

Astrofisica e particelle elementari

aa 2007-08

Lezione 14

Bruno Borgia

Evidenze astronomiche materia oscura

New evidence for a Dark Matter Galaxy

New evidence that VIRGOHI 21, a mysterious cloud of hydrogen in the Virgo Cluster 50 million light-years from the Earth, is a Dark Galaxy, emitting no star light, was presented today at the American Astronomical Society meeting in Washington, D. C. by an international team led by astronomers from the National Science Foundation's Arecibo Observatory and from Cardiff University in the United Kingdom. Their results not only indicate the presence of a dark galaxy but also explain the long-standing mystery of its strangely stretched neighbour.

The new observations, made with the Westerbork Synthesis Radio Telescope in the Netherlands, show that the hydrogen gas in VIRGOHI 21 appears to be rotating, implying a dark galaxy with over ten billion times the mass of the Sun. Only one percent of this mass has been detected as neutral hydrogen - the rest appears to be dark matter.

But this is not all that the new data reveal. The results may also solve a long-standing puzzle about another nearby galaxy. NGC 4254 is lopsided, with one spiral arm much larger than the rest. This is usually caused by the influence of a companion galaxy, but none could be found until now - the team thinks VIRGOHI 21 is the culprit. Dr. Robert Minchin of Arecibo Observatory says; "The Dark Galaxy theory explains both the observations of VIRGOHI 21 and the mystery of NGC 4254."

Gas from NGC 4254 is being torn away by the dark galaxy, forming a temporary link between the two and stretching the arm of the spiral galaxy. As the VIRGOHI 21 moves on, the two will separate and NGC 4254's unusual arm will relax back to match its partner.

JOHNS HOPKINS TEAM FINDS RING OF DARK MATTER

Using NASA's Hubble Space Telescope, a team of astronomers has discovered a ghostly ring of dark matter that formed long ago during a titanic collision between two massive galaxy clusters. The ring's discovery is among the strongest evidence yet that dark matter exists.

Astronomers have long suspected the existence of the invisible substance as the source of additional gravity that holds together galaxy clusters. Such clusters would fly apart if they relied only on the gravity from their visible stars. Although astronomers don't know what dark matter is made of, they hypothesize that it is a type of elementary particle that pervades the universe.

"This is the first time we have detected dark matter as having a unique structure that is different from both the gas and galaxies in the cluster," said team member M. James Jee of the Henry A. Rowland Department of Physics and Astronomy at The Johns Hopkins University.

The researchers spotted the ring unexpectedly while they were mapping the distribution of dark matter within the galaxy cluster Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652), located 5 billion light-years from Earth. The ring measures 2.6 million light-years across. Although astronomers cannot see dark matter, they can infer its existence in galaxy clusters by observing how its gravity bends the light of more distant background galaxies.

"Although the invisible matter has been found before in other galaxy clusters, it has never been detected to be so largely separated from the hot gas and the galaxies that make up galaxy clusters," Jee said. "By seeing a dark-matter structure that is not traced by galaxies and hot gas, we can study how it behaves differently from normal matter."

Supersimmetrie

- La motivazione dell'introduzione di teorie supersimmetriche si basa sull'ipotesi di unificazione delle interazioni elettrodeboli con le interazioni forti, Grande Unificazione, GUT. Ovvero la possibilità di introdurre una simmetria globale che riunisca la simmetria $SU(2) \otimes U(1)$ elettrodebole ed $SU(3)$ di colore, $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$. Il modello più semplice di GUT fu $SU(5)$ di Georgi e Glashow nel '74.
- Un modello più ampio è offerto dalle supersimmetrie, SUSY, dove ad ogni fermione corrisponde un bosone e viceversa. Benché non esistano risultati sperimentali incontrovertibili, gli argomenti per l'introduzione delle supersimmetrie sono fondamentalmente tre.
- La *naturalità*, ovvero la spiegazione dell'origine della scala di massa così vasta, dalle masse del W e Z alla scala di Planck, $M_P \approx 10^{19}$ GeV. Questa è la cosiddetta *gerarchia di gauge*. Nel calcolo delle correzioni di ordine superiore intervengono loop che contengono fermioni e bosoni. Questi loop generano divergenze a meno di cancellazioni di ordine superiore. La supersimmetria offre *naturalmente* queste cancellazioni in quanto per ogni fermione/bosone vi è un bosone/fermione supersimmetrico. Fermioni e bosoni danno contributi di segno opposto e quindi si ottiene la cancellazione dei termini divergenti.
- L'unificazione delle tre costanti di gauge ad energie vicine alla massa di Planck non avviene nel Modello Standard. Solo l'introduzione di nuova fisica alla scala del TeV porta ad un cambiamento della variazione delle costanti di gauge con la loro unificazione.
- L'esistenza della materia oscura non è spiegabile con il Modello Standard. La supersimmetria offre un candidato neutro, stabile e con la massa necessaria per giustificare la densità osservata di materia oscura.

SUPERSIMMETRIE

Nelle supersimmetrie ad ogni fermione corrisponde un bosone supersimmetrico e per ogni bosone vi è un fermione. L'estensione minimale del modello standard, SM, è brevemente detto MSSM.

Modelli supersimmetrici postulano una simmetria R in cui particelle supersimmetriche sono prodotte in coppia con R opposto, similmente alla stranezza.

Con altra definizione, R è un numero quantico moltiplicativo definito come

$$R = (-1)^{3(B-L)+2S}$$

Le particelle ordinarie del Modello Standard hanno parità R pari mentre le particelle supersimmetriche hanno parità dispari.

Una coppia quark-antiquark di energia sufficiente può annichilarsi in una coppia squark-antisquark.

