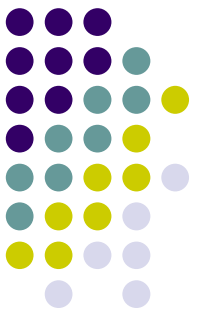


Ricerche Indirette di Dark Matter

Nicola Giglietto
INFN-Bari

Bologna 14 dicembre 2007

Osservazioni indirette di Dark Matter



Le possibilità osservative dipendono da molti fattori:

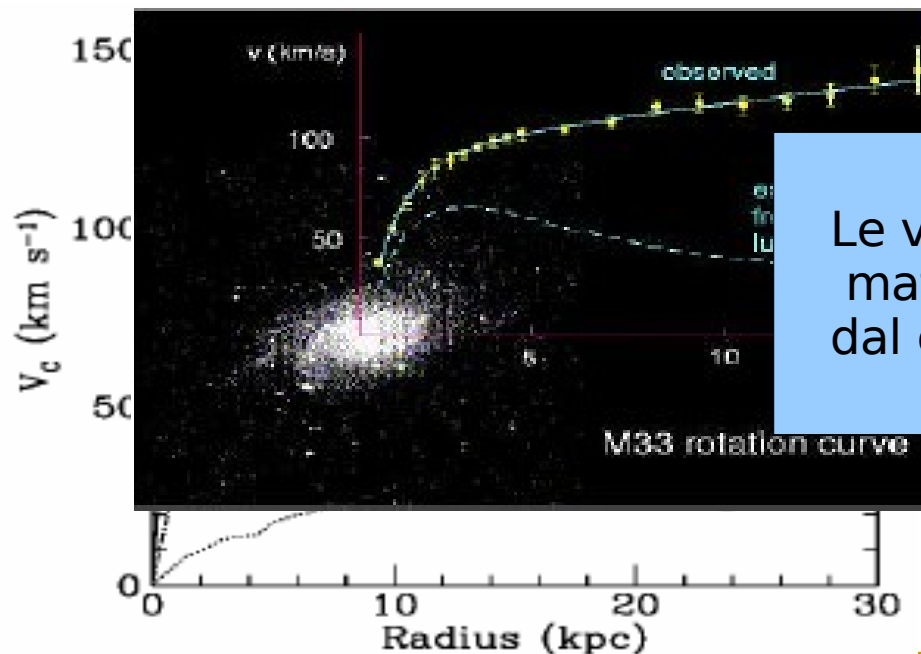
- Tipo di particelle, sezioni d'urto e massa
- Distribuzione della Dark Matter
- Background osservativo

DM: Evidenze sperimentali

Prime evidenze e prime conferme:

-nel 1933 Zwicky studia le velocità di dispersione delle galassie dell'Ammasso di Coma

-nel 1936 Smith, l'Ammasso della Vergine



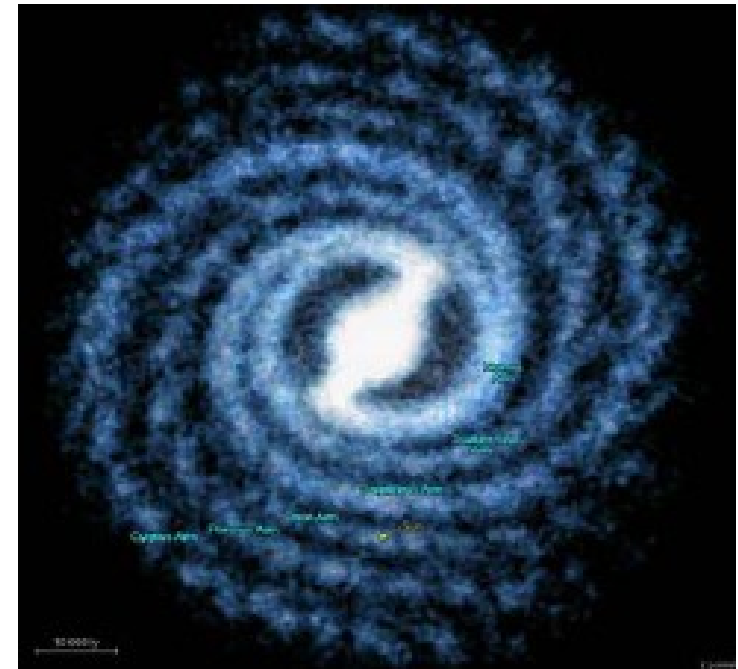
Le velocità sono compatibili con della materia non visibile a più grande distanza dal centro della galassia (alone)

galassie confrontando la densità di massa con la distanza dal centro galattico

Curva di Rotazione della Galassia a Spirale NGC 6503

$$v(r) \propto \sqrt{M(r)/r}$$

DM: Evidenze sperimentali (2)



Cluster di Galassie **Bullet 1E 0657-56**

prodotto dallo scontro tra due ammassi:
sovrapposto l'immagine di CHANDRA nella banda
X le zone blu indicano dove si trova la maggior
parte della massa gravitazionale (**dark**) mentre la
rossa è quella che emette in X

Via Lattea

$M_{\text{visibile}} \ll M_{\text{gravitazionale}}$ circa il 90% della massa e' Oscura!

Dark Matter – sommario

■ Evidence:

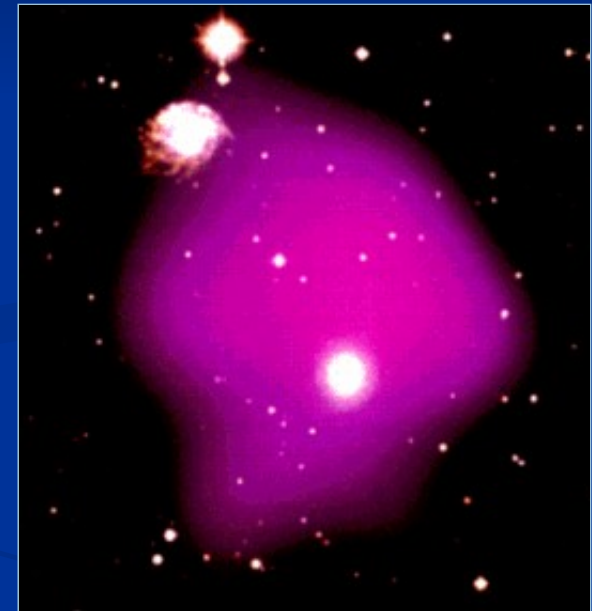
- Rapidly moving galaxies in clusters
- Rotation curves of galaxies
- Hot gas in galaxy clusters
- Gravitational lensing
- Stability of rotating spiral galaxies

➤ Types:

- Baryonic vs. non-baryonic
- Cold vs. Hot

Sovrapposizione delle immagini di un ammasso di galassie nel visibile con l'emissione X del gas:

l'interazione gravitazionale è molto più grande di quella visibile nelle due bande



Cosmological Mass-Energy Budget

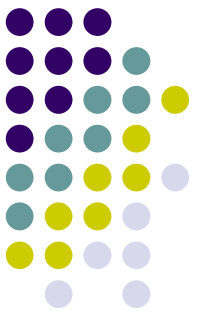
Component:	Fraction:
• visible baryons	~ 0.01
• dark baryons	~ 0.04
• non-baryonic dark matter	~ 0.25
• <u>dark energy</u>	<u>~ 0.70</u>
total	~ 1.00

Components of the universe measured in units of critical density

Cosa cerchiamo?

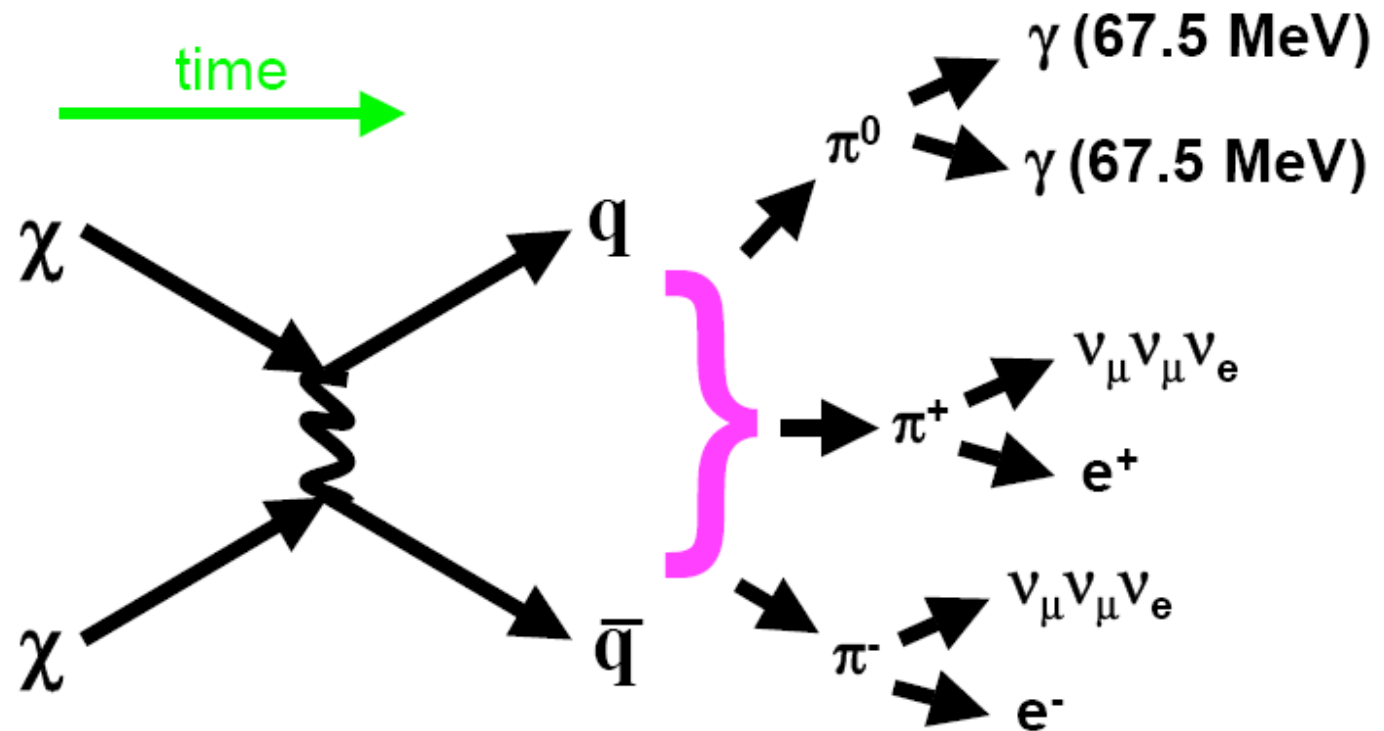
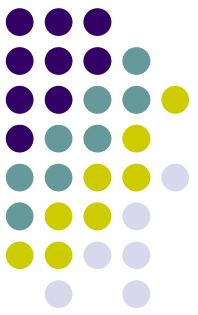
- **Particelle neutre** (altrimenti interagiscono elettromagneticamente e sarebbero ben visibili)
- **Particelle stabili**
- **Particelle comunque debolmente interagenti** (accoppiamento gravitazionale)
- **Non conosciamo la distribuzione di densità della DM e le velocità**

Non-Baryonic Dark Matter Candidates



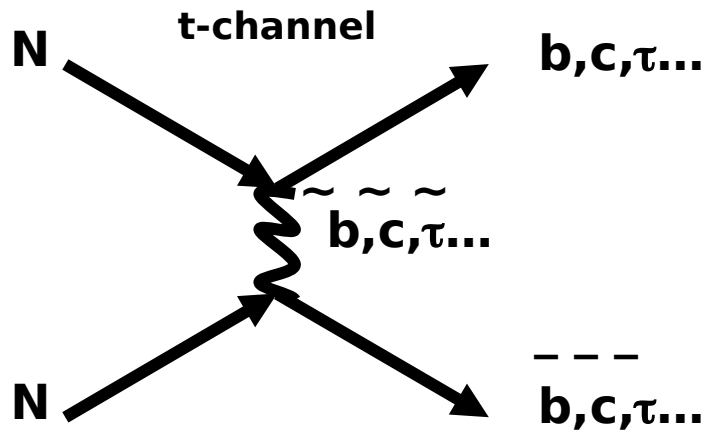
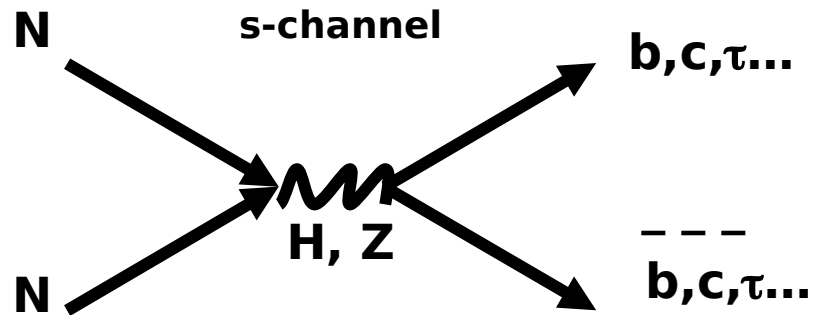
<i>Particle Type</i>	<i>Production Process</i>	<i>Mass</i>	<i>Observation methods</i>
Axions	Big Bang Non-thermal	$\sim 10^{-5}$ eV	Direct conversion to radio waves
Neutrinos	Big Bang Thermal	$\sim 10^{-1}$ eV	Analysis of large scale structure
WIMPs	Big Bang Thermal	$\sim 10^2$ GeV	Direct scattering on nuclei, Indirect observation of annihilation products

Processi di annichilazione wimps (semplificato)

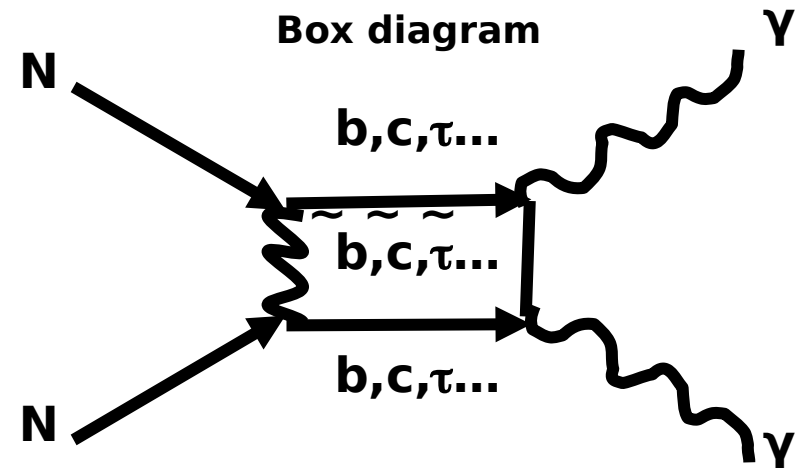


WIMP Annihilation Processes

Tree level:

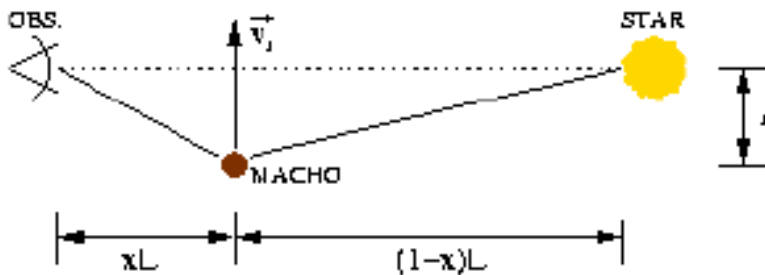


Loop diagrams:

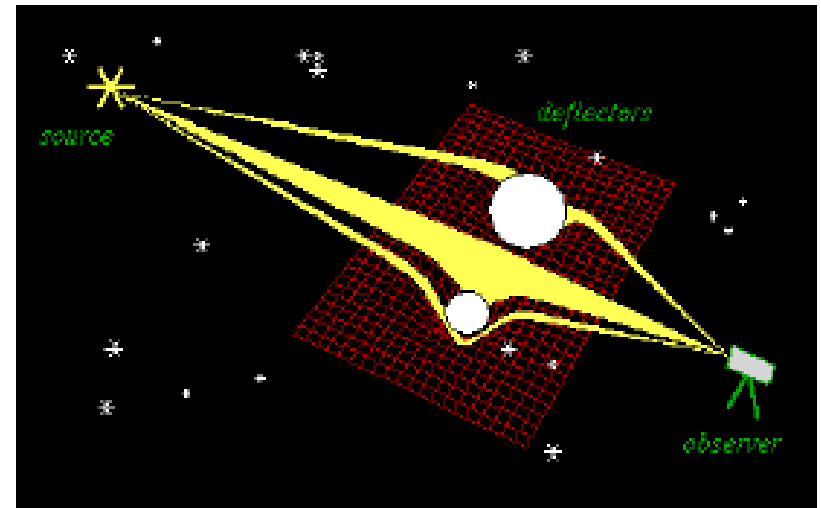


Barionic DM

Barionic DM = Machos (MAssive Compact Halo Object); cioè: **Nane Brune (BD), Pianeti, ecc...** oggetti che hanno una luminosità al di sotto della sensibilità strumentale
Per cercarli si usa l'effetto lente gravitazionale.



lente gravitazionale



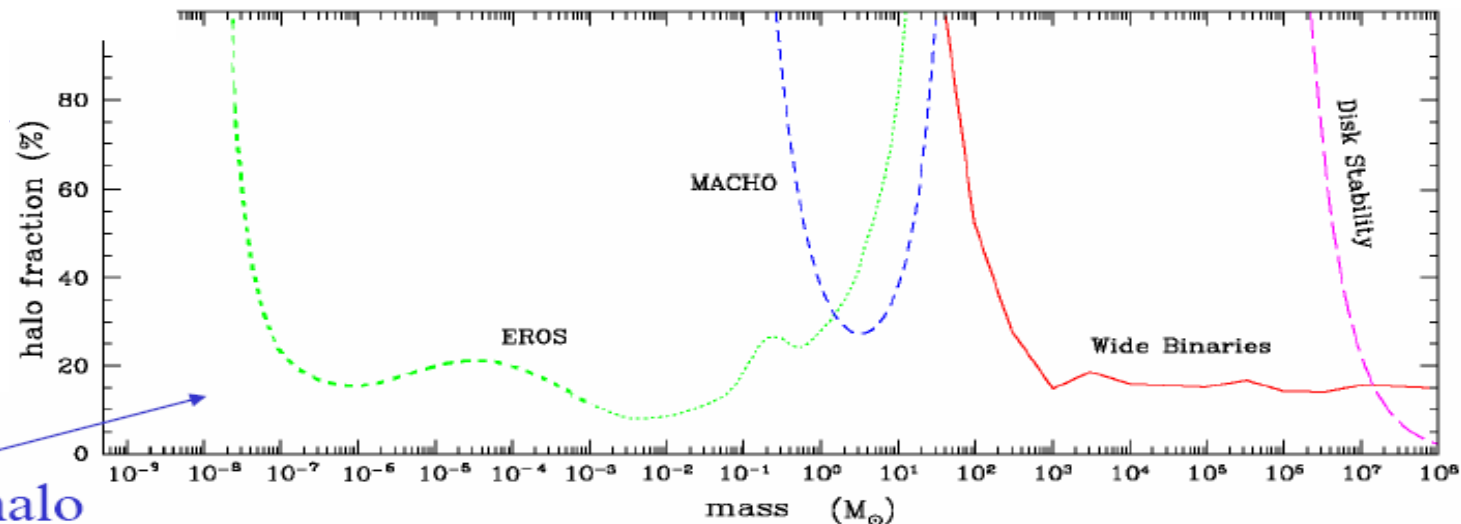
Barionic DM (2)

Diversi esperimenti:

- EROS (Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres)
- OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment)
- MACHO Project
- DUO (Disk Unseen Objects)
- AGAPE (Andromeda Galaxy and Amplified Pixels Experiment)
- MOA (MACHO Observations in Astrophysics)
- PLANET (Probing Lensing Anomalies NETwork)
- DUO (Disk Unseen Objects)
- GMAN (Global Microlensing Alert Network)

Ci dicono che e'
davvero poca!!

< 10% of the galactic halo



Hot Dark Matter

HDM: particelle relativistiche al tempo del disaccoppiamento.
Neutrini massivi...

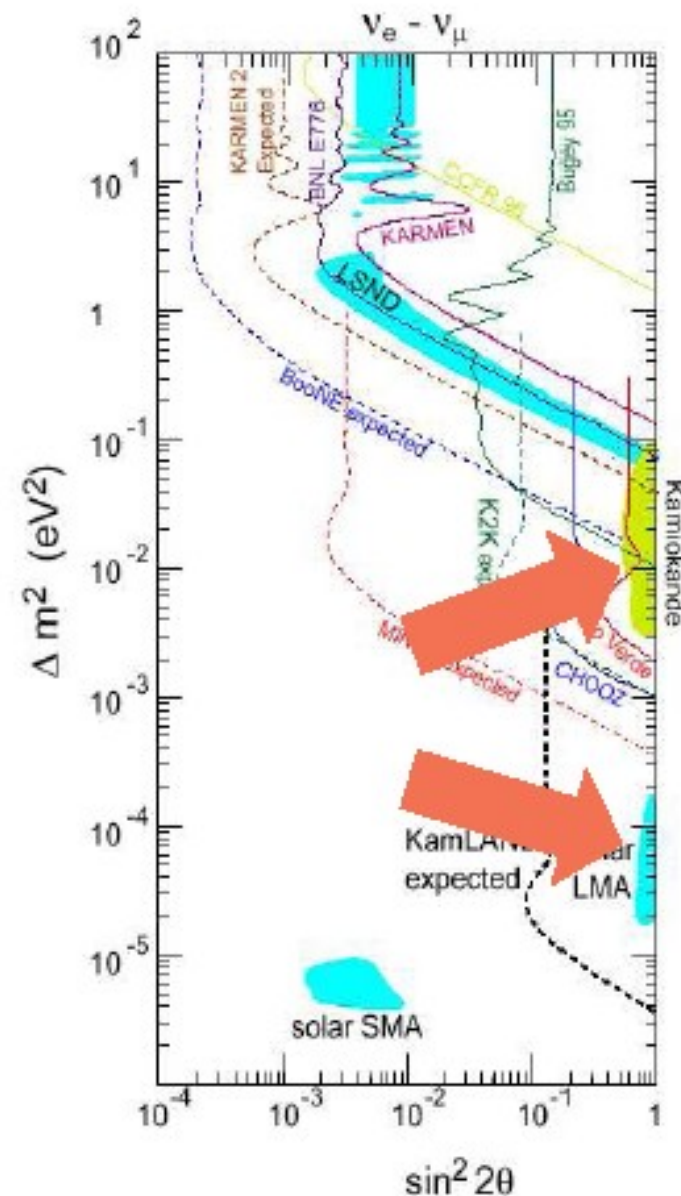
Al massimo:

$$\Omega_\nu \sim 0.1\%$$

Paragonabile al contributo in v delle Stelle:
non risolve il problema.

Anche la Cosmologia mette dei limiti alla percentuale di HDM; per poter avere le strutture piccole che oggi vediamo nell'Universo la HDM non deve essere dominante Ω_{NB} .

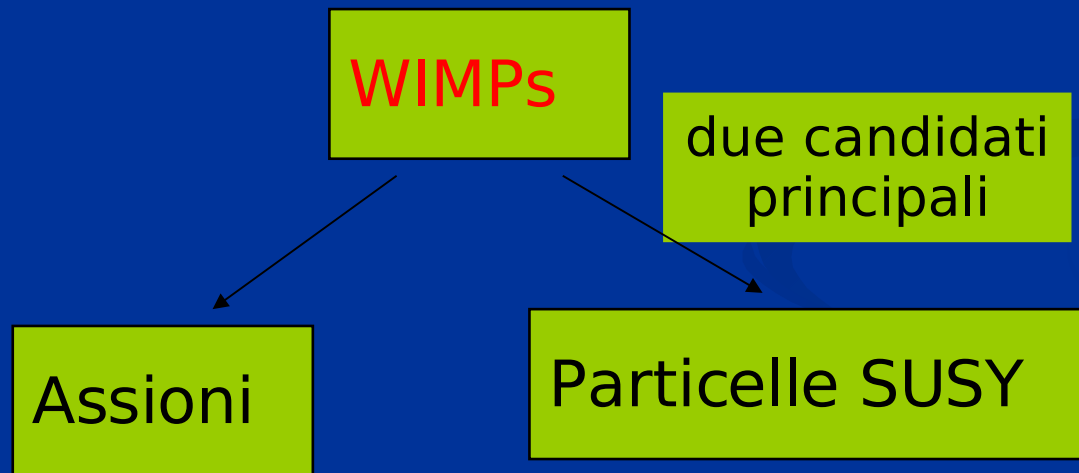
$$\Omega_{\text{HDM}} < 5\%$$



Cold Dark Matter

CDM: particelle NON-relativistiche al tempo del disaccoppiamento.

WIMPs: difficili da rilevare!



Tuttavia esistono altri candidati, per esempio: Sneutrino (SUSY), una quarta famiglia di ν , "mirror dark matter", particelle di Kaluza-Klein...

Assioni

Introdotti nel 1977 per cercare di spiegare la violazione di CP in QCD ((pseudo-bosone di Nambu-Goldstone in un nuovo tipo di simmetria $U(1)$, chiamata $U_{PQ}(1)$, simmetria di Peccei –Quinn))

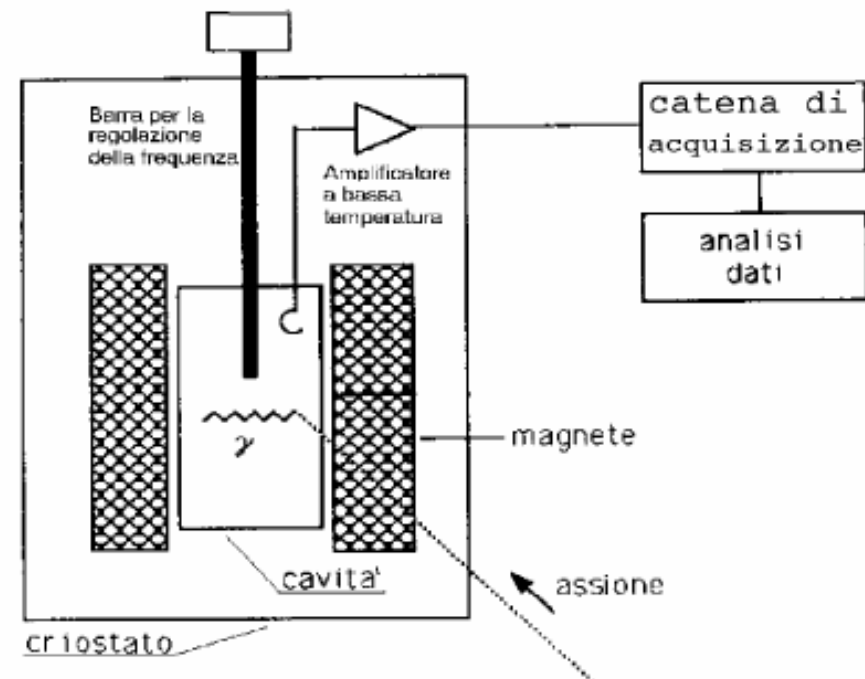
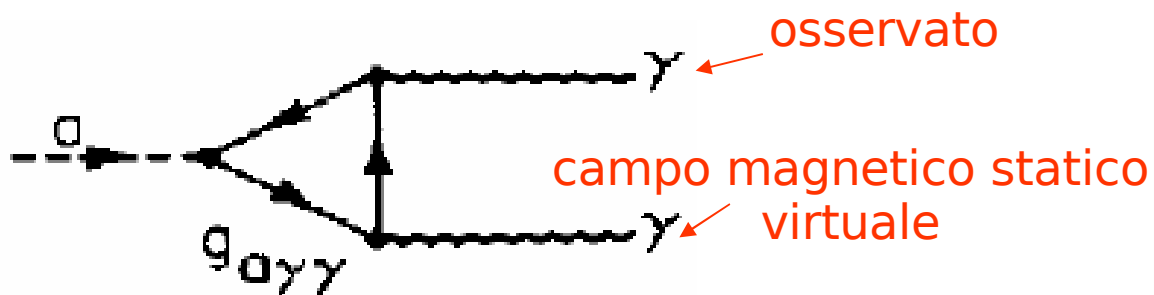
Prodotti in un universo primordiale. Non relativistici! (CDM)

Di massa piccola.

$$10^{-3} \text{ eV} < m_a < 10^{-2} \text{ eV}$$

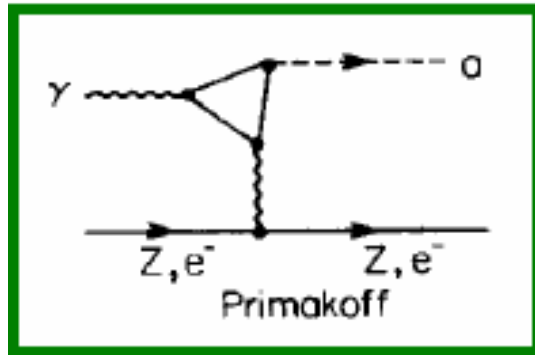
Si rilevano attraverso una cavita' risonante.

Sottoposto ad un forte campo magnetico (diversi Tesla), l'assione dovrebbe decadere in fotoni.

