta la Materia Oscura?

Materia Oscura barionica:

- pianeti, lune, detriti, asteroidi, nane brune, nubi molecolari, polvere ...
⇒ contributo trascurabile
- MACHOs (Massive Compact Halo Objects):
relitti stellari, buchi neri, oggetti massivi non luminosi ...
⇒ contributo trascurabile

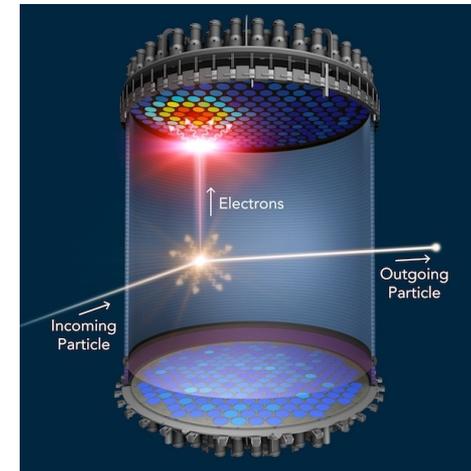
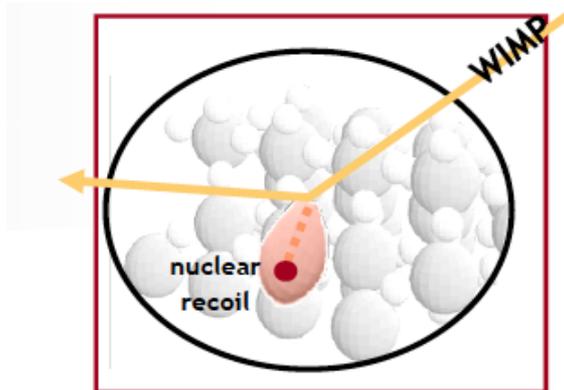
Materia Oscura NON-barionica:

- **neutrini** (hanno una massa, piccolissima)
⇒ contributo trascurabile (impedirebbero la formazione delle strutture cosmiche)
- **WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)**
⇒ perfette. Ma esistono?
- Assioni, Q-balls, monopoli magnetici ... Modellistica pressoché infinita!

