

Astrofisica e particelle elementari

aa 2009-10

Lezione 11

- Materia oscura
- Candidati
- Neutralino
- Ricerca indiretta

Bruno Borgia

Scoperta della materia oscura

- ***MATERIA OSCURA***
- In Astrofisica, materia di composizione non nota, che non emette né riflette radiazione elettromagnetica, e dunque non è visibile, ma la cui presenza è comunque rivelabile a partire da altri fenomeni, ad esempio di natura gravitazionale.
- ***Prime osservazioni***
- *1933 - F. Zwicky*
- Applica il teorema del viriale alle galassie del cluster Coma, e stima la massa m_C del cluster dal moto delle galassie periferiche: confrontata con quella deducibile dalla quantità di materia luminosa, m_L , ottiene $m_C \sim 400 m_L$.
- *Anni '60-'70 - V. Rubin e H. Ford*
- Usando uno spettrografo di alta risoluzione misurano le curve di velocità delle galassie a spirale, trovando per le stelle periferiche velocità più elevate di quelle attese in base alla distribuzione della massa visibile.

Il teorema del viriale

- Dato un sistema di masse le cui interazioni reciproche siano di tipo gravitazionale e tali che i loro moti avvengano in una porzione limitata di spazio, allora

$$2\bar{K} + \bar{U} = 0$$

- K = energia cinetica totale
- U = energia potenziale totale
- Dunque nelle galassie e nei cluster di galassie ci si aspetta un'energia cinetica totale pari al doppio dell'energia potenziale.
- Invece, in media si osservano energie cinetiche totali molto maggiori di quelle aspettate.
- In particolare, nelle stelle periferiche le velocità osservate sono maggiori di quelle predette.

La scoperta della materia oscura

Per 40 anni dopo le osservazioni di Zwicky non ci furono altre osservazioni che corroborassero i suoi risultati.

Alla fine degli anni 60 e dei primi anni 70, Vera Rubin, giovane astronoma del Carnegie Institution, insieme a Kent Ford annunciò nel 1975 in un meeting della American Astronomical Society che gran parte delle stelle nelle galassie a spirale orbitano circa alla stessa velocità. Fatto che implica che la densità di massa delle galassie sarebbe uniforme ben al di là della zona dove si trova la maggioranza delle stelle.

Il lavoro fu pubblicato nel 1980:

V. Rubin, N. Thonnard, W. K. Ford, Jr, (1980). "Rotational Properties of 21 Sc Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii from NGC 4605 (R=4kpc) to UGC 2885 (R=122kpc)". *Astrophysical Journal* **238**: 471

Vera Rubin inizialmente non fu creduta, ma col tempo altre osservazioni confermarono i suoi risultati.

Distribuzione di velocità di rotazione nelle galassie a spirale

- Consideriamo una stella di massa m a distanza r dal centro della galassia. Vale

$$\frac{mv^2(r)}{r} = \frac{mM(r)G}{r^2}$$

- Per questo tipo di galassie la maggior parte di materia luminosa è concentrata nel globo centrale di raggio R_0 , dunque per la massa contenuta in un raggio r vale

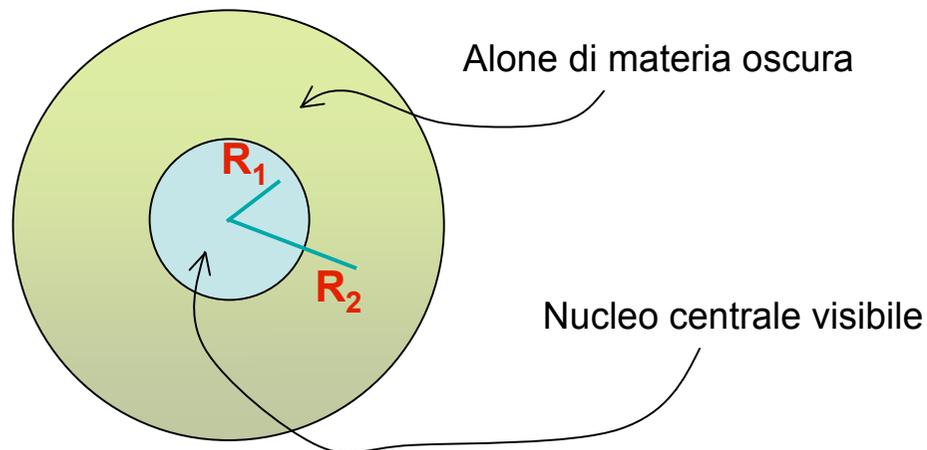
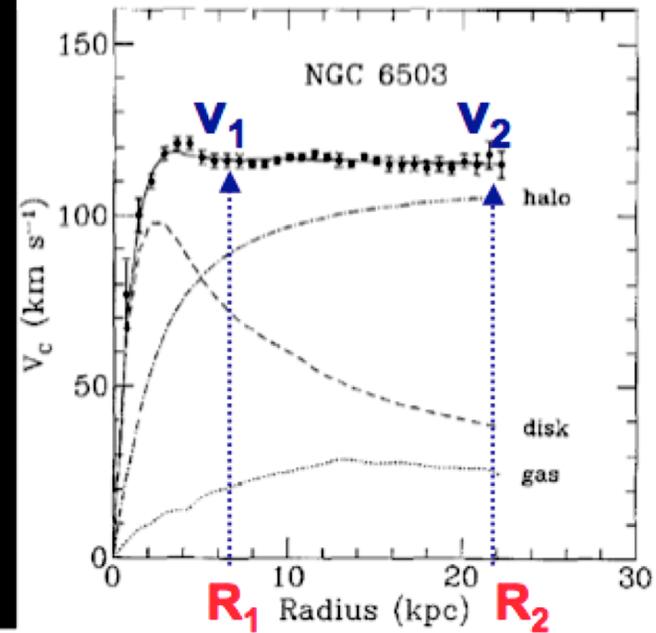
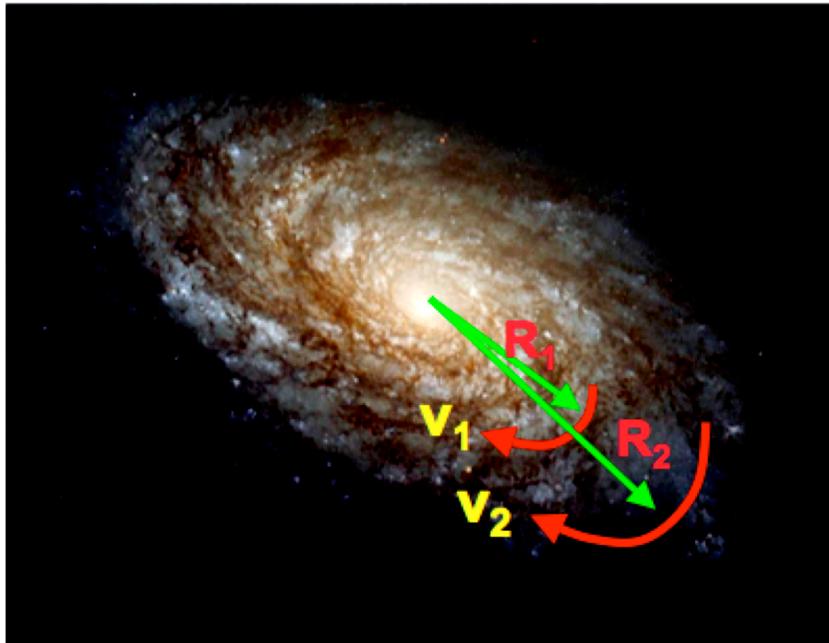
$$M(r) = \begin{cases} \rho r^3 & r < R_0 \\ \rho R_0^3 & r \geq R_0 \end{cases}$$

- e per la velocità

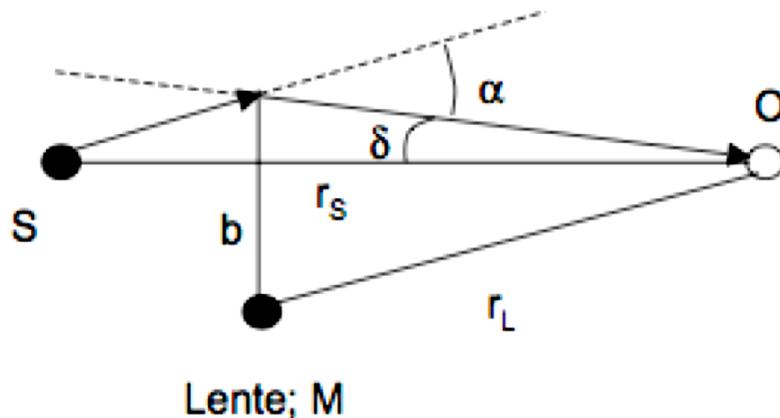
$$v(r) = \begin{cases} \propto r & r < R_0 \\ \propto r^{-1/2} & r \geq R_0 \end{cases}$$

- Ci si aspetta un andamento della velocità crescente fino a $r = R_0$ e poi decrescente.
- Invece si osserva un andamento costante dopo R_0 , che suggerisce che il grosso della massa - dall'80 al 90% - sia composto di materia oscura, distribuito in un alone che si estende ben più del nucleo centrale visibile.

Evidenza indiretta della presenza di materia oscura nello spazio interstellare: le curve di rotazione delle galassie a spirale



Evidenza indiretta della presenza di materia oscura nello spazio interstellare: il lensing gravitazionale



I fotoni che transitano a distanza b da una massa M subiscono una deflessione gravitazionale con angolo $\alpha = 4GM/c^2b$.

Si ha $\delta = \alpha (r_s - r_L)/r_s$ per piccole deflessioni.

Le singole stelle di una galassia possono agire come lenti, ma la deflessione risulta troppo piccola per essere osservata (*microlensing*).

Se una stella si muove perpendicolarmente alla direzione di vista, si può osservare un aumento di intensità di breve durata.

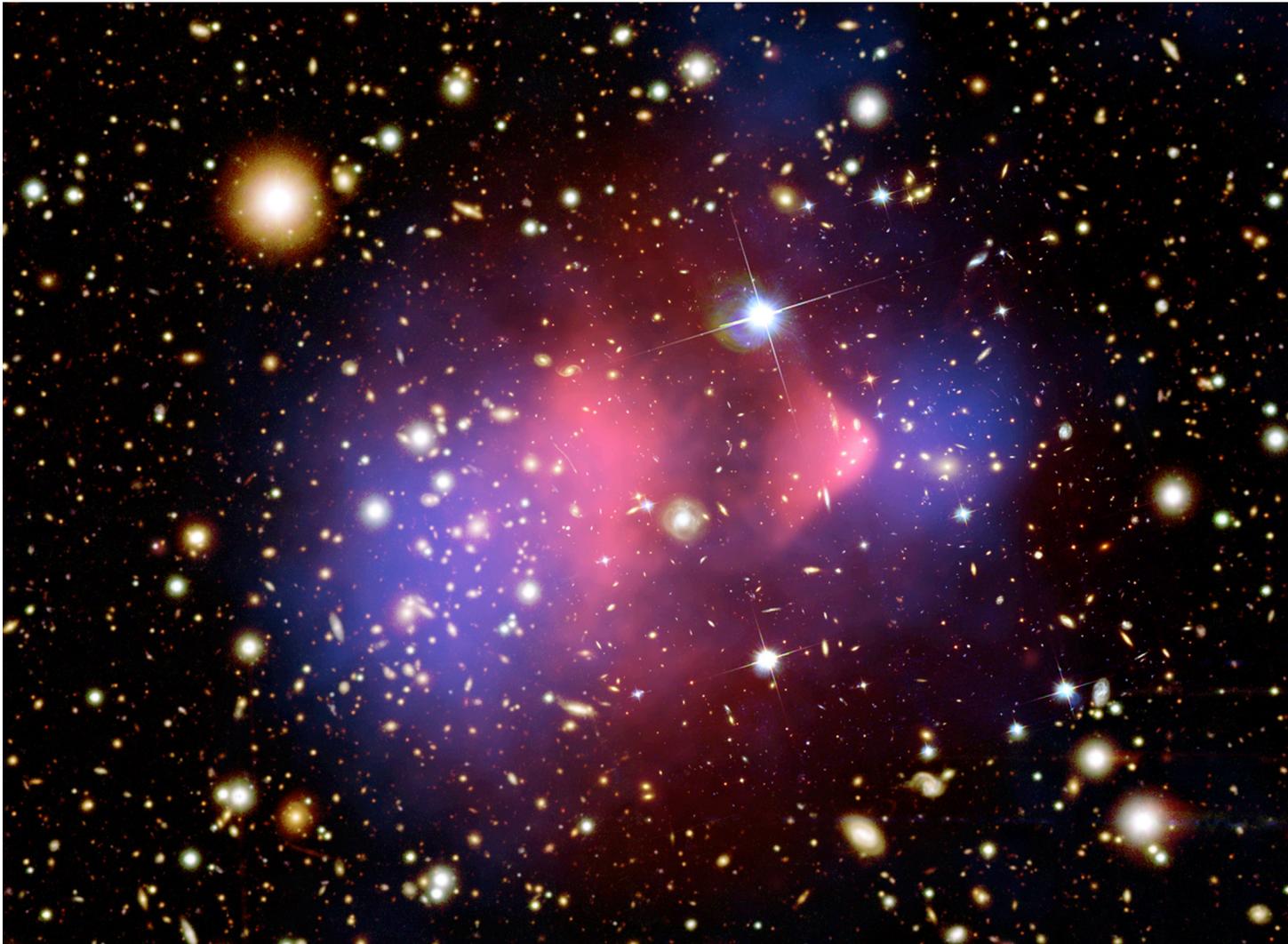
Questo effetto è conveniente per rivelare oggetti scuri molto deboli.

È stato iniziato un progetto di osservazione sistematica di microlensing, MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects) per identificare tali oggetti.

Ma il loro contributo alla densità di materia è basso.

Lensing gravitazionale





Tramite il lensing gravitazionale gli astronomi hanno ricostruito la distribuzione di massa totale di due cluster di galassie che passano uno contro l'altro, bullet cluster. La massa luminosa (rosso) è ottenuta dalle immagini con i raggi X del Chandra X-ray Observatory, mentre la massa oscura è mostrata in blu. Si notano quattro ammassi, i due di massa oscura, non avendo praticamente interazioni, sopravanzano i due ammassi di materia luminosa mentre questi ultimi sono rallentati dalle interazioni.



