

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

Un modello di Materia Oscura

Shervin Nourbakhsh Priscilla Pani

5 Marzo 2010

① Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

La ricerca indiretta

Descrizione degli esperimenti

L'evidenza sperimentale

② I requisiti

③ Una teoria di Dark Matter

La situazione a Luglio 2009

④ Conclusioni e prospettive future

L'ipotesi della Materia Oscura

Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

La ricerca indiretta

Descrizione degli esperimenti

L'evidenza sperimentale

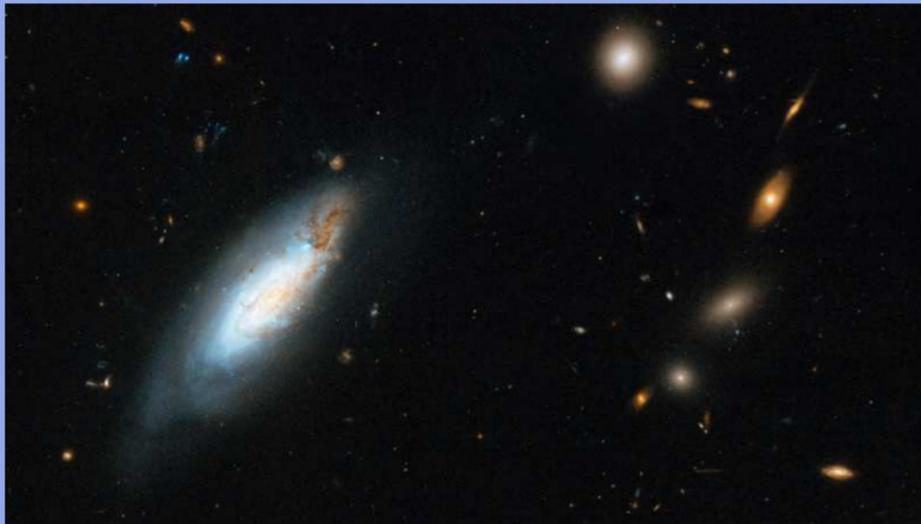
I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

1933 Zwicky ipotizza l'esistenza di **massa** nell'universo **non luminosa**: poichè confrontando la massa stimata attraverso la velocità di rotazione e la luminosità, trova un fattore ammanco di ordine 10^2 .

ingrandimento dell'ammasso di Coma



L'ipotesi della Materia Oscura

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti
La ricerca
indiretta
Descrizione
degli
esperimenti
L'evidenza
sperimentale

I requisiti

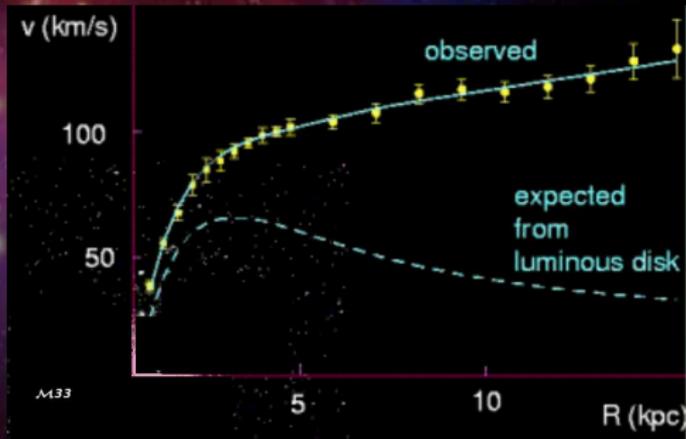
Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

1979 V. Rubin studiò la curva rotazione di alcune galassie trovando un'incongruenza tra la predizione basata sulla massa luminosa e le misure sperimentali.

$$\frac{GmM}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow$$

$$v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$



Il *gravitational lensing*

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

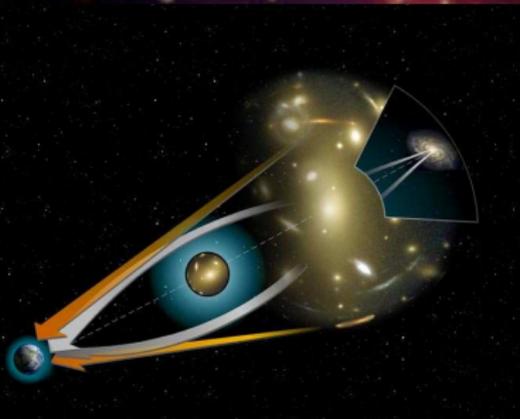
Ricerca
indiretta ed
esperimenti
La ricerca
indiretta
Descrizione
degli
esperimenti
L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

È il processo per il quale un oggetto massivo, curvando lo spaziotempo secondo la relatività generale di Einstein, devia i fotoni provenienti da una sorgente luminosa, distorcendone la posizione rivelata dalla Terra.