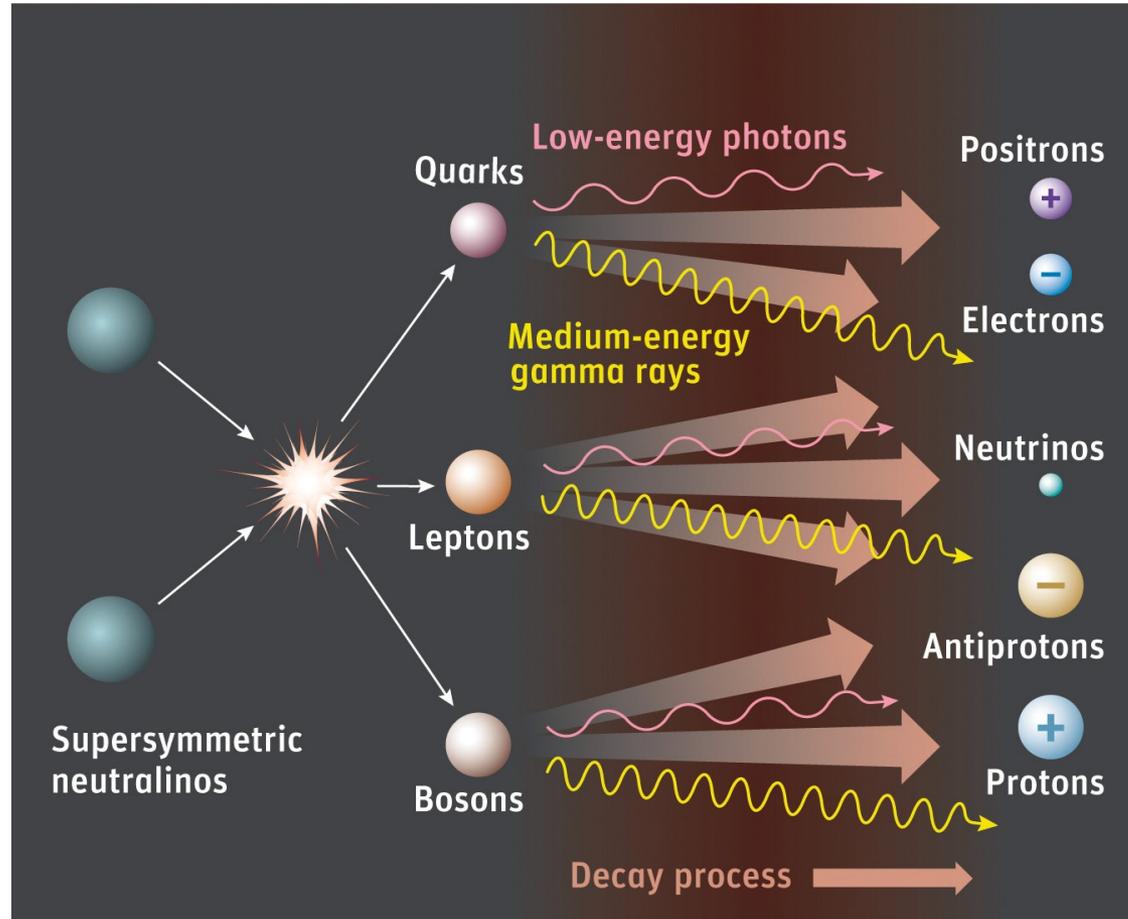
Un segnale diretto di materia oscura

La WIMP, nell'urto con il rivelatore, rilascia energia attraverso diversi meccanismi:

- 1. Scintillazione:** il nucleo colpito torna nella configurazione iniziale emettendo un fotone (luce)
- 2. Ionizzazione:** la WIMP rimuove elettroni all'atomo colpito
- 3. Fononi (calore):** il trasferimento energetico WIMP-nucleo avviene sotto forma di calore



Annichilazione di WIMP nello spazio



AMS from Shuttle to ISS

Alpha Magnetic
Spectrometer on
STS-134

A photograph of the Space Shuttle STS-134 in orbit above Earth. The shuttle is oriented vertically, with its nose pointing towards the bottom right. The Earth's blue and white atmosphere is visible in the background. The text "Alpha Magnetic Spectrometer on STS-134" is overlaid in white on the image.

A photograph of a Soyuz spacecraft being mated to the Resurs-DK1 satellite on the launch pad at night. The launch pad is illuminated by bright lights, and the Soyuz spacecraft is visible in the center, with its external tank and boosters. The background is dark, suggesting a night launch.