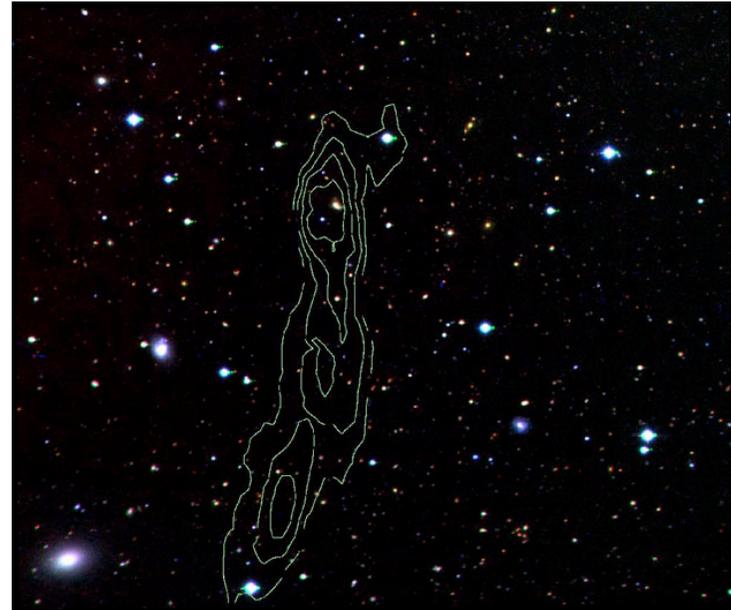
Dark Matter Ring in Galaxy Cluster CI 0024+17 (ZwCl 0024+1652)
Hubble Space Telescope • ACS/WFC

NASA, ESA, and M.J. Jee (Johns Hopkins University)

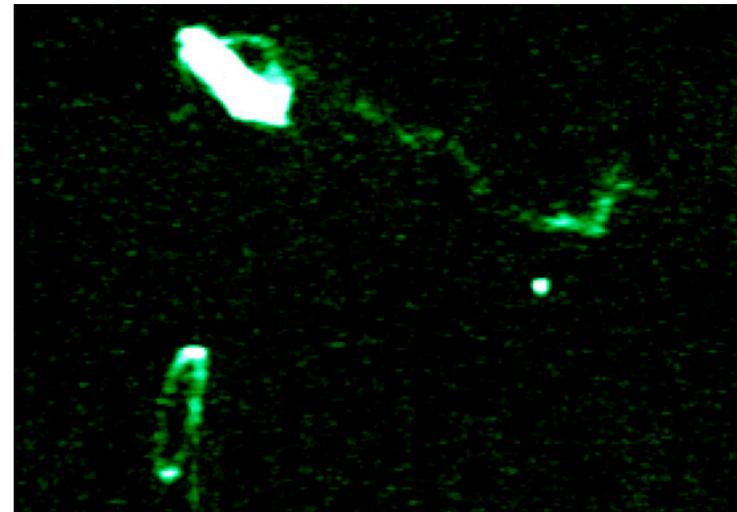
STScI-PRC07-17a

VIRGOHI 21 galassia oscura

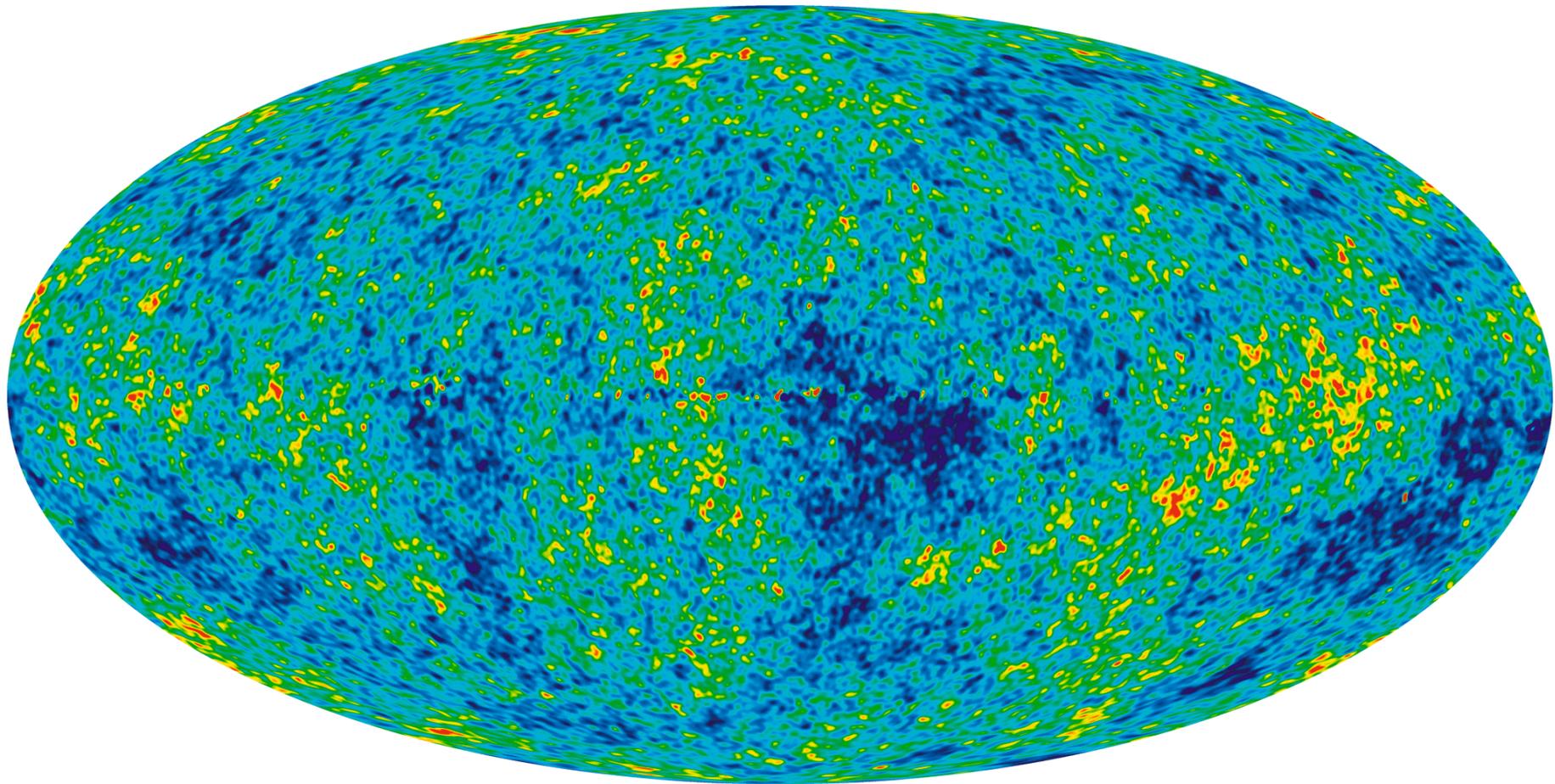
Nel Virgo cluster si osserva una nuvola di idrogeno che non emette nel visibile ma onde radio.
La nuvola di idrogeno ruota intorno ad una massa oscura che è circa 10^{10} masse solari. Solo l'1% di questa massa è attribuibile all'idrogeno.
I contorni sovrainposti all'immagine mostrano la zona dove è stato individuato l'idrogeno.



Una corrente di idrogeno tra la galassia NGC 4254 in alto a sinistra e VIRGOHI 2, al centro a destra.
L'attribuzione a VIRGOHI 21 di galassia oscura spiega questo mistero del braccio molto asimmetrico di NGC 4254.



I fondo cosmico di microonde osservato da WMAP



MATERIA OSCURA

evidenze indirette (2)

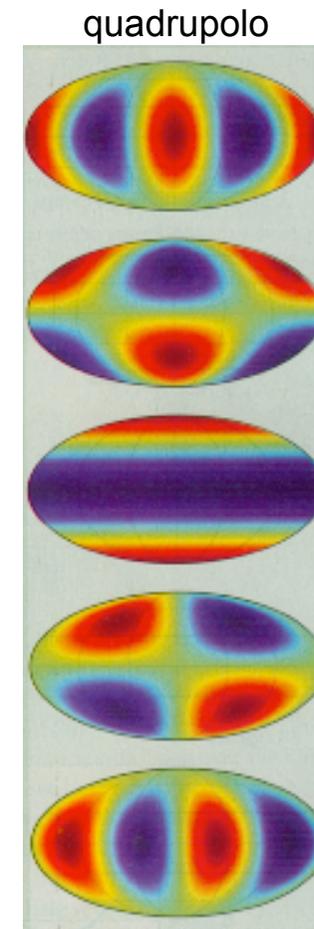
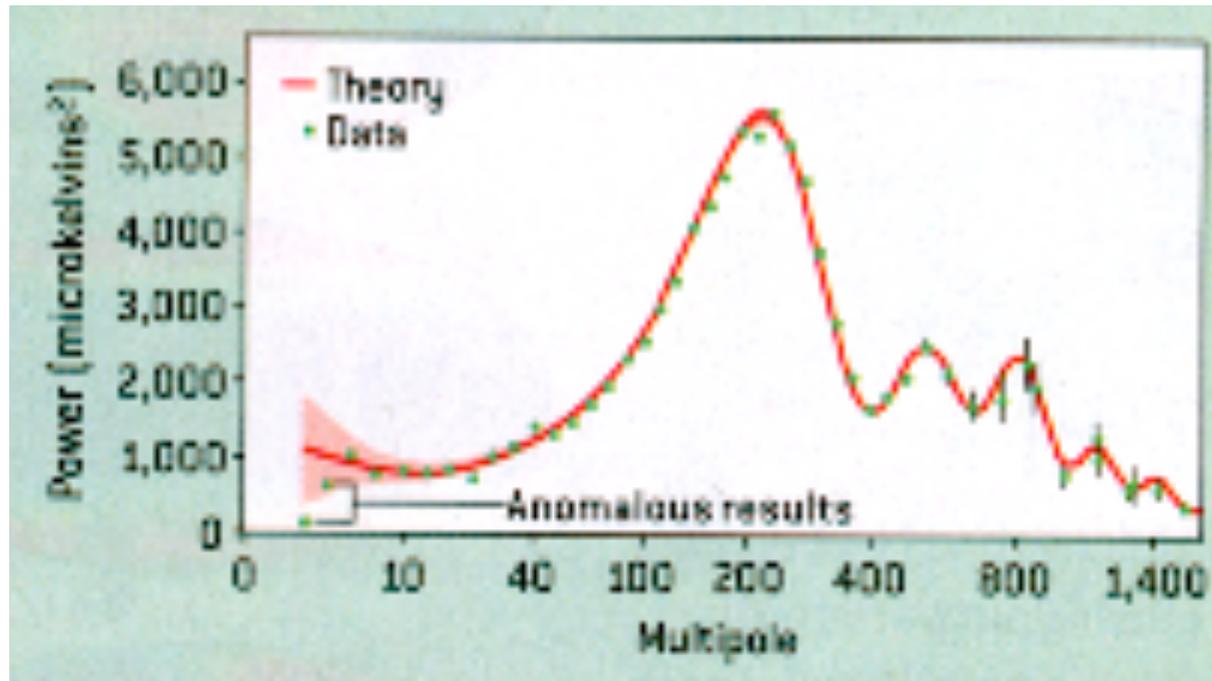
- Fluttuazioni del fondo cosmico di microonde, CMB. L'ampiezza e la forma delle fluttuazioni della CMB, dipendono dalla densità di materia e dalla densità barionica.
- Da questi effetti WMAP ottiene:

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02 \pm 0.02;$$

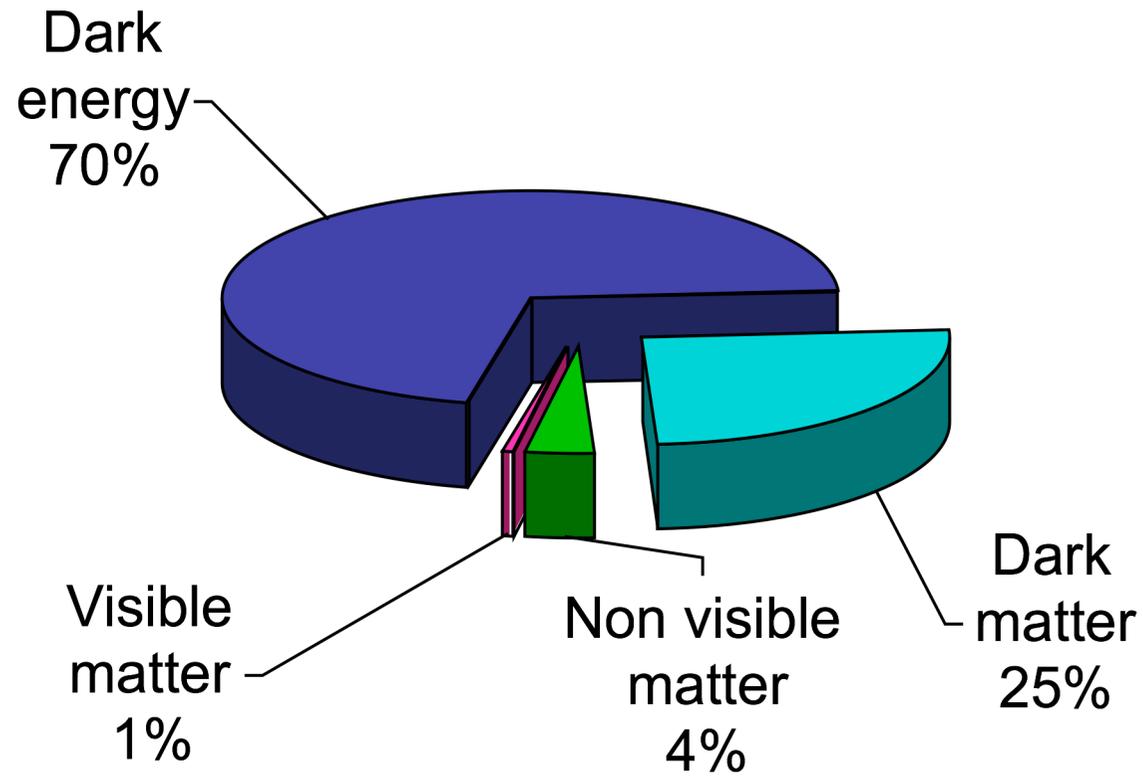
$$\Omega_{\Lambda} = 0.73 \pm 0.04;$$

$$\Omega_{\text{b}} = 0.044 \pm 0.004;$$

$$\Omega_{\text{m}} = 0.27 \pm 0.04$$



Dark matter.....



I possibili candidati

- **Materia barionica** La densità di materia luminosa è $\Omega_{lum} = 0.01$ mentre dalla nucleosintesi si ottiene $\Omega_b = 0.05$. Quindi oltre le stelle visibili altri oggetti non luminosi e di natura barionica devono contribuire (MACHO?)
Il contributo dei barioni è del tutto insufficiente alla densità totale dell'universo.

- **Neutrini** Prodotti in grandi quantità nell'universo primordiale nei processi

$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^+ + e^- \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}$$

La densità di neutrini è $3 \times 3/11$ volte la densità di fotoni ($N_\gamma = 411 \text{ cm}^{-3}$) e quindi se la somma delle masse dei neutrini fosse 47 eV, la densità dei neutrini sarebbe pari alla densità critica. I risultati sperimentali sulle oscillazioni di neutrini indicano una massa dei neutrini molto più piccola. Inoltre al momento del disaccoppiamento i neutrini erano relativistici e quindi come i fotoni tendono a ridurre le fluttuazioni primordiali di densità (Hot Dark Matter).