Il MSSM introduce 4 particelle di Majorana neutre, spin 1/2:

- i partner dei bosoni di gauge neutri B, W
- i partner CP-pari degli higgs H^0_1, H^0_2

Si ottengono quattro autostati di massa, il più leggero dei quali è il neutralino χ_1 ,

$$\chi_1 = N_1 \tilde{B} + N_2 \tilde{W}^3 + N_3 \tilde{H}^0_1 + N_4 \tilde{H}^0_2$$

Il neutralino non ha interazioni elettromagnetiche o forti ma solo deboli ed è antiparticella di se stesso.

MSSM

Super multipletti	Bosoni	Fermioni
gluone/gluino gauge/gaugino	g W [±] W ⁰ B	\tilde{g} \tilde{W}^{\pm} \tilde{W}^0 \tilde{B}
sleptone/leptone	$\tilde{\nu}$ \tilde{e}	ν e
squark/quark	\tilde{u} \tilde{d}	u d
higgs/higgsino	H	\tilde{H}
fotone/fotino	γ	$\tilde{\gamma}$

mSUGRA

La supersimmetria è evidentemente “rotta”, dato che le masse dei partner supersimmetrici sono molto diverse dalle masse delle particelle “ordinarie”. Si possono costruire modelli in cui la rottura della simmetria è spontanea oppure 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 GUT,

$m_{1/2}$: massa scalari a GUT,

A_0 : accoppiamento trilineare nel settore Higgs,

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

μ , μ : parametro di mixing higgs.

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, se l'ampiezza di scattering è coerente e quindi $K \propto A^2$, altrimenti K contiene un fattore di forma. Infine K dipende 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, $\rho_W \approx 0.3 \text{ GeV cm}^{-3}$.

La frequenza di interazioni per unità di massa del bersaglio è $R = \sigma \phi_W / M_N$ con $\phi_W = \rho_W v / M_W$ flusso di WIMP, v : velocità dei WIMP, M_N : massa del nucleo bersaglio.

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

RIVELAZIONE DIRETTA

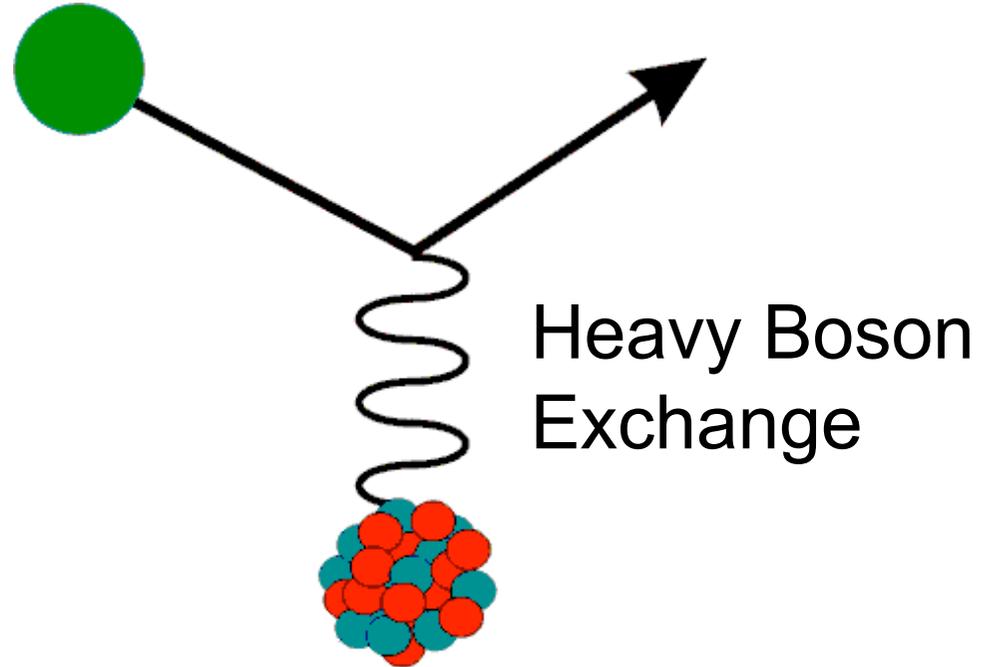
WIMP

$$30 < M_W \text{ [GeV]} < 1000$$

$$46 < \lambda_W \text{ [fm]} < 1.4$$

$$v_{\text{rms}} \sim 270 \text{ km/s}$$

$$\rho_W \sim 0.3 \text{ GeV}/c^2 \text{ cm}^{-3}$$

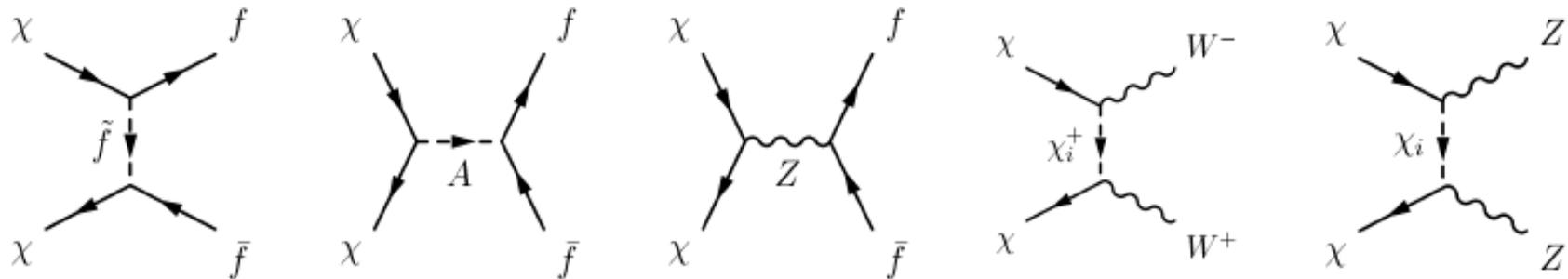


$$E_R = E_0 \cdot \frac{4M_W M_N}{(M_W + M_N)} \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos \theta^*) \approx 0.4 \text{ keV} \cdot \frac{M_W}{\text{GeV}}$$