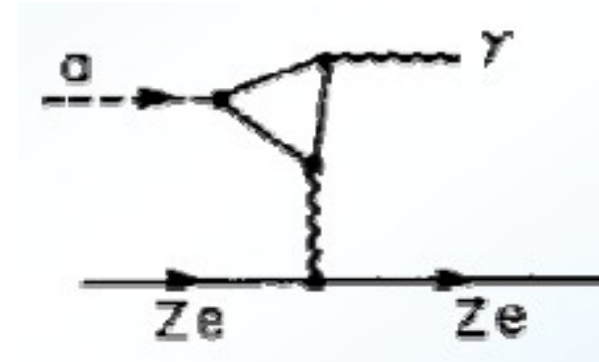
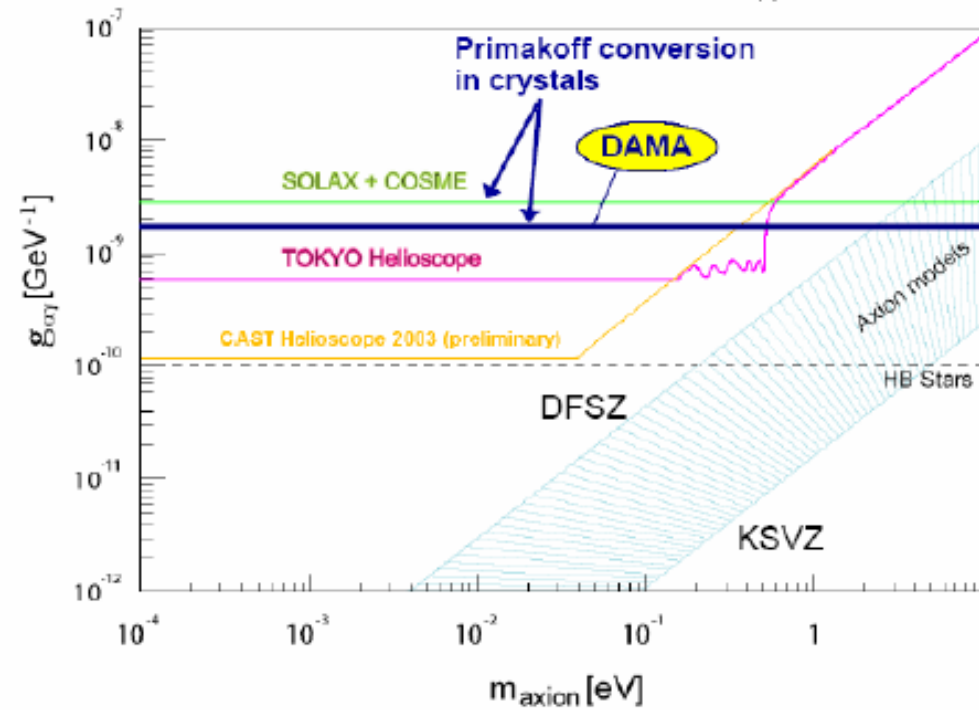


Assioni (2)

Si potrebbero rilevare assioni solari anche utilizzando la conversione di Primakoff:



La “ri-conversione” in un rivelatore a cristalli, dovrebbe quindi essere visibile:



questo e', per esempio, l'approccio di DAMA/NaI

SUSY Particles

Oltre allo Sneutrino, i piu' "gettonati" candidati CDM sono particelle SUSY.

Gravitino (SUGRA)? Massa attorno al TeV

In particolare le ricerche si stanno concentrando attorno alle LSP, ovvero (MSSM) al Neutralino.

$$\chi = a_1 \underset{\text{gaugino}}{\tilde{B}} + a_2 \tilde{W}^3 + a_3 \underset{\text{higgsino}}{\tilde{H}_1^0} + a_4 \tilde{H}_2^0$$

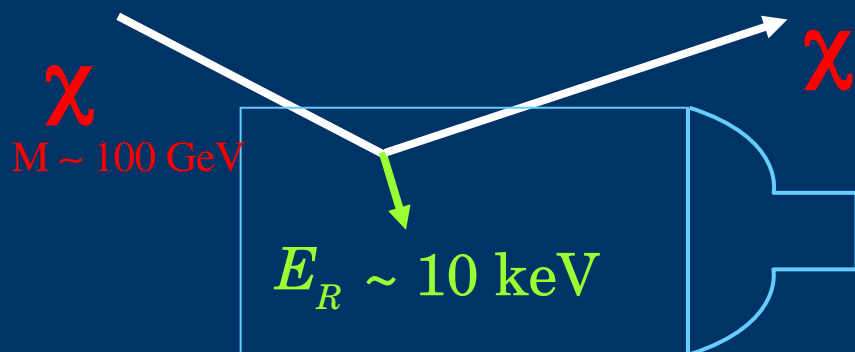
In ogni caso, il nostro candidato deve avere alcune importanti caratteristiche! Deve essere:

- NEUTRO
- STABILE ($\tau \sim \text{eta' dell'Universo}$)
- MASSIVO
- deve interagire DEBOLMENTE

Metodi per cercare la Dark Matter

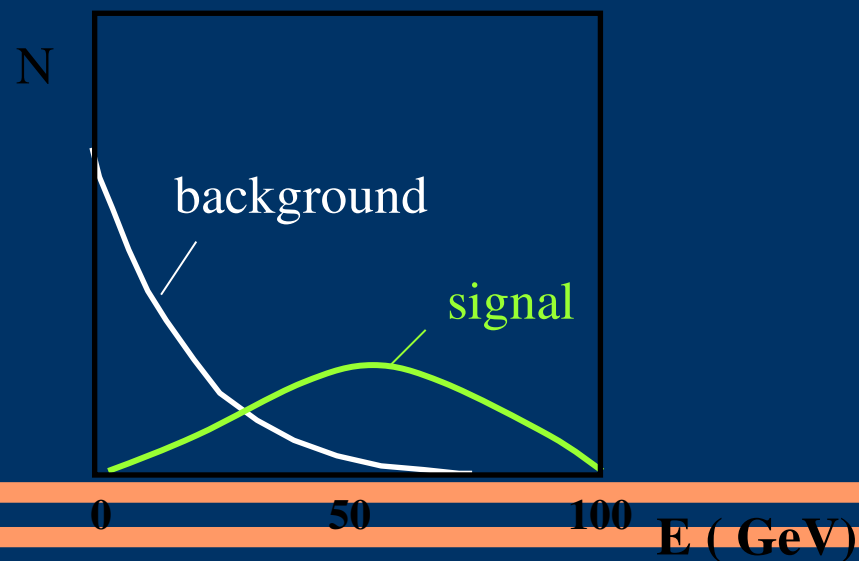
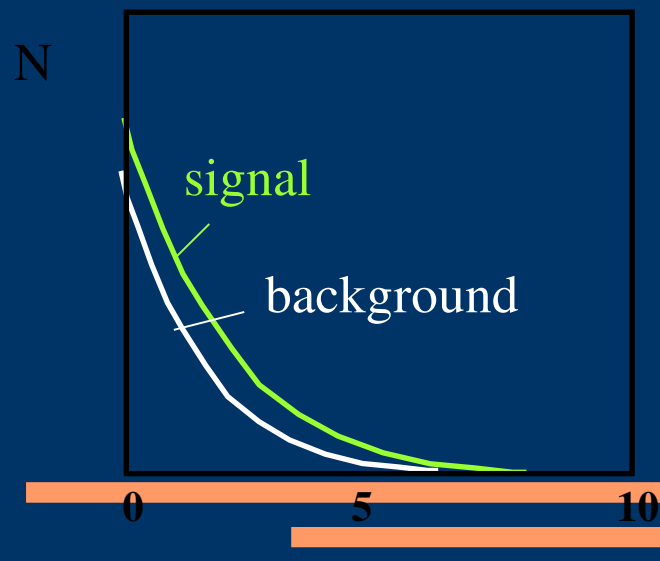
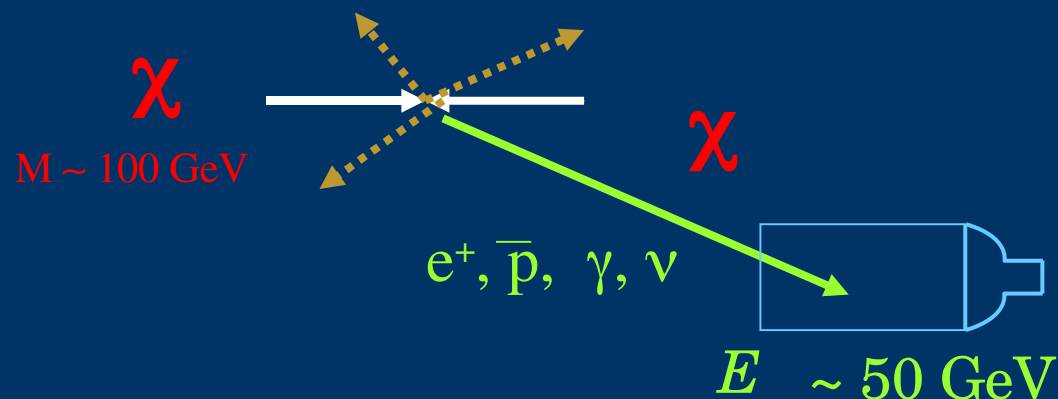
Direct

Galactic halo
collisions: $v \sim 300$ km/sec



Indirect

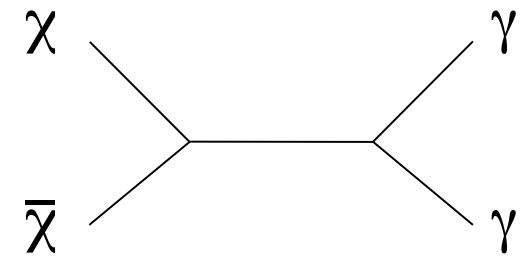
Concentrations in massive bodies or in halo
annihilations: $\sim$ at rest



Ricerche indirette

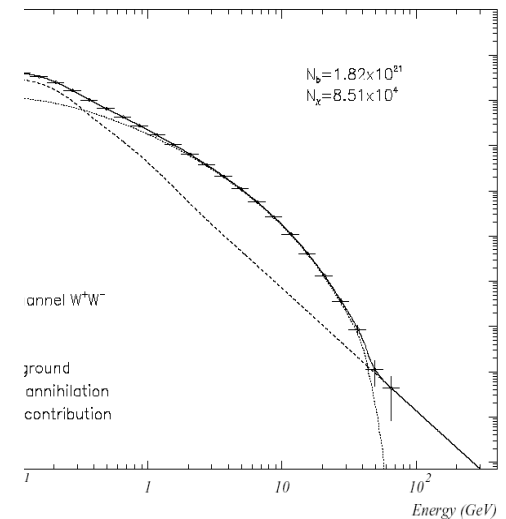
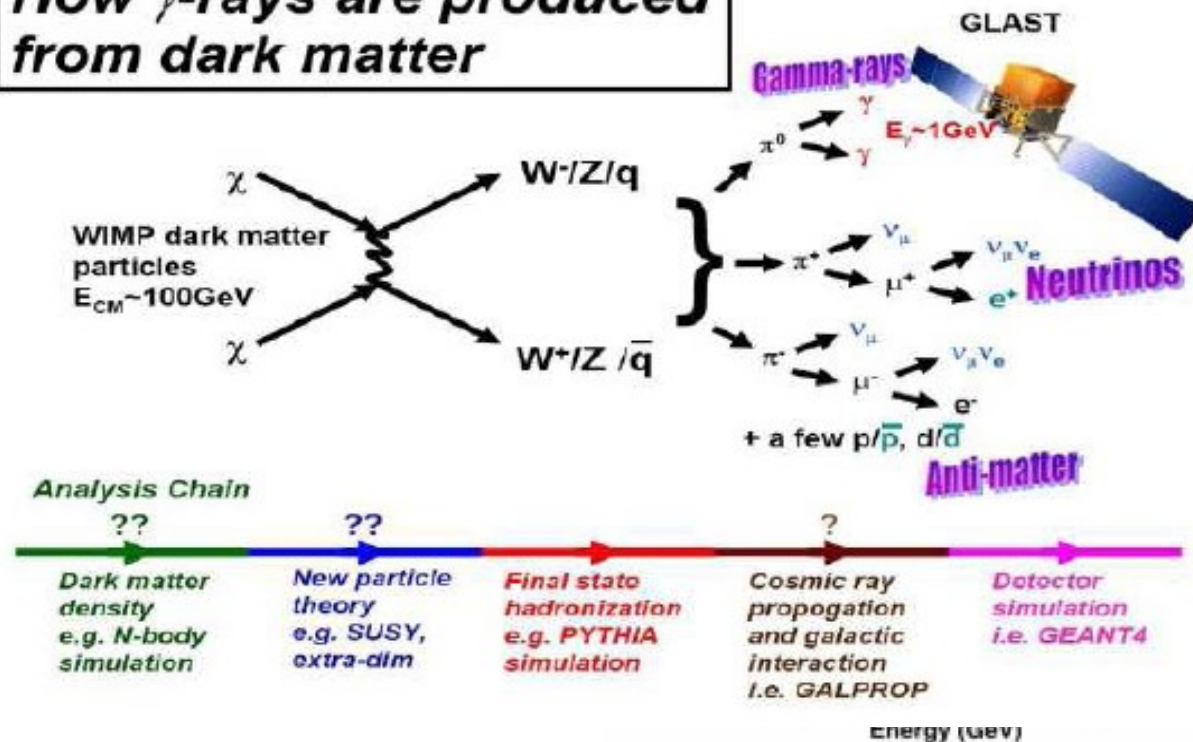
Si prevede che l'annichilazione di neutralino e anti-neutralino ci dia un segnale γ (o $p/\text{anti-}p$, o e^-/e^+).

Ovviamente il segnale dipende strettamente dalla massa del neutralino.