- **Weakly interacting massive particle** Il candidato WIMP preferito è la particella supersimmetrica di massa più bassa, o Lightest Supersymmetric Particle (LSP), identificata con il *neutralino* χ , la cui massa ha un limite inferiore di 45 GeV/c² posto dagli esperimenti al LEP, e che dunque costituirebbe Cold Dark Matter in quanto non relativistica al disaccoppiamento.

Tra i candidati WIMP il bosone neutro del modello di Kaluza Klein ad una dimensione aggiuntiva ha caratteristiche particolarmente interessanti.

Teorie supersimmetriche

- La supersimmetria è introdotta per riportare la massa del bosone di Higgs a valori tipici del modello standard evitando un fine-tuning dei parametri: così come la poca rottura della simmetria chirale dei fermioni ne protegge le masse, introducendo una nuova simmetria Q che agisce secondo
 - $Q |bosone\rangle = |fermione\rangle, \quad Q |fermione\rangle = |bosone\rangle$
 - la protezione della simmetria chirale si estende anche ai bosoni se la nuova simmetria è poco rotta.
 - Le regole di commutazione sono tali che i multipletti hanno la stessa massa ma spin diverso.
 - Nel MSSM ci sono due bosoni di Higgs e due bosoni di gauge, coi loro superpartner, cioè 4 particelle di Majorana neutre, spin 1/2, che si combinano in 4 autostati di massa neutri, χ_i .
 - Nel MSSM viene introdotto un nuovo numero quantico, la R-parità $R=(-1)^{2S+3B+L}$ che vale 1 per particelle del MS e -1 per i partner supersimmetrici. Se R è conservata, la particella supersimmetrica più leggera deve essere stabile.
 - Il neutralino più leggero è una combinazione
 - $$\chi_1 = N_1 B + N_2 W + N_3 H_1 + N_4 H_2$$
 - La frazione “gaugino” Z_g è definita da $Z_g = |N_1|^2 + |N_2|^2$
 - Se $Z_g < 0.01$ si ha neutralino higgsino-like, si ha gaugino-like se $Z_g > 0.99$.
 - Il neutralino non ha interazioni elettromagnetiche o forti, ma solo deboli ed è antiparticella di se stesso.

SPARTICLES

Names	Spin	P_R	Gauge Eigenstates	Mass Eigenstates
Higgs bosons	0	+1	H_u^0 H_d^0 H_u^+ H_d^-	h^0 H^0 A^0 H^\pm
squarks	0	-1	\tilde{u}_L \tilde{u}_R \tilde{d}_L \tilde{d}_R	(same)
			\tilde{s}_L \tilde{s}_R \tilde{c}_L \tilde{c}_R	(same)
			\tilde{t}_L \tilde{t}_R \tilde{b}_L \tilde{b}_R	\tilde{t}_1 \tilde{t}_2 \tilde{b}_1 \tilde{b}_2
sleptons	0	-1	\tilde{e}_L \tilde{e}_R $\tilde{\nu}_e$	(same)
			$\tilde{\mu}_L$ $\tilde{\mu}_R$ $\tilde{\nu}_\mu$	(same)
			$\tilde{\tau}_L$ $\tilde{\tau}_R$ $\tilde{\nu}_\tau$	$\tilde{\tau}_1$ $\tilde{\tau}_2$ $\tilde{\nu}_\tau$
neutralinos	1/2	-1	\tilde{B}^0 \tilde{W}^0 \tilde{H}_u^0 \tilde{H}_d^0	\tilde{N}_1 \tilde{N}_2 \tilde{N}_3 \tilde{N}_4
charginos	1/2	-1	\tilde{W}^\pm \tilde{H}_u^\pm \tilde{H}_d^\pm	\tilde{C}_1^\pm \tilde{C}_2^\pm
gluino	1/2	-1	\tilde{g}	(same)
goldstino (gravitino)	1/2 (3/2)	-1	\tilde{G}	(same)

mSUGRA

La supersimmetria è evidentemente “rotta”, dato che le masse dei partner supersimmetrici sono molto diverse dalle masse delle particelle del MS.

Si possono costruire modelli in cui la rottura della simmetria avviene tramite l'introduzione nella lagrangiana di termini “soffici”.

La rottura avviene in un “settore nascosto” di particelle che non hanno accoppiamenti diretti con il “settore visibile” dei supermultipletti del MSSM.

Tuttavia la rottura della simmetria deve essere trasmessa in qualche modo dal settore nascosto al settore visibile. La teoria alla base dei modelli in cui l'interazione tra i due settori è mediata dalla gravitazione si chiama **supergravità** e la versione minimale si chiama **mSUGRA**.

In questo modello, l'intero spettro MSSM è dato solo da 5 parametri che intervengono nella lagrangiana:

m_0 : massa gaugino alla scala di GUT,

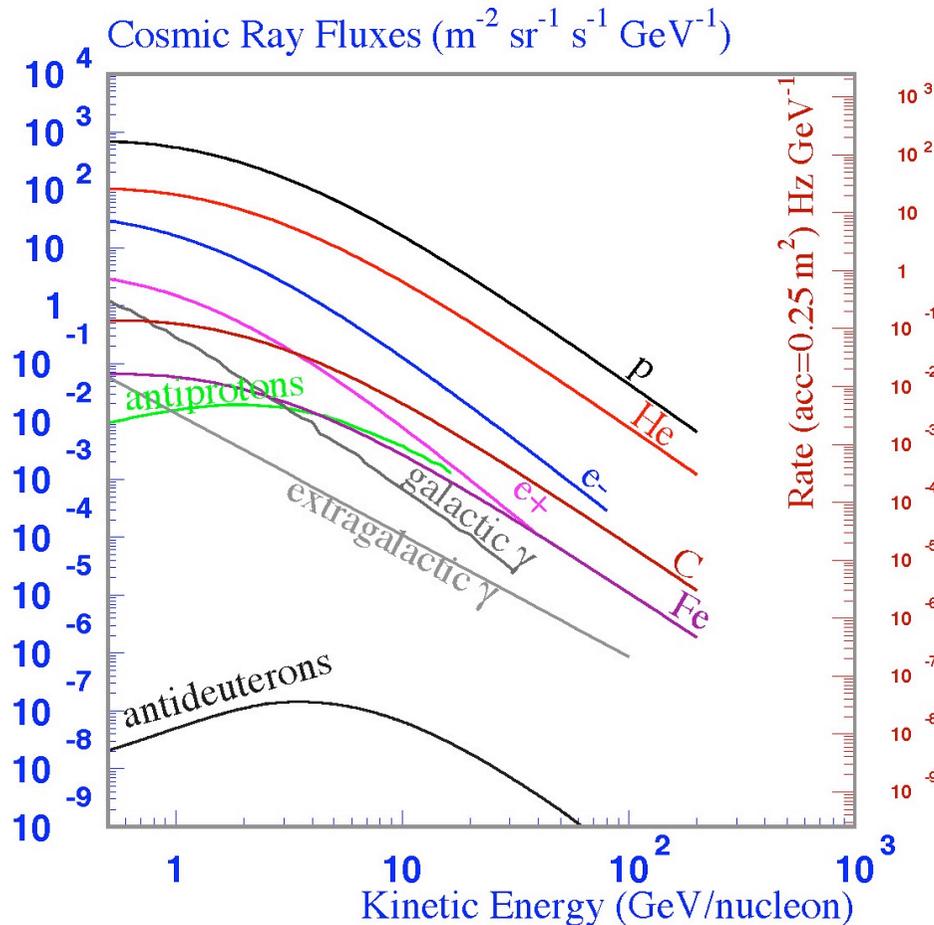
$m_{1/2}$: massa scalari alla scala di GUT,

A_0 : accoppiamento trilineare nel settore Higgs,

$\tan\beta$: rapporto dei valori di aspettazione del vuoto per gli Higgs neutri

$\text{segno}(\mu)$, μ : parametro di mixing degli Higgs.

Flussi di particelle nei raggi cosmici



$$p/e^+ \approx 10^3 - 10^4$$

Dunque per rivelare la materia oscura in modo indiretto a partire dalla misura dello spettro dei positroni, l'apparato sperimentale deve avere un fattore di reiezione dei protoni rispetto ai positroni di almeno $p \approx 10^5$

Rivelazione del neutralino

Rivelazione diretta. Si basa sullo scattering del neutralino sui nuclei di massa M_N del rivelatore. L'energia cinetica E dei neutralini sarà data dalla velocità di fuga dalla Galassia al quadrato per la loro massa M , ovvero $v \approx 10^{-3}c$. Applicando le trasformazioni cinematiche non relativistiche, si ottiene la quantità di moto di ciascuna particella nel centro di massa:

$$p^{*2} = 2\mu^2 E/M$$

dove μ è la massa ridotta.

Si ottiene facilmente che le energie di rinculo dei nuclei sono dell'ordine di A keV, con A numero atomico.

La sezione d'urto del processo dipende dai dettagli dai parametri del modello SUSY. Per valutare l'ordine di grandezza si può assumere la sezione d'urto debole:

$$\sigma \approx (G_F^2 p^{*2} K) / \pi v_{rel}$$

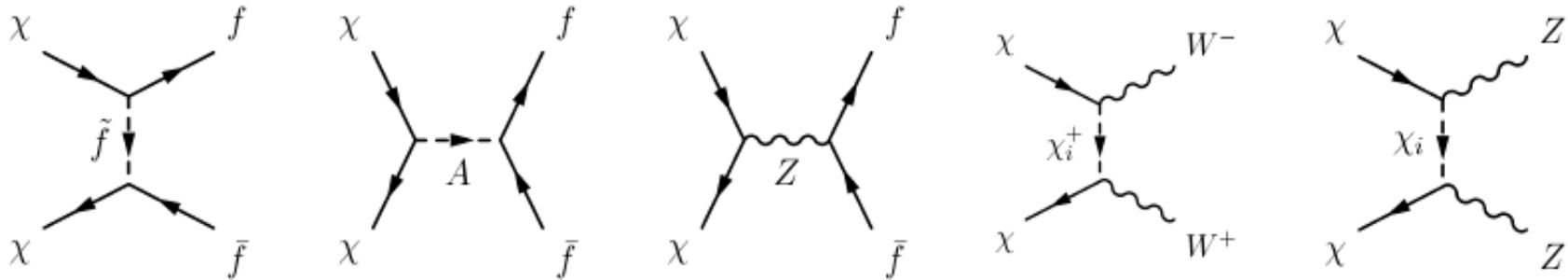
Il fattore K dipende dal modello, ovvero se l'accoppiamento è dipendente o meno dallo spin.

Il numero di eventi dipende infine dalla densità di WIMP nella Galassia e dalla loro distribuzione. Ci si aspetta che nell'alone la densità sia un fattore 10^5 rispetto alla densità media nell'universo.

Il numero di eventi aspettato per un valore tipico di $M=100$ GeV può variare da 10^{-2} eventi/kg d a ≈ 1 evento/kg d.

Rivelazione del neutralino

Rivelazione indiretta. Si basa sull'osservazione degli stati finali nell'annichilazione.



Nello stato finale le particelle più convenienti da osservare sono quelle per cui il fondo dei raggi cosmici è minimo, ovvero γ , e^+ , anti-p, anti-D.

E' forse anche possibile mettere in evidenza l'annichilazione dei neutralini all'interno del Sole rivelando i neutrini, che sono le uniche particelle degli stati finali che possono emergere.

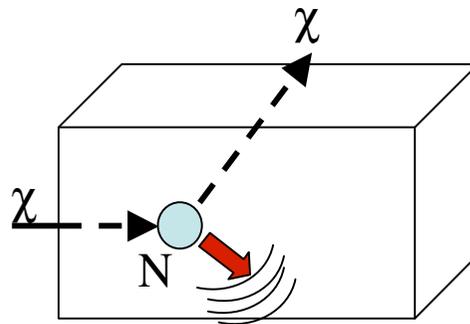
Per il calcolo della frequenza di eventi è cruciale anche in questo caso la distribuzione di densità dei neutralini nella Galassia.

Kaluza Klein dark matter

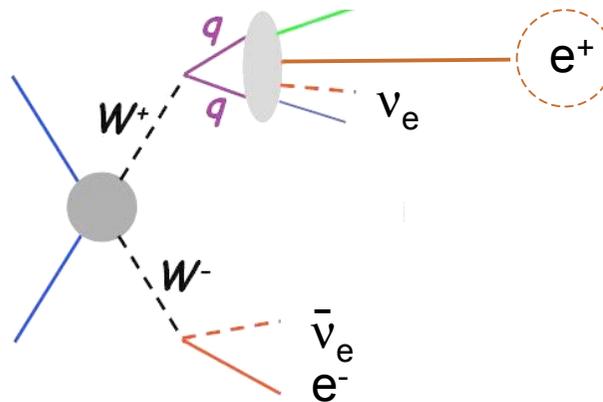
- Nel contesto della materia oscura di Kaluza Klein, il modello introduce una quarta dimensione spaziale universale, ovvero i campi del Modello Standard (SM) sono liberi di propagarsi in esso. La dimensione extra è compattata con una dimensione R dell'ordine del TeV^{-1} .
- I campi dello SM che si propagano in questa dimensione appaiono come particelle massive, stati Kaluza Klein (KK).
- La parità KK in questo modello è conservata naturalmente con la conseguenza che le particelle più leggere (LKP) sono stabili.
- Le LKP sono l'eccitazione più leggera del bosone $B^{(1)}$. Questo stato è senza colore, neutro e le coppie $B^{(1)}$ annichilano in coppie di fermioni via il canale t con lo scambio di un fermione KK.
- Il $B^{(1)}$ per essere un candidato di DM dovrebbe avere una massa di $\approx 800 \text{ GeV}$.
- Contrariamente al neutralino che è un fermione di Majorana, l'annichilazione della materia oscura KK in coppie di fermioni non è soppressa per conservazione dell'elicità.
- Ref.: D.Hooper and S. Profumo, Phys. Rept. 453, 29 (2007); (arXiv:hep-p/0406026)

In breve:

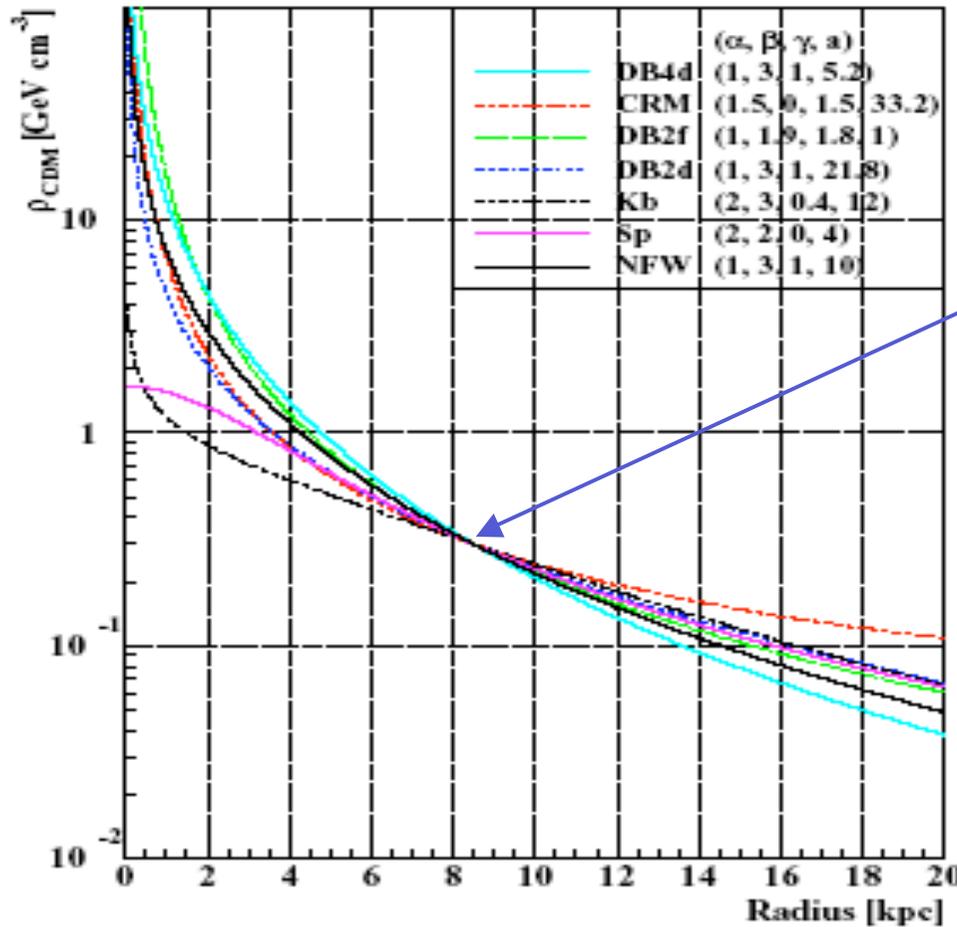
- Materia oscura costituisce il 27% dell'Universo.
- Potrebbe essere composta da *neutralini* particelle stabili, spin 1/2, massa > 45 GeV, solo interazioni deboli.
- **Rivelazione diretta:** interazione del neutralino con i nuclei del detector



- **Rivelazione indiretta:** osservazione di particelle prodotte dopo l'annichilazione $\chi\chi$



DENSITA' DARK MATTER



$$\rho(r) = \rho_0 \cdot \left(\frac{r}{a}\right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha\right]^{\frac{\gamma-\beta}{\alpha}}$$

“modello NFW”

$$I_\gamma \propto \frac{\langle \sigma v \rangle N_\gamma}{m_\chi^2} \Sigma$$

I_γ : n. fotoni/cm² s

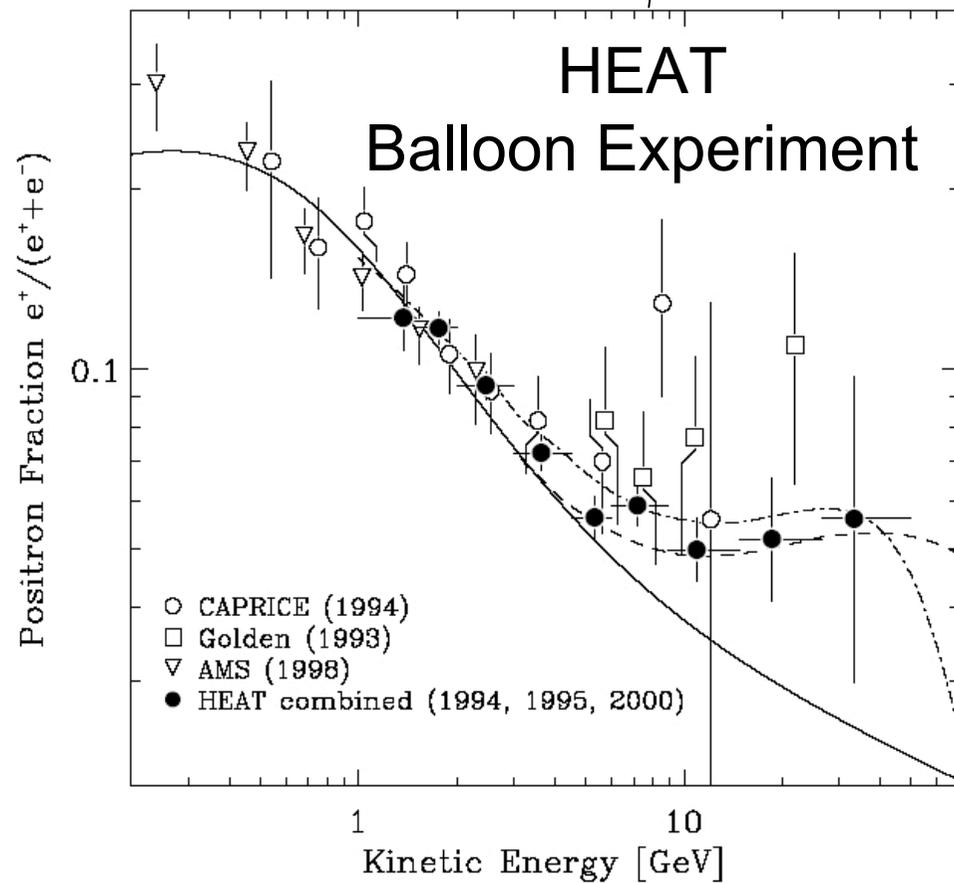
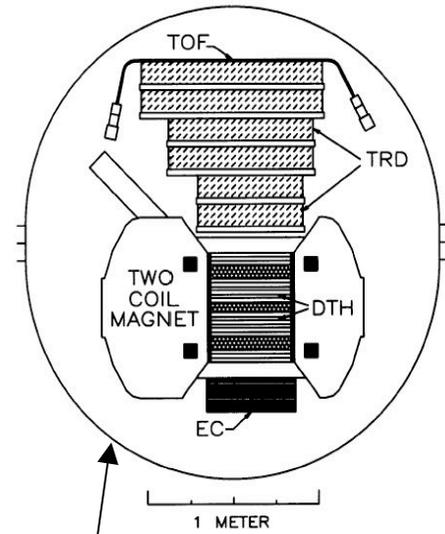
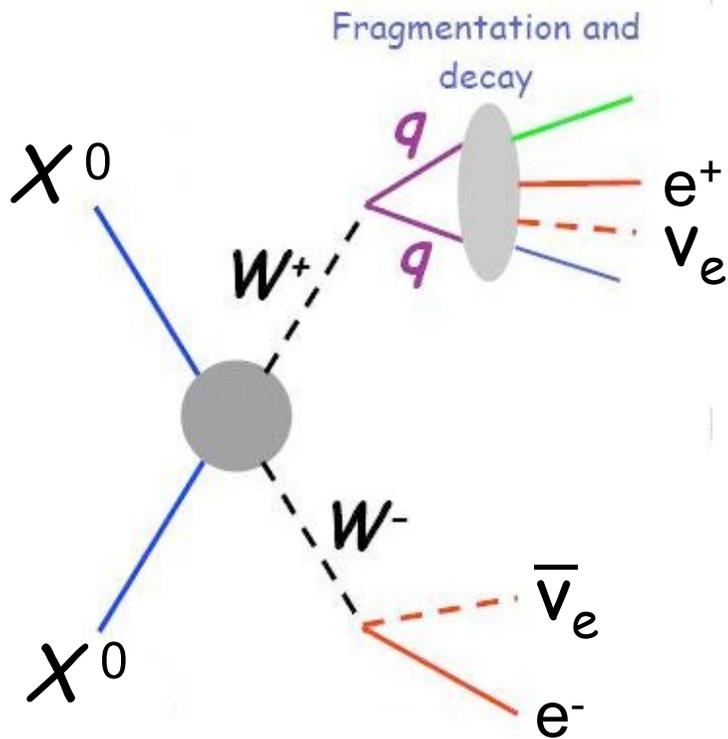
$\rho(r)$: densità neutralini

$\langle \sigma v \rangle N_\gamma$: tasso di annichilazione con N_γ

Σ : fattore geometrico

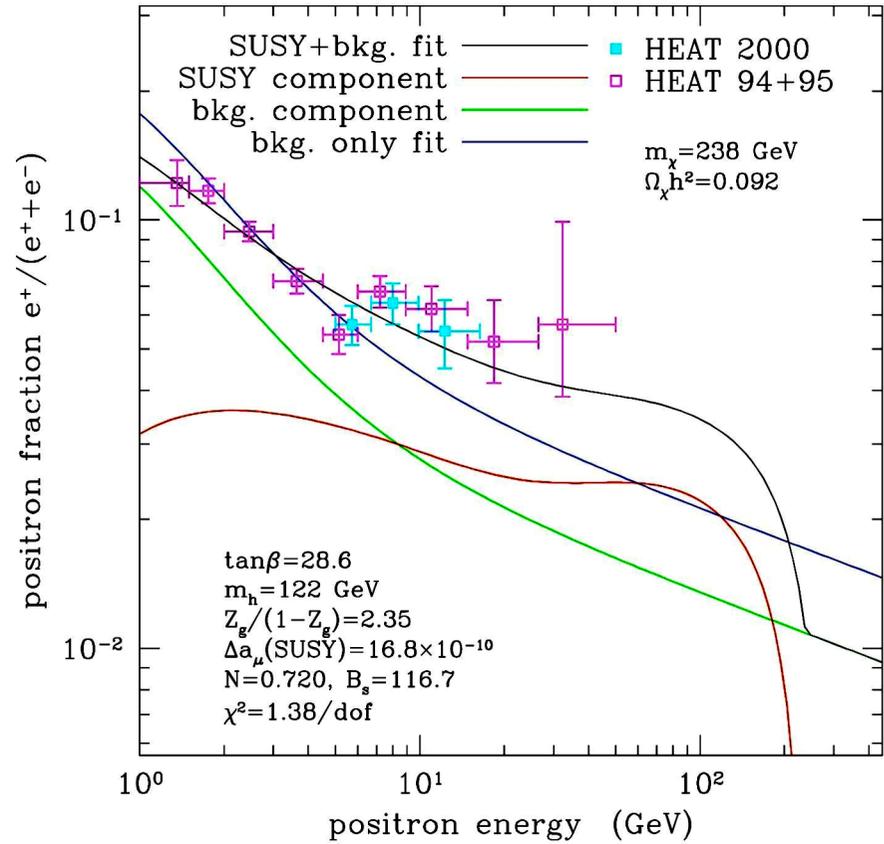
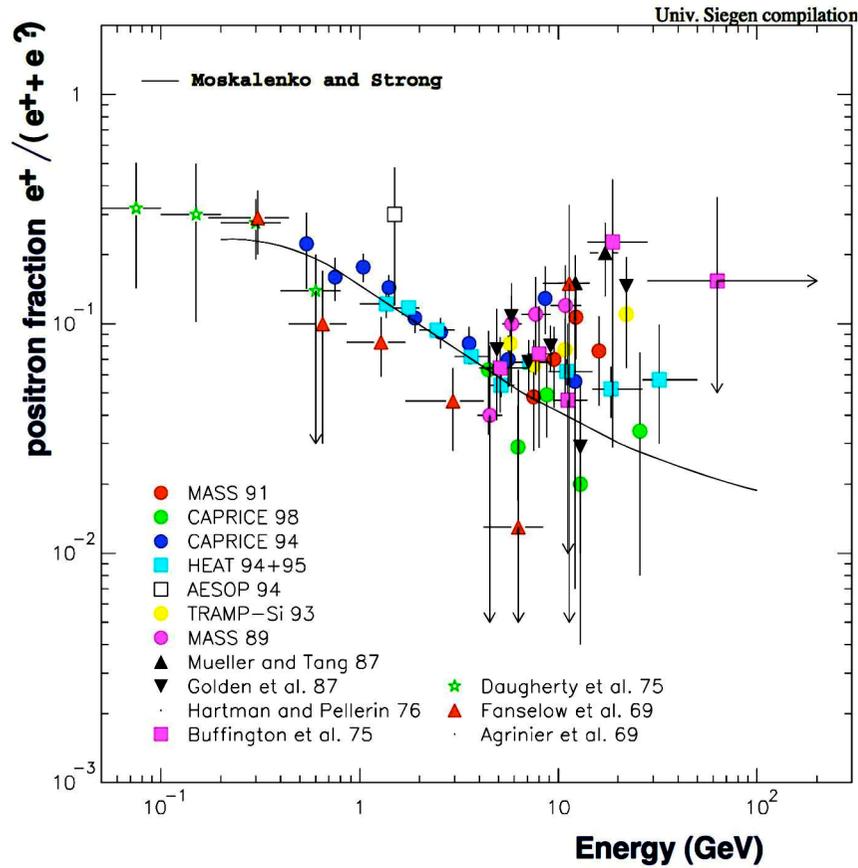
Comparsa di materia oscura nello spettro dei positroni - HEAT

$$\bar{\chi}^0 = \chi^0$$



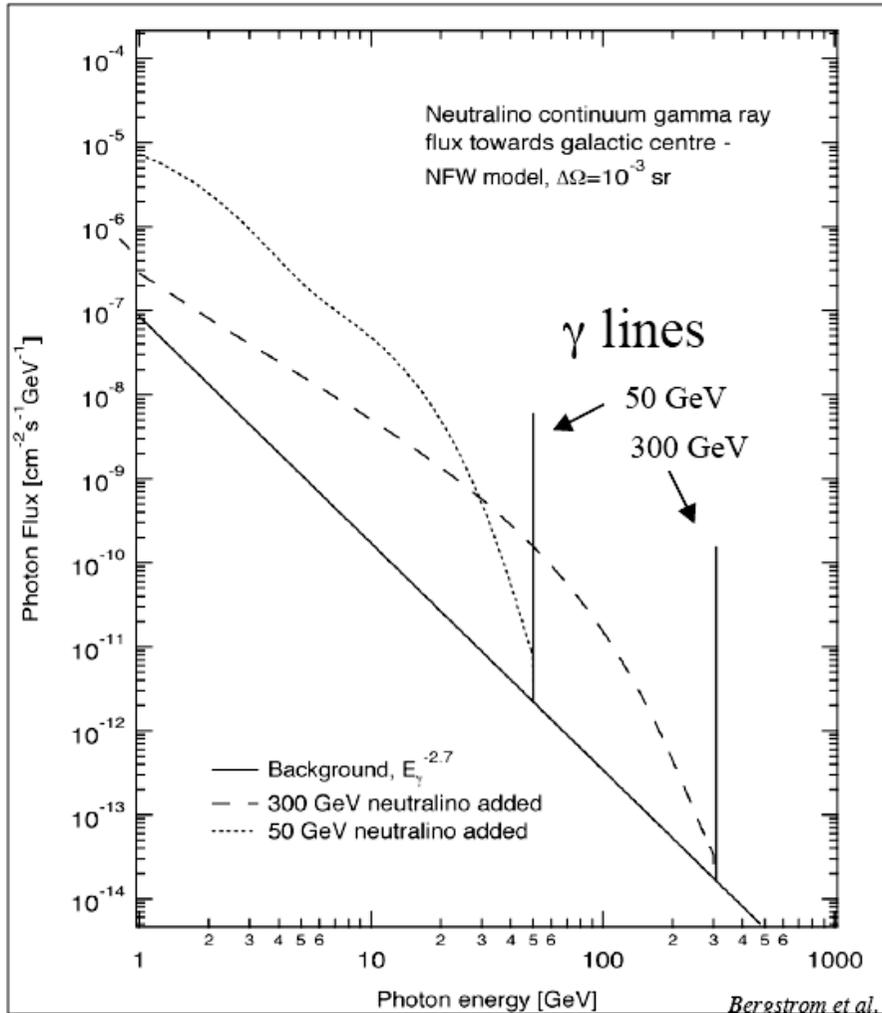
Era pre-Pamela
2006

POSITRONI



Baltz et al., astro-ph/0109318

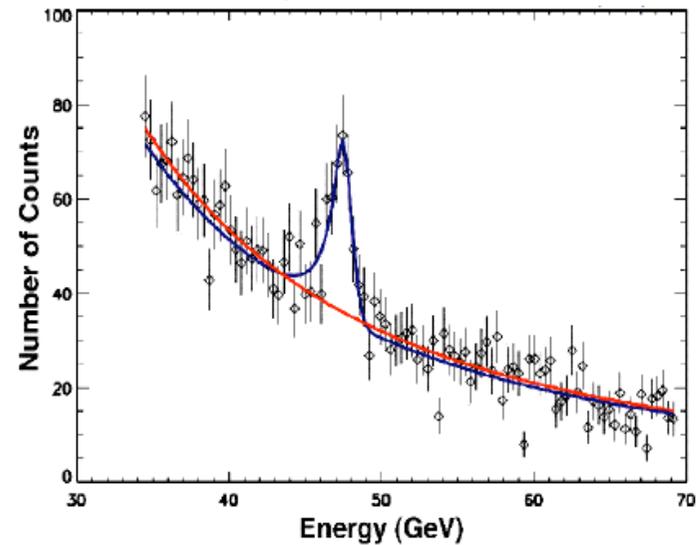
SPETTRO γ DA ANNICHILAZIONE $\chi\chi$



- Two-year scanning mode

Infinite energy resolution

With finite energy resolution



FLUSSO γ

$$\frac{d\Phi_\gamma}{d\Omega} = \frac{\sigma_{\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma} v}{4\pi m_\chi^2} \int_0^\infty \rho^2(r) dr(\psi) \simeq$$