Direct detection via WIMP scattering by nuclei: $E_R \sim$ tens of keV

RIVELAZIONE DEL NEUTRALINO

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

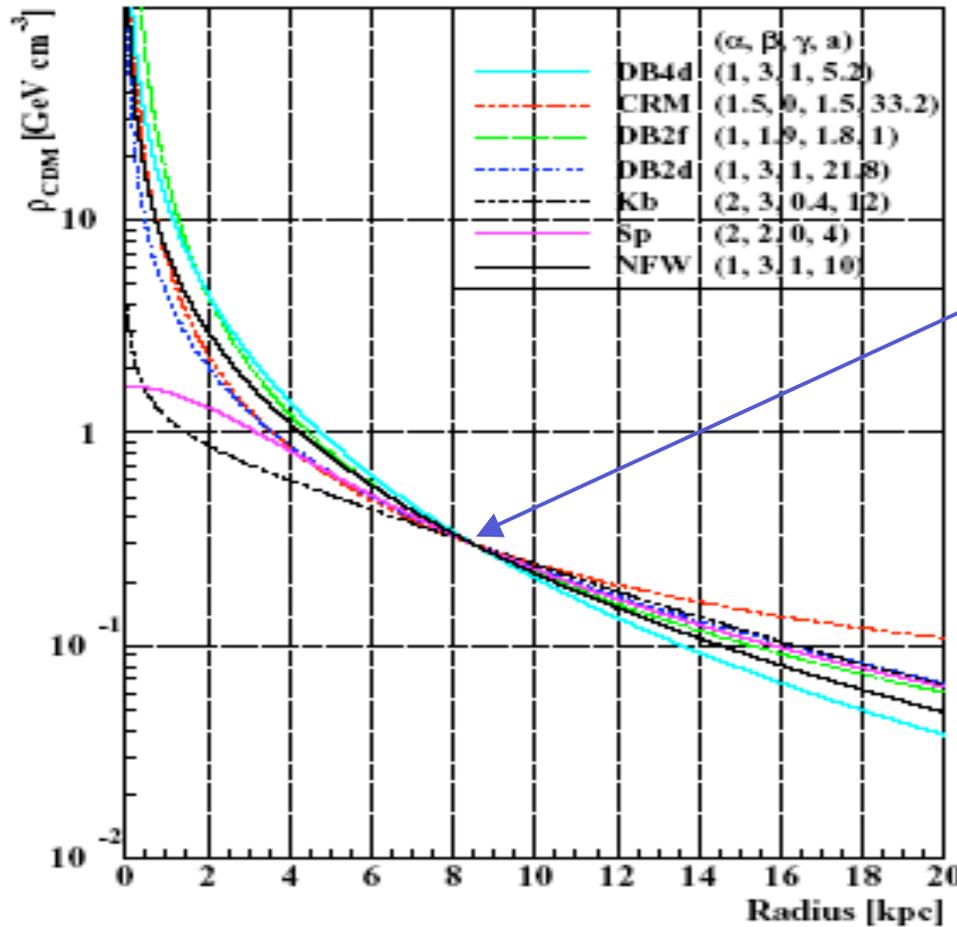


Nello stato finale le particelle più convenienti da osservare sono quelle per cui il fondo dei raggi cosmici è minimo, ovvero γ , e^+ , anti-p, anti-D.

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 dal Sole.

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

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”