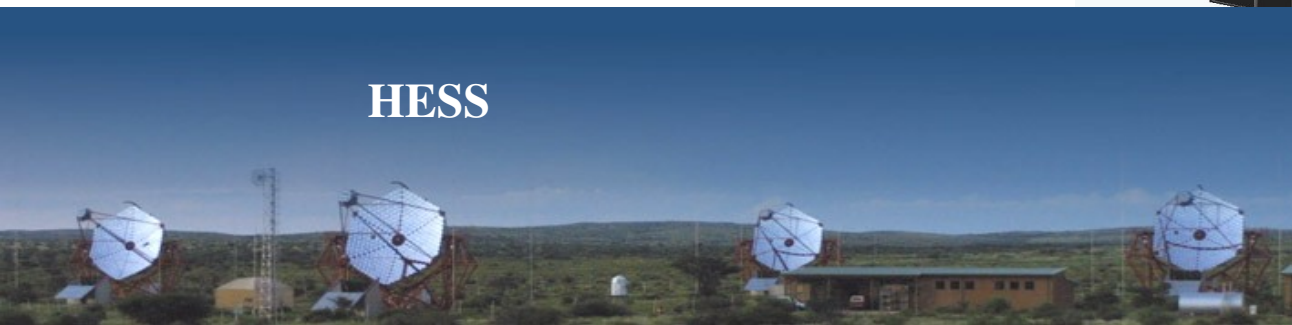
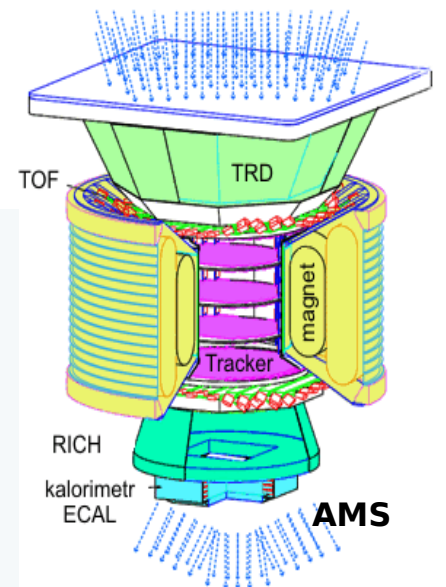
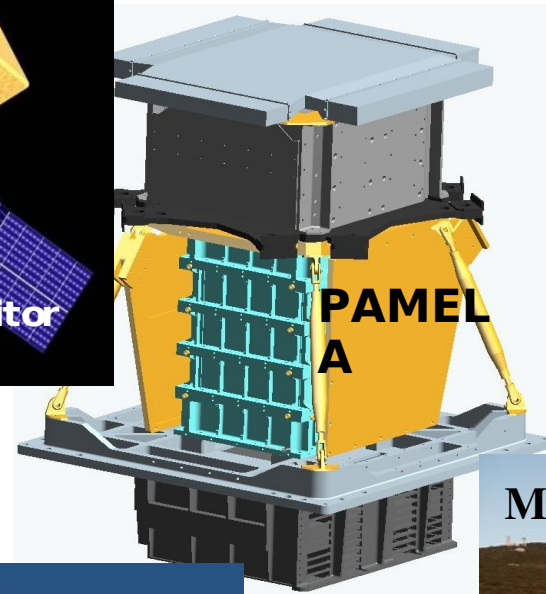
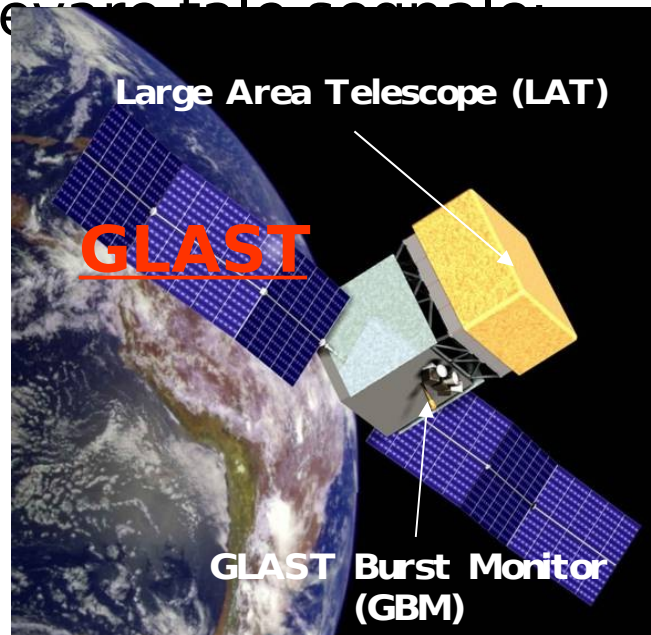
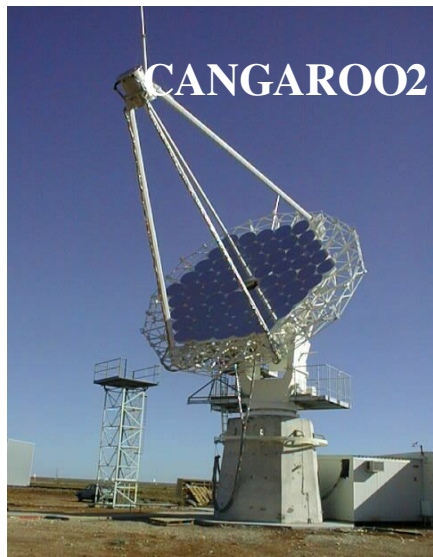
(2004)

How γ -rays are produced from dark matter



Indirect Detection (2)

Diversi esperimenti (da terra e su satellite e underground) si propongono di rilevare i raggi cosmici.

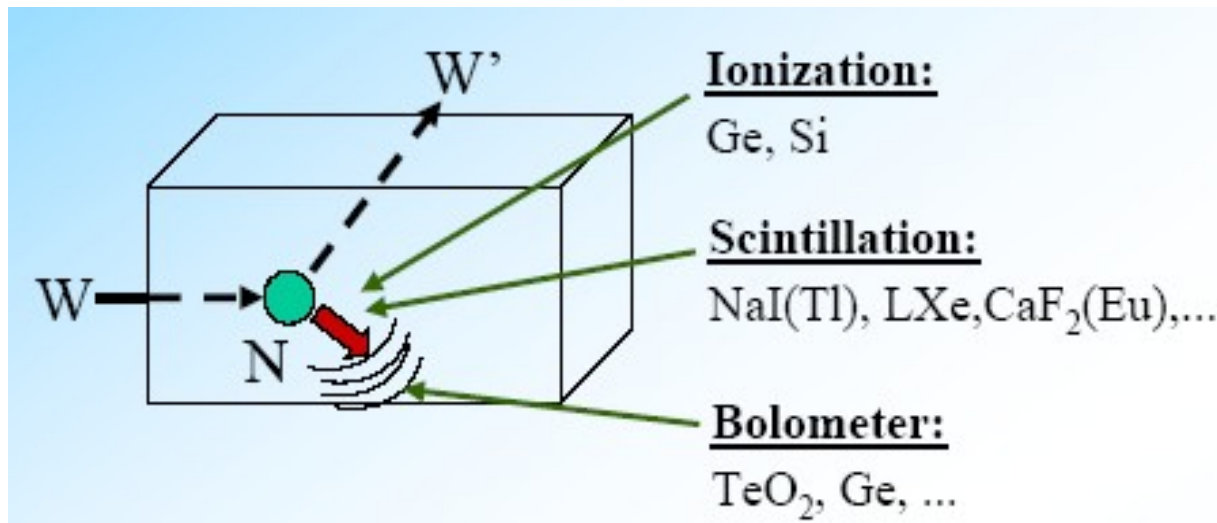
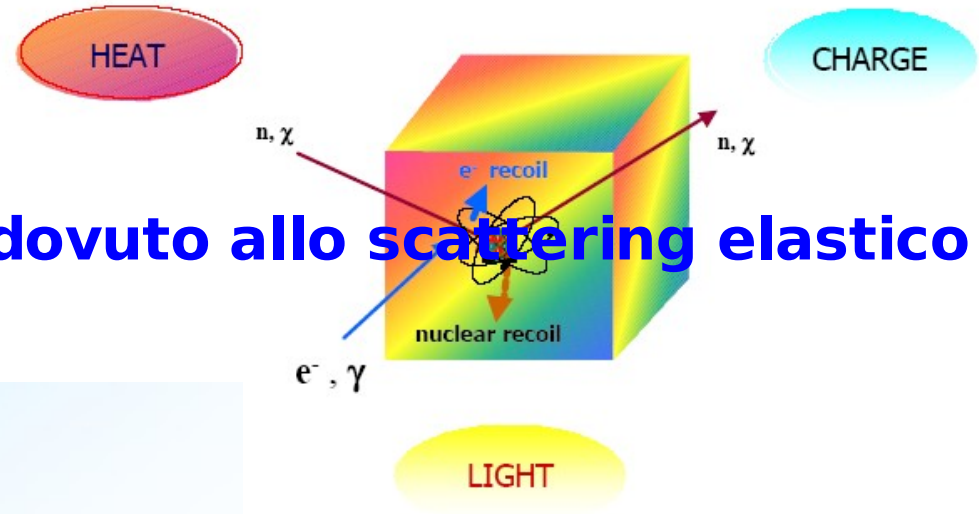


Rivelazione Diretta di DM

Per la rivelazione diretta si usano diverse tecniche, che possiamo dividere in 3 gruppi:

- Bolometri (o Rivelatori Criogenici)
- Rivelatori a scintillatore
- Rivelatori a ionizzazione

Si cerca il deposito di energia dovuto allo scattering elastico



Ricerca di dark matter

- La particella supersimmetrica χ più leggera è il principale candidato per la CDM
- È neutra (da cui neutralino) e stabile se la R-parity non è violata
- Modi di annichilazione:
 - $\chi \chi \rightarrow \gamma\gamma$ where $E_\gamma = M_\chi c^2$ (riga)
 - $\chi \chi \rightarrow Z\gamma$ where $E_\gamma = M_\chi c^2(1 - M_Z^2/4M_\chi^2)$
 - $\chi \chi \rightarrow l-l^+$ oppure $h-h^+$ questi canali producono adroni e quindi $\pi_0 \rightarrow$ fondo continuo
- Gamma-ray lines possible: 30 GeV - 10 TeV

Ricerche indirette

```
graph TD; A([Ricerche indirette]) --> B[Exp. SOTTERRANEI (neutrini)]; A --> C[Exp. IN SUPERFICIE (gamma)]; A --> D[Exp. In orbita];
```

Exp. SOTTERRANEI (neutrini)

- MACRO (1989-1999)
- AMANDA/ICECUBE
- NEMO/ANTARES/KM3

Exp. IN SUPERFICIE (gamma)

- MAGIC/HESSE

Exp. In orbita

- AGILE (gamma)
- GLAST (gamma)
- PAMELA (e⁺/e⁻, p⁺, p⁻)

Ricerche (indirette) di DM underground

- Gli esperimenti sotterranei e sottomarini possono effettuare misure indirette di DM
- Tipicamente parliamo di rivelatori di neutrini
- Il segnale che si cerca è di annichilazione di wimps con neutrini negli stati finali
- Bisogna cercare degli eccessi sopra il livello del fondo dei neutrini atmosferici



MACRO (1989-1999)

- Esperimento per la ricerca di monopoli magnetici con tecniche di rivelatori complementari
- In grado di misurare il flusso di neutrini al LNGS
- Ha cercato un eccesso di neutrini in direzione del SOLE e del centro della Terra



MACRO: Flussi limiti di nucleariti (Strange quark Matter)

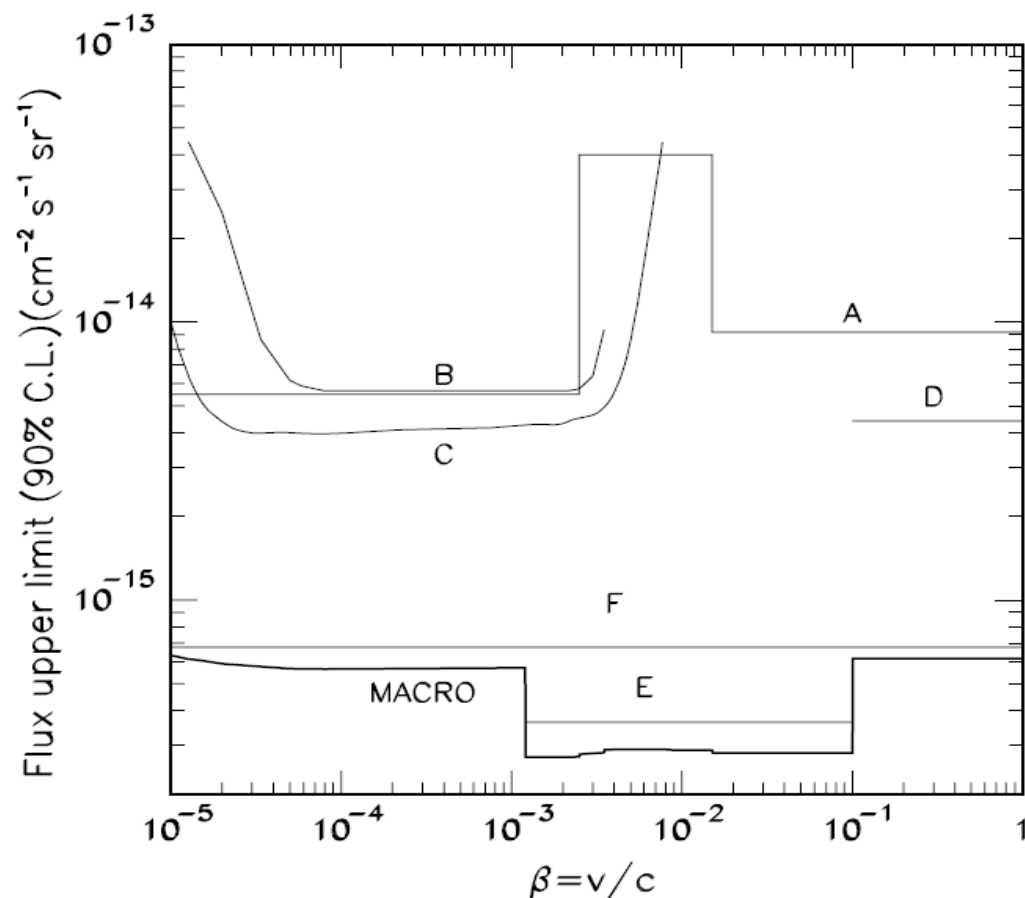


Fig. 2. The 90% C.L. upper limits for an isotropic flux of nuclearites obtained using the liquid scintillator (curves A - E) and the CR39 nuclear track (curve F) subdetectors; the bold line is the present MACRO global limit

MACRO flussi limite WIMPS

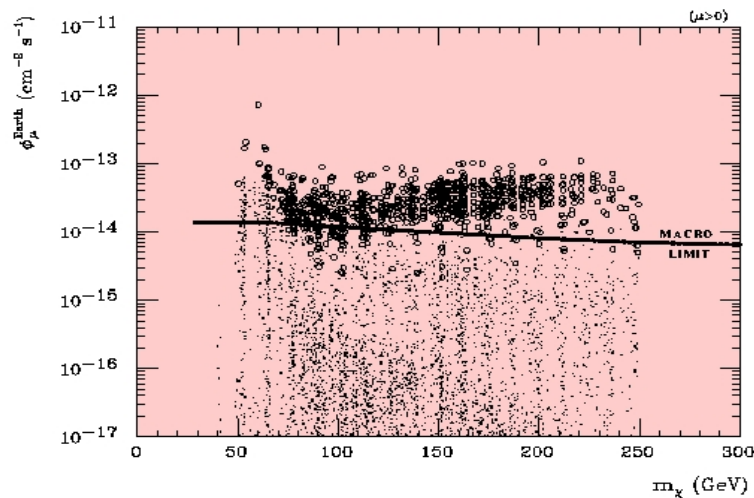
Ref: hep-ex/9812020

M.G., T.M., January 16, 1999

SEARCH FOR WIMPS FROM THE EARTH CORE

WIMPs are Weakly Interacting Massive Particles which could be Dark Matter candidates. A WIMP candidate is the lowest mass neutralino $\tilde{\chi}^0$ (a supersymmetric neutral mixture of the SUSY partners of the photon, the Z^0 and Higgs bosons).

Dark Matter WIMPs could be intercepted by the Earth, slow down by interactions with atomic nuclei, concentrate in the earth core and annihilate into hadrons yielding ν_μ of multi-GeV.



MACRO searches for WIMPs studying upgoing μ produced by ν_μ from earth center which interact in the rock below the detector. No excess above background has been observed.