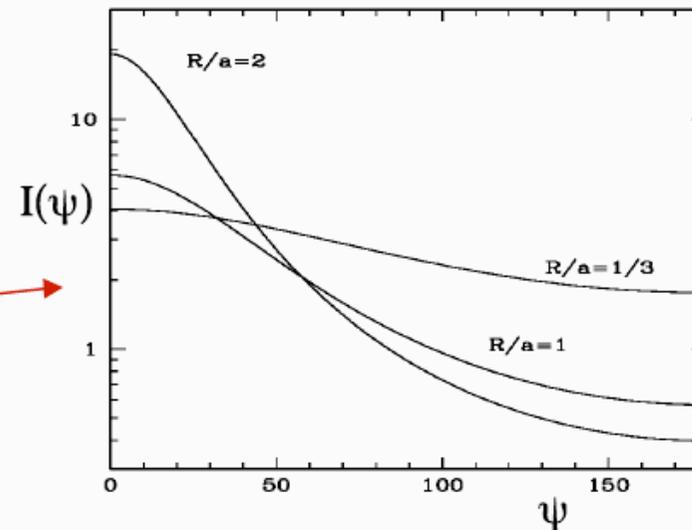
$$\simeq (2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}) (\rho_\chi^{0.4})^2 \frac{(\sigma_{\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma} \cdot v / 10^{-30} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1})}{(m_\chi / 10 \text{ GeV})^2} I(\psi)$$

where:

ψ is the angle between the line of sight and the Galactic center,
 $r(\psi)$ is the distance along that line of sight

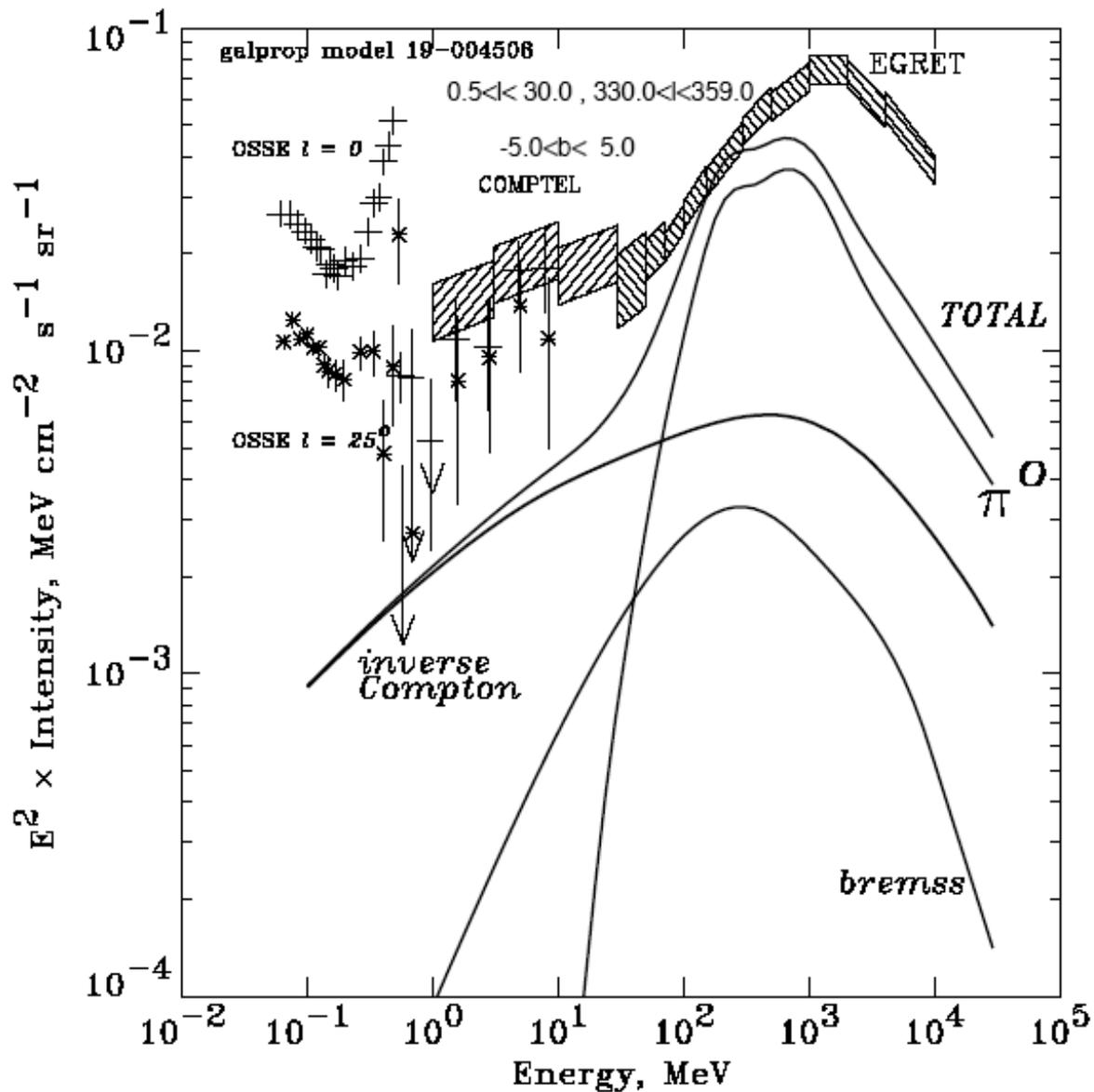
$I(\psi)$ is the angular dependence of the gamma-ray flux.

The galactic dark matter density distribution can have the form
 $\rho(r) \sim r^{-\alpha}$ with $\alpha \sim 1.8$ and the predicted photon flux can be
 10^4 brighter from certain directions!
 (the sources can appear nearly point-like)



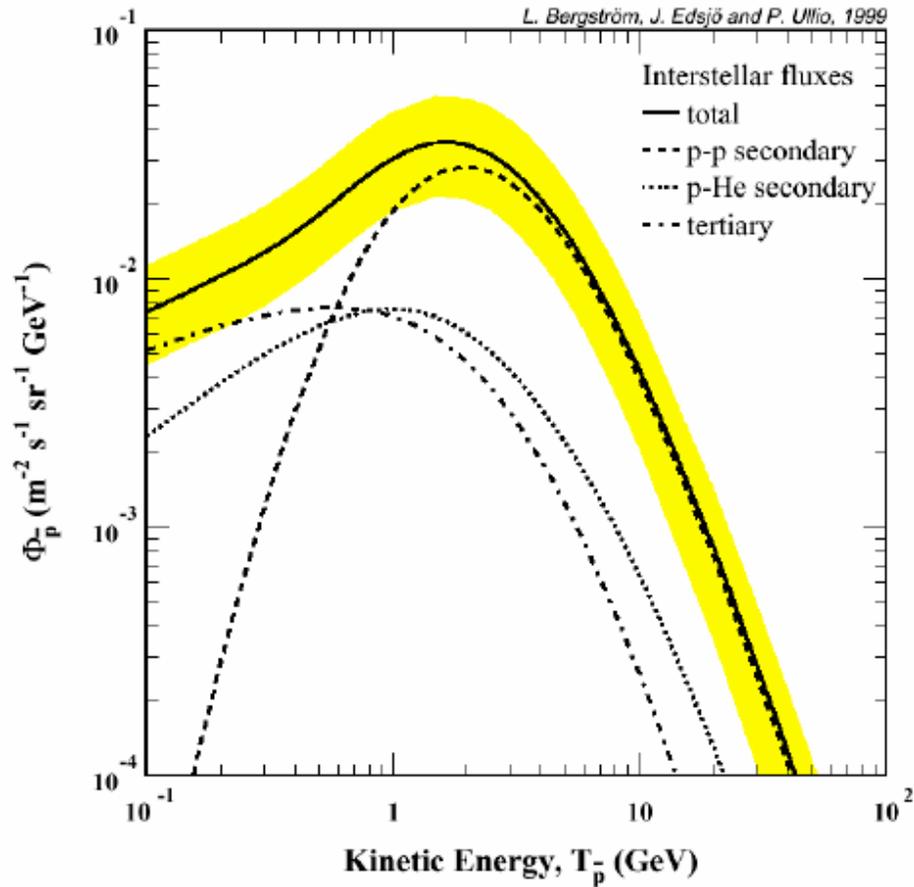
$R \sim 8.5 \text{ kpc}$

SPETTRO γ

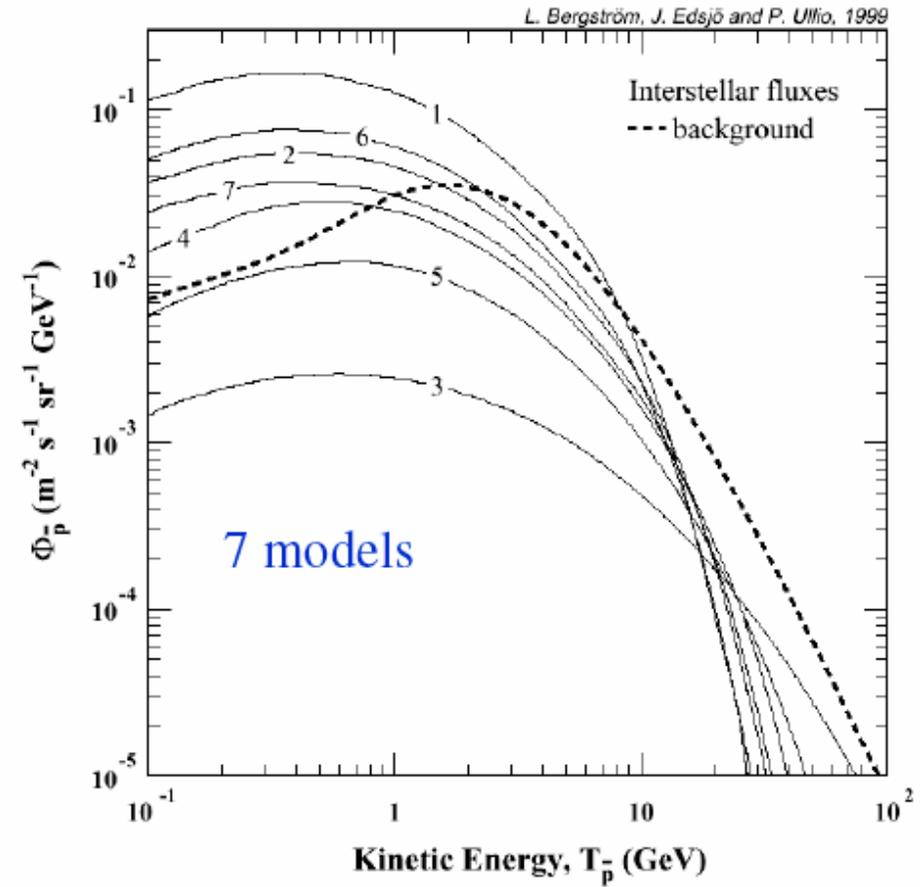


I dati di COMPTEL ed EGRET, γ osservati in una regione prossima al centro della Galassia, sono confrontati con la predizione di un modello standard di propagazione per la radiazione diffusa.