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

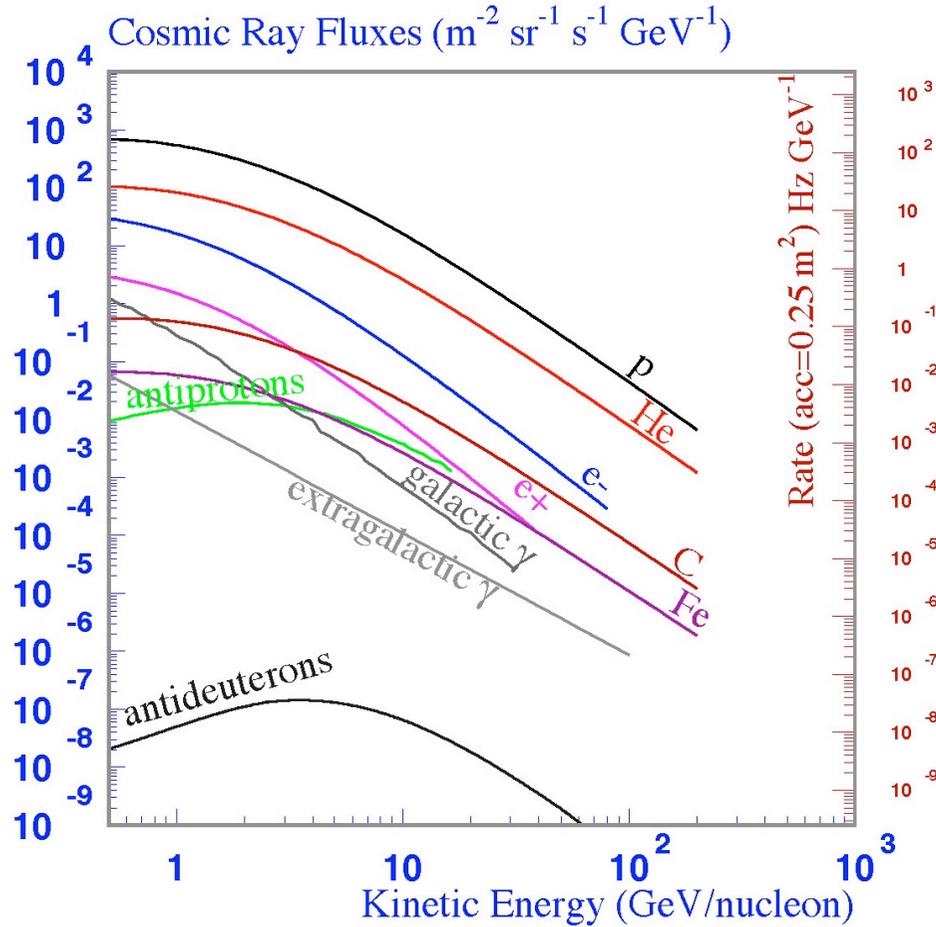
I_γ : n. fotoni/cm² s

$\rho(r)$: densità neutralini

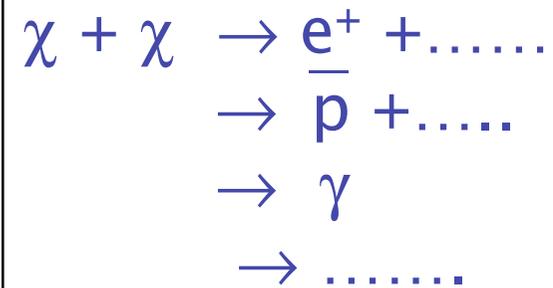
$\langle \sigma v \rangle N_\gamma$: tasso di annichilazione con N_γ

Σ : fattore geometrico

Dark matter



Supersimmetria:



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

apparato:

• reiezione $p \approx 10^5$

SUSY Dark Matter

- **Neutralino** – majorana particles

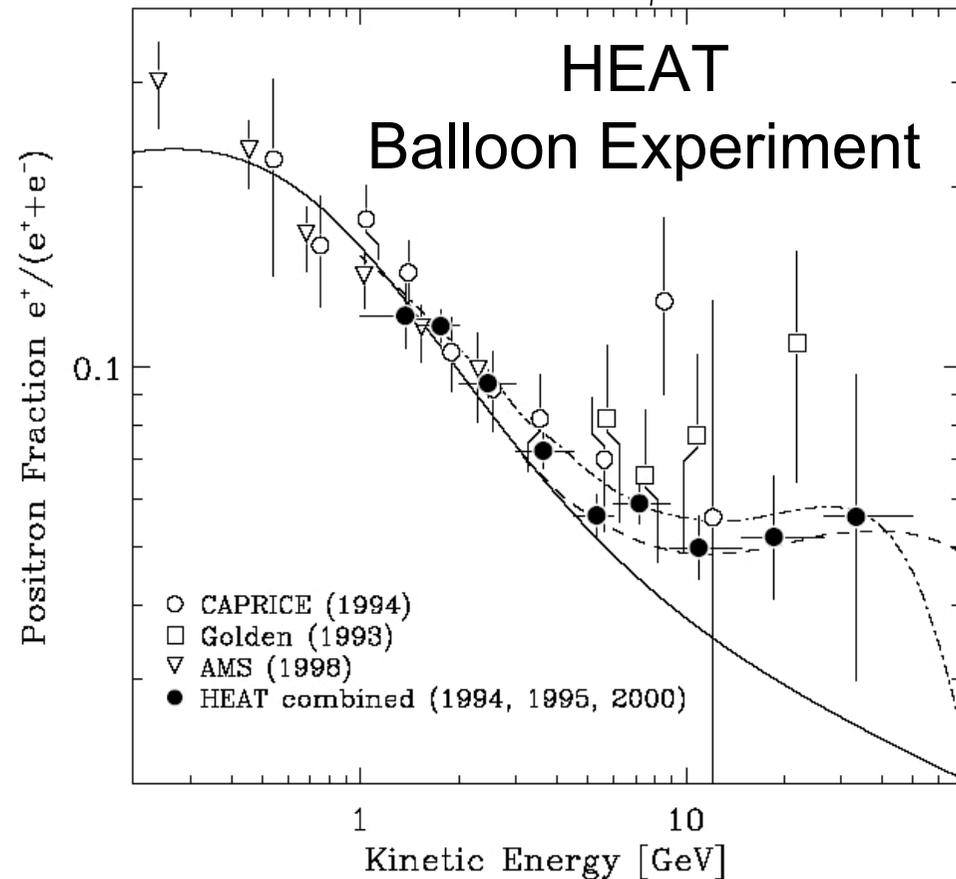
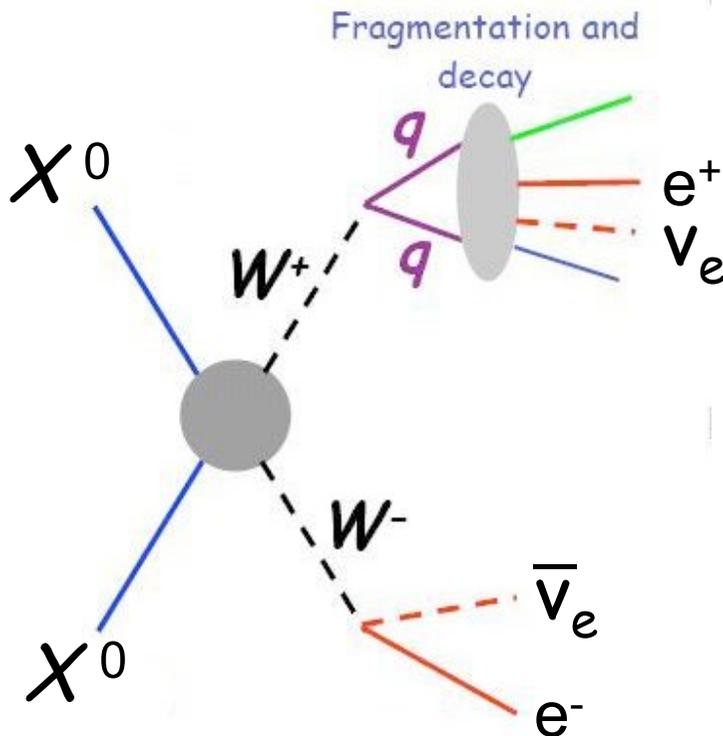
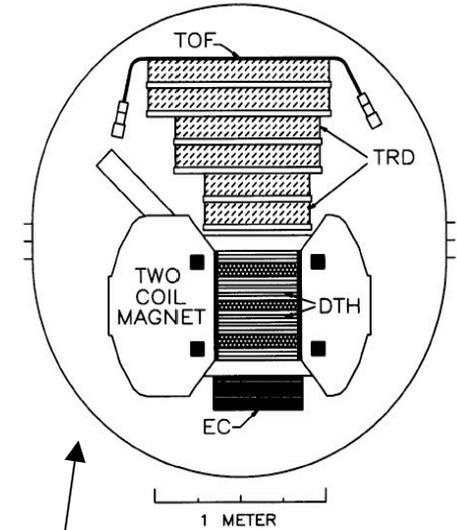
$$\rightarrow \bar{\chi}^0 = \chi^0$$

