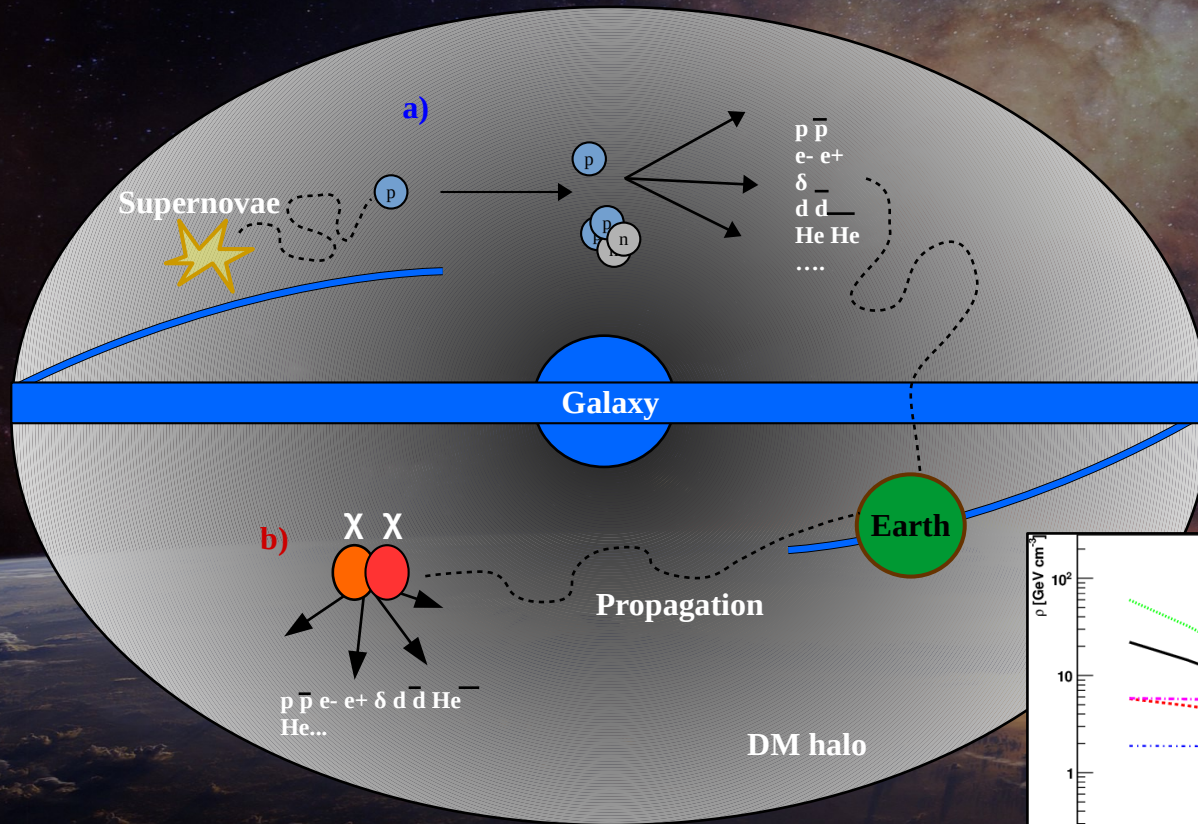


Segnali di materia oscura dallo spazio

107° CONGRESSO NAZIONALE della SOCIETA' ITALIANA DI FISICA
Riccardo Munini – INFN Trieste
14 settembre 2021

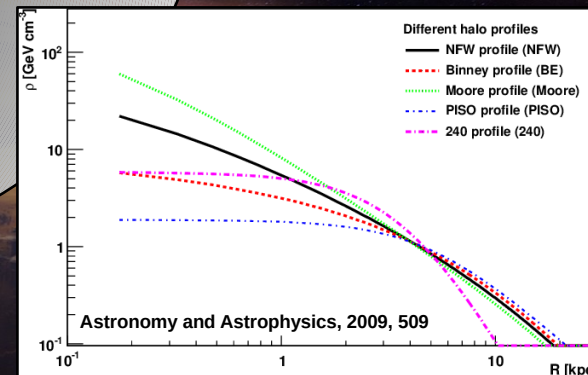
riccardo.munini@ts.infn.it

Come rivelarla? Rivelazione indiretta



Tra i modelli più accreditati per la materia oscura ci sono le **WIMP** (**Weakly Interacting Massive Particle**): particelle massive che interagiscono solo gravitazionalmente e che potrebbero annichilire o decadere in particelle del modello standard.

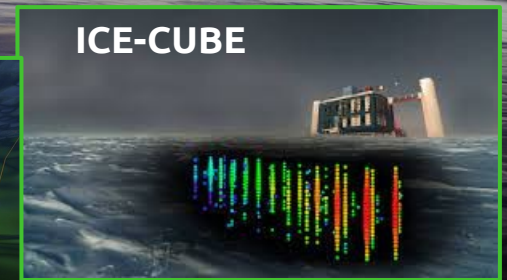
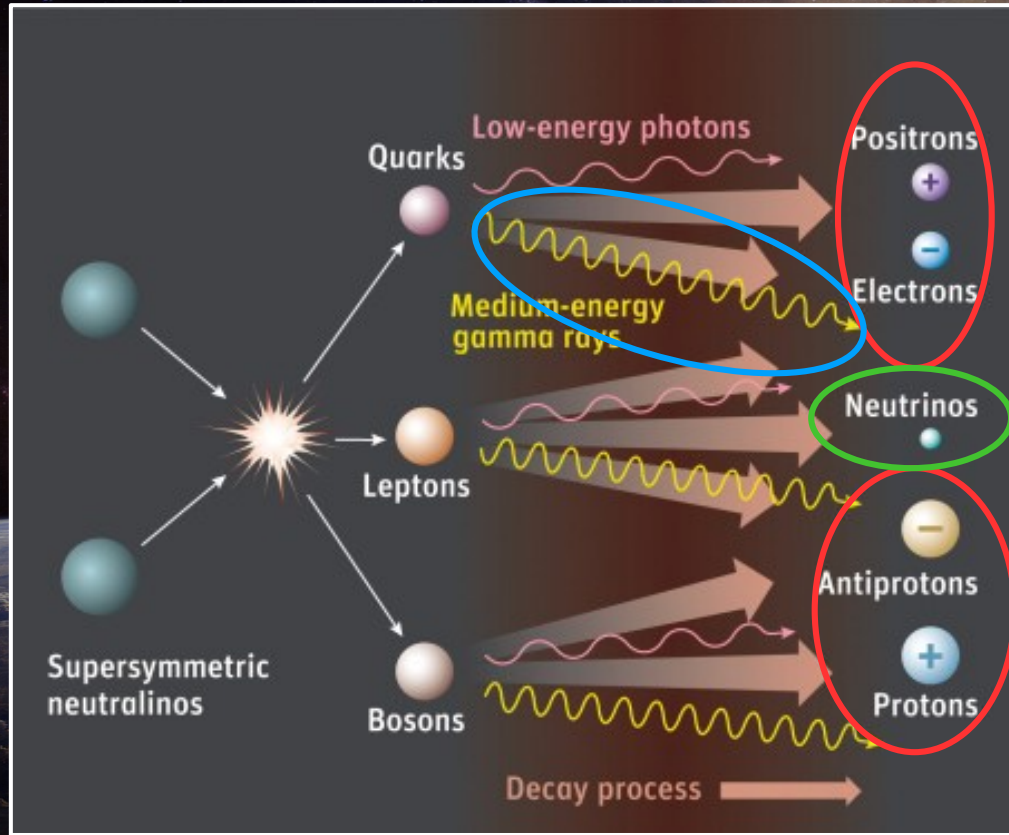
Dato che la materia oscura dovrebbe permeare la nostra galassia le particelle prodotte dall'annichilazione dovrebbero essere rivelate nella radiazione cosmica.



Diversi profili per la densità di materia oscura vengono utilizzati nei modelli.

Astronomy and Astrophysics, 2009, 509

Come rivelarla? Rivelazione indiretta



Raggi cosmici: materia e antimateria

Supernovae

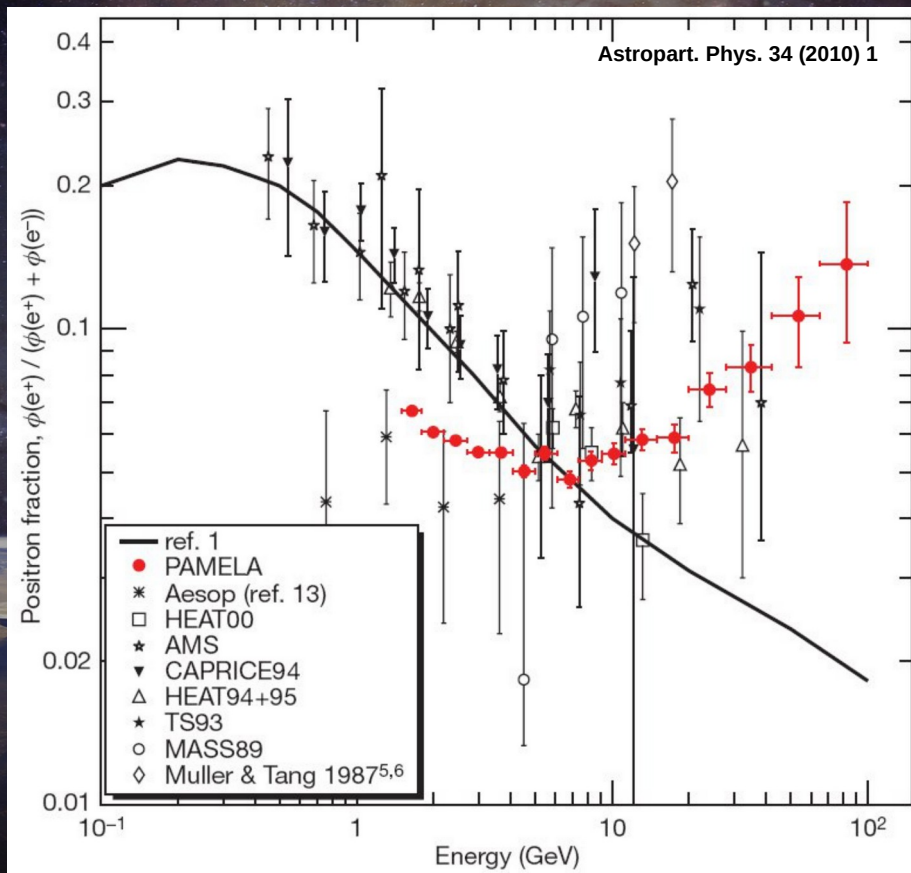
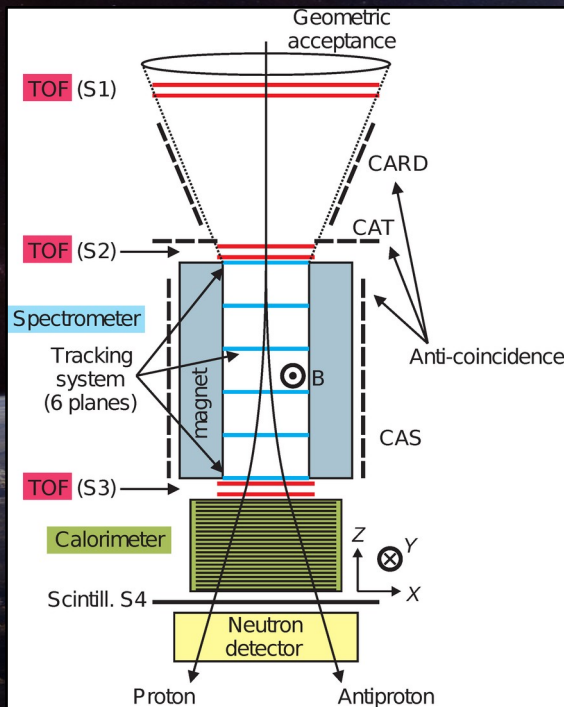
I raggi cosmici subiscono processi di diffusione per la presenza dei campi magnetici galattici → non contengono l'informazione sulla loro direzione d'arrivo.

Si cerca un eccesso negli spettri di antimateria in quanto con minor fondo astrofisico (origine secondaria nei raggi cosmici). Alcuni canali come gli antinuclei sono i più promettenti. Modelizzazione del fondo astrofisico è il punto chiave per queste ricerche.