ANTIPROTONI

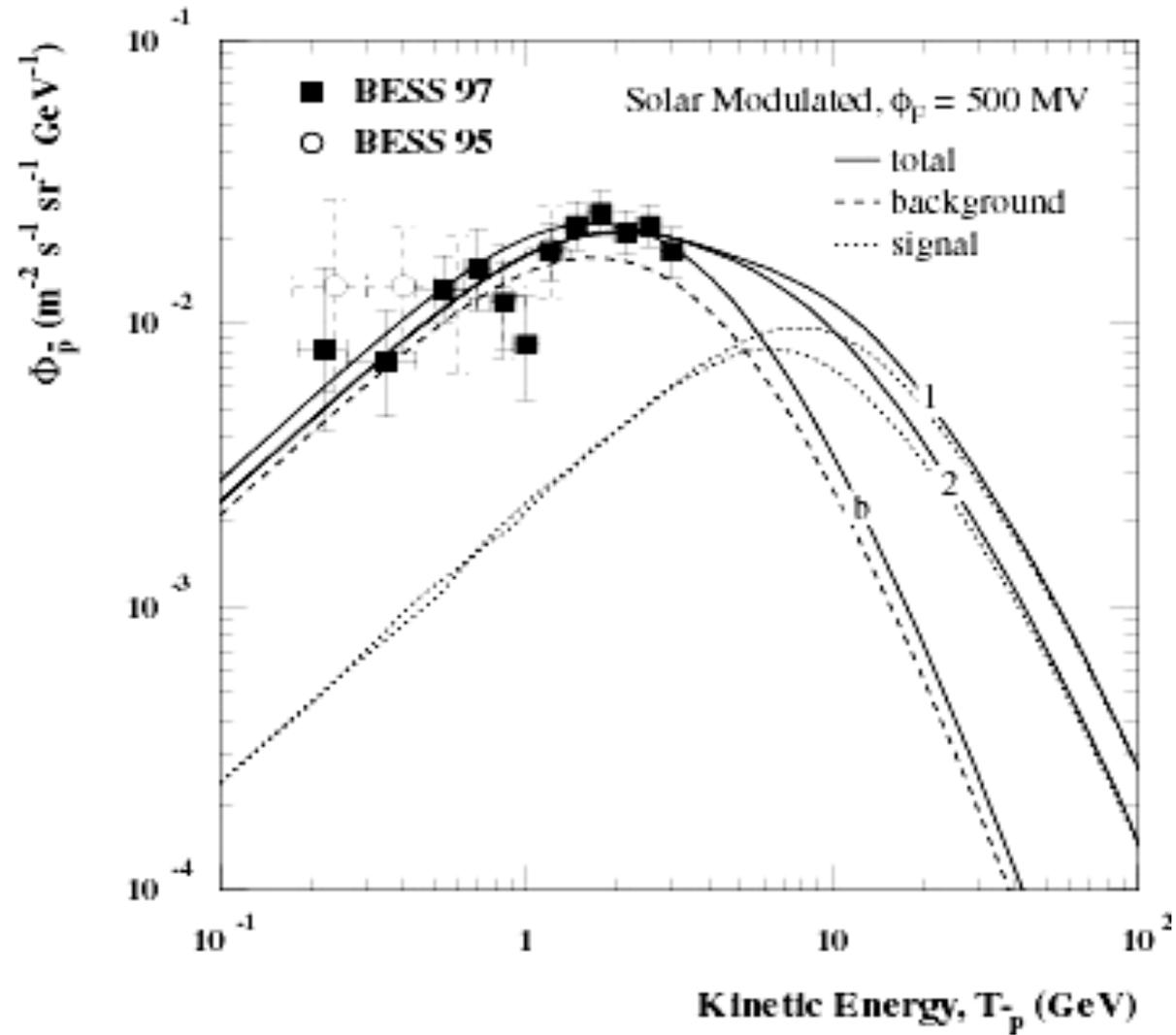


Background



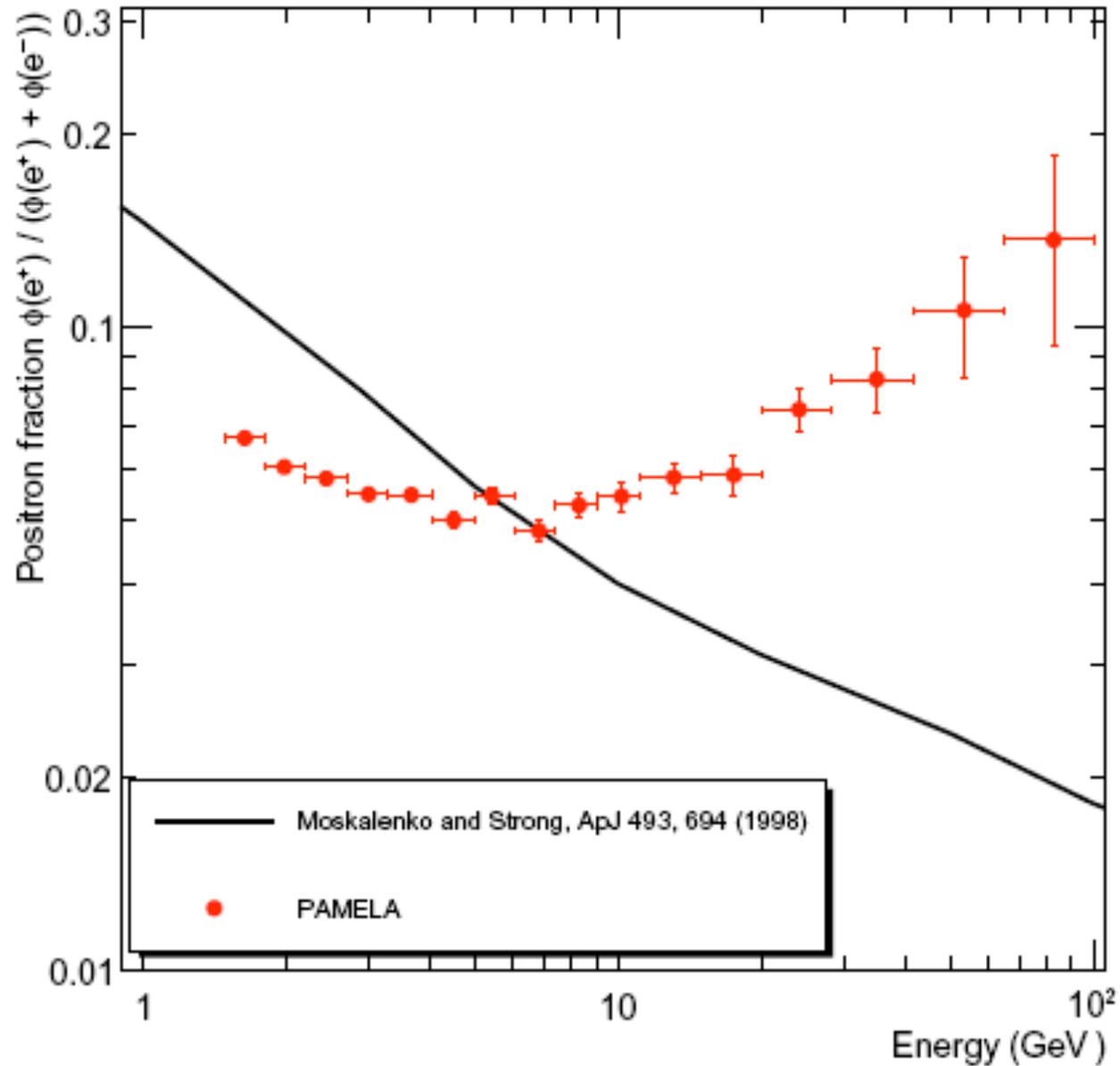
Primary antiprotons from SUSY χ annihilation