Direct searches: Scattering off nuclei

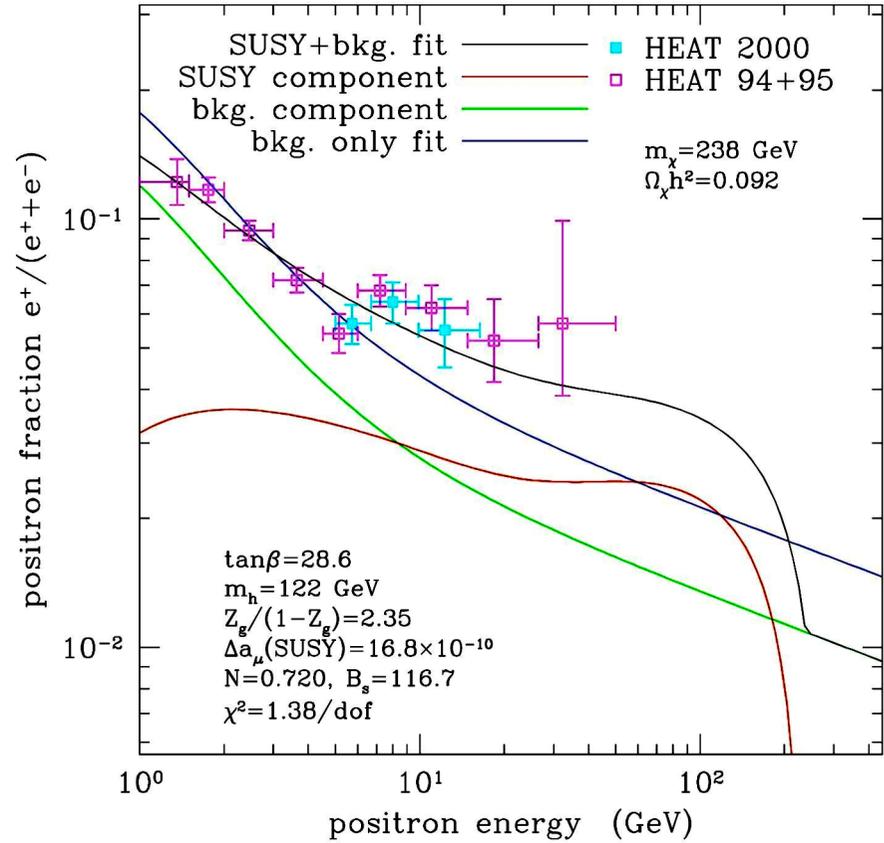
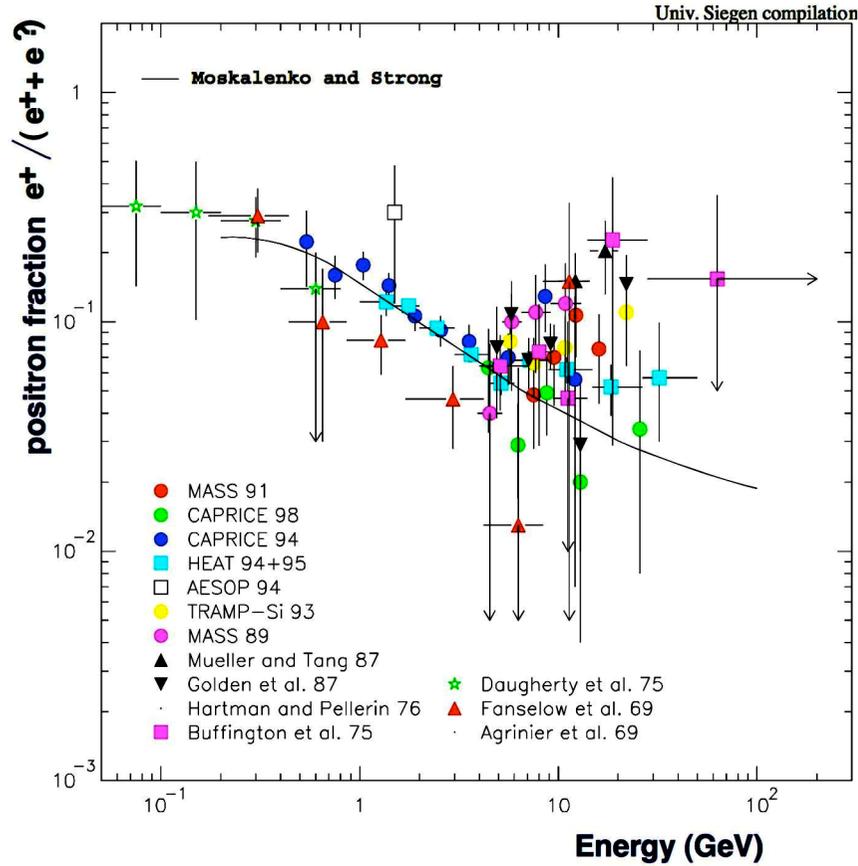
Indirect searches: Look for annihilation products.