L'esperimento PAMELA e l'eccesso di positroni

PAMELA: spettrometro magnetico + calorimetro
Luglio 2006 – Marzo 2016



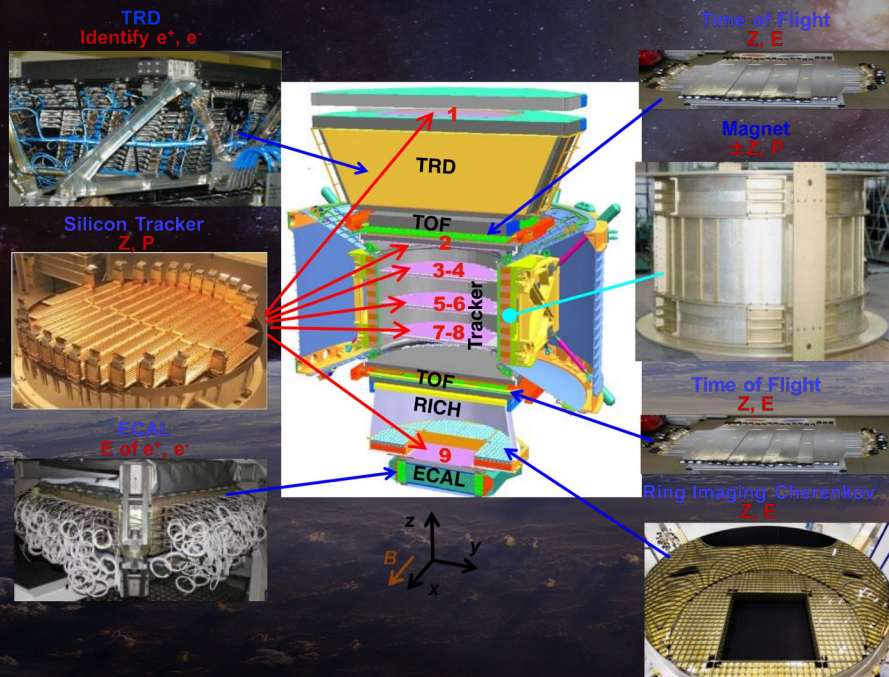
Prima inequivocabile misura di un eccesso di positroni rispetto alla produzione secondaria!

Da cosa sono prodotti?

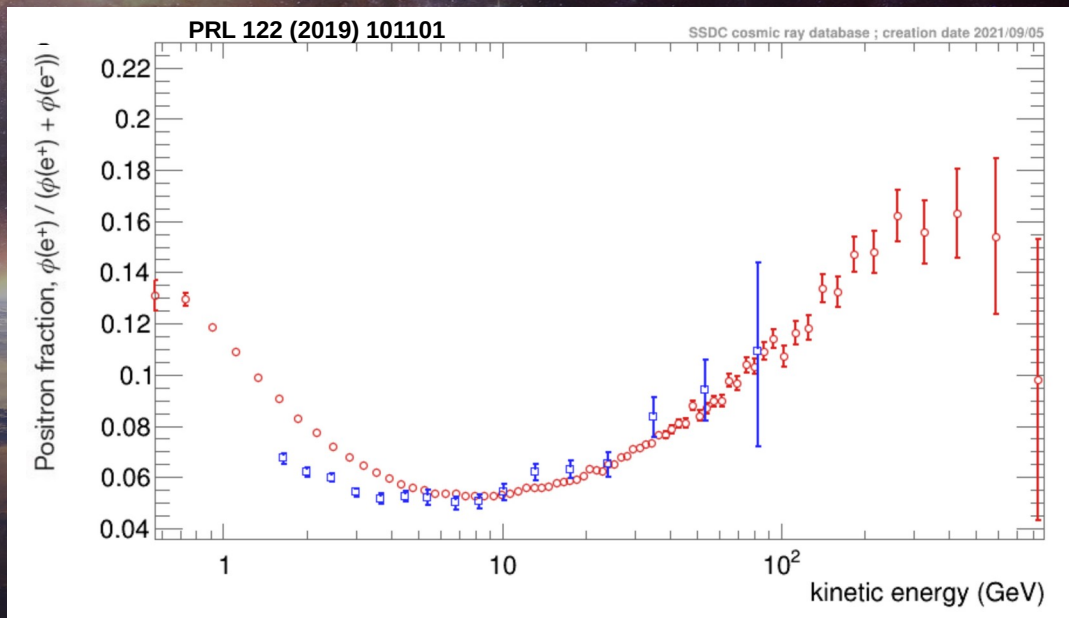
Il risultato ebbe un effetto esplosivo nella comunità, più di 1800 citazioni per le sue implicazioni sulla materia oscura.

L'esperimento AMS02 e l'eccesso di positroni

AMS02: spettrometro
magnetico + calorimetro
Maggio 2011 – Oggi

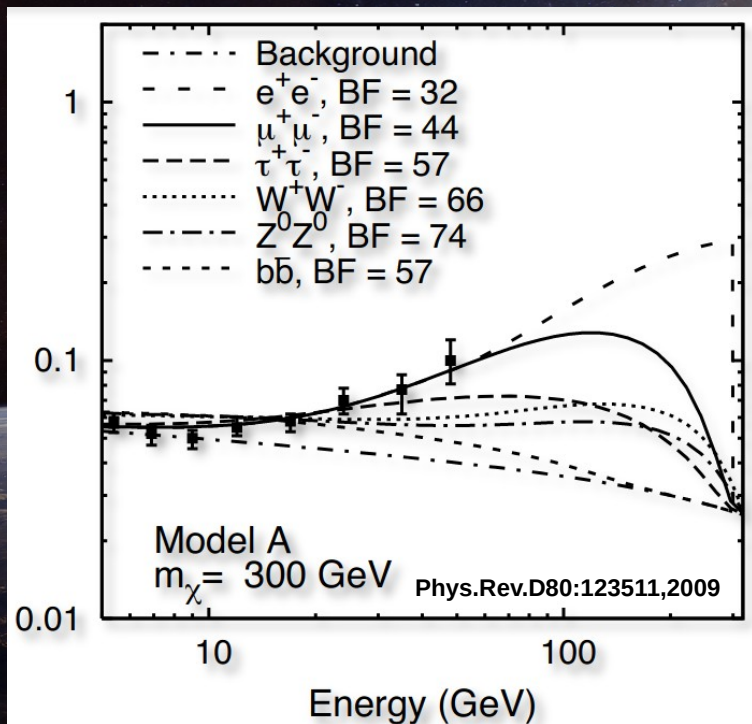


Risultato confermato da AMS02 con maggior
precisione statistica e con estensione del range
energetico fino ad alcune centinaia di GeV

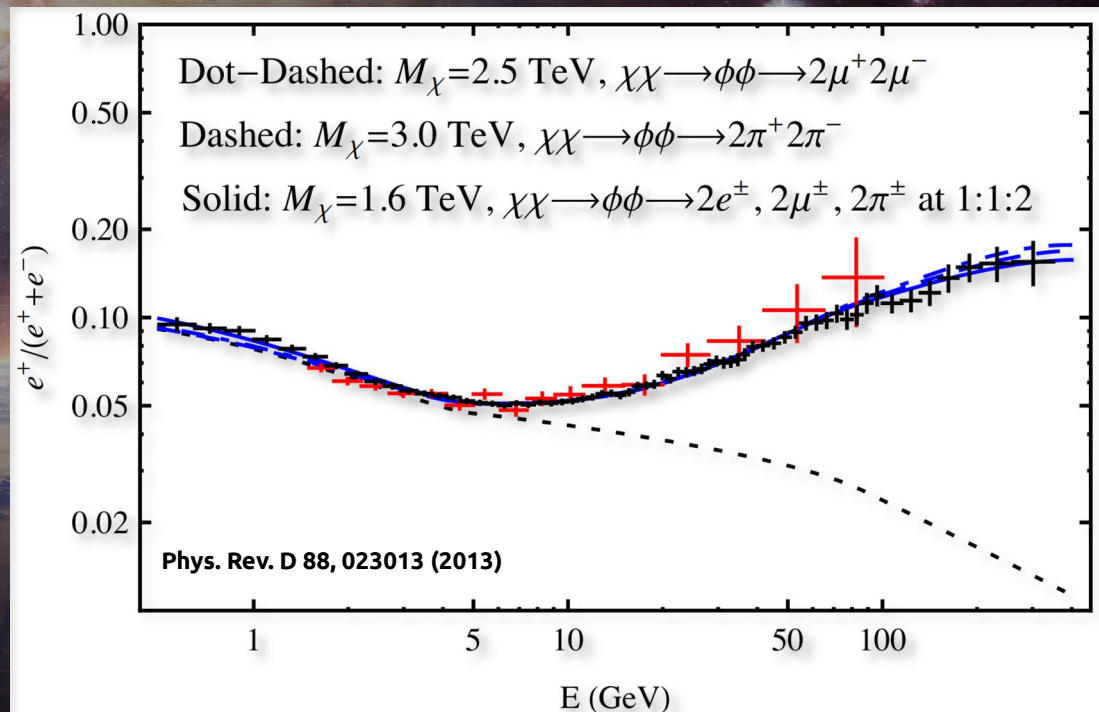


Eccesso di positroni e materia oscura

Frazione positroni PAMELA: annichilazione di materia oscura $\rightarrow$ grande sezione d'urto, boost factor richiesto, leptophilic models



Dopo le misure di AMS02 i modelli che accomodano la materia oscura vedono masse piu` grandi 1-3 TeV



Produzione di positroni da Pulsar

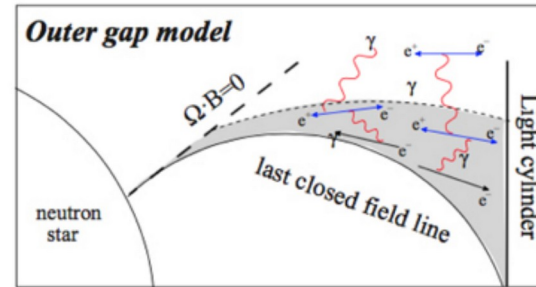
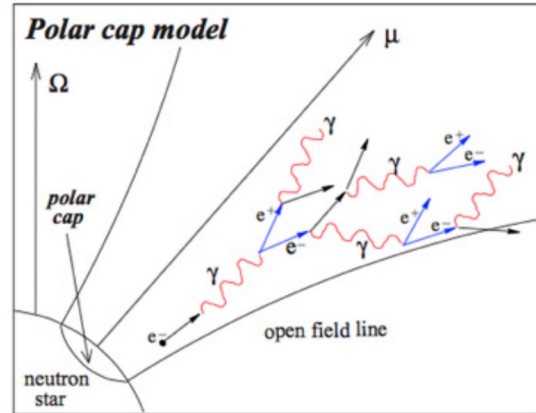
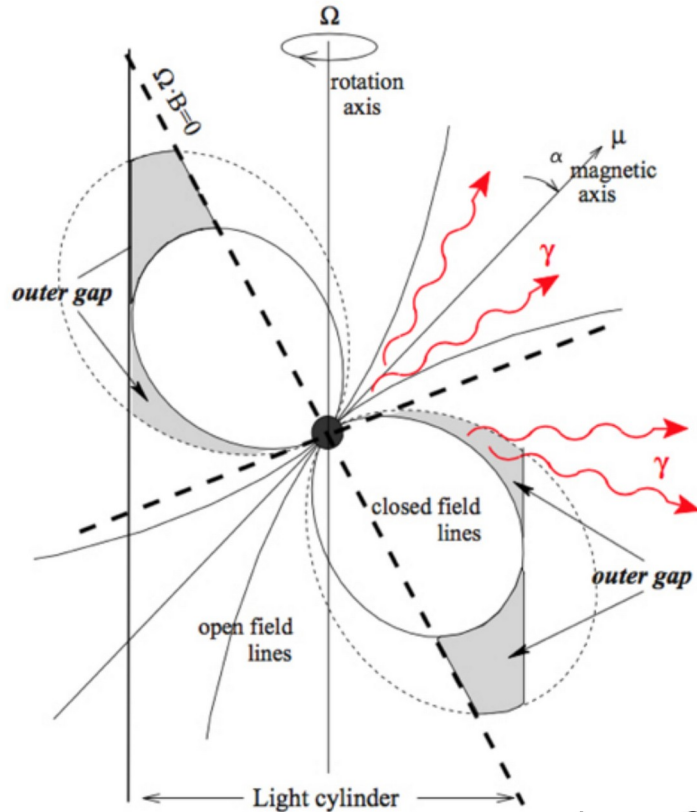