ANTIPROTONI

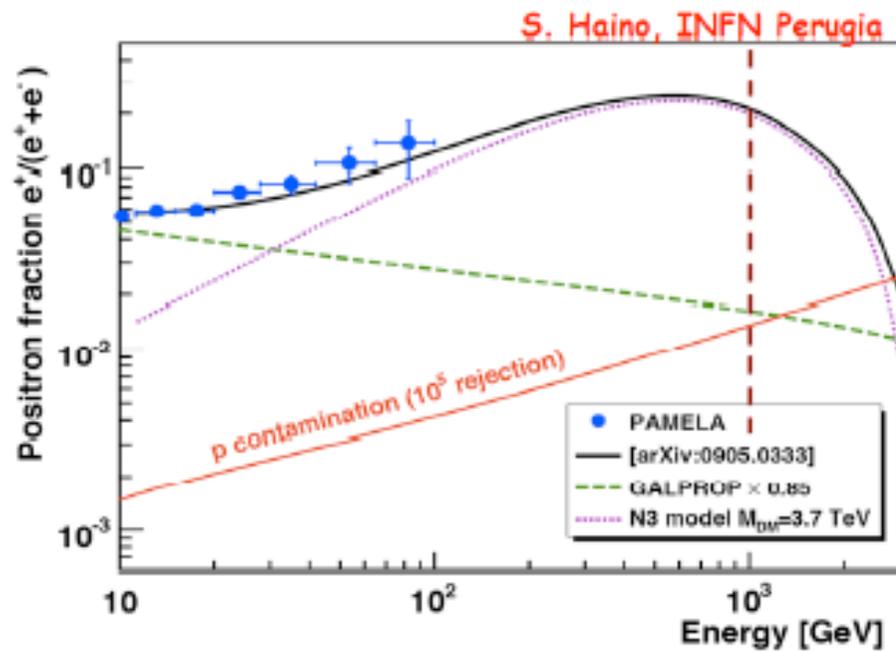


Post 2006

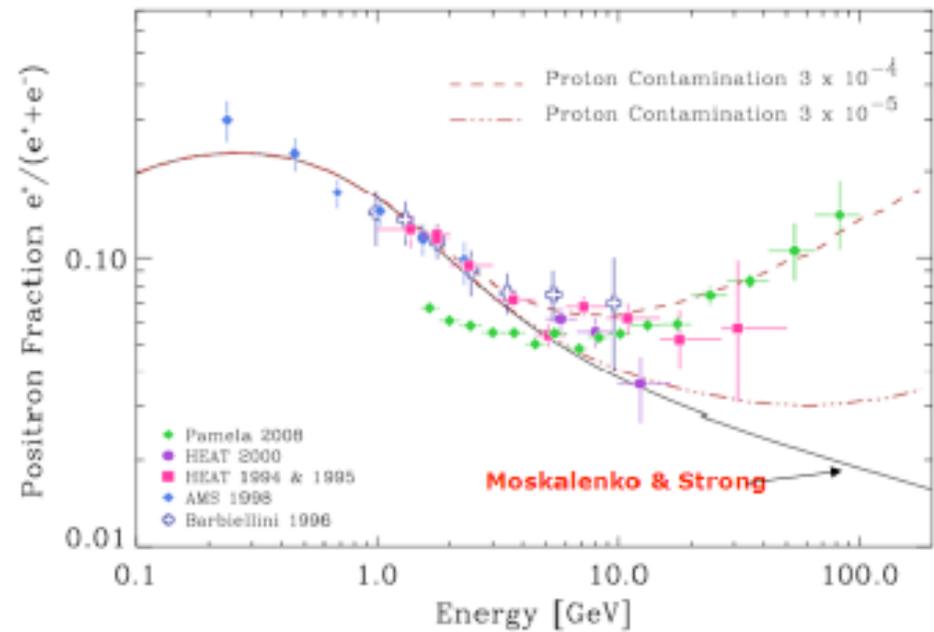
PAMELA: frazione positroni



Contaminazioni di protoni al segnale di positroni

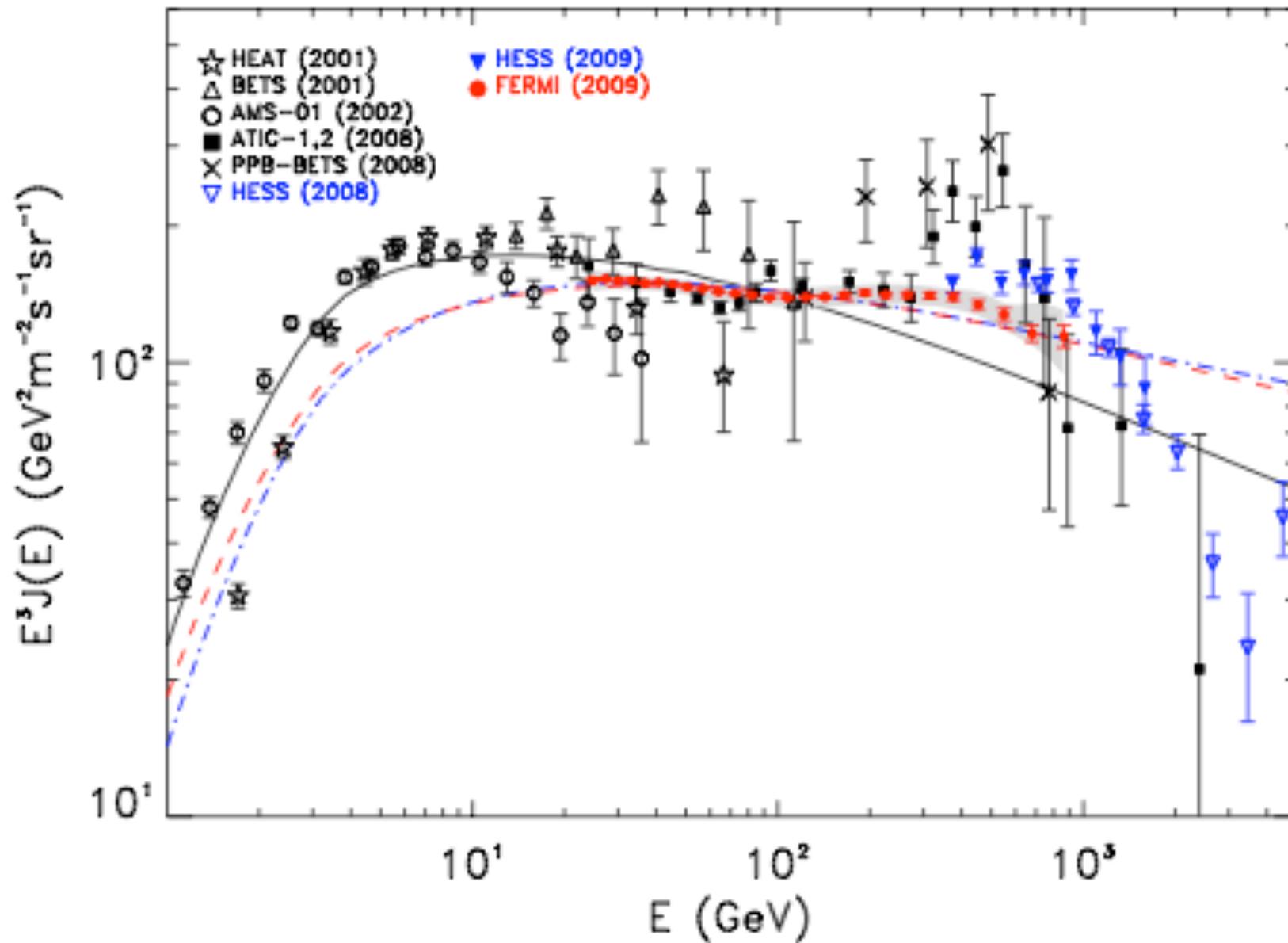


PAMELA

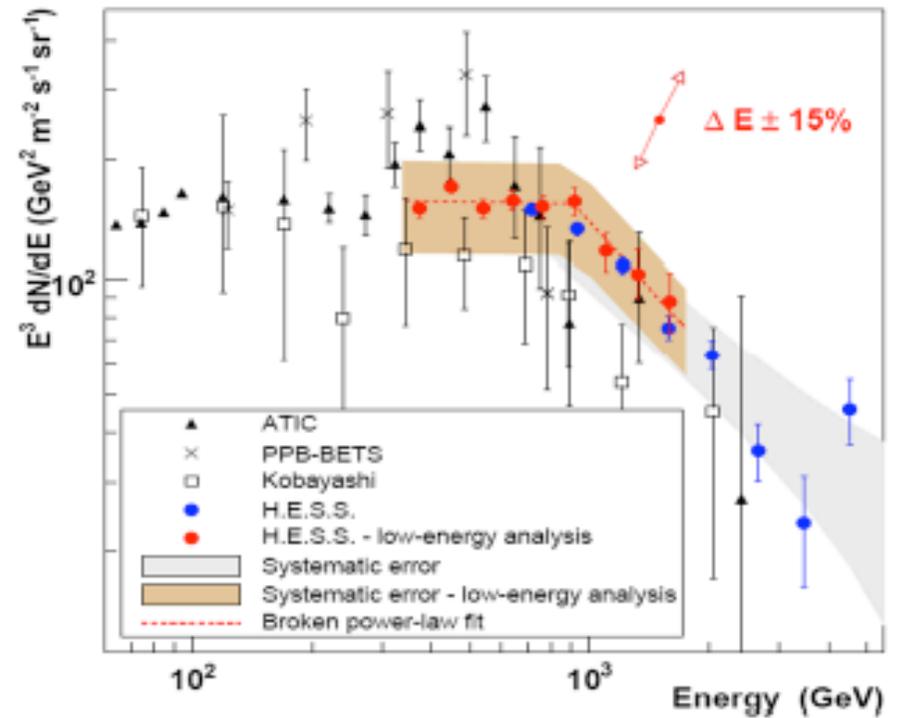
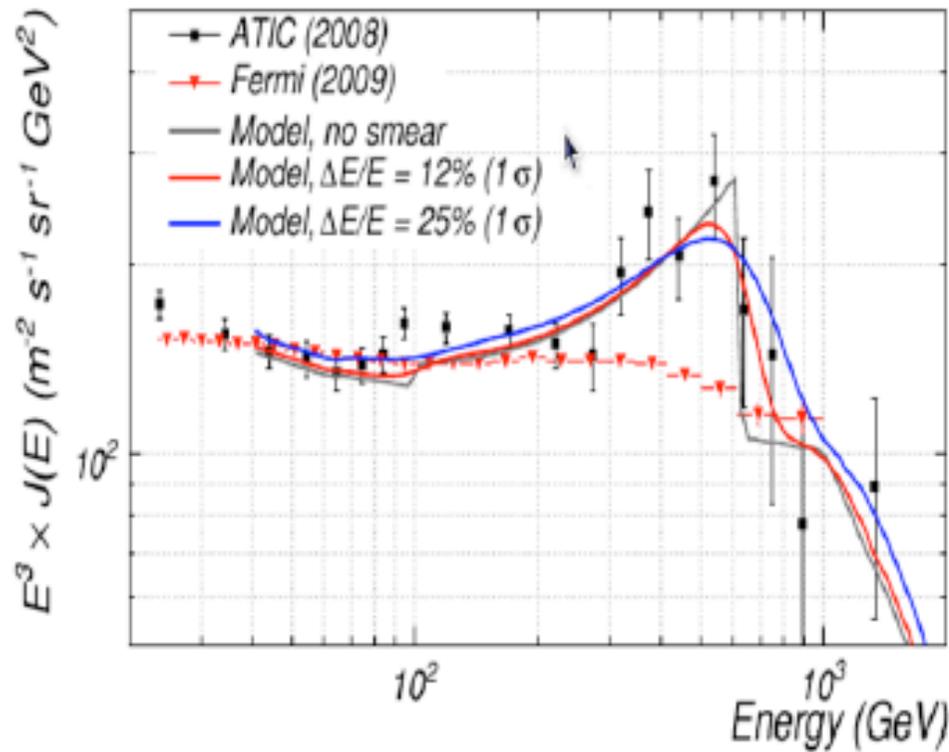