Launch of Resurs-DK1
with Pamela antimatter
spectrometer

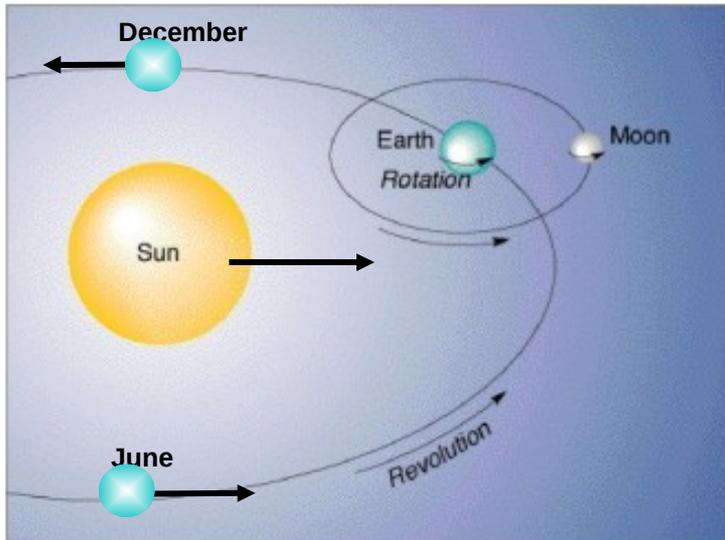
Soyuz spacecraft

Baikonur, 15-6-2006

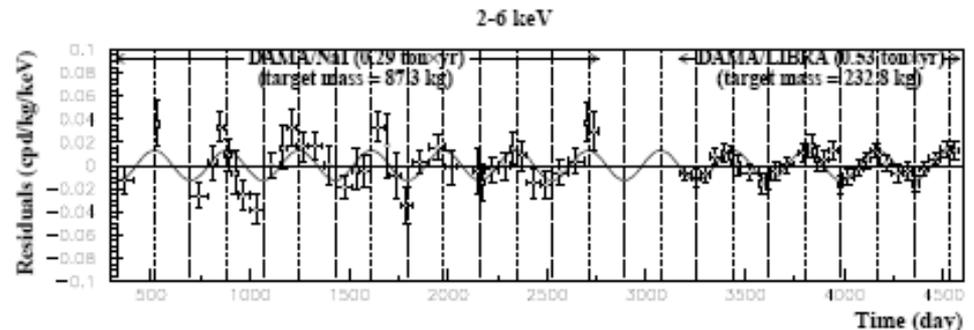
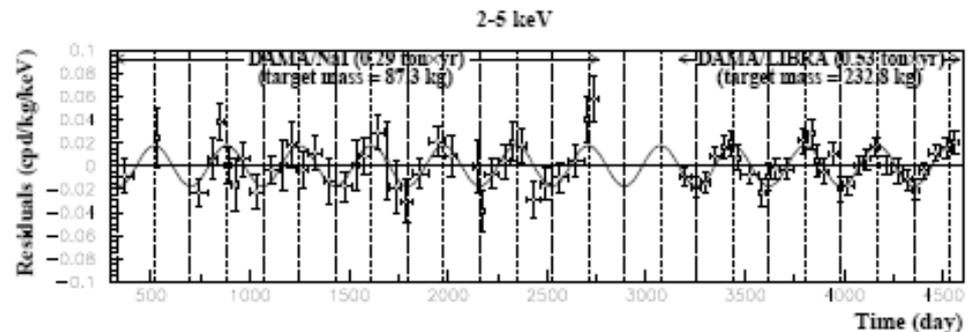
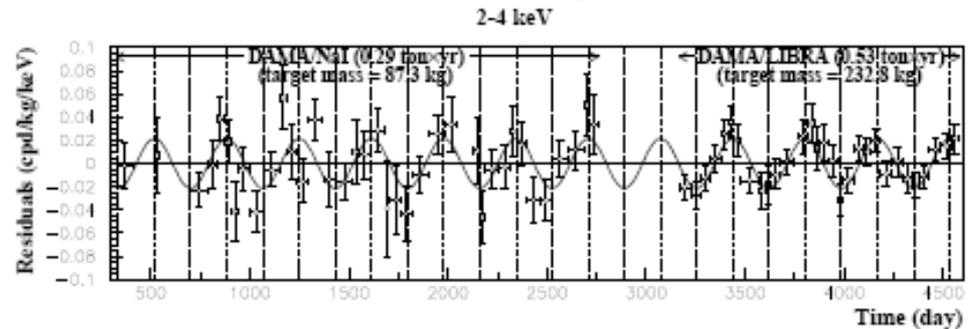
Partenza di Fermi-LAT, 11.6.2008