Positrons: low intrinsic background

Energy correlated to WIMP mass

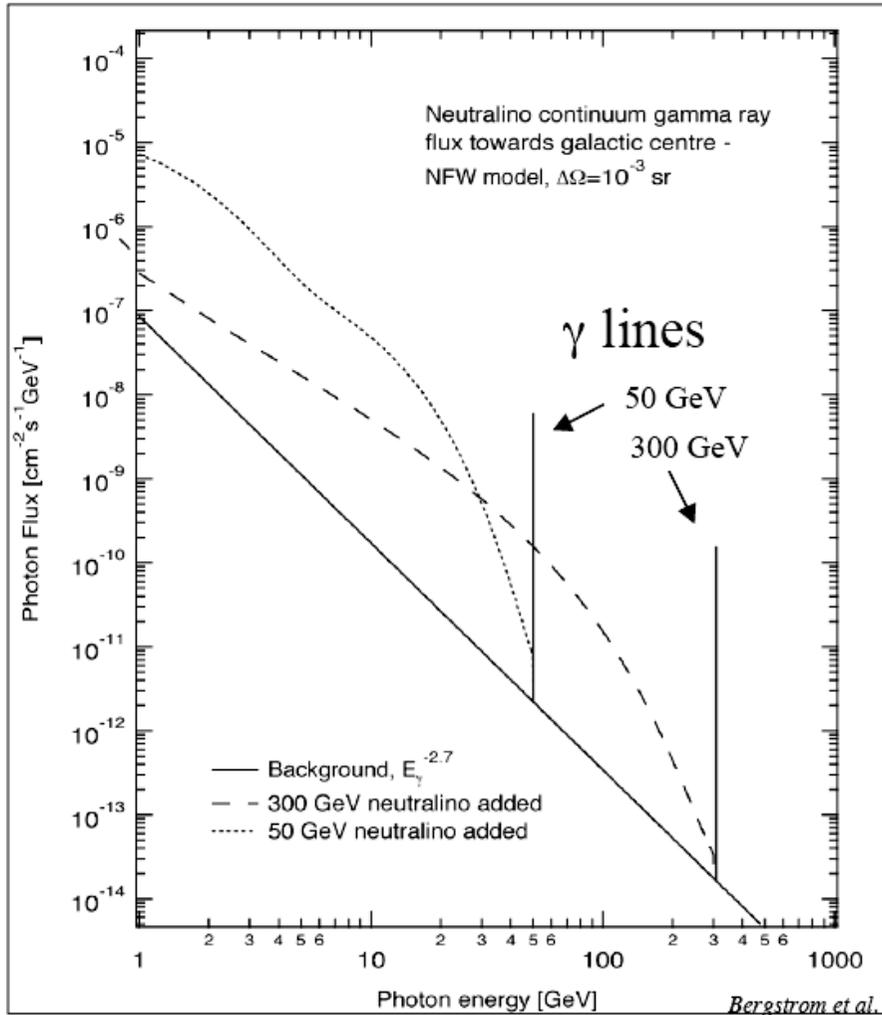


POSITRONI



(Baltz et al., astro-ph/0109318)