PAMELA
HEAT
AMS 1998

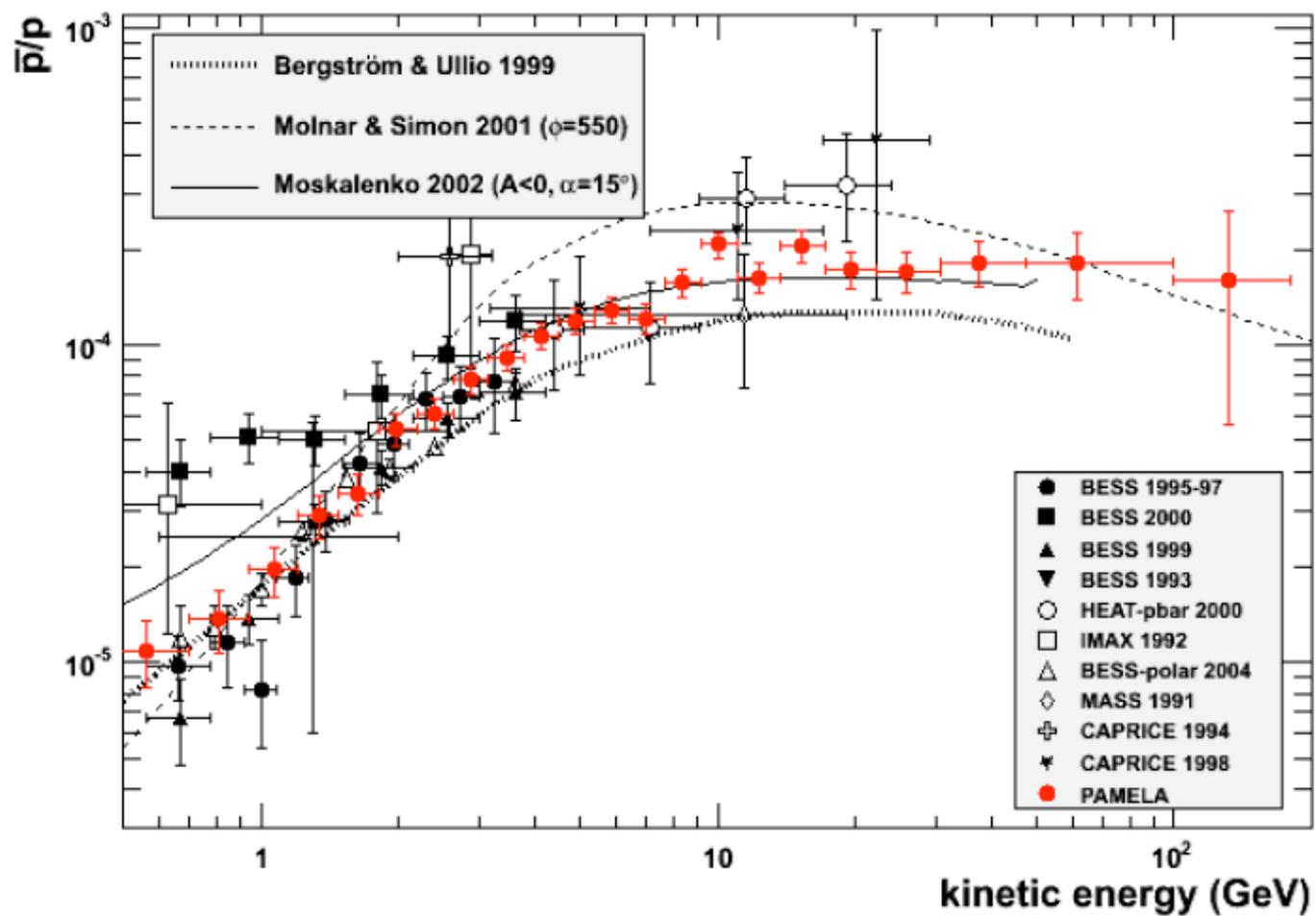
FERMI: $e^+ + e^-$



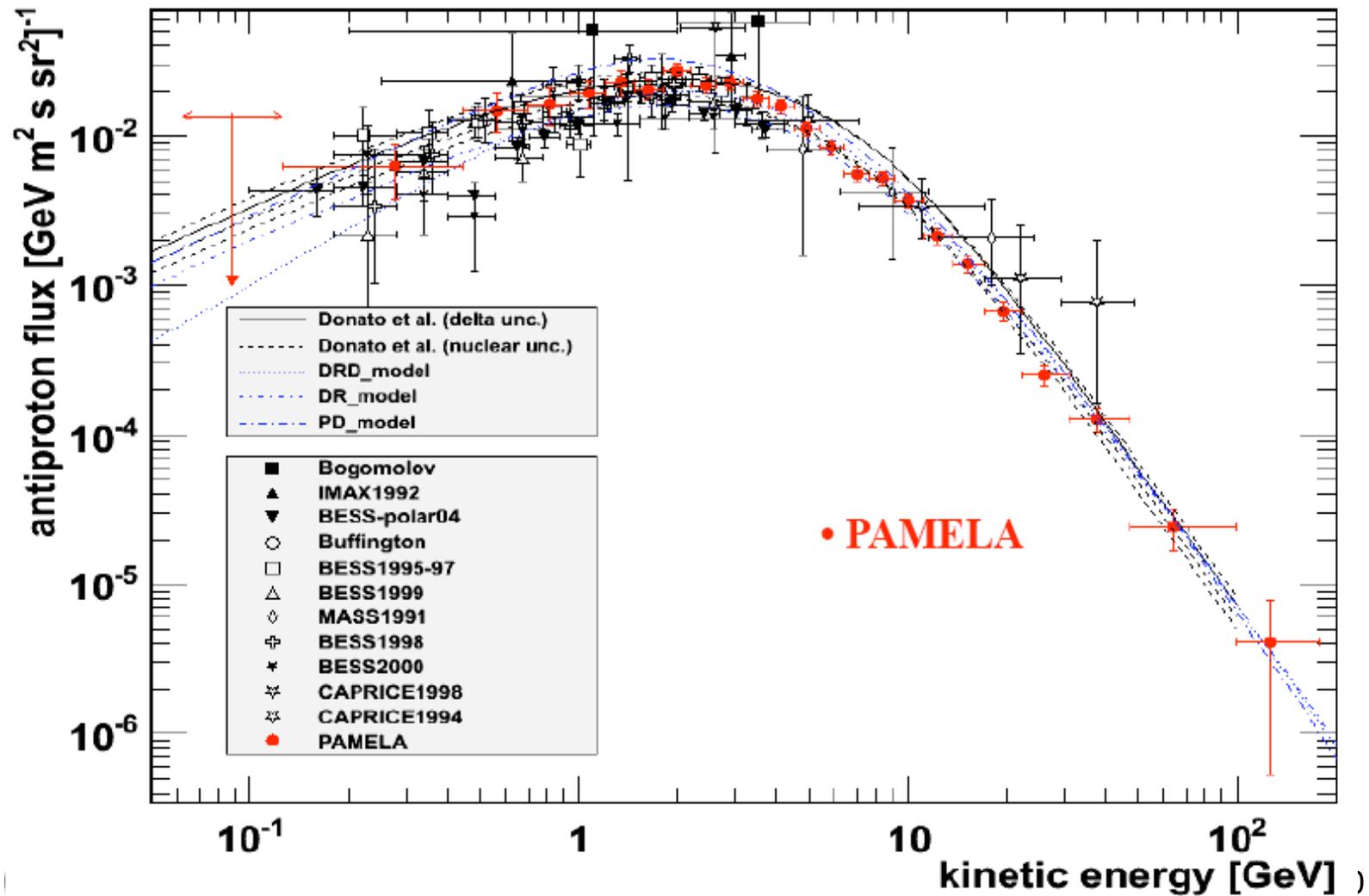
ATIC FERMI HESS: $e^+ + e^-$



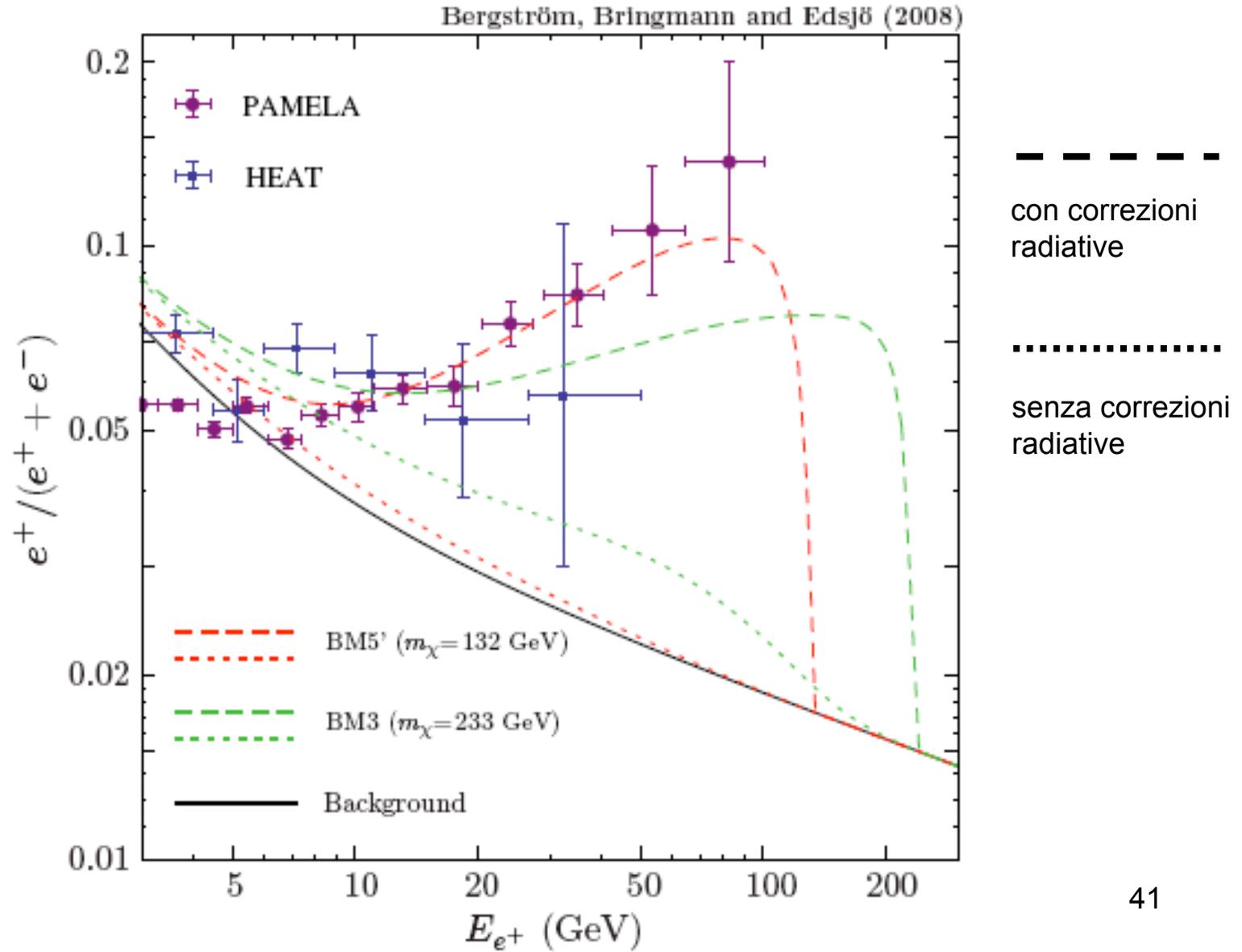
PAMELA: antiprotoni



PAMELA: flusso antiprotoni

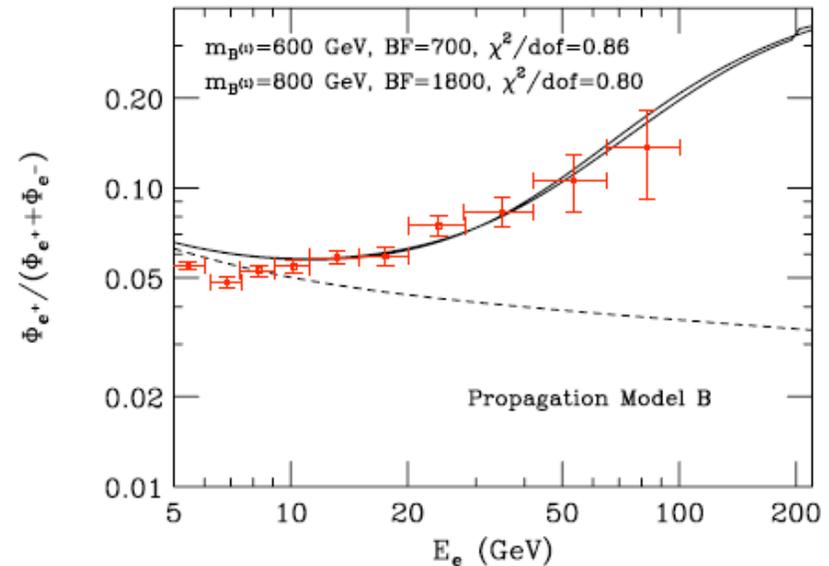
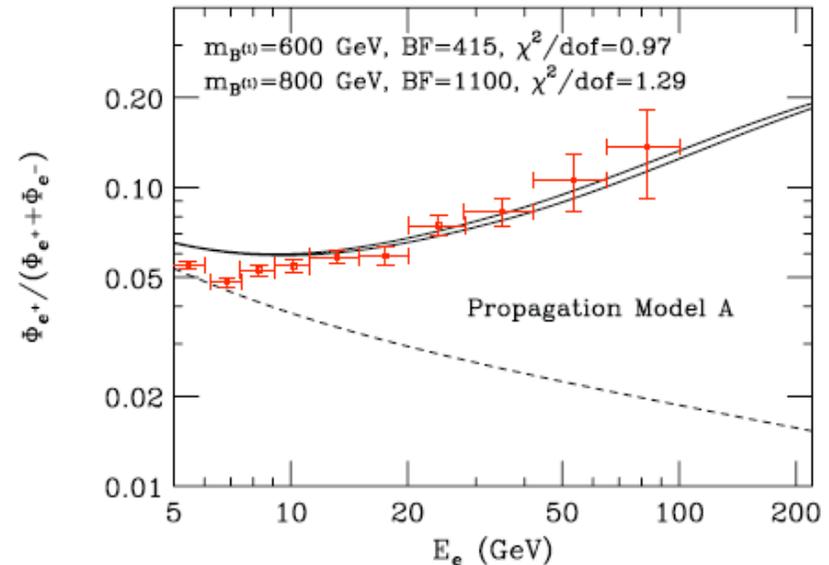


PAMELA: annichilazione neutralino



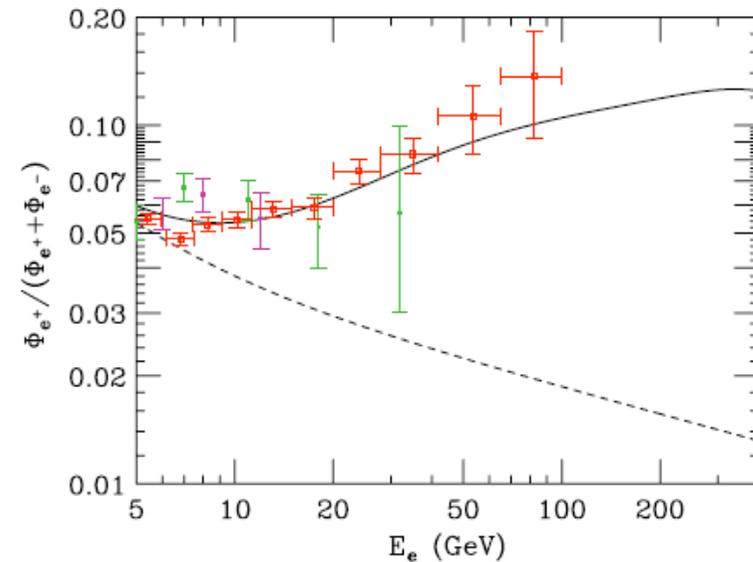
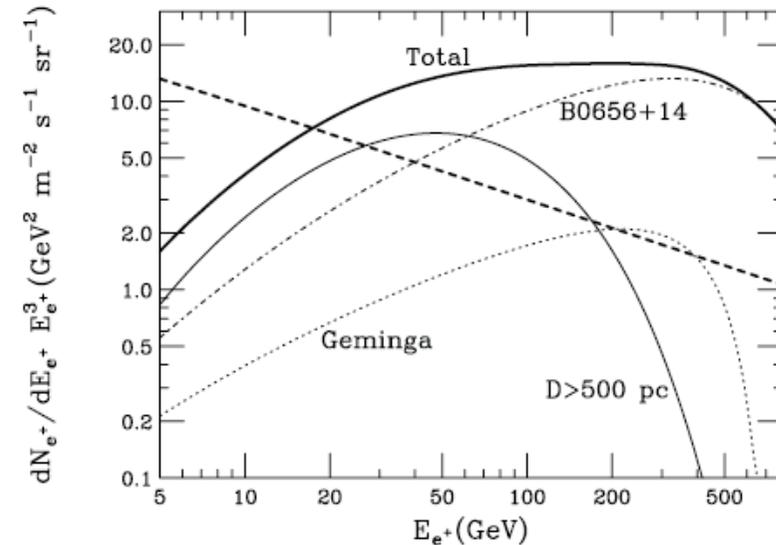
PAMELA: KK dark matter

- Il boost factor (BF) necessario per spiegare i dati di Pamela, con il modello KK è dell'ordine di 1000.
- La massa del bosone KK sarebbe dell'ordine di 800 GeV

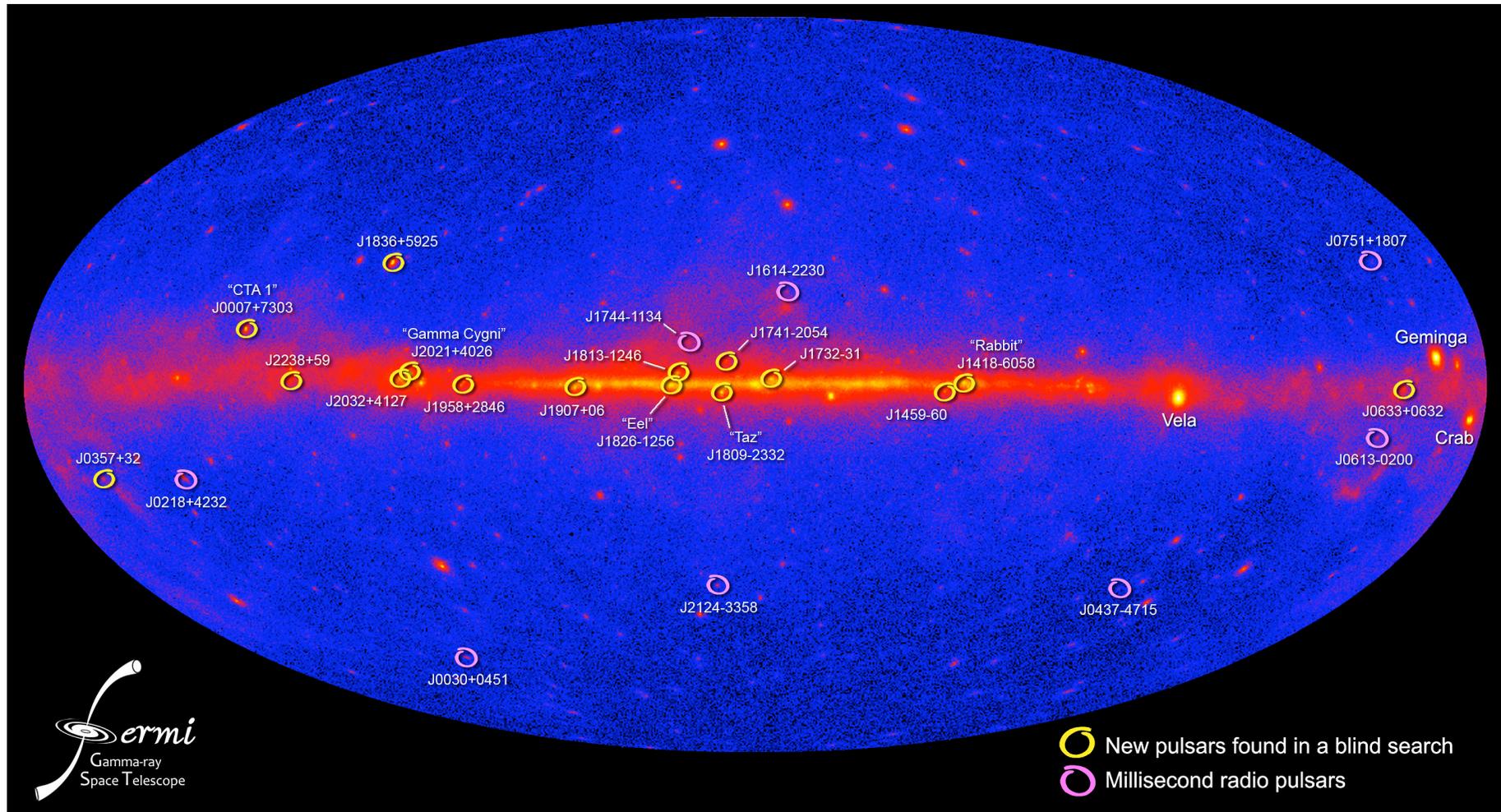


PAMELA: sorgenti astrofisiche

- Le pulsar, se abbastanza vicine e abbastanza giovani, possono emettere coppie di elettroni e positroni di alta energia dalla magnetosfera nella “polar cap”.
- Gamma di alta energia originati da radiazione di sincrotrone produrrebbero coppie $e^+ e^-$.
- Le coppie sarebbero accelerate ulteriormente nella nebula della pulsar e confinate per circa 10^5 anni.
- A causa delle perdite di energia della coppia per il Compton inverso e per la radiazione di sincrotrone, solo pulsar distanti non più di 1 kpc possono contribuire.

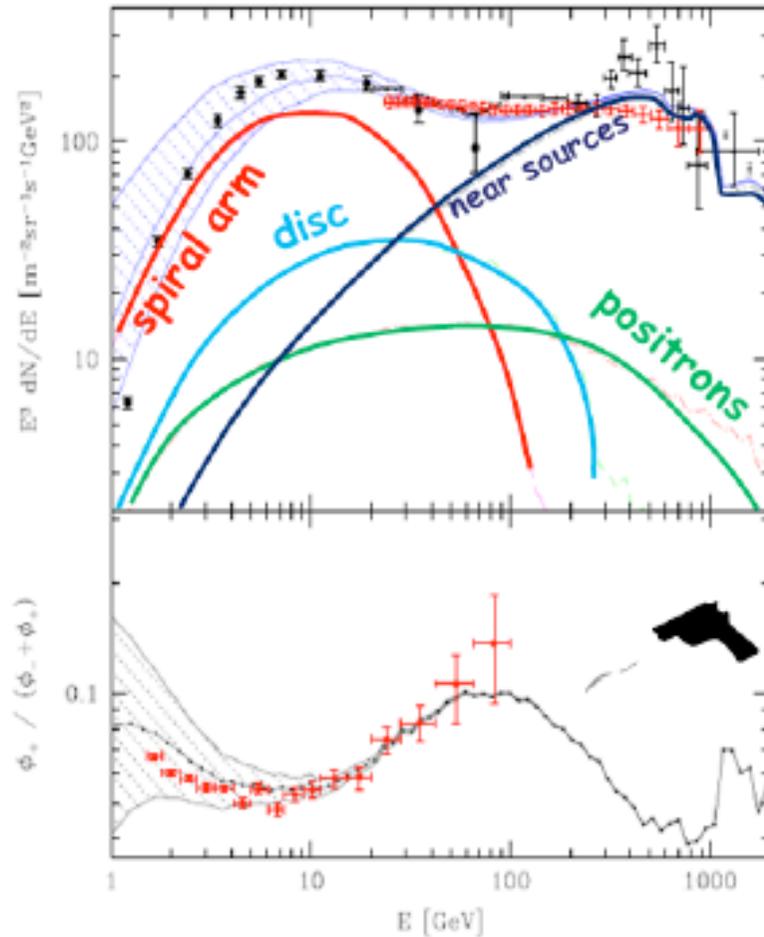


FERMI: pulsar galattiche

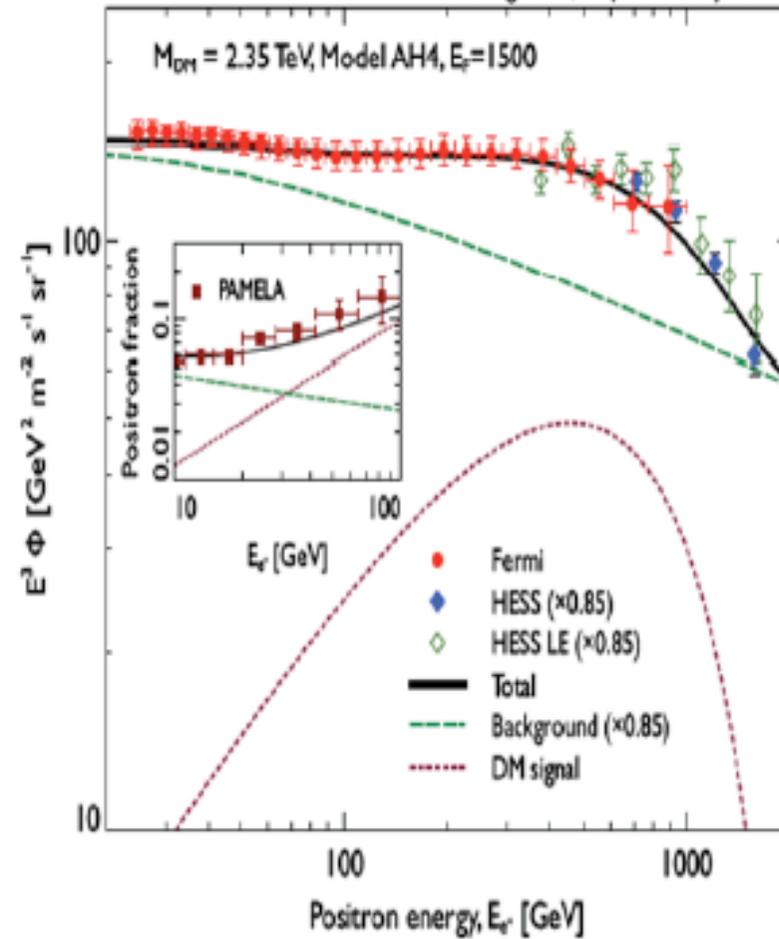


Sorgenti astrofisiche

Shaviv et al., arXiv:0902.0376, 2009



Bergström, Edsjö & Zaharijas 2009



CONCLUSIONE

- Le interpretazioni possibili sono ancora troppo aperte e la fantasia dei teorici produce più modelli esotici che gli esperimenti nuovi dati
- Tutti i modelli proposti hanno difficoltà più o meno nascoste
- Gli esperimenti non sono in accordo completo e sembra che ci sia spazio per errori sistematici