The very DM signature: the annual modulation



Residual rate for single hit events



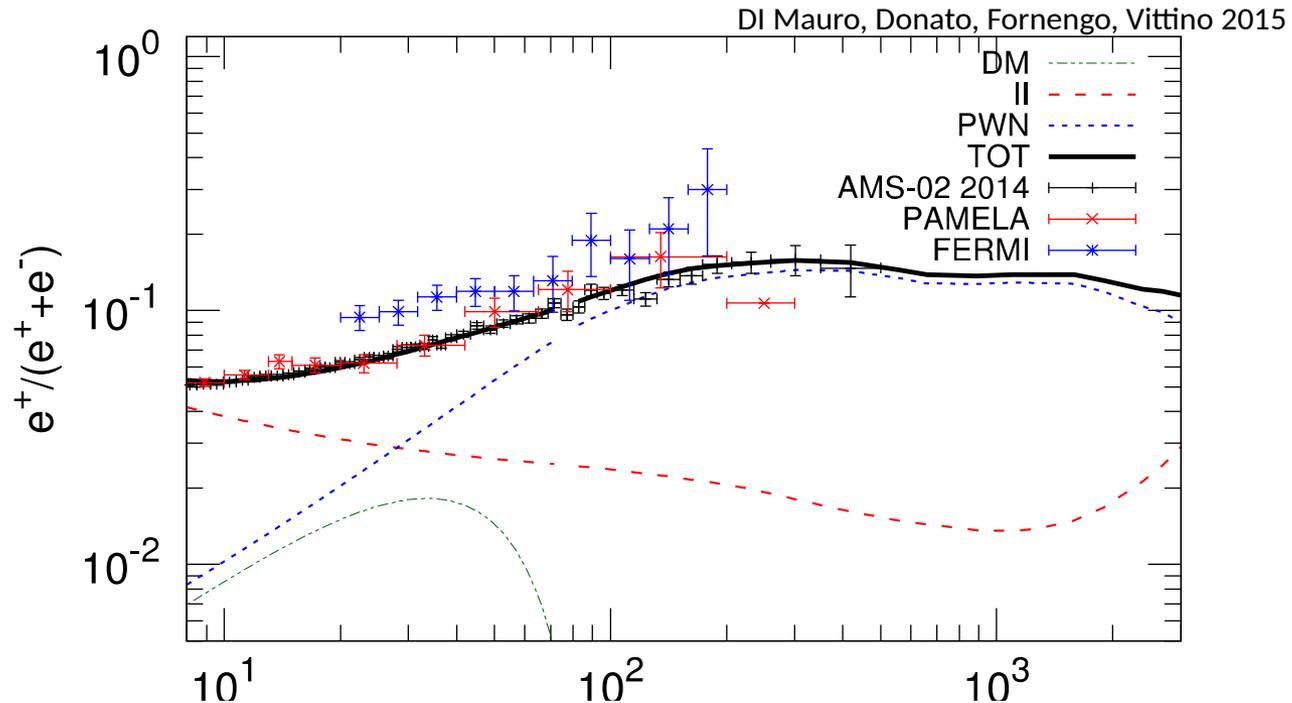
0.82 ton year total exposure
@ LN Gran Sasso (INFN)

Reported a positive evidence for
a modulated signal 8.2σ C.L.