Image Credit: Yating, Kwong-Sang, Jumpei (2016)

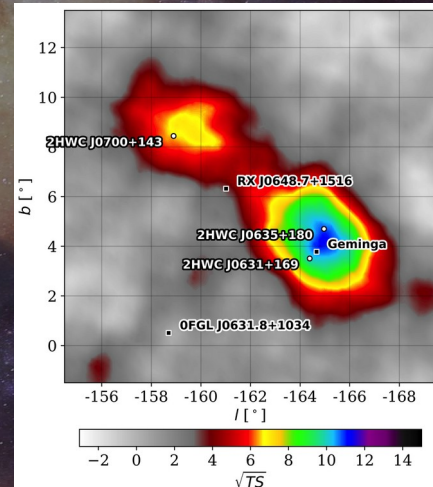
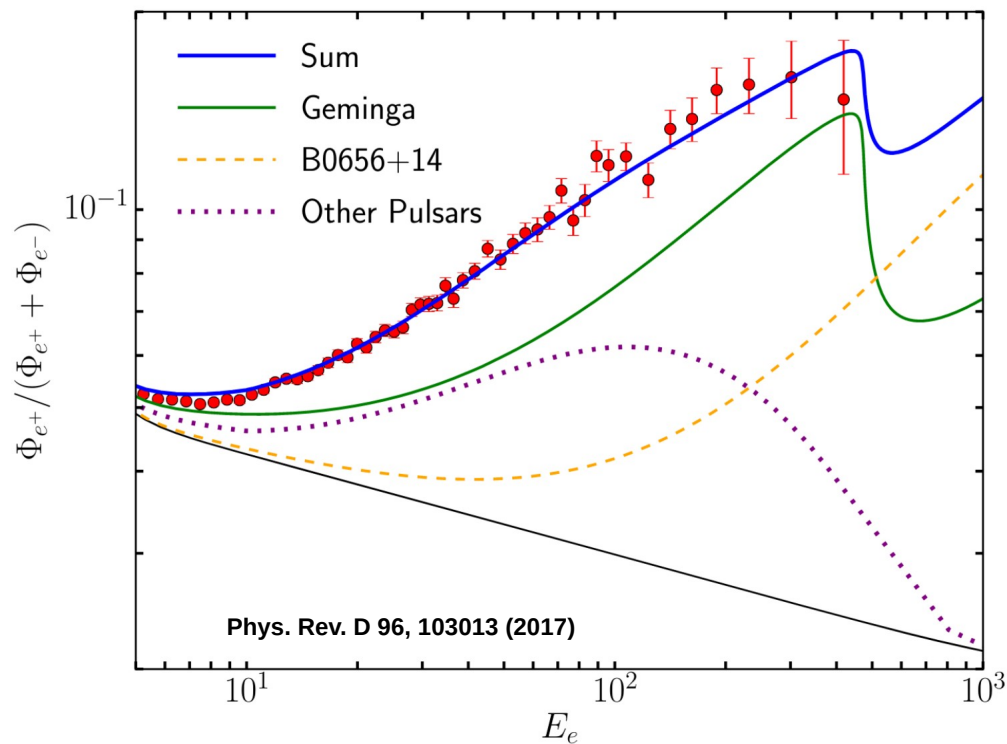
- Electrons are accelerated by the strong magnetic fields, somewhere in the magnetosphere (the location is model dependent)

- These electrons then induce electromagnetic cascades through the emission of curvature radiation

- This results in the production of photons with energies above the threshold for pair production in the strong magnetic field

- These electrons and positrons then escape the magnetosphere through open field lines, or after reaching the pulsar wind

Produzione di positroni da Pulsar



Emissione gamma (HAWC) da GEMINGA da Inverse Compton. Usato per modellizzare il meccanismo di emissione dei positroni ed elettroni.

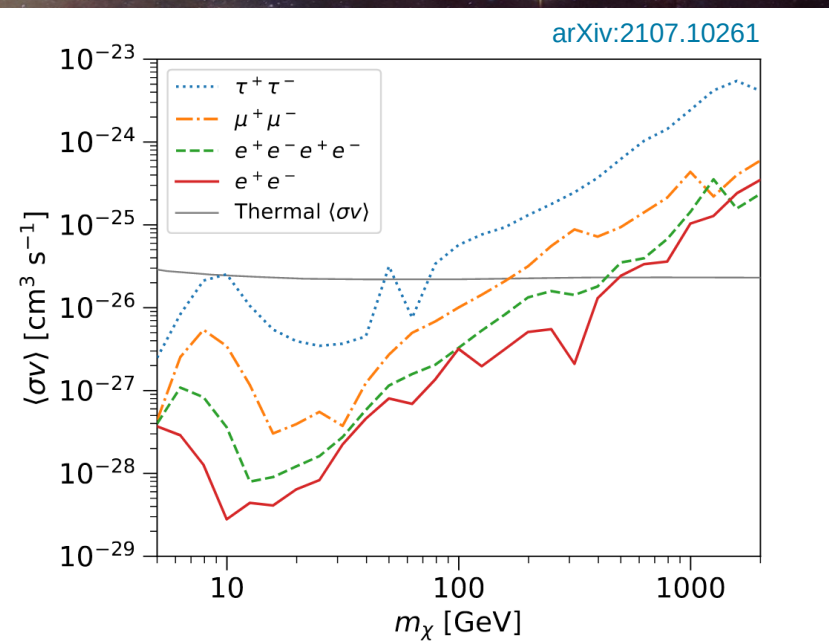
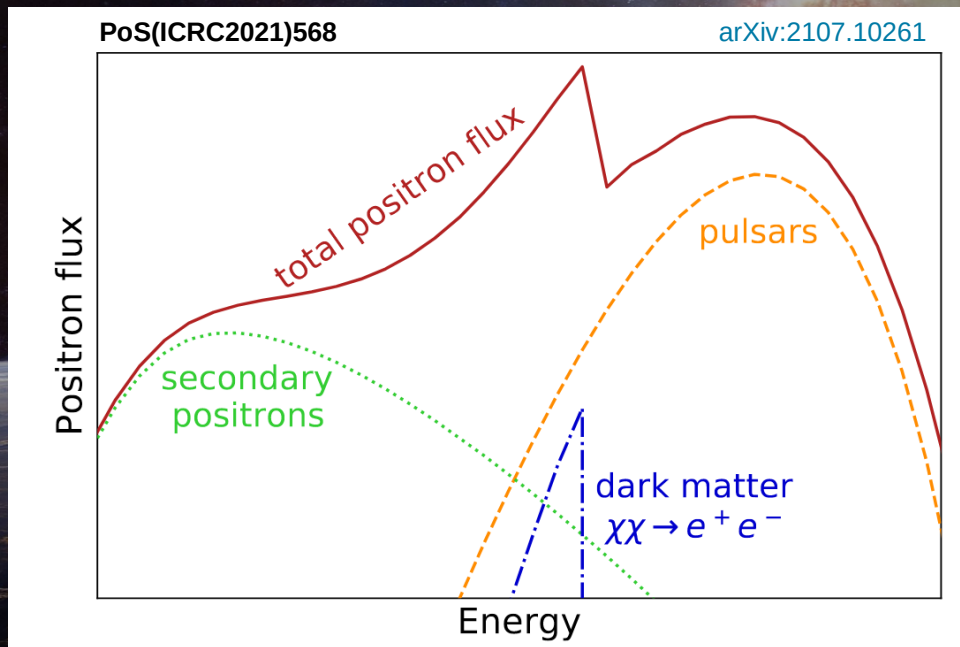
“What the HAWC data tell us is that below ~ 10 TeV or so, electrons leave the region surrounding Geminga before they lose the majority of their energy”

“In light of this result, we conclude that it is very likely that pulsars provide the dominant contribution to the long perplexing cosmic-ray positron excess”

Eccesso di positroni e materia oscura

Approccio misto: si cerca la possibilità di un bump prodotto da decadimento di materia oscura su un fondo astrofisico dovuto a pulsar.

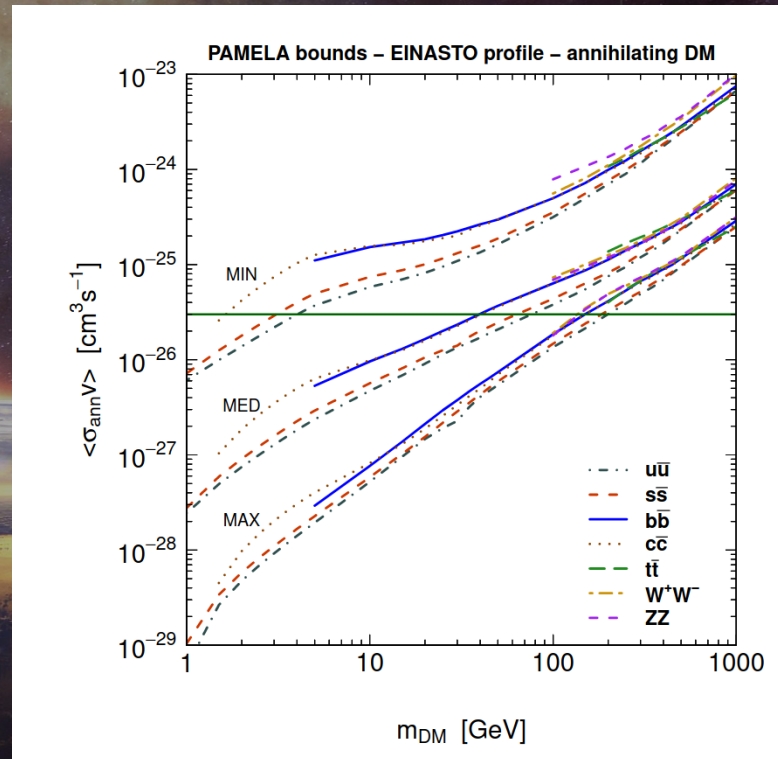
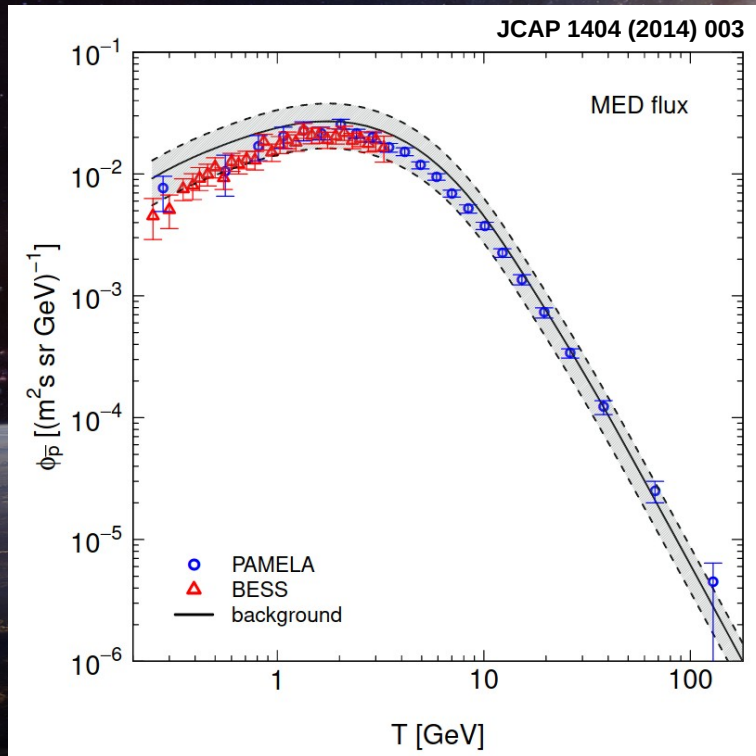
“We find no evidence for a spectral bump correlated with leptophilic dark matter, and set strong constraints on the dark matter annihilation cross-section that fall below the thermal annihilation cross-section for dark matter masses below 60 GeV and 380 GeV.”