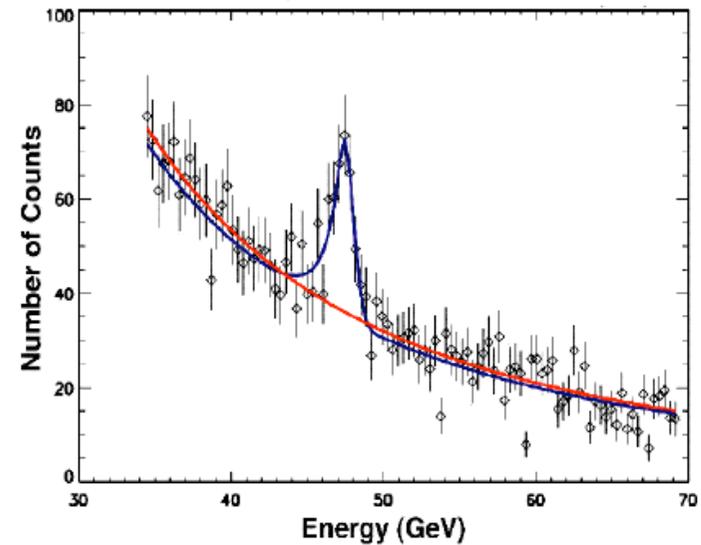
SPETTRO γ DA ANNICHILAZIONE $\chi\chi$



- Two-year scanning mode

↙ Infinite energy resolution

With finite energy resolution



FLUSSO γ

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

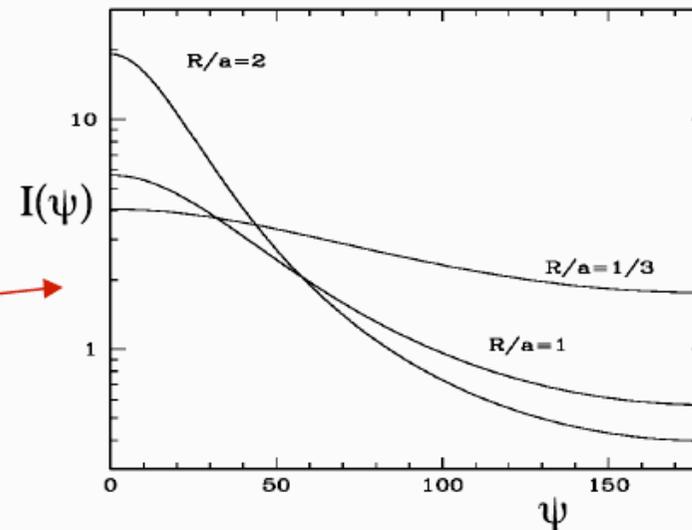
$$\simeq (2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}) (\rho_\chi^{0.4})^2 \frac{(\sigma_{\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma} \cdot v / 10^{-30} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1})}{(m_\chi / 10 \text{ GeV})^2} I(\psi)$$

where:

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

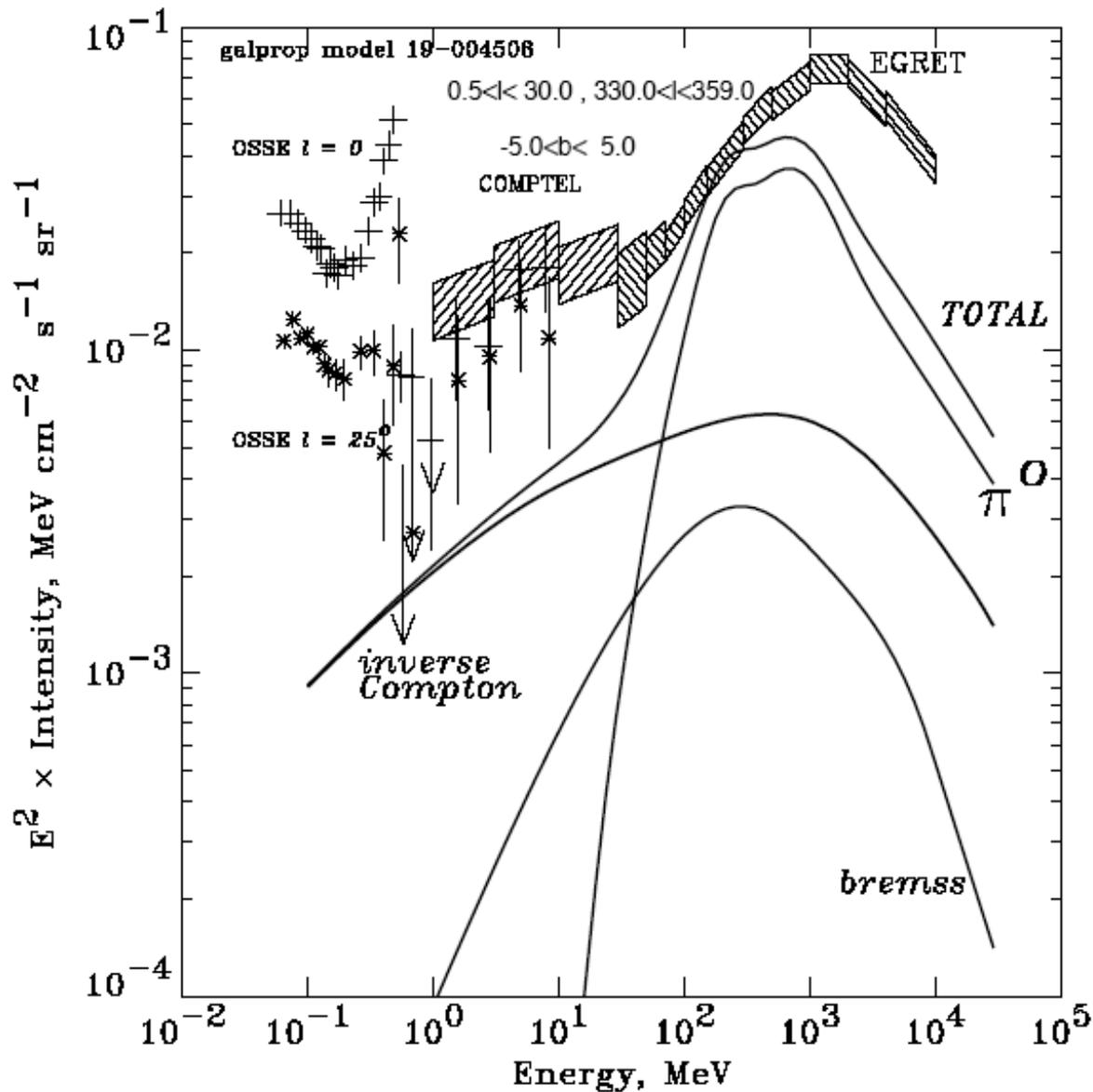
$I(\psi)$ is the angular dependence of the gamma-ray flux.