Bernabei et al. arXiv 0804.2738, 0804.2741

Bernabei et al. arXiv 0804.2741

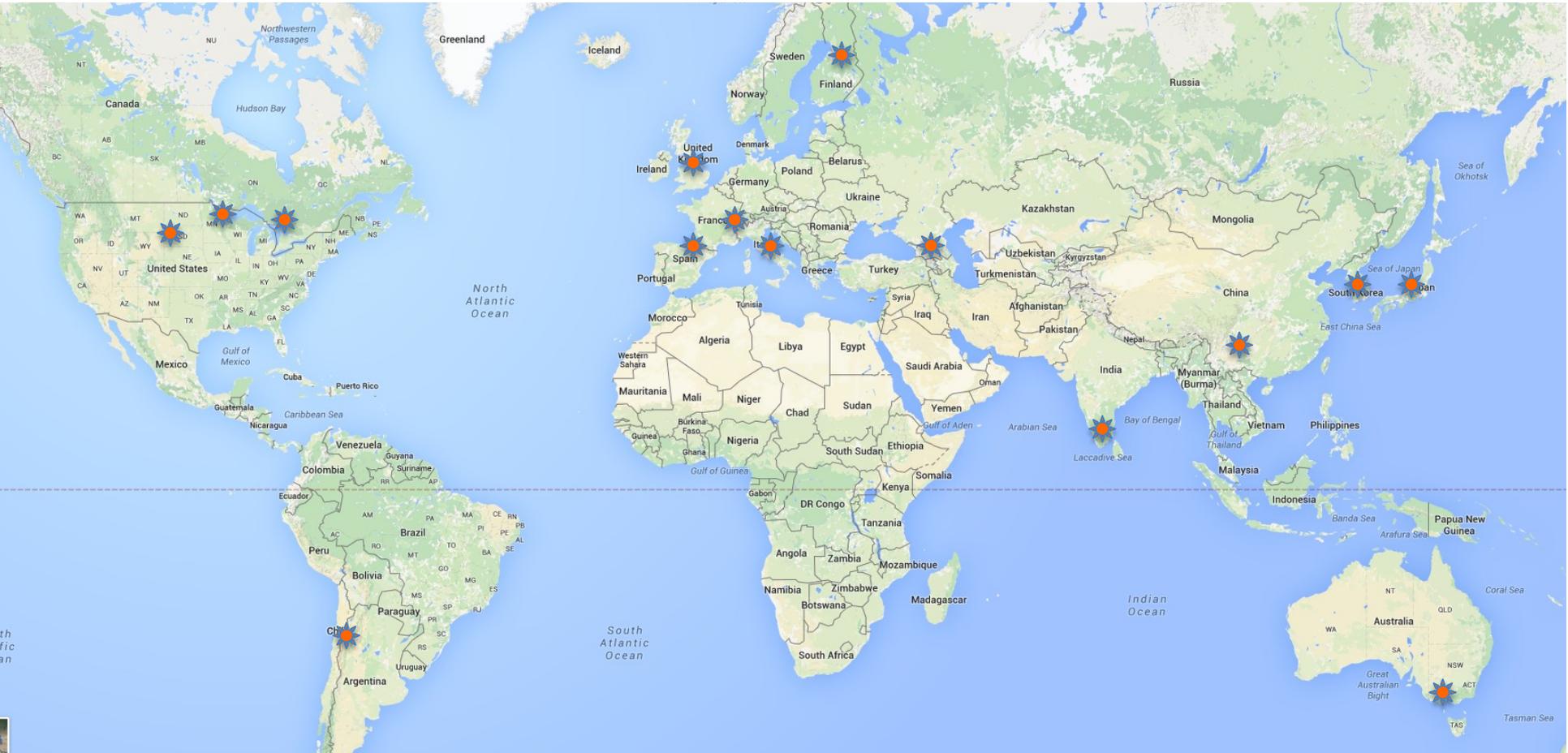
Risultati da AMS



Ogni curva corrisponde a un complicato modello di emissione di elettroni e positroni (e' il mio lavoro)