Antiprotoni PAMELA, BESS e materia oscura

PAMELA per prima fornisce una misura dello spettro degli antiprotoni su un range energetico esteso. I voli di BESS forniscono una misura più precisa delle basse energie.

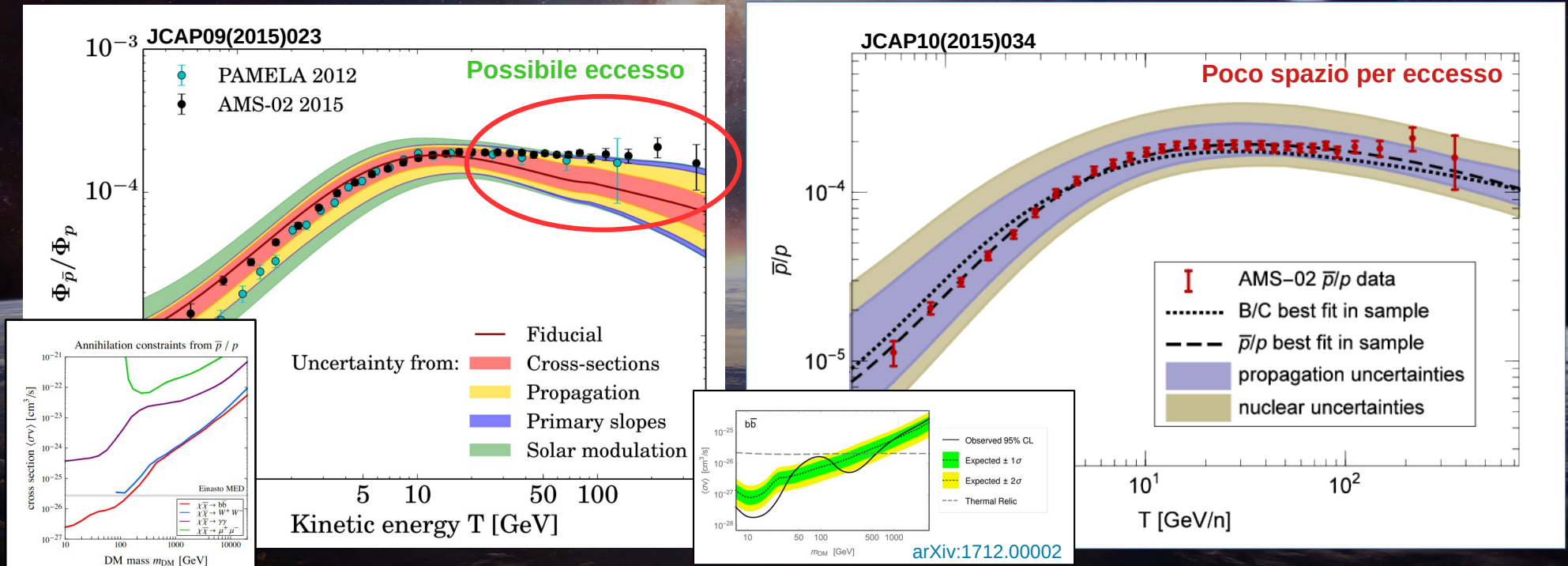
I limiti ottenuti sono caratterizzati da un grande spread, sia per le incertezze sui modelli di propagazione sia per la precisione statistica della misura ancora limitata.



Antiprotoni AMS02 e materia oscura

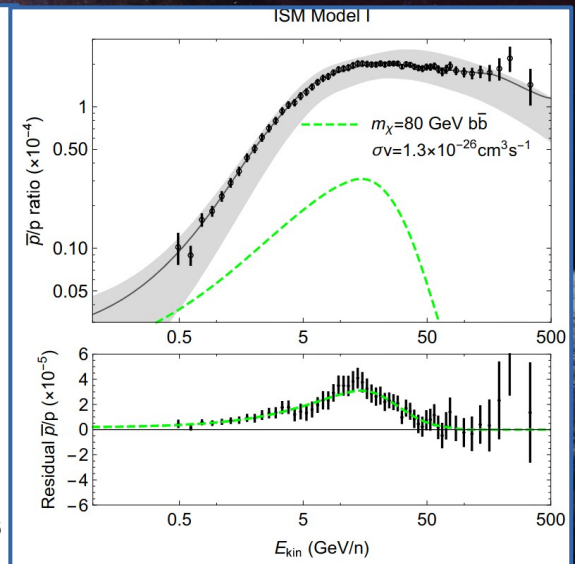
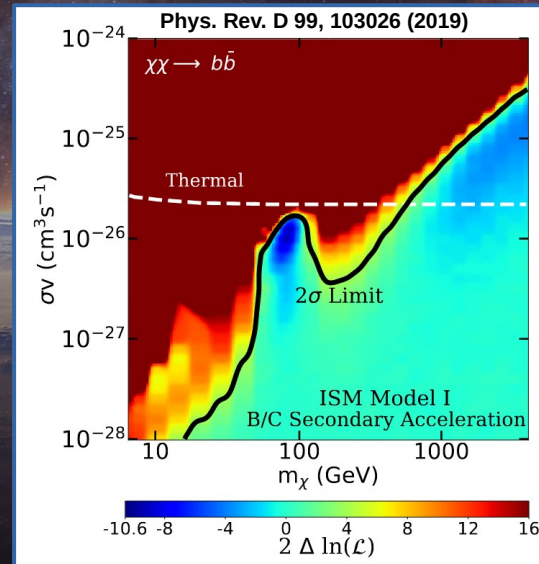
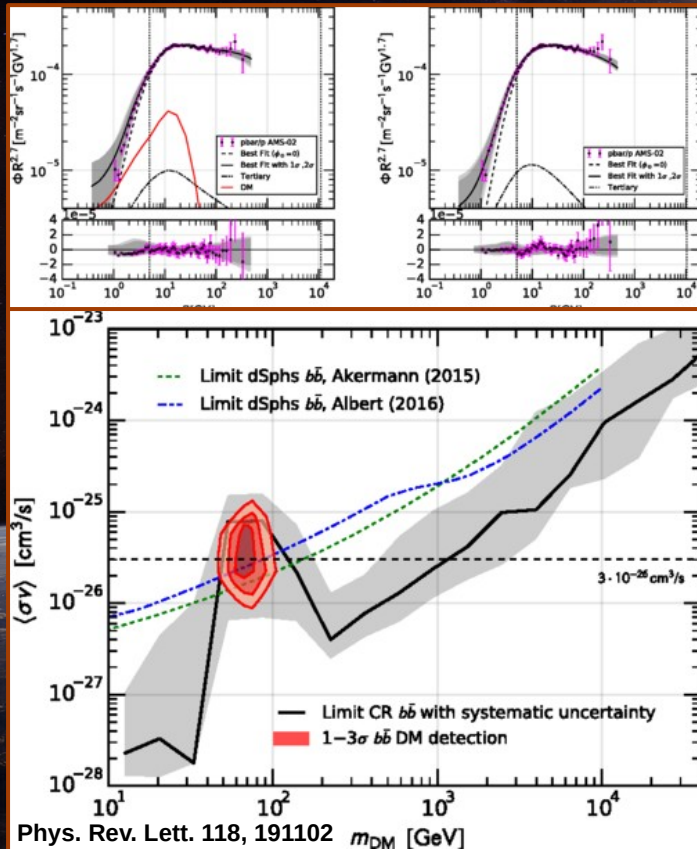
AMS02 estende il range energetico e aumenta la precisione statistica. Indicazioni di un possibile eccesso di antiprotoni ad energie > 50 GeV

Misure aggiornate delle sezioni d'urto e dei modelli di propagazione riducono significativamente lo spazio per un eccesso...

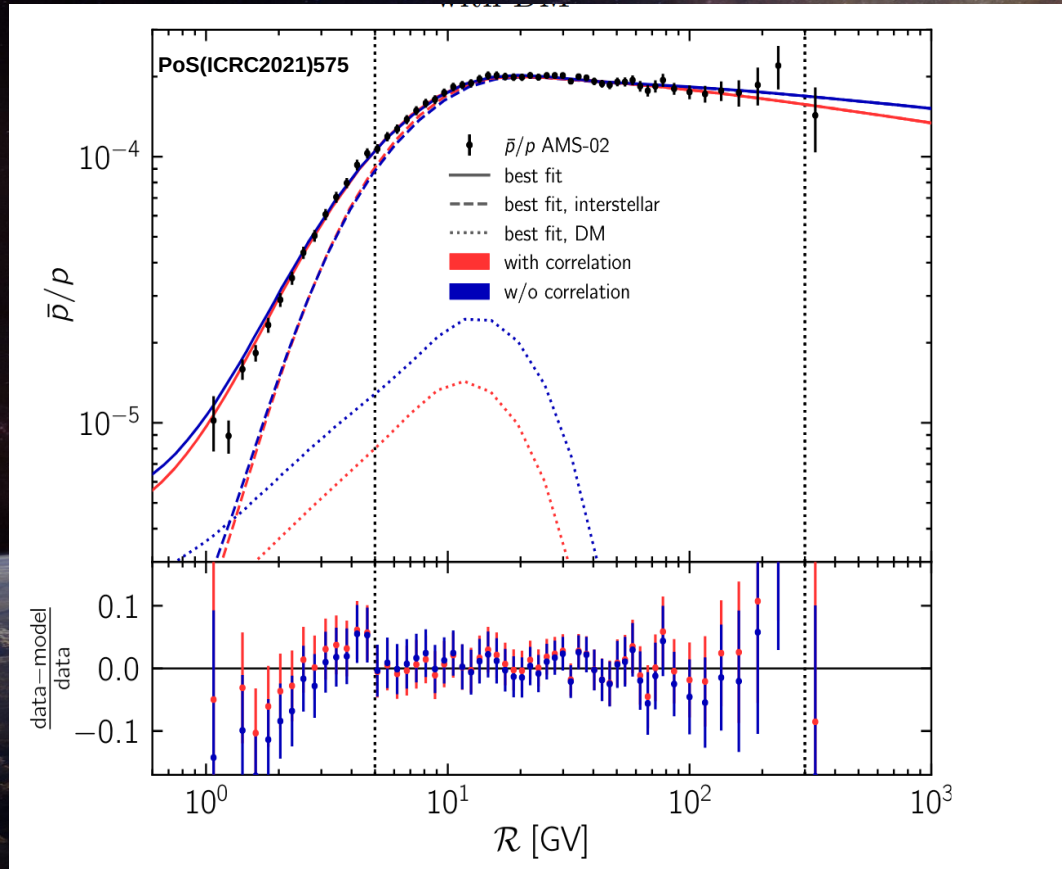


Antiprotoni AMS02 e materia oscura: bassa energia

Due gruppi indipendenti trovano un eccesso di antiprotoni nella parte di bassa energia, compatibile con una massa tra le decine e i 100 GeV. Il segnale ha una significanza statistica di alcune sigma.



Antiprotoni AMS02 e materia oscura: bassa energia



Includendo la correlazione tra le sorgenti di errore sistematico (assunzioni fatte dagli autori e non dalla collaborazione AMS02) e usando i dati di AMS02 dopo 7 anni di presa dati la significanza dell'eccesso diminuisce significativamente .

“Here, we have considered another source of uncertainties, namely correlations in the AMS-02 systematic errors... The most relevant of these stem from cross sections for cosmic-ray absorption in the detector...

Their inclusion reveals that the excess is not robust.”