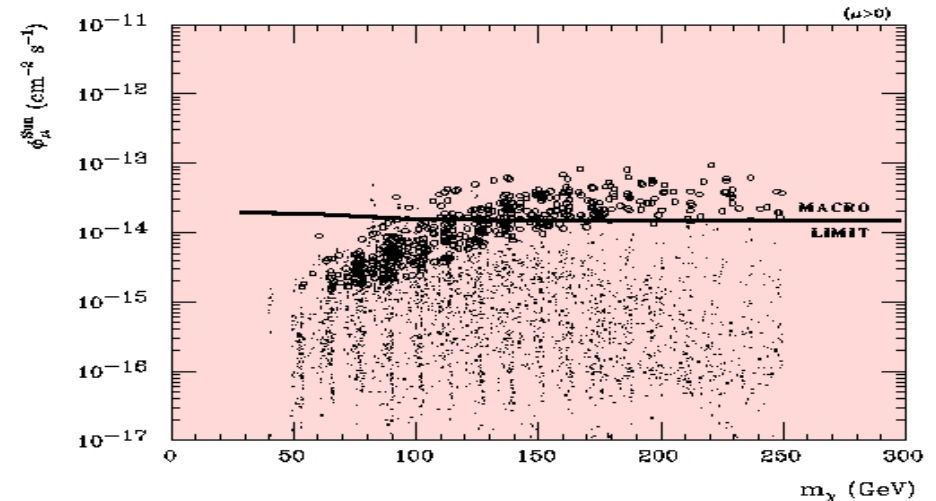
The MACRO upper flux limit, of $\sim 10^{-14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, excludes a large fraction of the parameters of supersymmetric models.

Ref: hep-ex/9812020

M.G., T.M., January 16, 1999

SEARCH FOR WIMPS FROM THE SUN

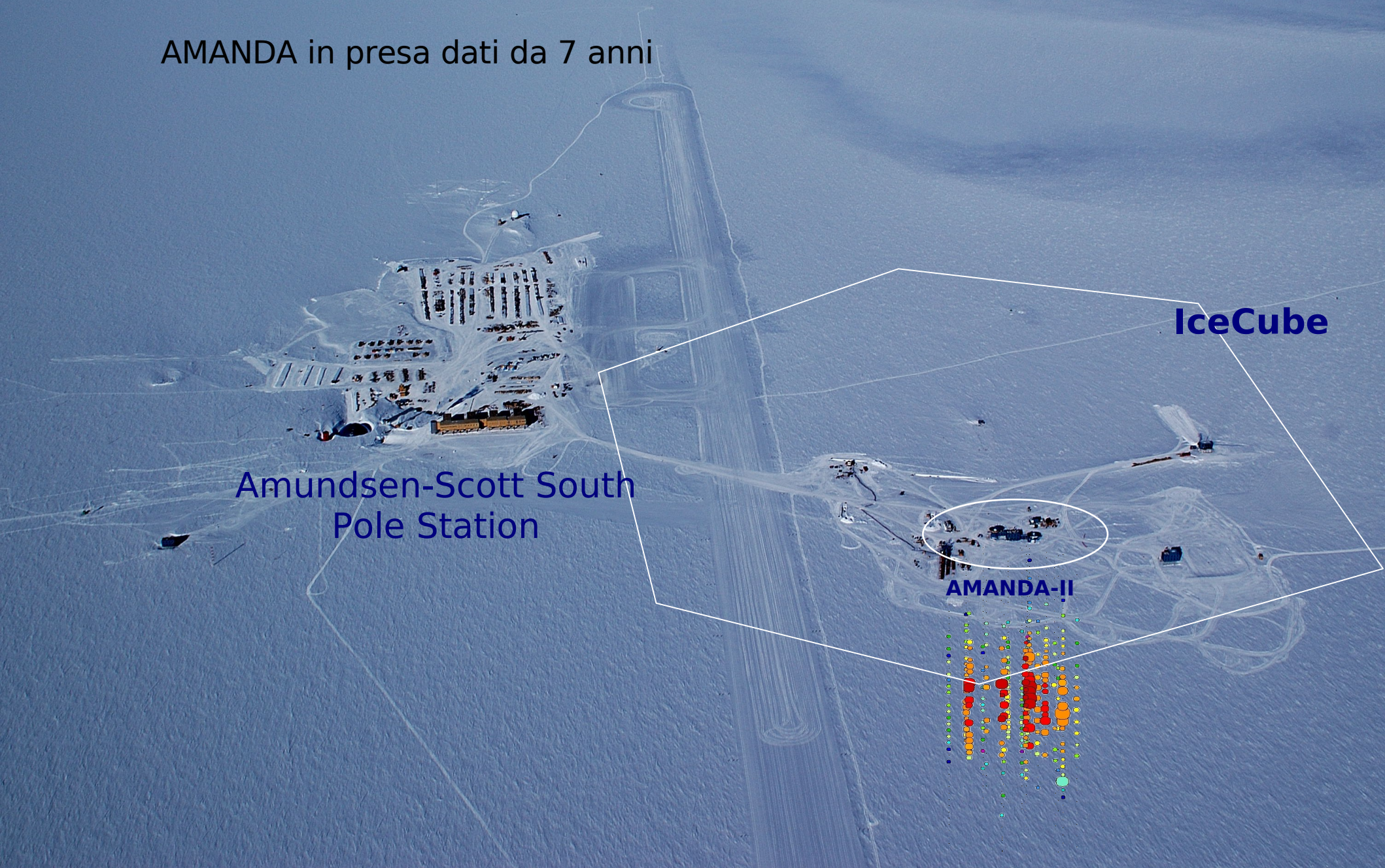
WIMPs intercepted by the Sun interact with solar atomic nuclei, slow down and concentrate in the sun core. When the concentration is high, annihilations WIMP-ANTIWIMP occur yielding ν_μ . We thus look for multi-GeV ν_μ coming from the Sun.



No excess above the general neutrino background has been observed. MACRO establishes a flux limit of $\sim 2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (solid line in the figure). This limit excludes an important fraction of the parameters of various supersymmetric models.

The IceCube observatory

AMANDA in presa dati da 7 anni



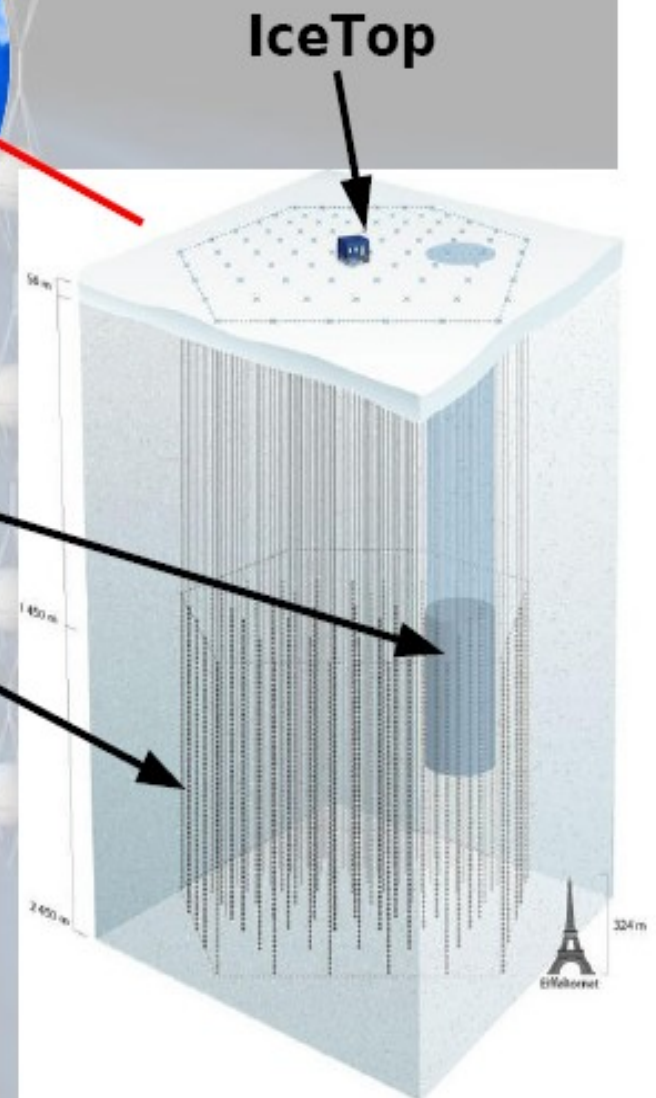
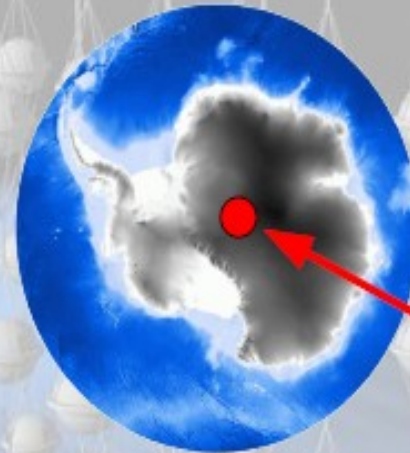
IceCube

**Amundsen-Scott South
Pole Station**

AMANDA-II

The IceCube and AMANDA Detectors

- AMANDA II (c. 2000)
 - 19 Strings, 677 OMs
 - Height ~ 500 m
 - Diameter ~ 200 m
- IceCube (c. 2011)
 - 80 Strings, 4800 DOMs
 - Height ~ 1000 m
 - Diameter ~ 1000 m
- IceTop (c. 2011)
 - 80 Stations, 320 DOMs
 - 2 Tanks x Station



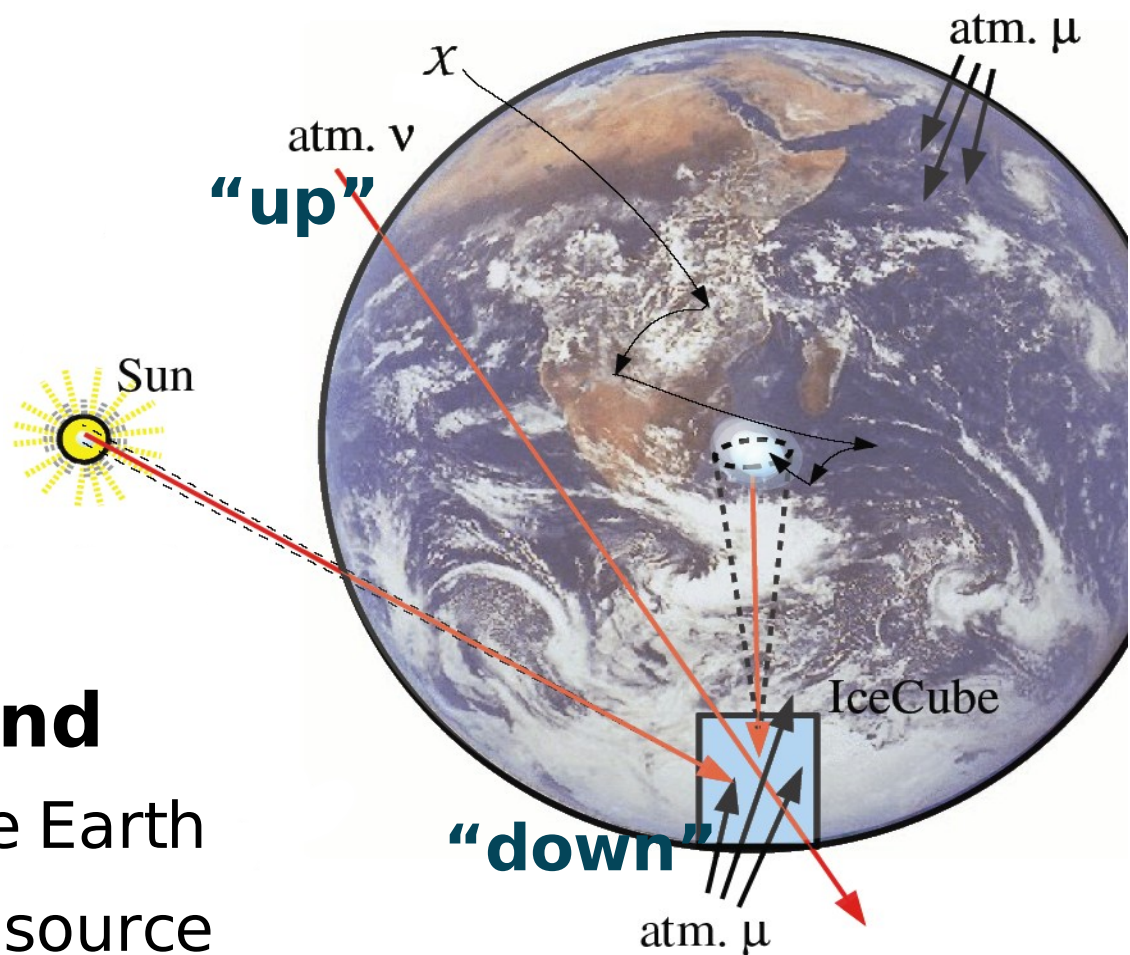
Neutralino signals

Neutralino-induced neutrinos

$$\chi\chi \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} qq \\ l^+l^- \\ W, Z, H \end{array} \right\} \rightarrow \nu$$