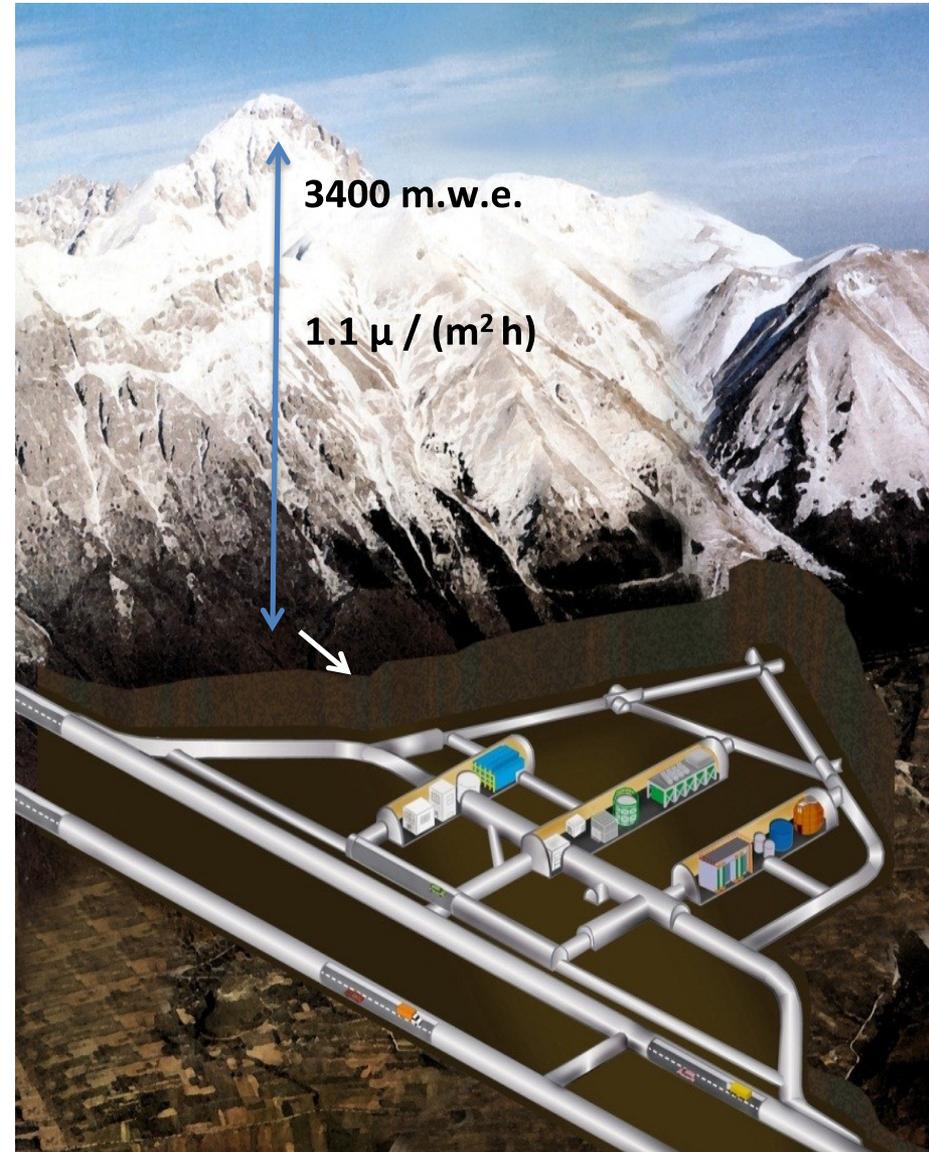
I dati sono ben spiegati da emissione di pulsar
Possibile, ma non necessaria, una componente di materia oscura.

I laboratori sotterranei



Laboratori Nazionali del Gran Sasso

- Muon flux: $3.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Neutron flux:
 - $2.92 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (0-1 keV)
 - $0.86 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($> 1 \text{ keV}$)
- Rn in air: 20-80 Bq m^{-3}
- **Surface: 17 800 m^2**
- **Volume: 180 000 m^3**
- Ventilation: 1 vol / 3.5 hours
- **Mechanical Design and Workshop**
- **Electronics Lab & Service**
- **Chemistry Lab & Service**
- **ULB Lab & Service**
- > 900 users from 29 countries
- ~ 100 Staff
- 225 avg. daily presence in 2014
- ~ 8000 visitors/y
- Virtual tour via Street View



Esperimenti per la rivelazione diretta di materia oscura