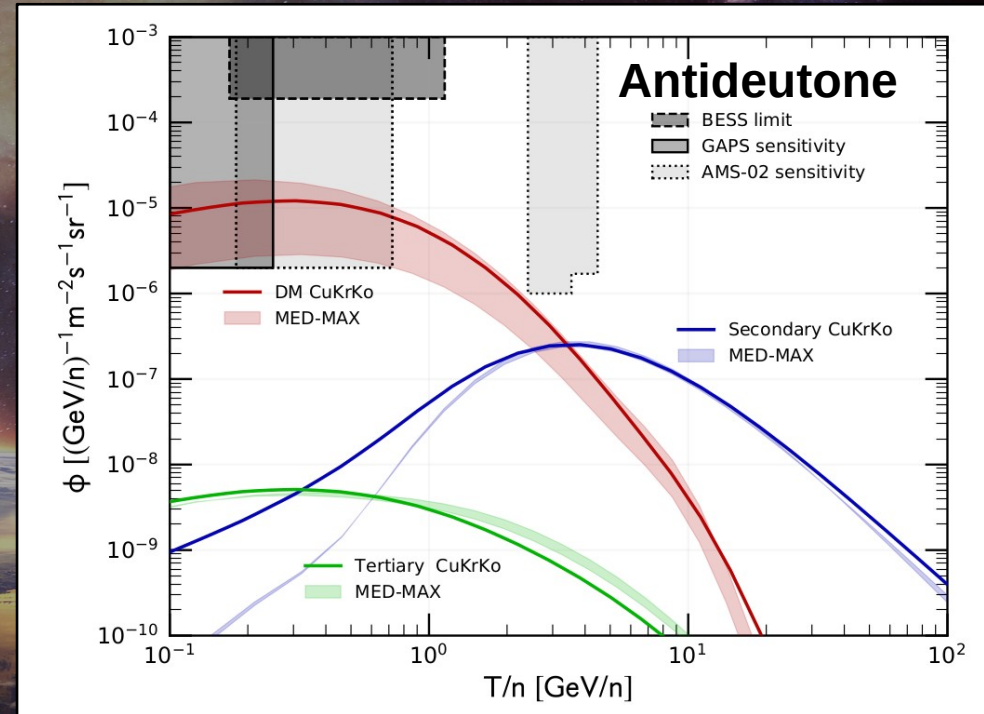
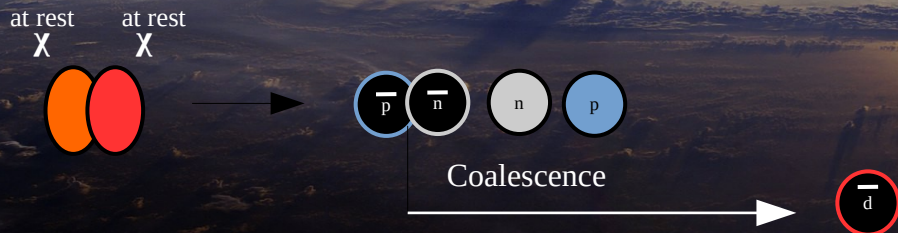
Antinuclei e materia oscura: la pistola fumante?

Antinuclei, segnale con bassissimo fondo astrofisico, 2 ordini di grandezza minore rispetto al segnale di materia oscura sotto il GeV.

Secondary antideuteron

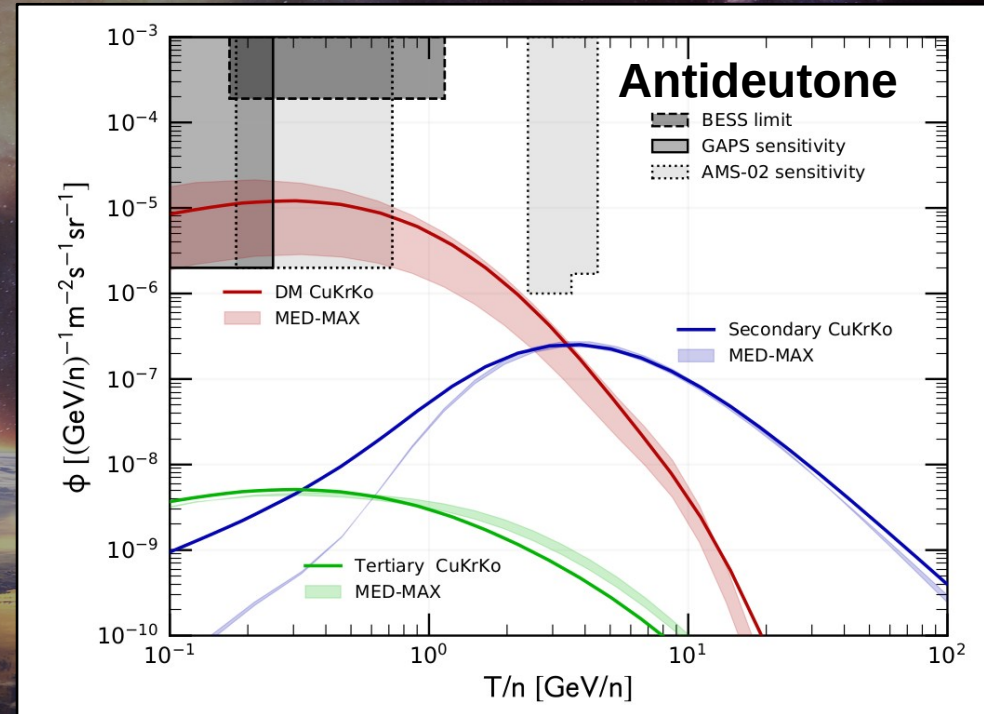
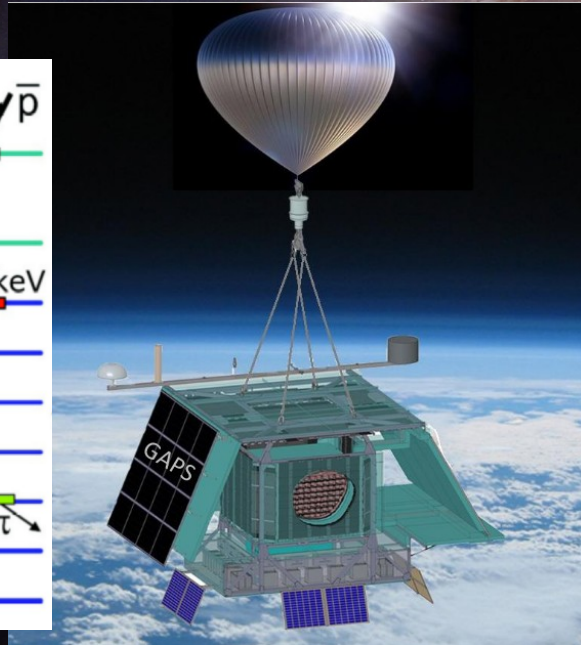
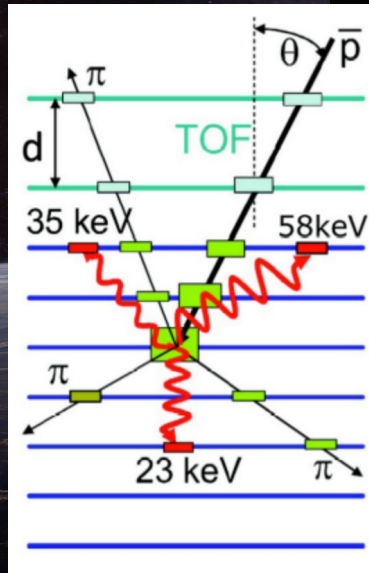


Primary antideuteron



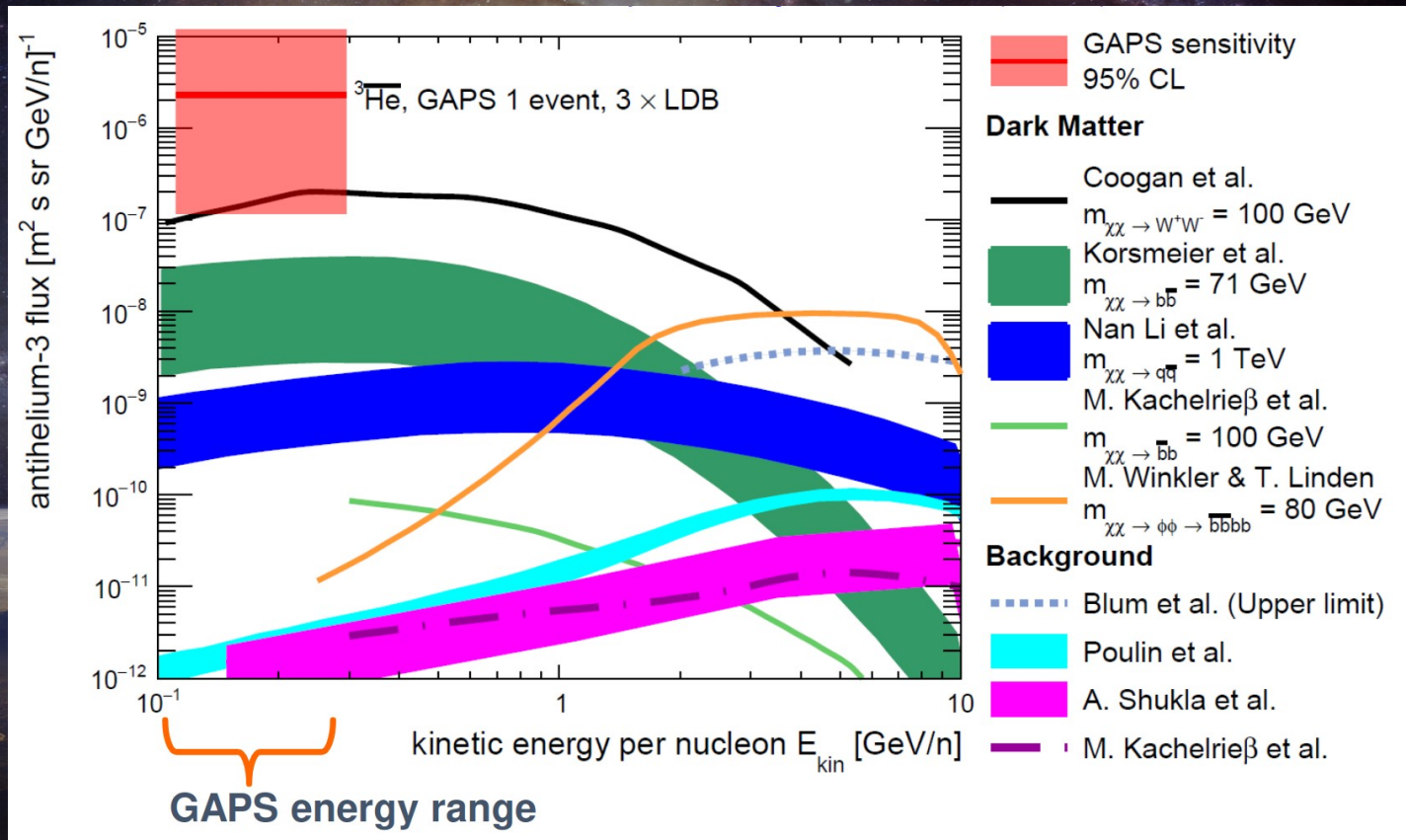
Antinuclei e materia oscura: la pistola fumante?

Esperimento GAPS volerà a fine 2022, pallone dal polo sud. Tecnica di rivelazione basata sulla formazione e annichilazione di un atomo esotico, complementare rispetto agli spettrometri magnetici. Misura antideuterio sarebbe segno di nuova fisica.



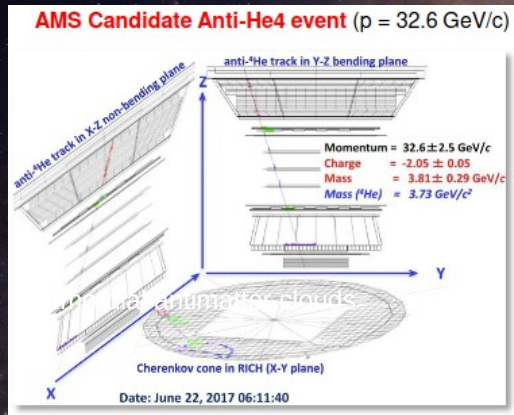
Antinuclei e materia oscura: la pistola fumante

Antielio, stesso basso fondo sotto il GeV.
Intensita` di circa 3 ordini di grandezza inferiore all'antideutone.