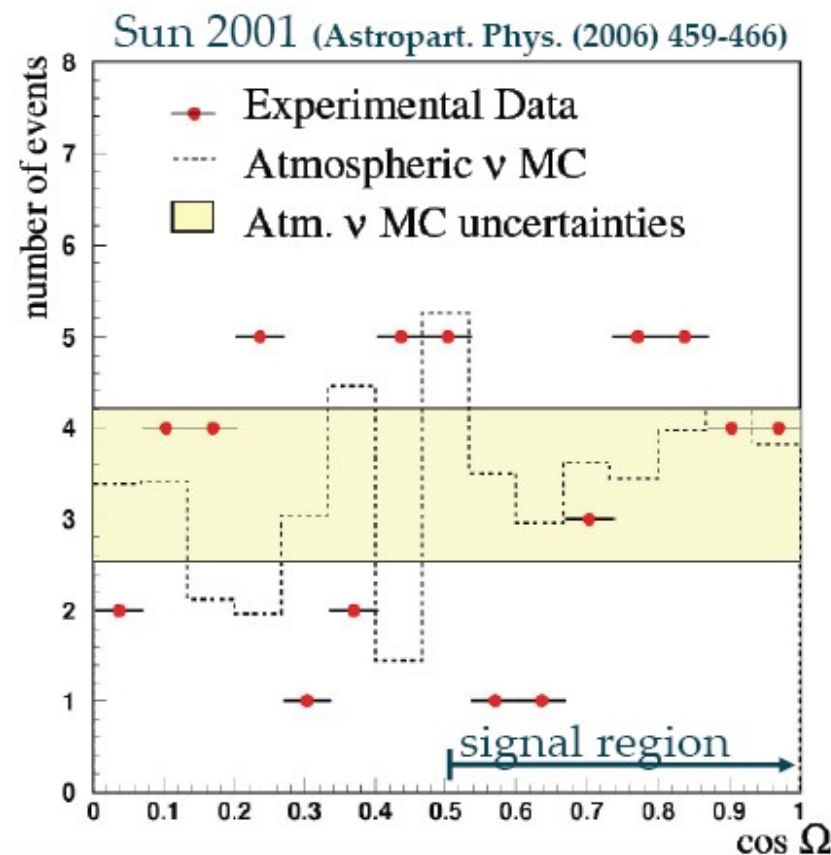
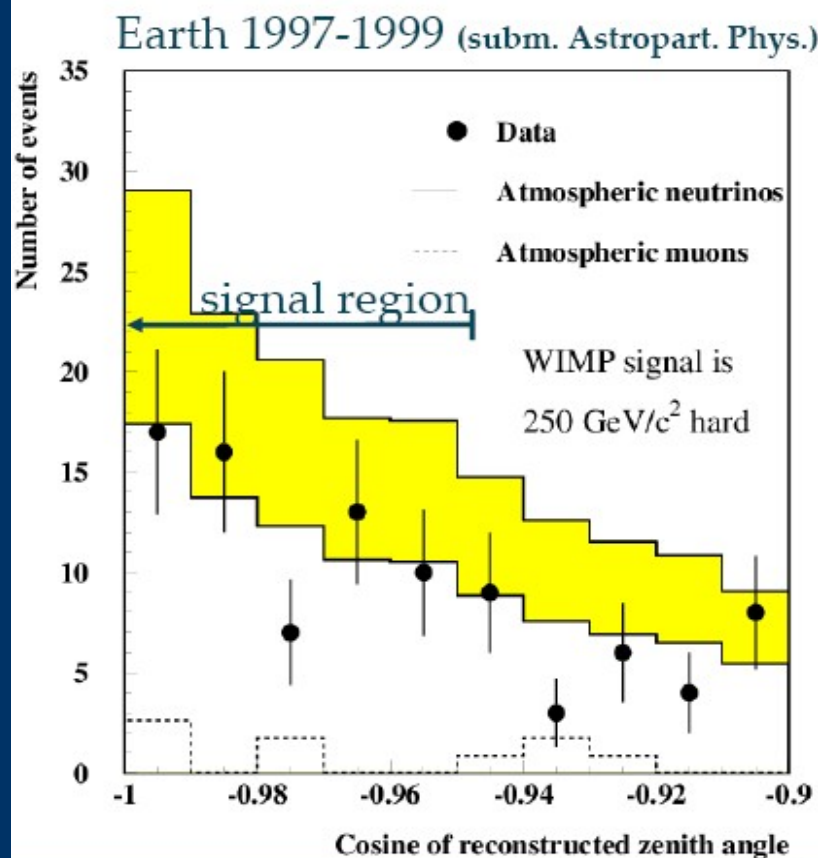
Atmospheric background

- ▶ atm. μ : absorbed by the Earth
- ▶ atm. ν : compare on/off source angular regions



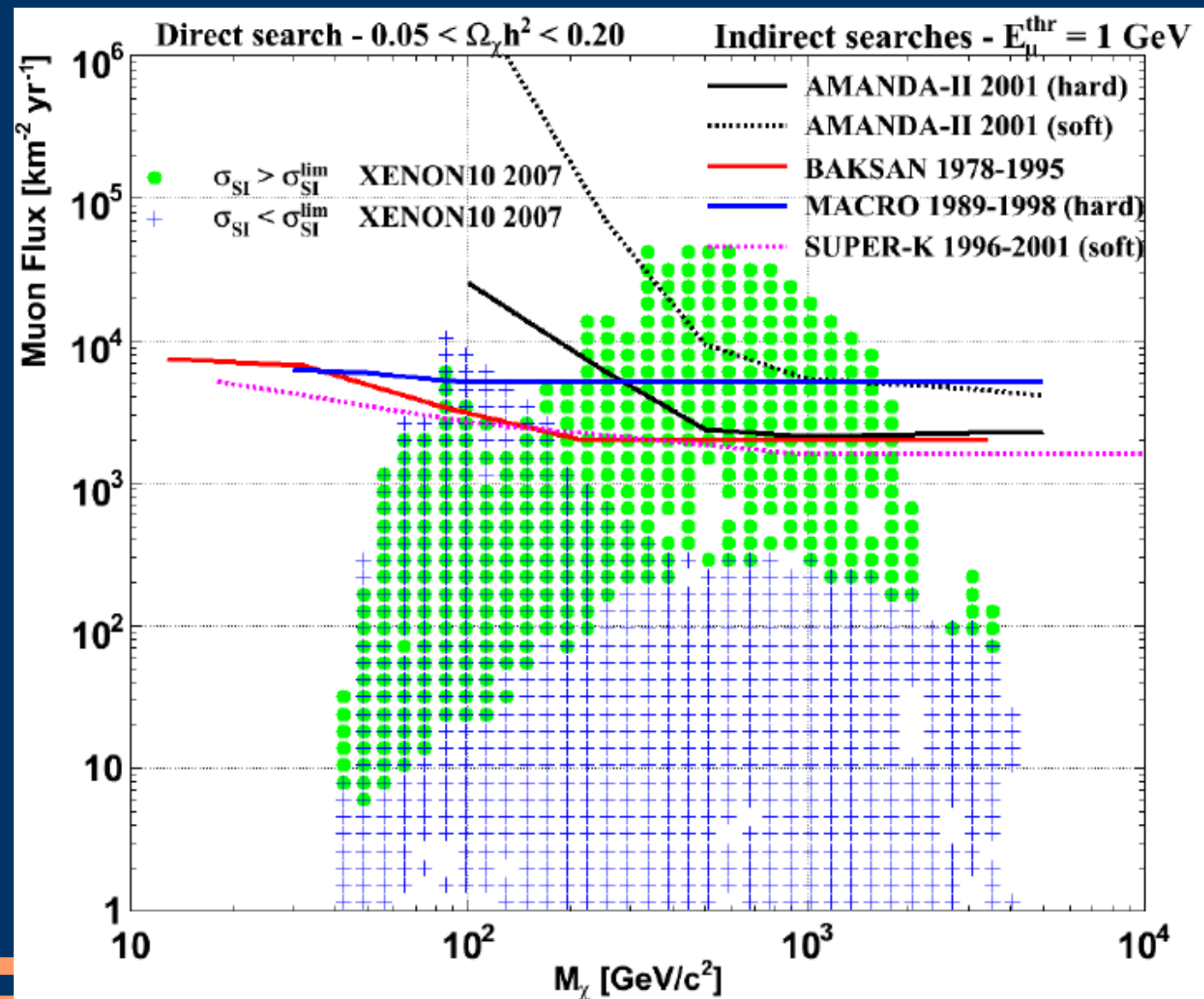
Ricerche Indirette rivelatori sottomarini: AMANDA-IceCube

No excess of neutralino-induced neutrinos



Icecube: Wimps dal Sole

- I primi flussi limite sono paragonabili alle misure dirette e ai risultati di MACRO

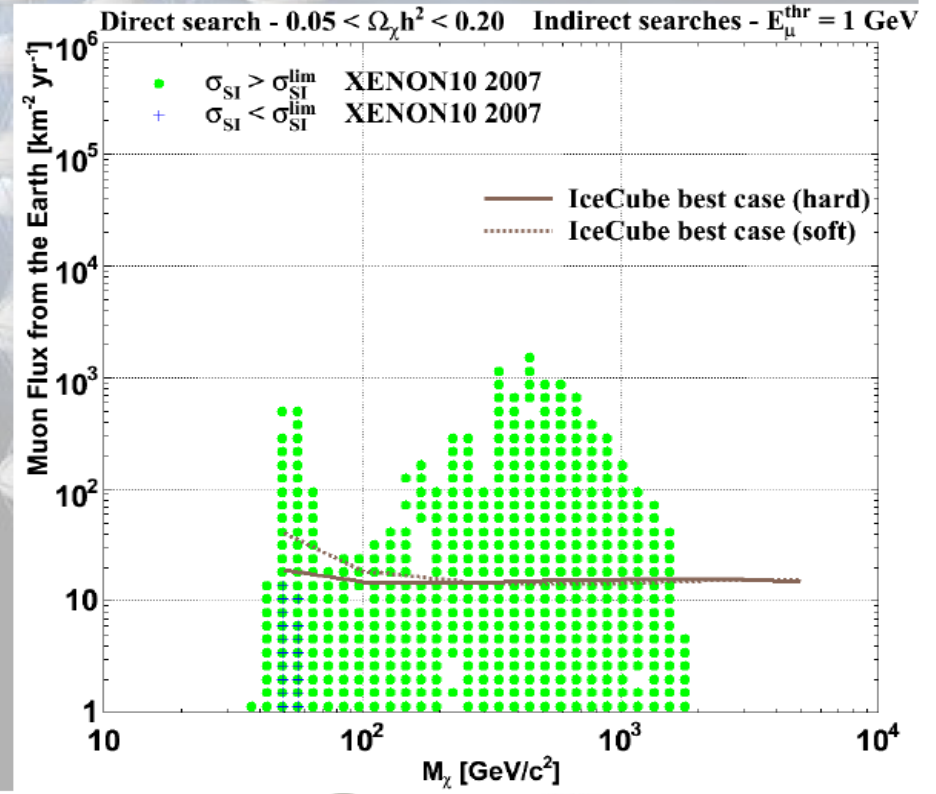
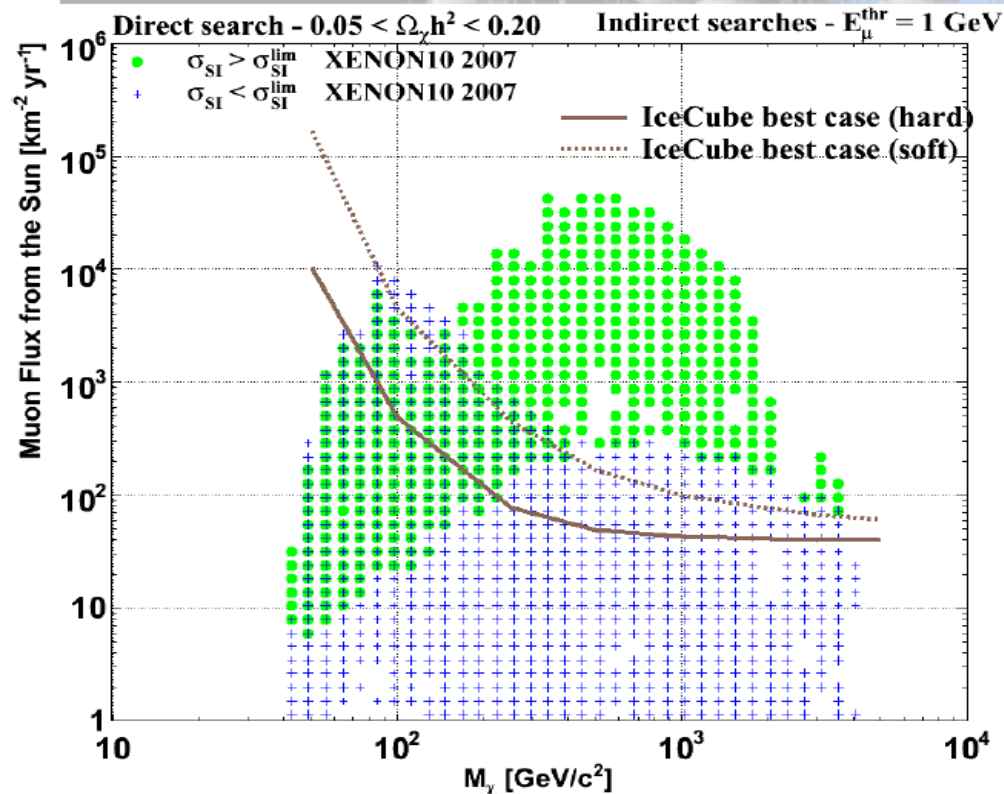


Prospettive ICECUBE

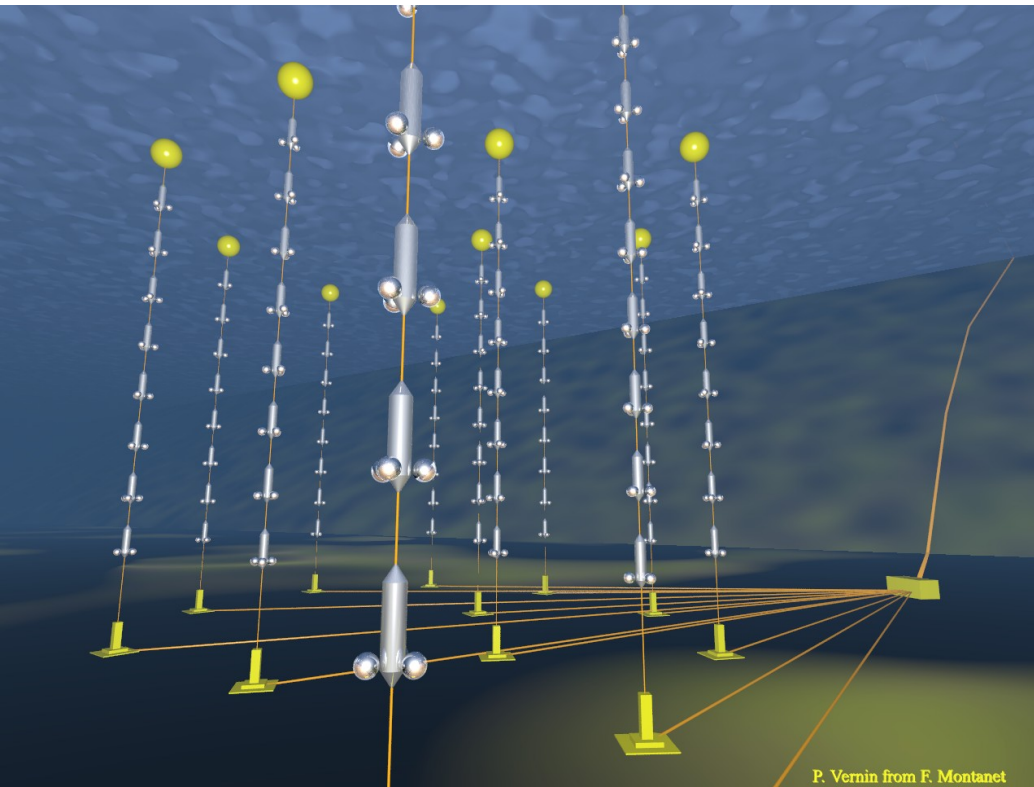
IceCube Prospects (Simulated 10 y of data-taking)