Arancione: posizione apparente della sorgente

Bianco: percorso dei fotoni

L'effetto, nelle forme

- **forte** (altamente distorcente)
- **debole** (con piccole distorsioni della posizione)
- **micro** (la sola luminosità della sorgente subisce una variazione)

permette di identificare la posizione di un corpo massivo non luminoso.

L'ipotesi della Materia Oscura

Un modello
di Materia
Oscura

2006 Il satellite Chandra ha studiato l'ammasso 1E 0657-56 prodotto dalla collisione di due ammassi di galassie distinti.

L'immagine è una sovrapposizione dello studio a raggi X dell'ammasso (materia luminosa, gas caldo in maggioranza), in rosso, con quella ottenuta mediante il *gravitational lensing* da Hubble (materia massiva), in blu.



È evidente come la maggior parte della massa non sia determinata dalla materia visibile.

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti
La ricerca
indiretta
Descrizione
degli
esperimenti
L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

La ricerca di Materia Oscura

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta
Descrizione
degli
esperimenti
L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

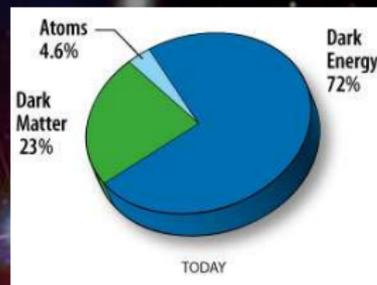
Secondo le più recenti misure,
il nostro universo è composto
per il 23% di Materia Oscura

Essa viene ricercata in modo:

- **Diretto:** CDMS, DAMA
- **Indiretto:** esperimenti su pallone e su satellite, acceleratori (LHC)

Essa può anche essere di diversi tipi:

- barionica
- non barionica
 - calda
 - fredda



La ricerca di Materia Oscura

Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

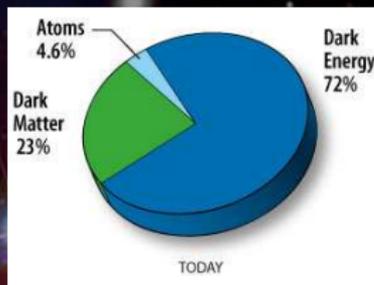
La ricerca indiretta
Descrizione degli esperimenti
L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

Secondo le più recenti misure, il nostro universo è composto per il 23% di Materia Oscura



Essa viene ricercata in modo:

- **Diretto:** CDMS, DAMA
- **Indiretto:** esperimenti su pallone e su satellite, acceleratori (LHC)

Essa può anche essere di diversi tipi:

- barionica
- non barionica
 - calda
 - **fredda**

Il miglior candidato è una *Weakly Interactive Massive Particle (WIMP)*

La ricerca indiretta: lo spettro dei positroni

Uno dei più recenti risultati ottenuti dagli esperimenti su satellite è una deviazione dello spettro di positroni ed elettroni galattici dai modelli di produzione

L'origine di e^\pm può essere di natura:

- **secondaria:**
 - diffusione di nucleoni: $p + p \rightarrow e^\pm + X$
 - produzione da parte di pulsar e supernovae remnants
- **primaria:** processi di annichilazione



Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

La ricerca indiretta

Descrizione degli esperimenti

L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

La ricerca indiretta: lo spettro dei positroni

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta

Descrizione
degli
esperimenti

L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

Numerosi esperimenti hanno effettuato misure che rappresentano o possono essere correlate con una deviazione dello spettro dei positroni rispetto ai correnti modelli di produzione secondaria

- 1 *PAMELA* (2008)
- 2 *ATIC* (2008)
- 3 *WMAP* (2001)
- 4 *EGRET* (1996)