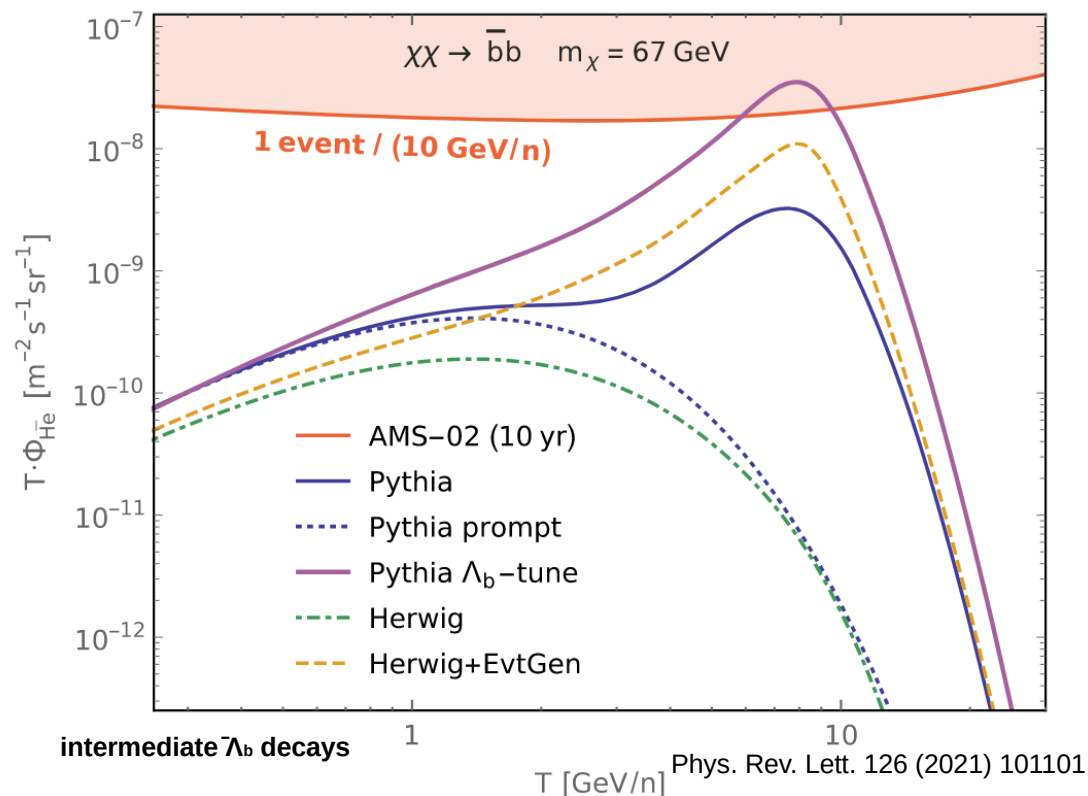
Antinuclei e materia oscura: la pistola fumante

2018: “To date, we have observed eight events...with $Z = -2$. All eight events are in the helium mass region.” – S. Ting (La Palma, AMS overview)



Interpretazioni speculative del risultato in quanto non ancora confermato.

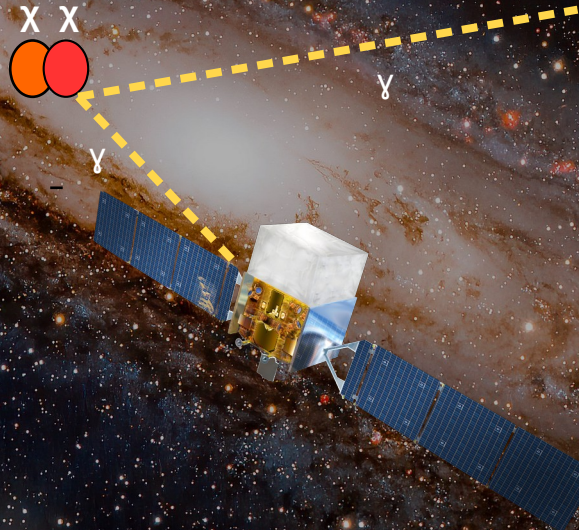
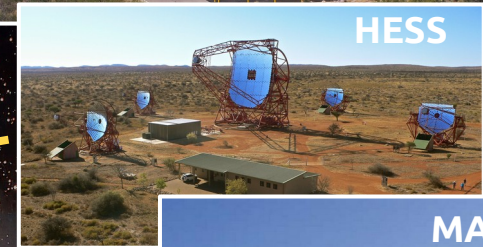
Modelli esotici come antistelle vicine alla terra o primordial antimatter clouds (e.g. Phys. Rev. D 99 (2019) 023016).



Raggi gamma e la materia oscura

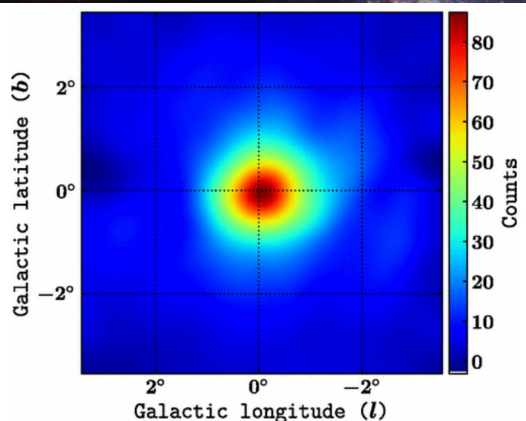
I raggi gamma non sono deflessi e mantengono l'informazione sulla direzione d'arrivo. Facili da rivelare, tecniche ben sviluppate e conosciute da anni.

Si ricerca un eccesso dalla direzione delle sorgente. Assorbimento e modellizzazione fondo astrofisico è il punto chiave.

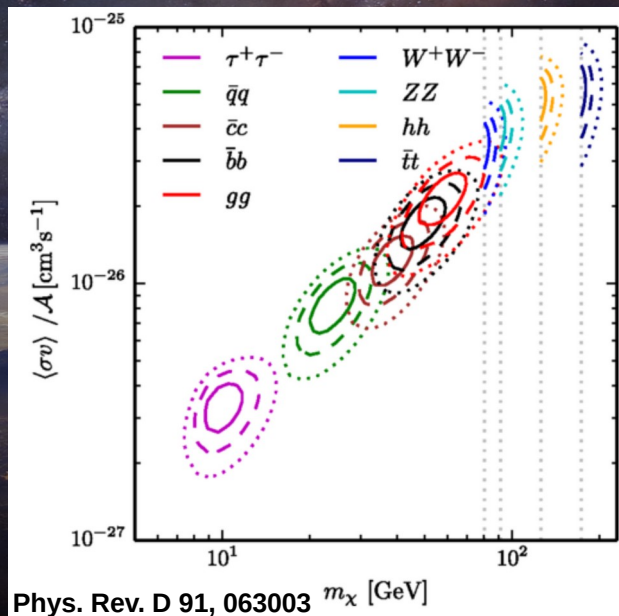


Centro galattico: eccesso?

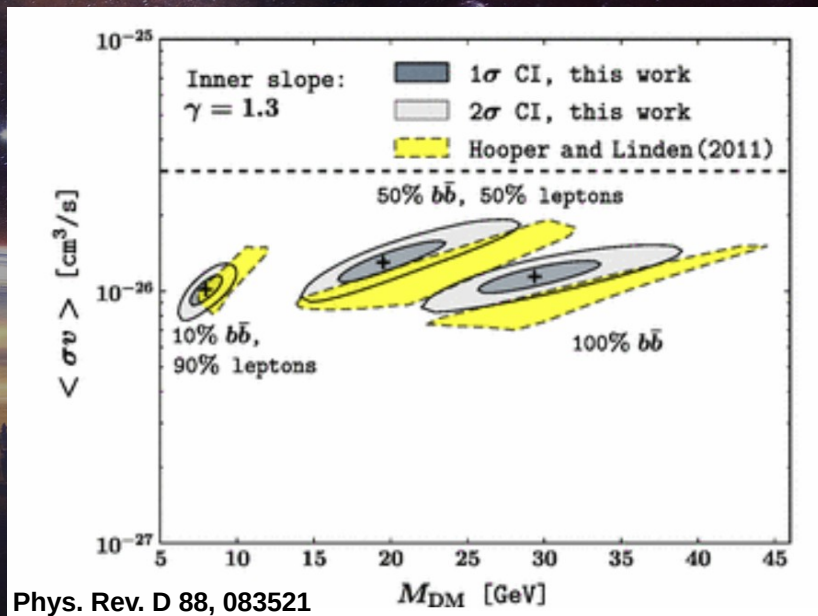
Un buon candidato e' il nostro **centro galattico** anche se e' una regione molto affollata con una forte componente gamma diffusa da sorgenti non risolte e da regioni di formazione stellare. Incertezze significative.



Diversi lavori trovano un eccesso dal centro galattico dopo la sottrazione del fondo simulato.



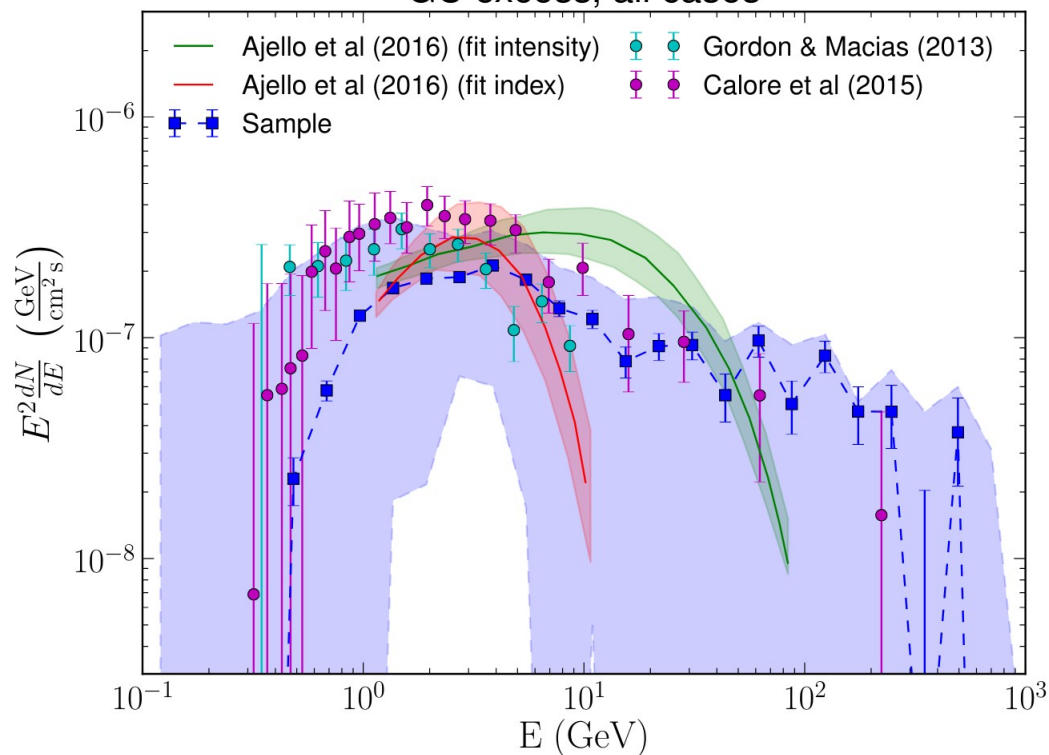
The main “result” of these claims is that a dark matter particle in the mass range of a few tens of GeV to a few hundred GeV. Questo e' anche in accordo con il possibile eccesso di antiprotoni a bassa energia di AMS02.



Centro galattico: eccesso??