Sun
5 y of live-time

Earth
10 y of live-time

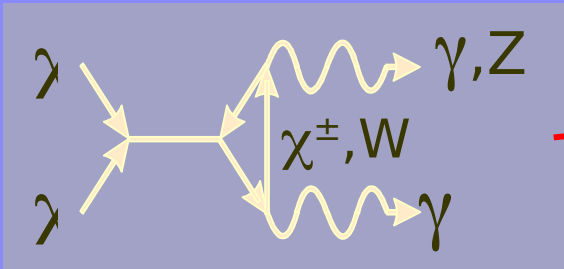


ANTARES Project

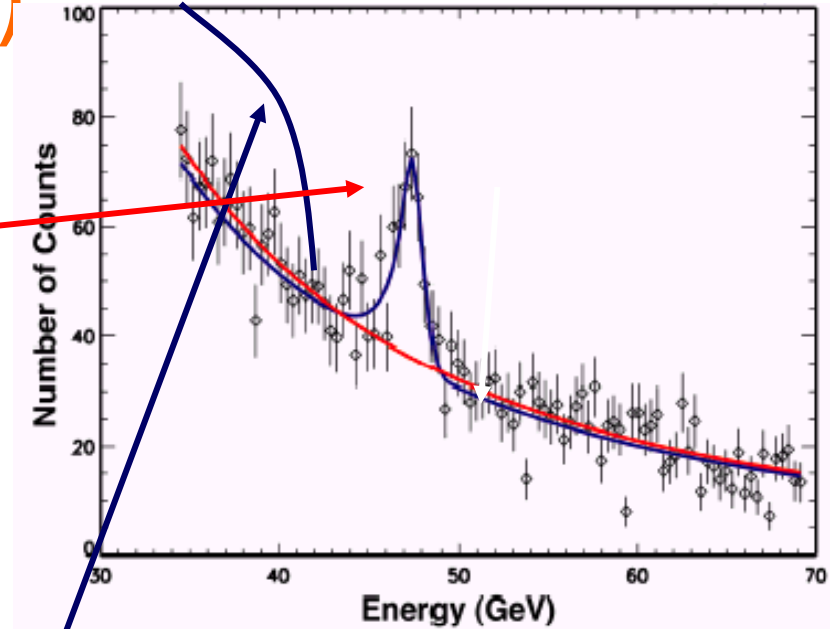


1. Rivelazioni indiretta di annichilazione (osservazione tramite gamma)

■ Annichilazione $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$ or γZ :

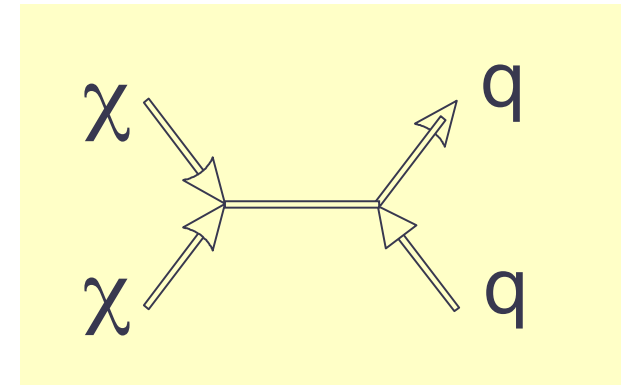


→ sarebbe chiara segnatura ad alte energie, ma: “*loop suppressed*”



■ annichilazione $\chi\chi \rightarrow qq \rightarrow \text{jets} \rightarrow n \gamma$'s

- continuo di γ di bassa energia
- segnatura più difficile, ma flusso maggiore

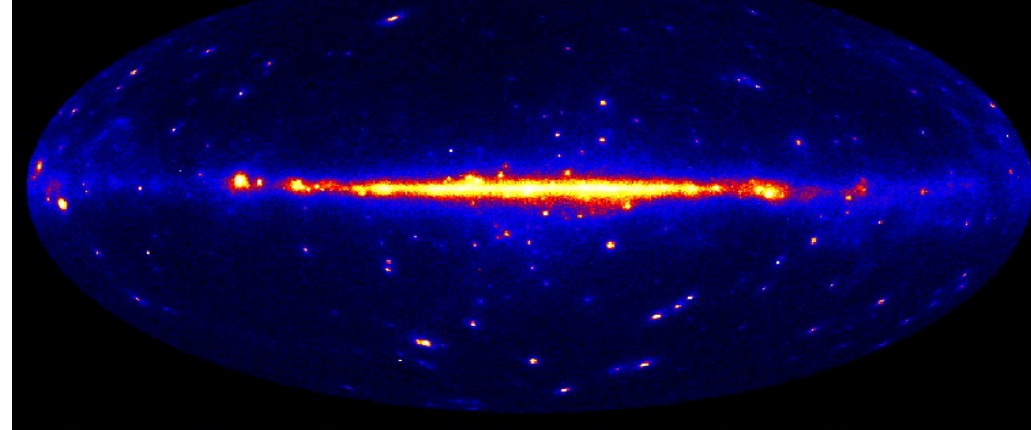


Regioni del cielo candidate per rivelare un possibile segnale di annichilazione

ZONA	VANTAGGI	DIFFICOLTÀ
CENTRO GALATTICO	Buona statistica	Incertezze dovute al fondo diffuso di RC
Galassie satelliti	Basso background e identificazione delle sorgenti buona	Bassa statistica
Alone Galattico	Buona statistica	Incertezza nella valutazione del fondo
Extragalattico	Buona statistica	Incertezze sul background
Righe spettrali	Nessuna incertezza astrofisica	Bassa statistica e risoluzione strument

L'osservatorio GLAST

The gamma-sky from 100 MeV to 300 GeV



Launch Vehicle - Delta II - 2920-10H

Launch Location - Kennedy Space Center

Orbit Altitude - 575 Km

Orbit Inclination - 28.5 degrees

Orbit Period - 95 Minutes

LAT mass 3000Kg

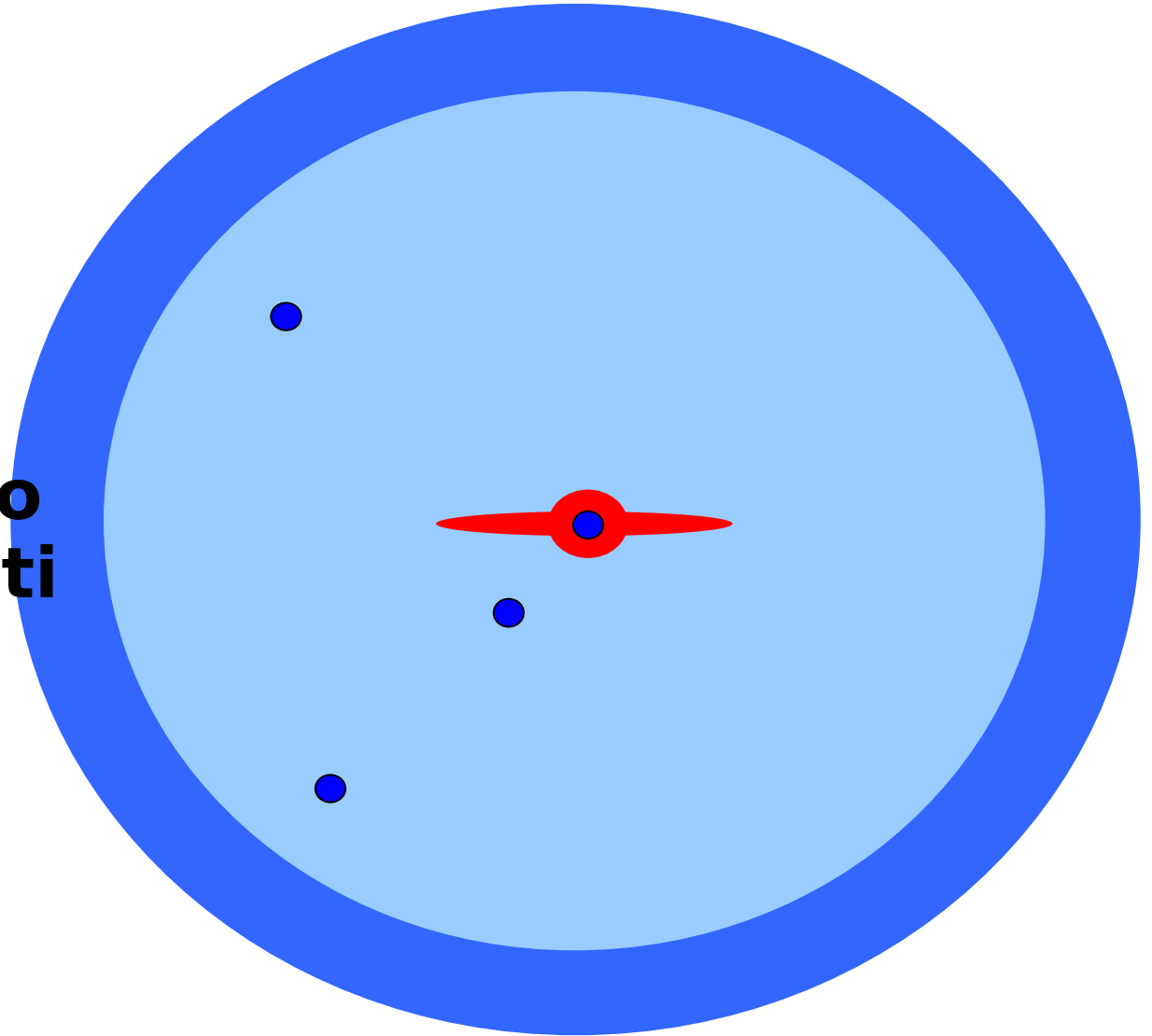
LAT power 650W

Launch Date - Maggio 2008

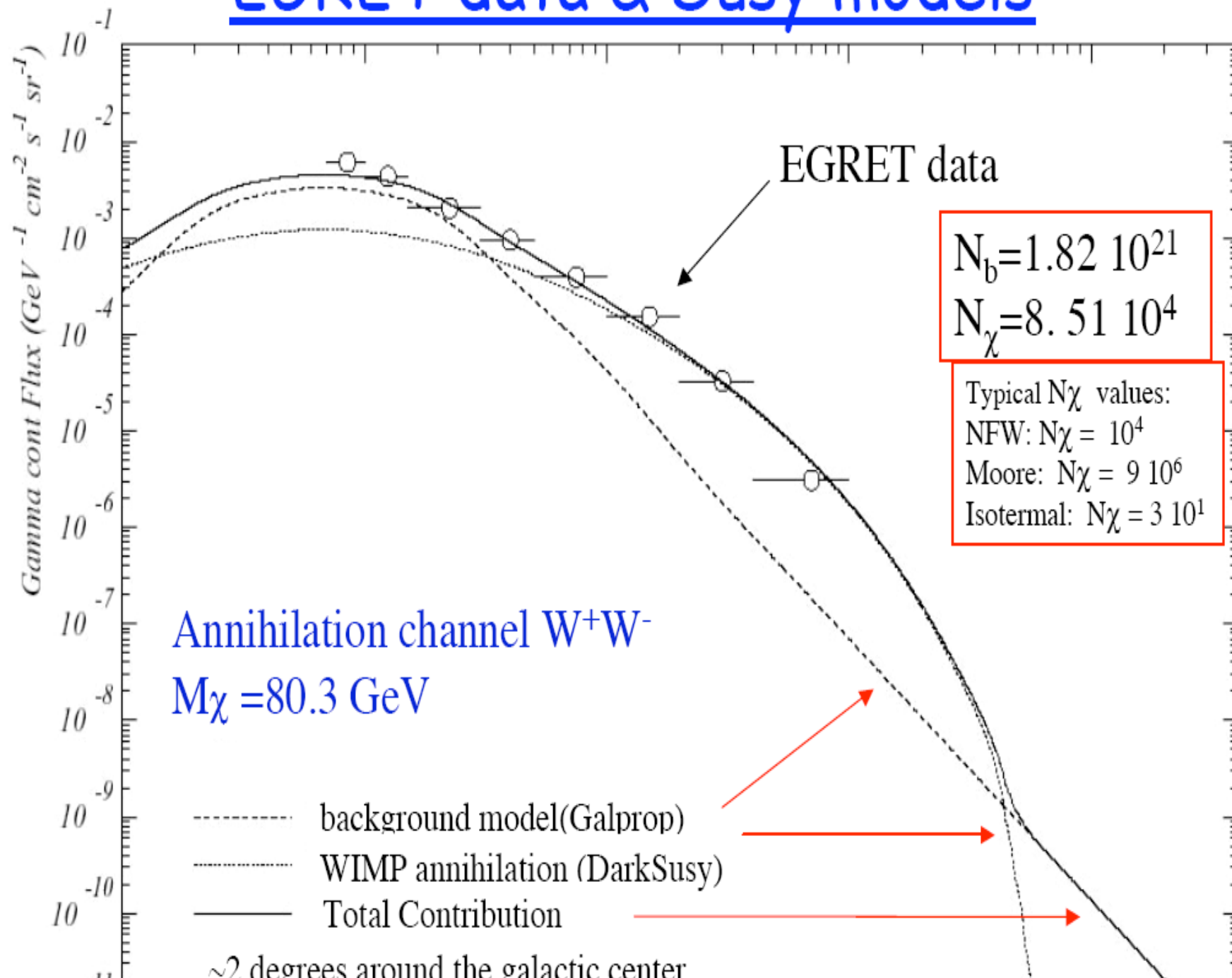
GLAST WIMPs: Regioni da investigare

Grazie alla buona
risoluzione angolare ed
energetica GLAST può
confrontare lo spettro
nelle direzione del cielo
più promettenti:

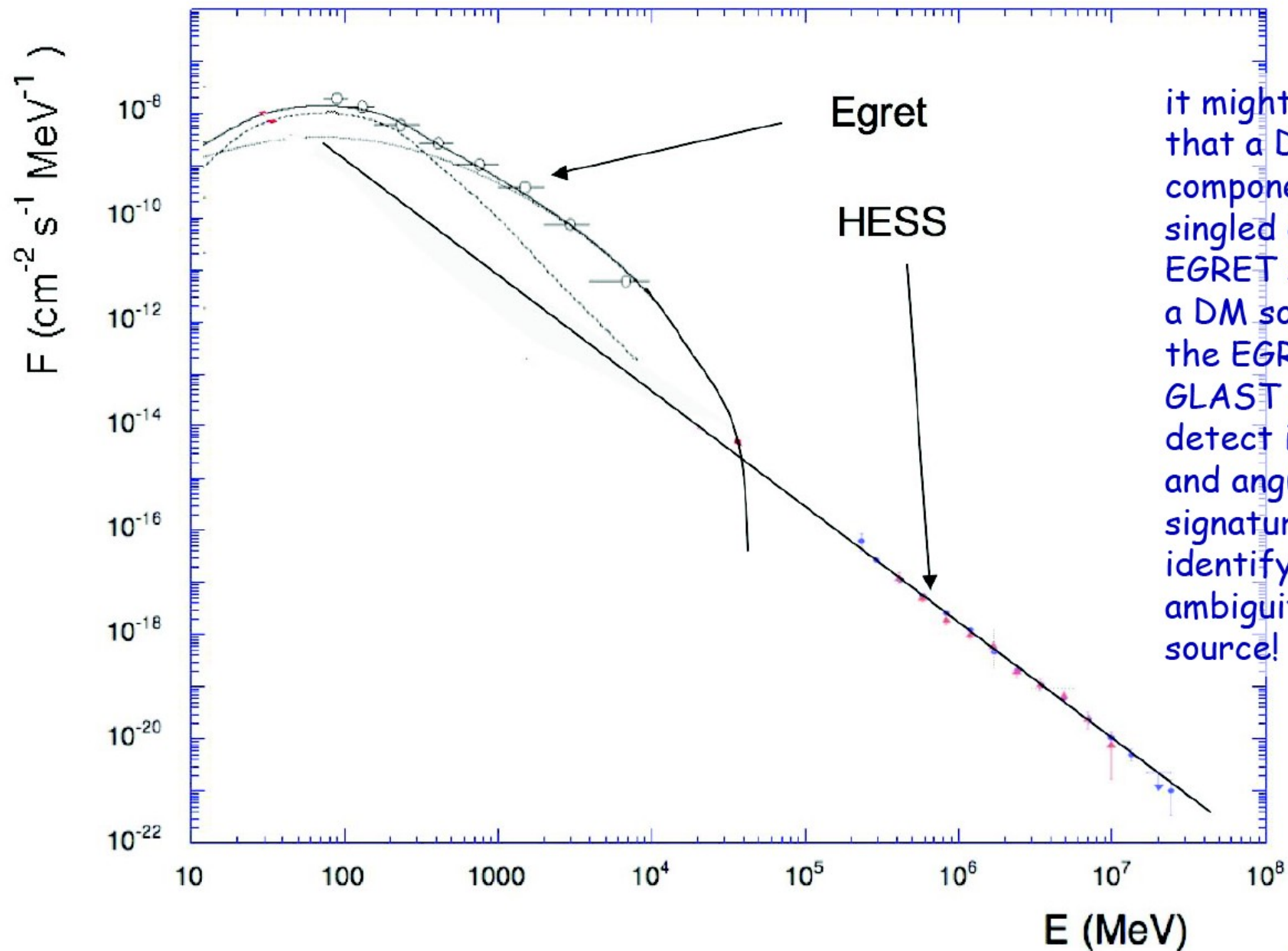
- **Centro galattico**
- **Galassie satelliti**
- **Alone galattico**
- **Contributi
Extra-galattici**