P A M E L A

Payload for Antimatter Matter Exploration & Light-nuclei Astrophysics

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta

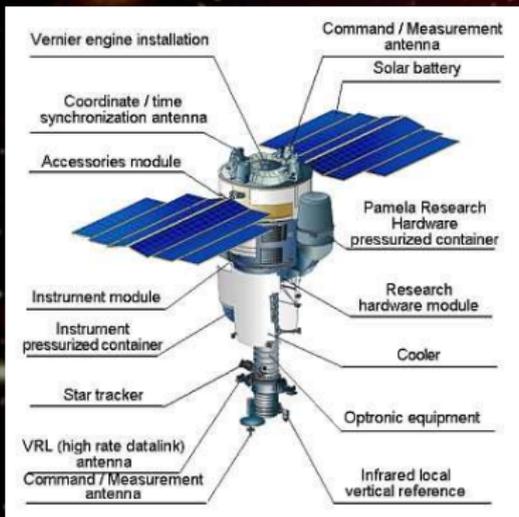
Descrizione
degli
esperimenti

L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future



Esperimento su satellite lanciato
nel 2006 in orbita a 500 km
Alcuni esempi di obiettivi
scientifici:

- Ricerca di antinuclei prodotti in stelle di antimateria
- Misure di particelle (e per la prima volta e^+) associata ad eruzioni solari
- Misure di precisione dei flussi di p , \bar{p} , e^+ , e^-



PAMELA

Payload for Antimatter Matter Exploration & Light-nuclei Astrophysics

Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

La ricerca indiretta

Descrizione degli esperimenti

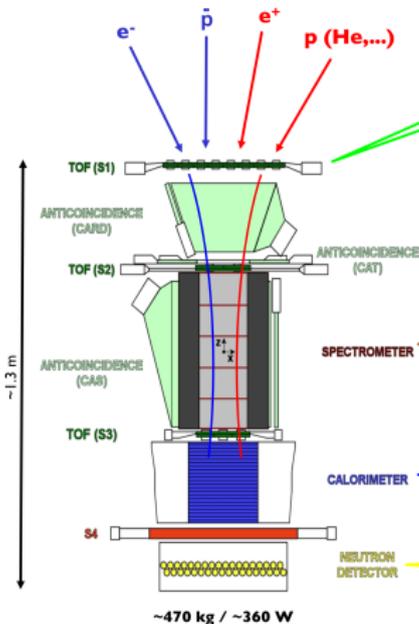
L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

P. Picozza et al., Astroparticle Physics 27 (2007) 296.



Trigger, ToF, dE/dx

- Plastic scintillator (8 mm) + PMT
- ToF resolution ~ 300 ps (S1-3 ToF > 3 ns)
- lepton-hadron separation < 1 GeV/c

Sign of charge, rigidity, dE/dx

- Permanent magnet, 0.43 T - 21.5 cm²sr
- 6 planes double-sided silicon strip detectors (300 μ m)
- 3 μ m resolution in bending view MDR
- ~ 1000 GV (6 plane) ~ 600 GV (5 plane)

Electron energy, dE/dx, lepton-hadron separation

- 44 'Si-x / W / Si-y' planes (380 μ m)
- $16.3 X_0 / 0.6 \lambda_L$
- dE/E ~ 5.5 % (10 - 300 GeV)
- Self trigger > 300 GeV / 600 cm²sr

Lepton-hadron separation

- 36 ³He counters
- ³He(n,p)T; E_p = 780 keV
- 1 cm thick poly + Cd moderator
- 200 μ s collection time

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta

Descrizione
degli
esperimenti

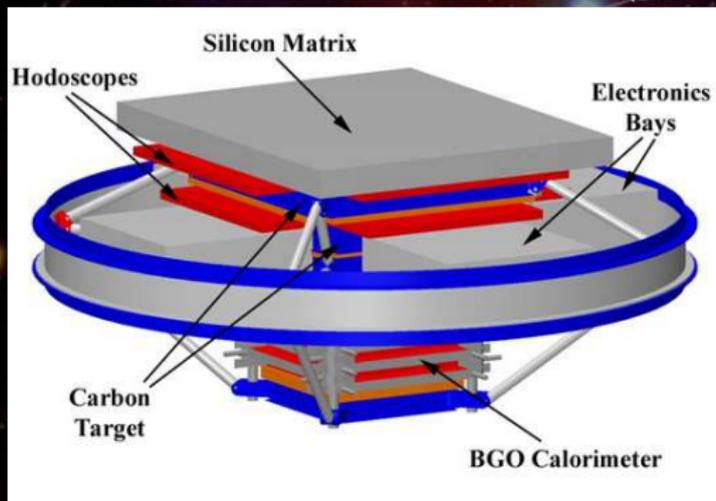
L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

Esperimento su pallone aerostatico per la misura di energia
dei cosmici tra 50 GeV e 100 TeV (protoni e nuclei).



Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta

Descrizione
degli
esperimenti

L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

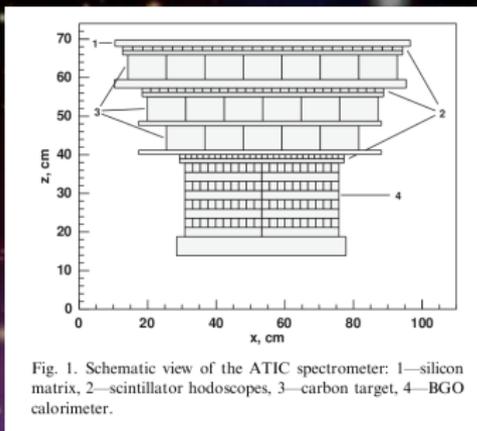
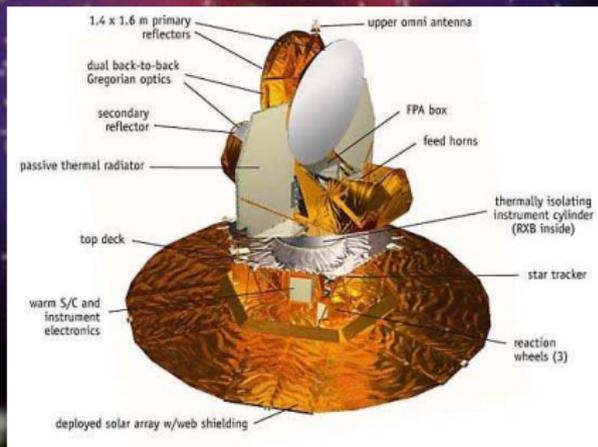


Fig. 1. Schematic view of the ATIC spectrometer: 1—silicon matrix, 2—scintillator hodoscopes, 3—carbon target, 4—BGO calorimeter.

- la *matrice di silicio* permette l'identificazione della carica della particella (al MIP) mediante l'energia rilasciata per ionizzazione.
- i 3 strati di *carbonio* servono da targhetta mentre i 3 strati di *scintillatore plastico*, con cui sono intervallati, per il trigger.
- il *calorimetro (a scintillazione)* è composto di 10 strati di BGO, la cui elevata densità permette di contenere interamente uno sciame elettromagnetico in 25 cm (1.1 lunghezze di interazione, 22 lunghezze di radiazione)

Esperimento su satellite lanciato nel 2001

- È un radiometro differenziale composto di 2 telescopi che focalizzano le microonde da due punti distanti ca. 140°
- È posizionato nel punto lagrangiano L2 dell'orbita Terra-Sole, che offre allo strumento la possibilità di osservare il cielo senza che Terra, Sole e Luna ostacolino la sua visuale
- Attraverso i picchi dello spettro di temperatura di WMAP si ottiene la densità relativa di p e materia oscura



Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta

Descrizione
degli
esperimenti

L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future



W M A P

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

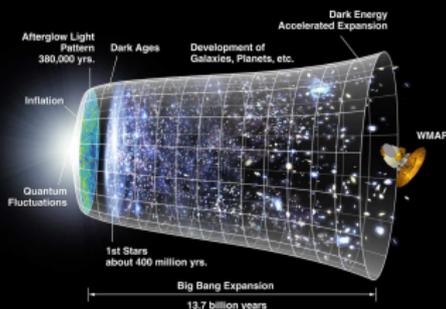
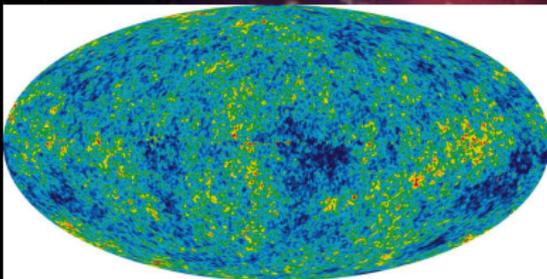
Ricerca indiretta ed esperimenti
La ricerca indiretta
Descrizione degli esperimenti
L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

Ha effettuato uno studio della radiazione di fondo cosmico (CMB) le cui anisotropie e fluttuazioni ci permettono di ottenere numerose informazioni sull'universo primordiale.



WMAP è sensibile a radiazione di sincrotrone e di frenamento prodotte da elettroni e positroni nella galassia.