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)



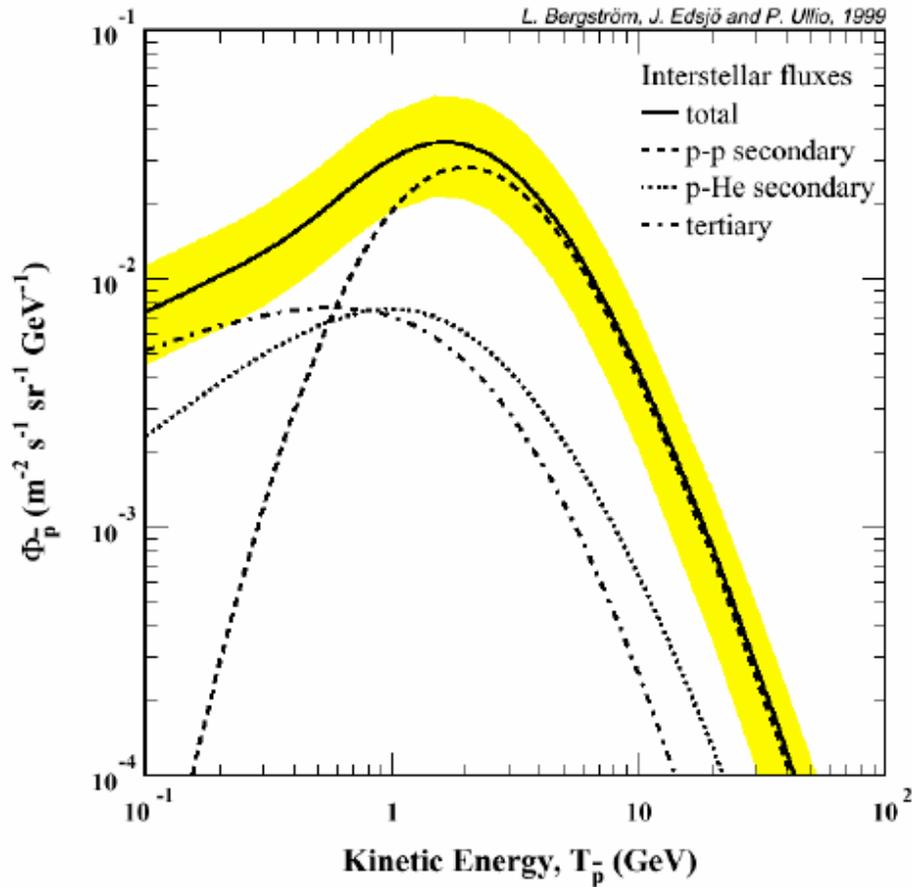
$R \sim 8.5 \text{ kpc}$

SPETTRO γ

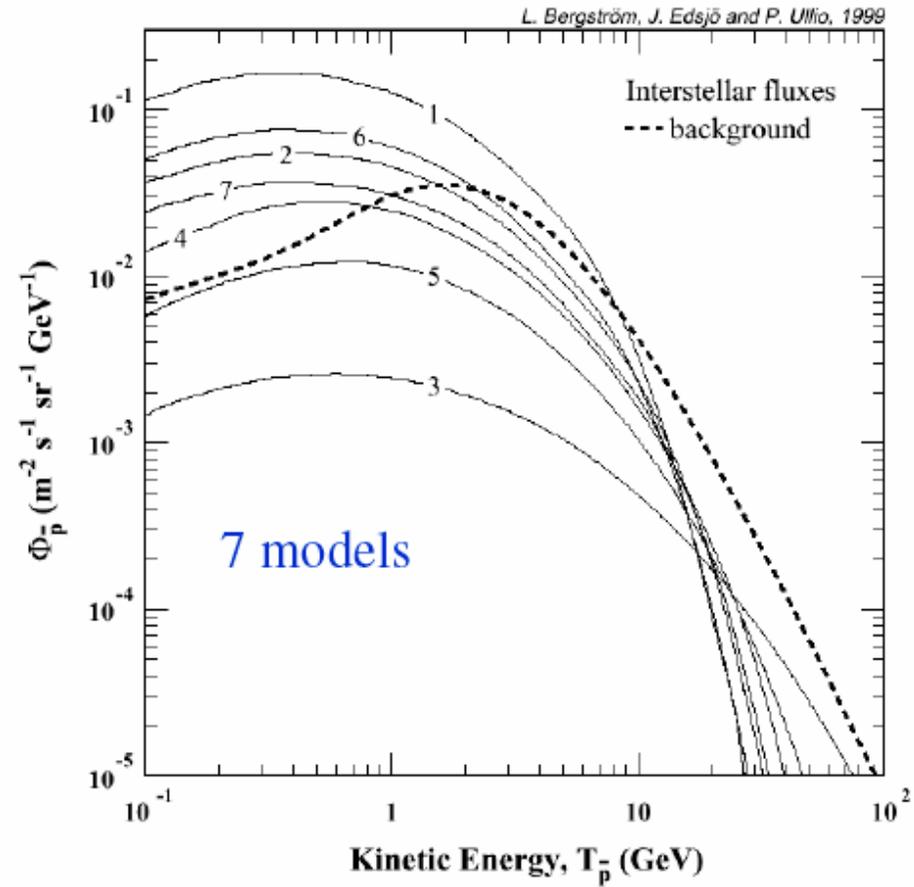


I dati di COMPTEL ed EGRET, γ osservati in una regione prossima al centro della Galassia, sono confrontati con la predizione di un modello standard di propagazione per la radiazione diffusa.

ANTIPROTONI



Background



Primary antiprotons from SUSY χ annihilation

ANTIPROTONI