EGRET data & Susy models

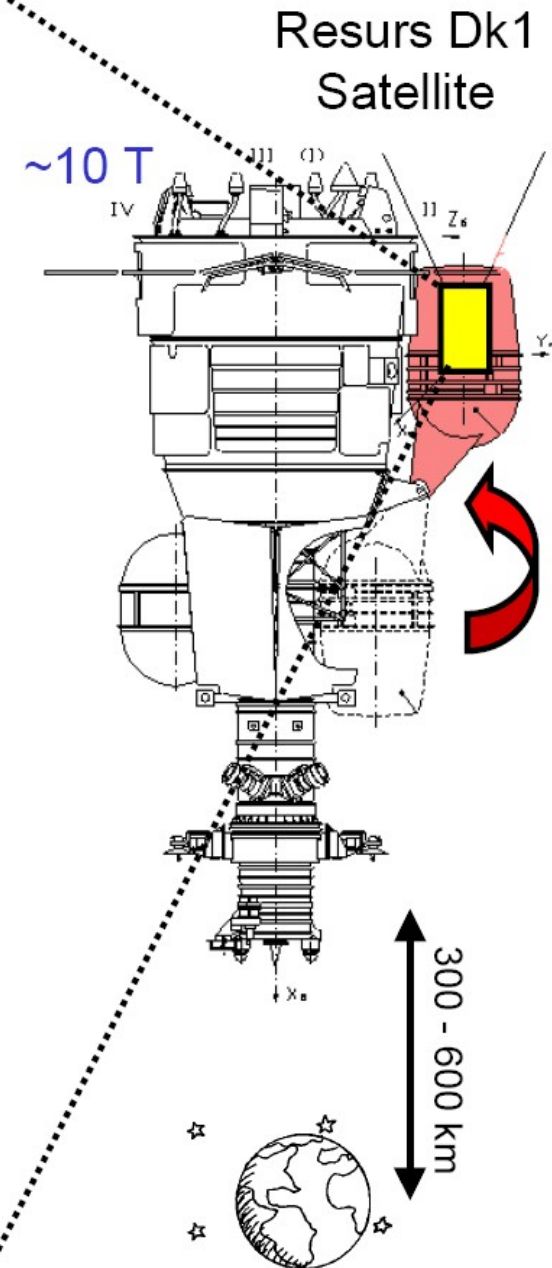
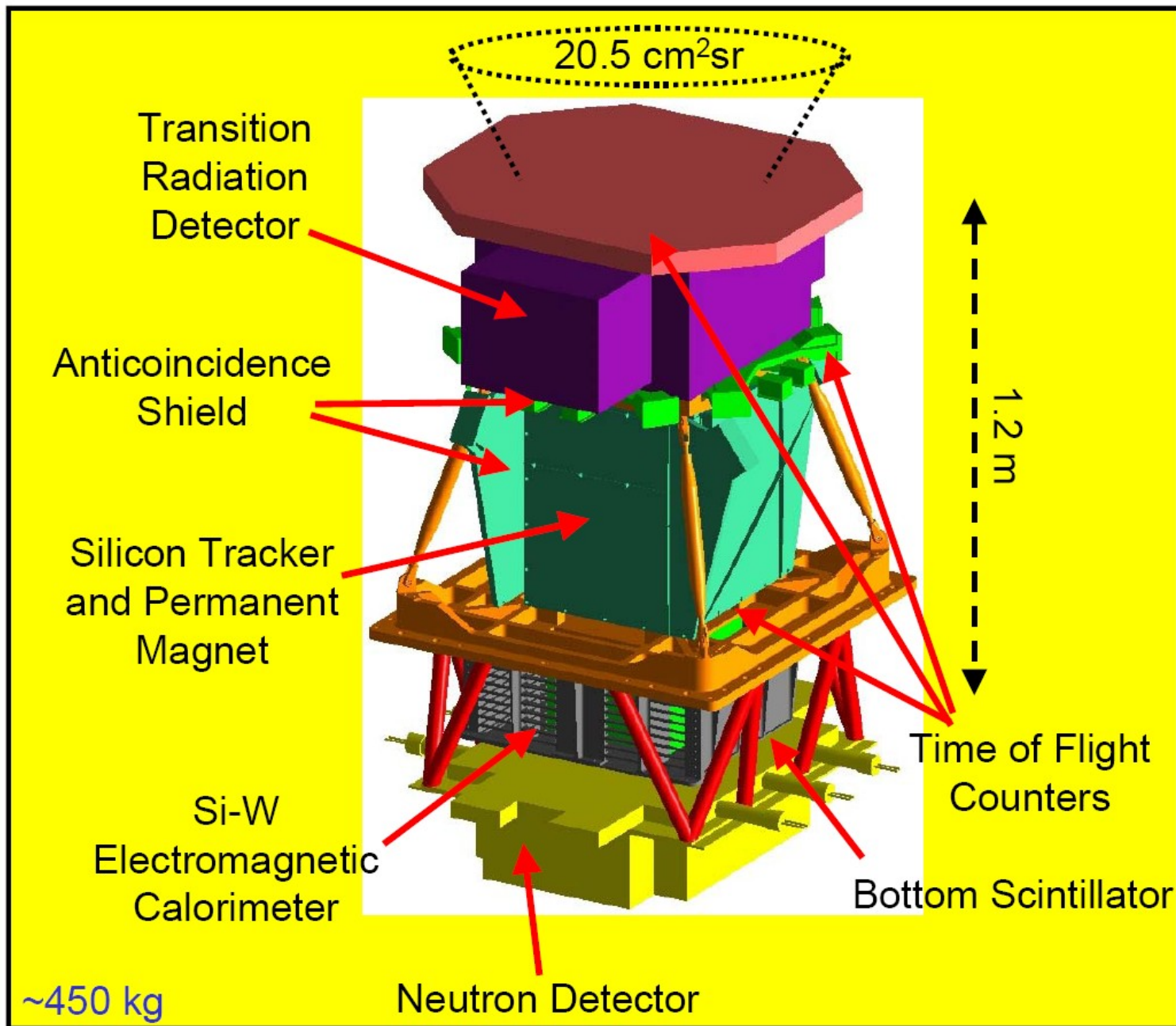


EGRET, GLAST, HESS



it might still be that a DM component could be singled out, e.g. the EGRET source (?): a DM source can fit the EGRET data; GLAST would detect its spectral and angular signatures and identify without ambiguity such DM source!

The PAMELA Satellite Experiment



PAMELA POSITRONS expectation

Secondary production

'Leaky box model'

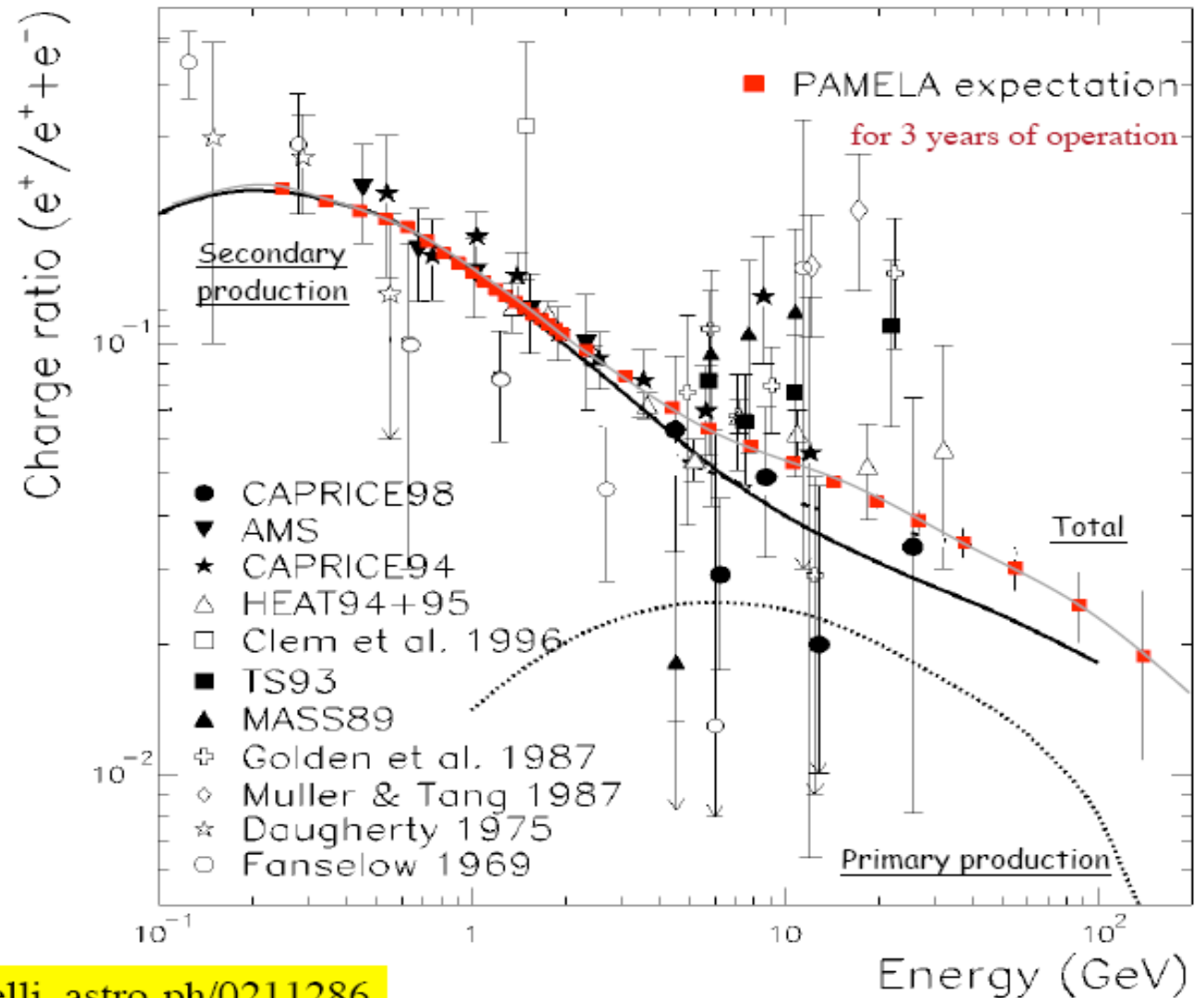
Secondary production

'Moskalenko + Strong
model' without
reacceleration

Primary production

from $\chi\chi$
annihilation

$(m(\chi) = 336 \text{ GeV})$



P. Picozza and A. Morselli, astro-ph/0211286

Il Telescopio MAGIC

•SITO:

- Roque de Los Muchachos
- Emisfero settentrionale
- Isole Canarie 2200m.slm

•Tecnologia:

- Telescopio Cerenkov

•Cronologia

- 2001 Inizio costruzione
- 2003 Inaugurazione
- 2004 Ciclo I di osservazioni
- 2006 Ciclo II di osservazioni

Grande area di raccolta

236m² superficie
10⁵m² area efficace

Sensibilità di flusso

2.5% crab/50ora
(10⁻¹¹ph/cm²/s)



Bassa soglia

energetica
(allo zenith)

50 GeV (**trigger**)
70-100 GeV
(**analisi**)

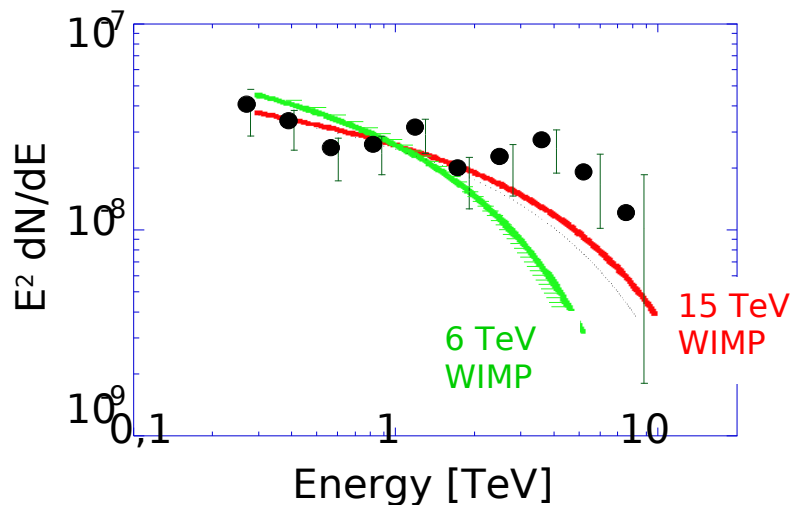
Risoluzione energetica

30% (**100 GeV**)
20% (**1 TeV**)



Magic: Osservazioni compiute

Il centro galattico [Ap] Letters 638 L101 (2006)]



- Il segnale è da associare ad una sorgente astrofisica:
 - Buco Nero Centrale SgrA*
 - SNR SgrA East
 - SNR G0.9+0.1
- Meccanismo di emissione sconosciuto

CONCLUSIONE

Seppure un segnale DM esiste è nascosto da sorgenti astrofisiche oppure è al di sotto della soglia

Il background è duro da considerare!

Conclusioni

- Abbiamo un insieme di esperimenti che a breve sono in grado di evidenziare un segnale dovuto alla DM
- Le possibili osservazioni potranno meglio chiarire la natura della DM ed il ruolo nell'evoluzione delle galassie
- Sono importanti le osservazioni secondo tutti i canali possibili e dal 2008 avremo una serie di esperimenti in osservazione in contemporanea