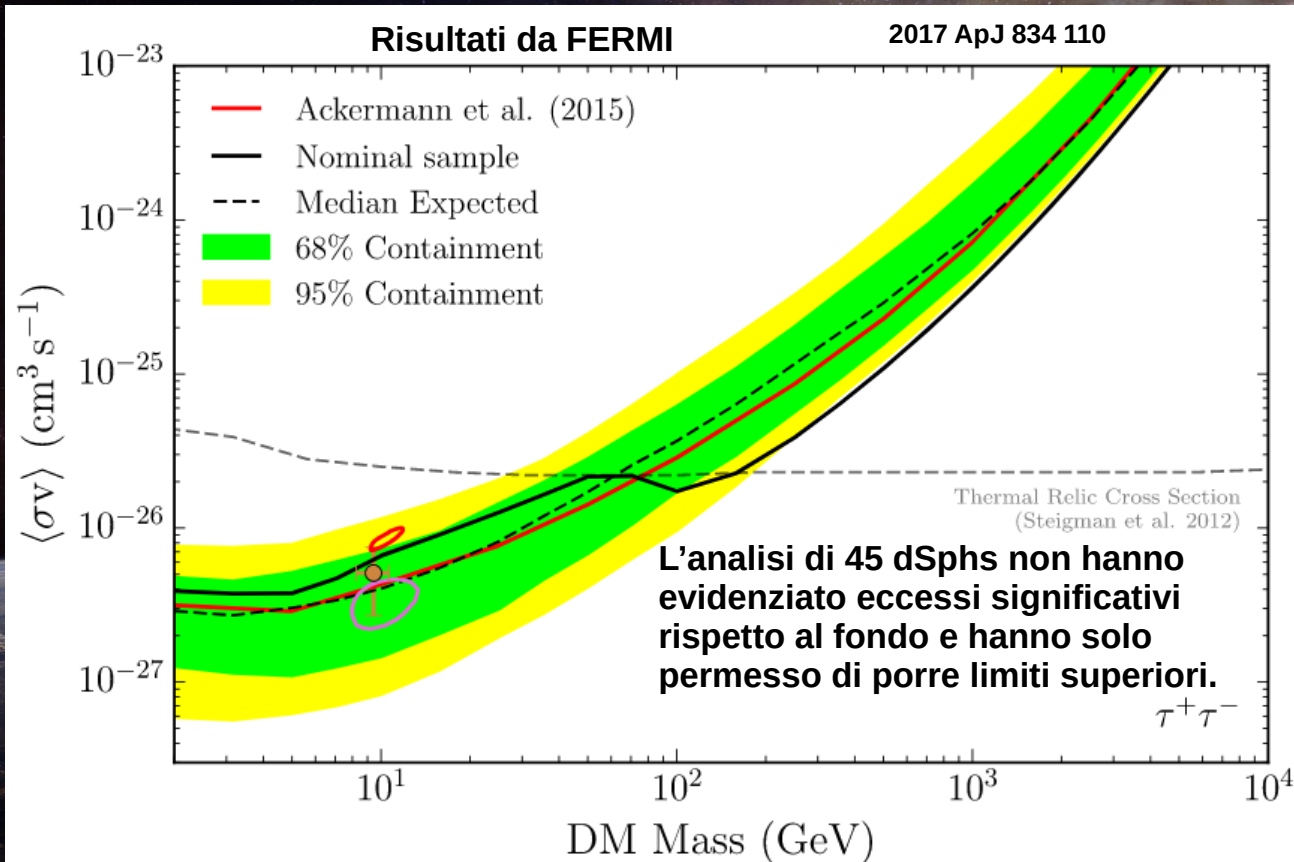
Astrophys. J. 2017, 840, 43.

GC excess, all cases

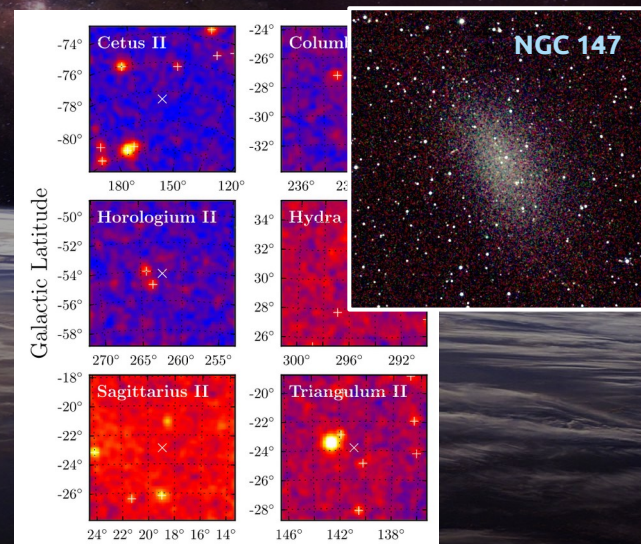


Stimando in modo accurato tutte le incertezze l'eccesso è ancora compatibile con una emissione standard astrofisica considerando interazione di raggi cosmici con il mezzo interstellare e una popolazione di pulsar non risolte.

Galassie nane e fotoni



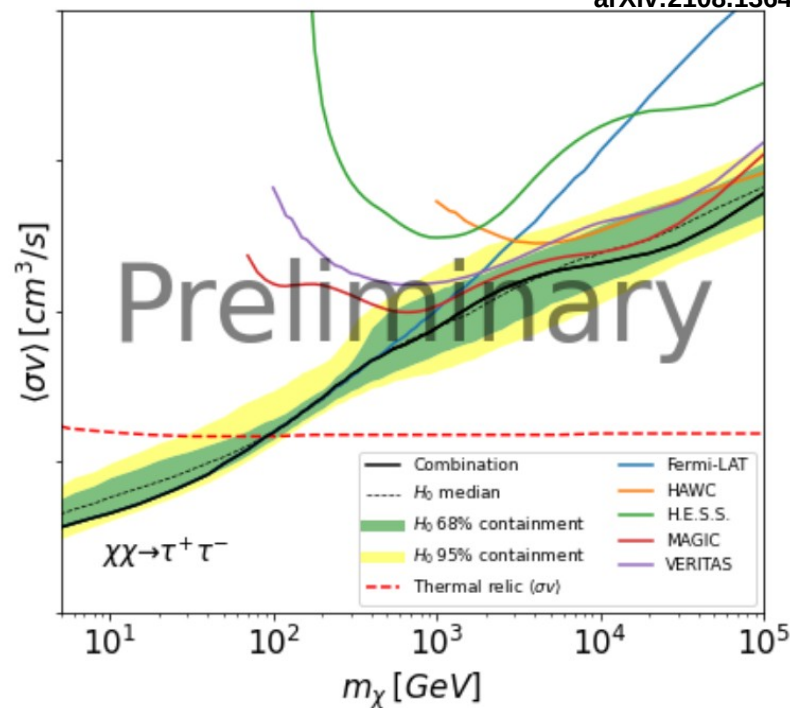
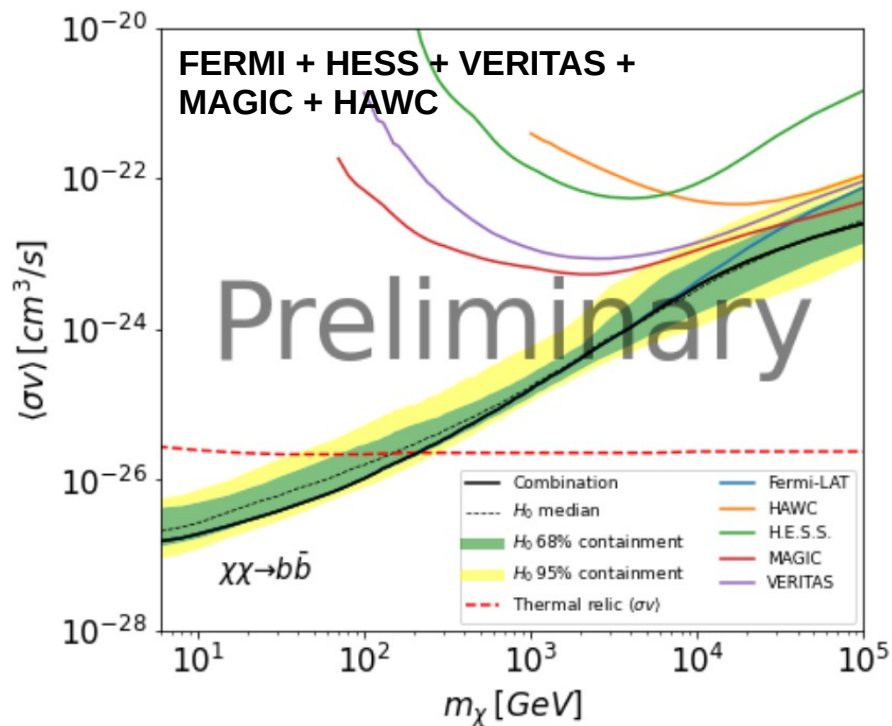
Le **galassie nane sferoidali** (dSphs) sono candidate migliori, alto rapporto massa luminosità, poco gas interstellare, bassa evidenza di emissione gamma non termica. Si pensa siano dominate dalla materia oscura.



Galassie nane e fotoni

Risultati combinati da HAWC, VERITAS, HESS, MAGIC e FERMI su 20 Dphs ha permesso di abbassare i limiti sopra il TeV anche di due ordini di grandezza rispetto alle osservazioni di FERMI.

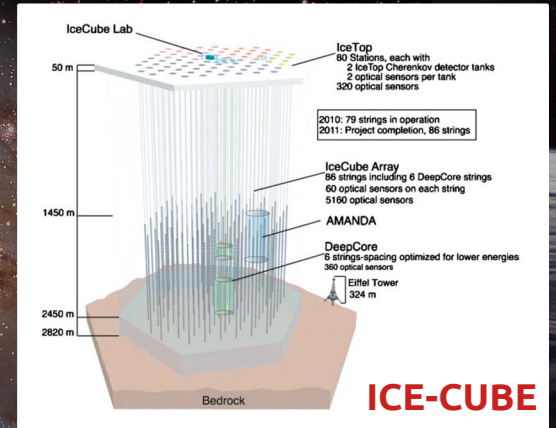
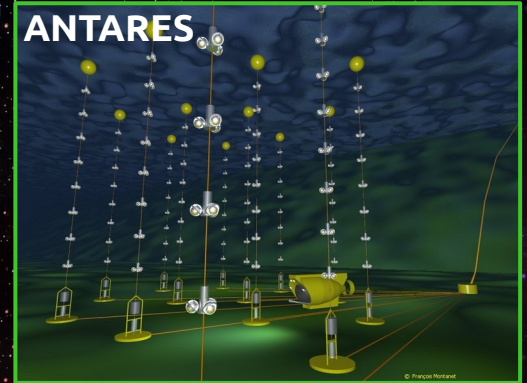
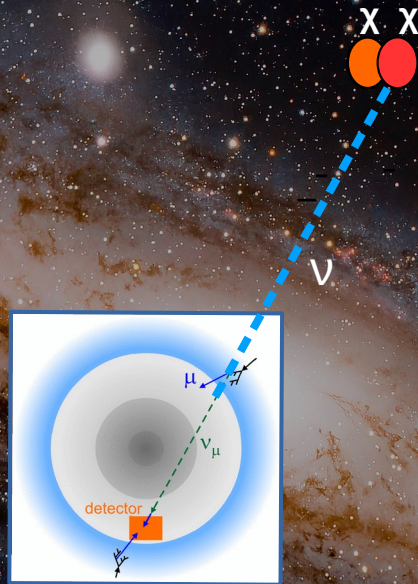
arXiv:2108.13646



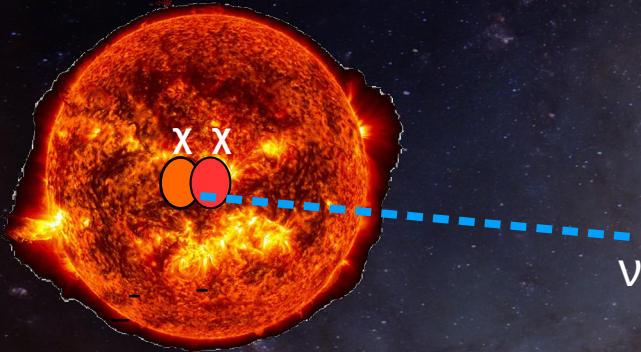
Neutrini e la materia oscura

Anche i neutrini non sono deflessi e mantengono l'informazione sulla direzione d'arrivo.

La loro rivelazione è complessa: bassa sezione d'urto → servono grandi detector e lunghi tempi di esposizione. Detector limitati nella risoluzione angolare (1° al TeV), questo limita la reiezione del background, la maggior parte neutrini atmosferici.

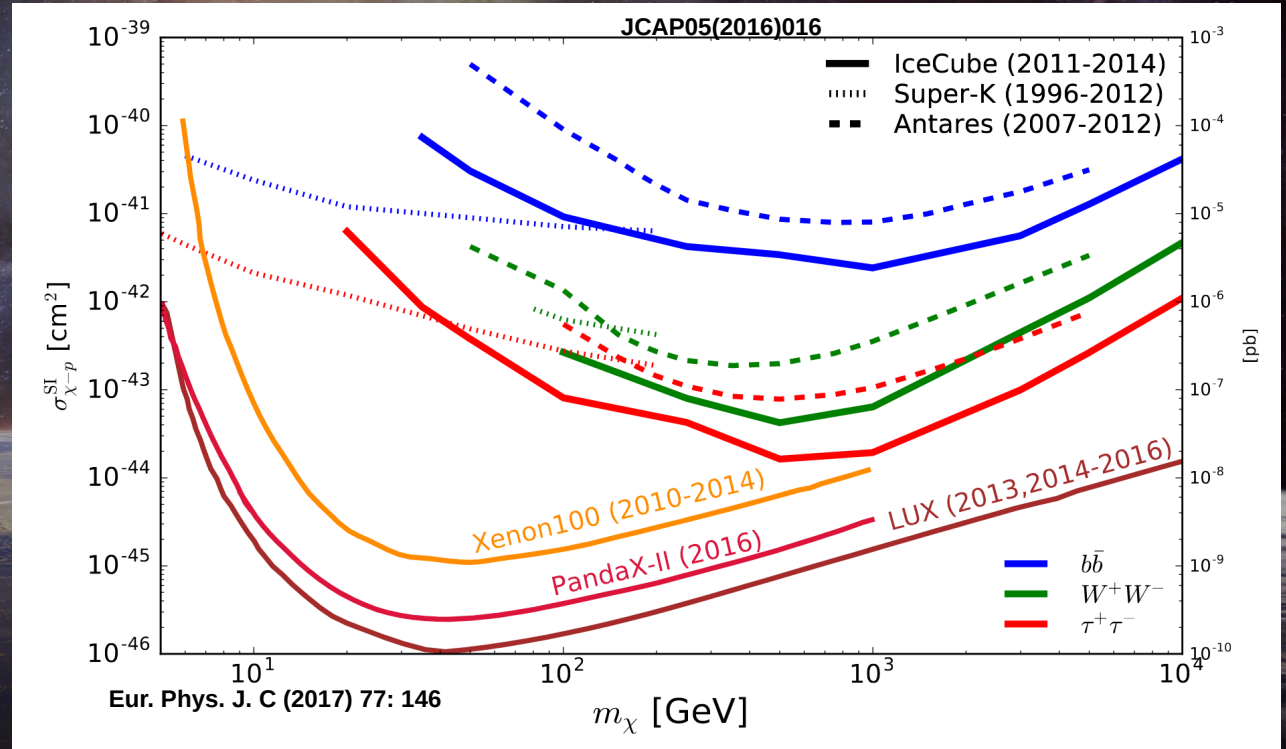


Neutrini e la materia oscura

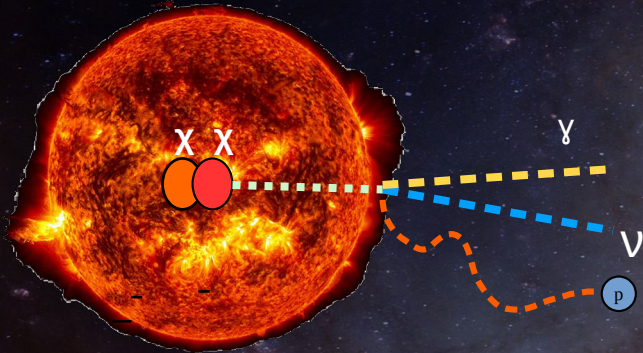


Particelle di materia oscura verrebbero catturate dal sole concentrandosi nel nucleo dove raggiungerebbero un equilibrio tra annichilazione e cattura. Segnale aspettato nel range $\sim \text{GeV} - 1 \text{ TeV}$.

Solo i neutrini sono in grado di uscire senza essere assorbiti dal nucleo del sole.

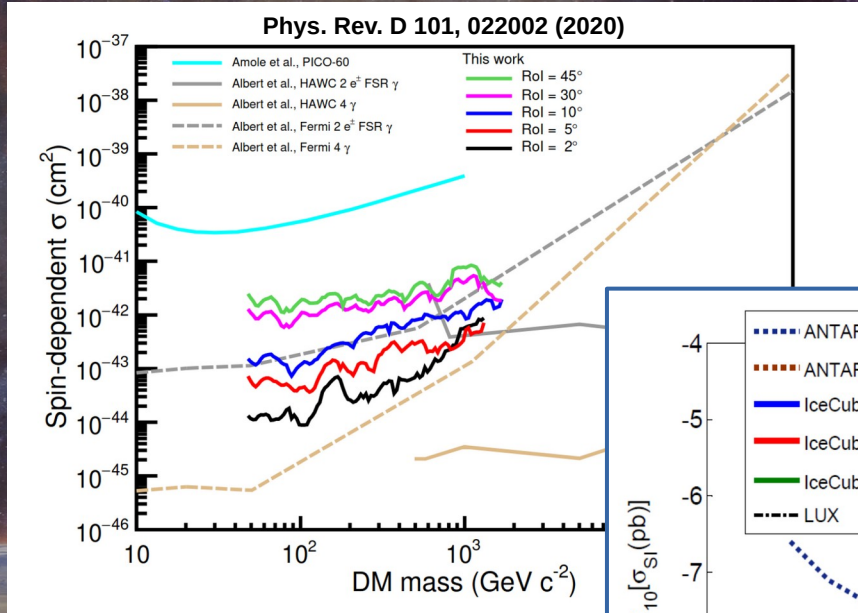


Neutrini e la materia oscura

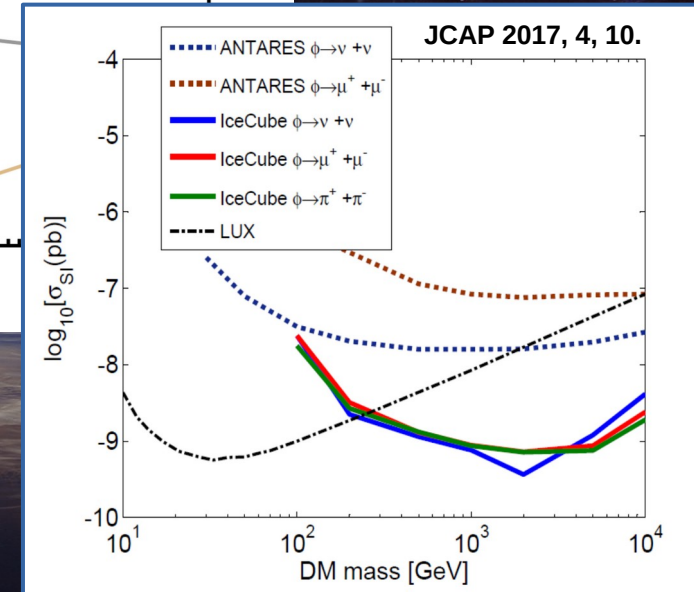


Particelle di materia oscura verrebbero catturate dal sole concentrandosi nel nucleo dove raggiungerebbero un equilibrio tra annichilazione e cattura. Segnale aspettato nel range $\sim \text{GeV} - 1 \text{ TeV}$.

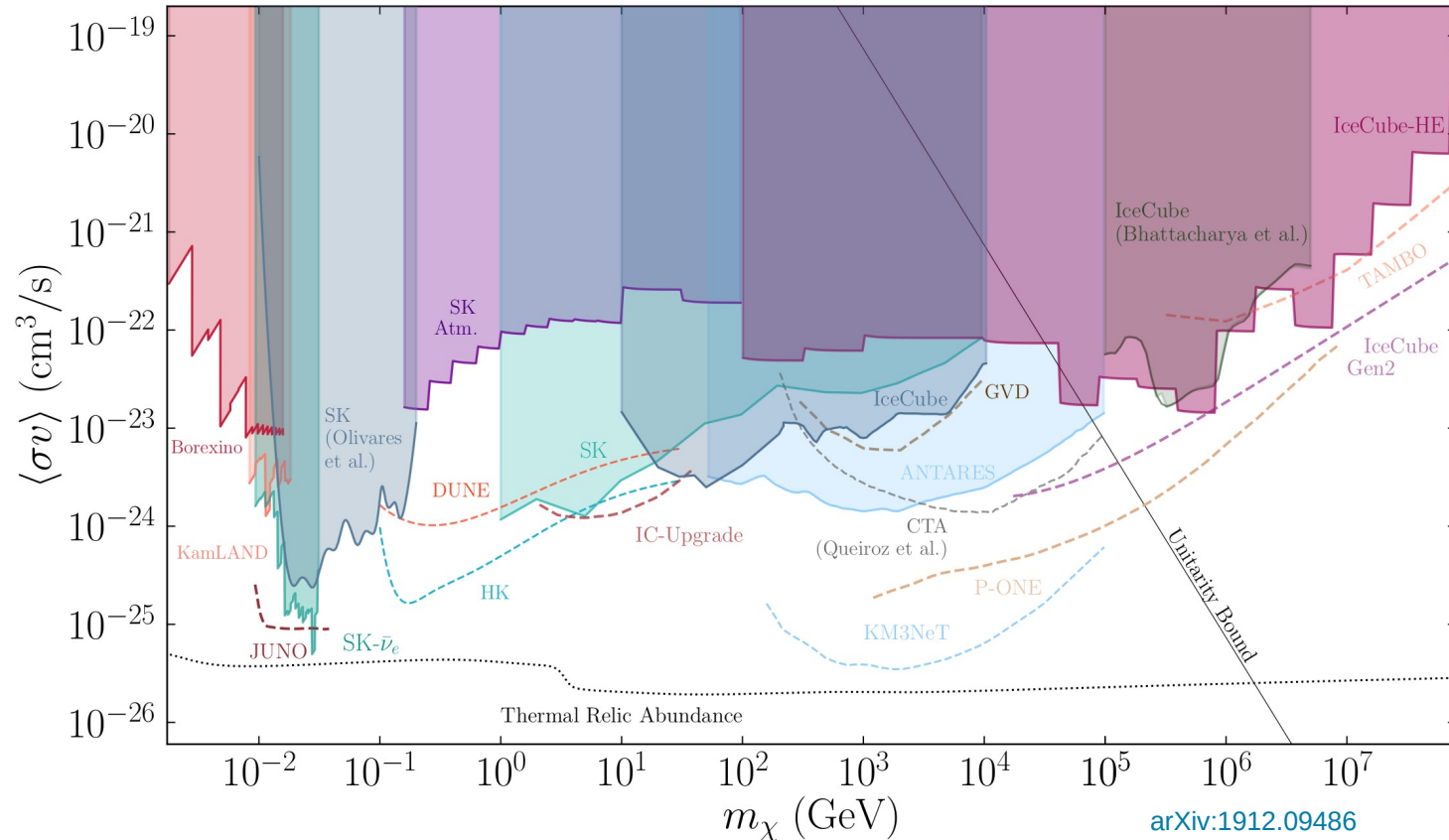
Nel caso di long live mediator questi potrebbero uscire dal sole e un eccesso di raggi cosmici e gamma sarebbe anche misurabile dal sole.



Eur. Phys. J. C (2017) 77: 146



Neutrini e la materia oscura



Plot riassuntivo di tutti i limiti sulla materia oscura ottenuti dall'analisi e dalle misure di neutrini comprese le proiezioni per i futuri esperimenti.

Conclusioni

La natura e l'esistenza della materia oscura può essere investigata attraverso la ricerca di un eccesso rispetto al fondo astrofisico nei raggi cosmici, fotoni o neutrini che arrivano dallo spazio.

Ad oggi le ricerche e le misure sperimentale non hanno prodotto una chiara e univoca evidenza di un segnale.

Indicazioni di un eccesso nei positroni, negli antiprotoni e nei raggi gamma sono tutti interpretabili anche attraverso una migliore modellizzazione del fondo e delle incertezze sistematiche o con sorgenti non standard.

Gli antinuclei nella radiazione cosmica dato il basso fondo astrofisico sotto il GeV sono un canale molto promettente (come le galassie nane sferoidali nel caso dei fotoni).

Strategie per il futuro:

- **Sforzi teorici e sperimentali per migliorare la modellizzazione del fondo.**
- **Aumentare la statistica del segnale (soprattutto per i neutrini).**
- **Maggiore controllo delle sistematiche sperimentali (per molti esperimenti allo stato attuale sono maggiori delle incertezze statistiche)**
- **Nel caso di un segnale questo deve aderire al modello (unificazione modelli analisi tra le collaborazioni) e produrre un segnale coerente in tutti gli altri canali: multi-messenger era in dark matter searches.**