Un modello
di Materia
Oscura

Telescopio su satellite (terzo catalogo 1991-1996)

Sommario

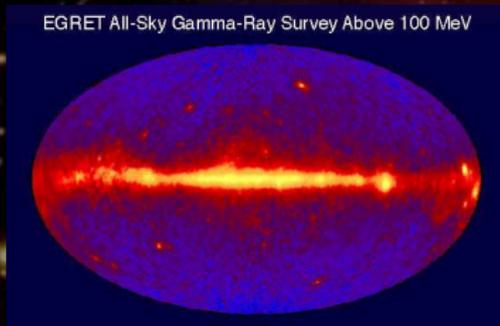
Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti
La ricerca
indiretta
Descrizione
degli
esperimenti
L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future



EGRET ha effettuato una
scansione completa del cielo
scoprendo numerose sorgenti
astrofisiche

Rivelazione di raggi gamma
tra 20 MeV e 30 GeV al 20%
di risoluzione energetica nella
zona centrale dell'intervallo di
funzionamento.

Il rivelatore:

- Camere a scintilla
- Cristalli a scintillazione (NaI(Tl))
- Scintillatori plastici



Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta

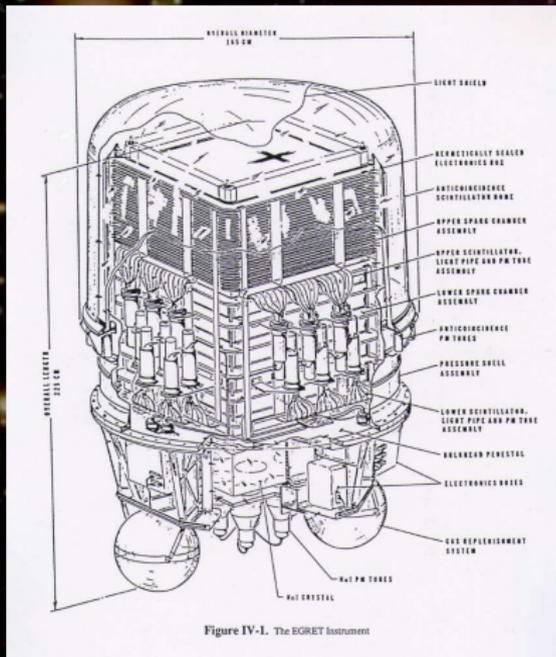
Descrizione
degli
esperimenti

L'evidenza
sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future



- un γ sopra i 200 MeV ha il 35% di probabilità di convertire nella parte alta del rivelatore
- attivazione del Trigger:
 - * il TOF riconosce almeno una delle 2 particelle come e^\pm proveniente dall'alto verso il basso
 - * nessun segnale nel sistema di anticoincidenza
- l'energia del γ viene misurata principalmente mediante il cristallo a scintillazione NaI(Tl)



Flusso di \bar{p} e e^+ misurato da PAMELA

Un modello di Materia Oscura

Lo spettro degli antiprotoni è ben riprodotto da modelli di produzione secondaria.

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

La ricerca indiretta

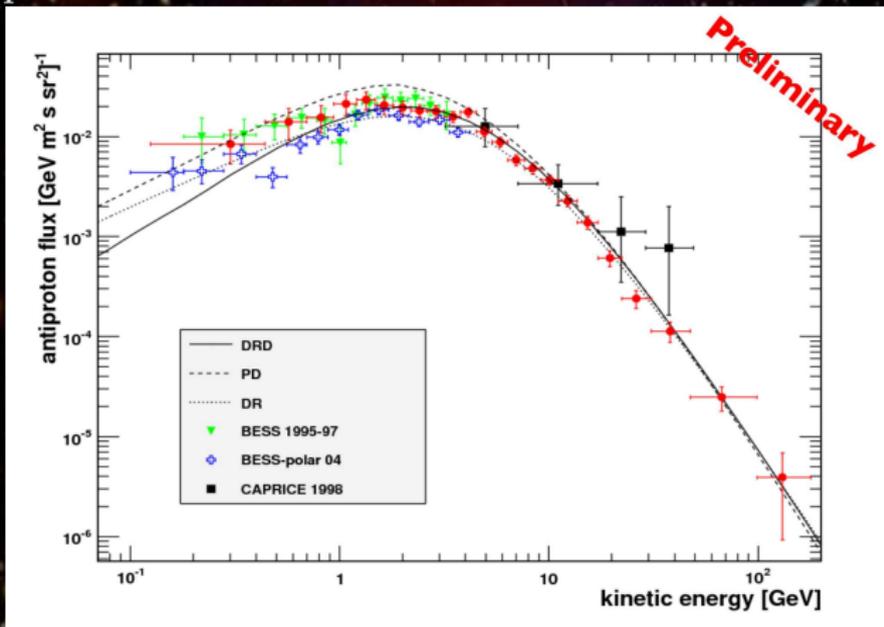
Descrizione degli esperimenti

L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

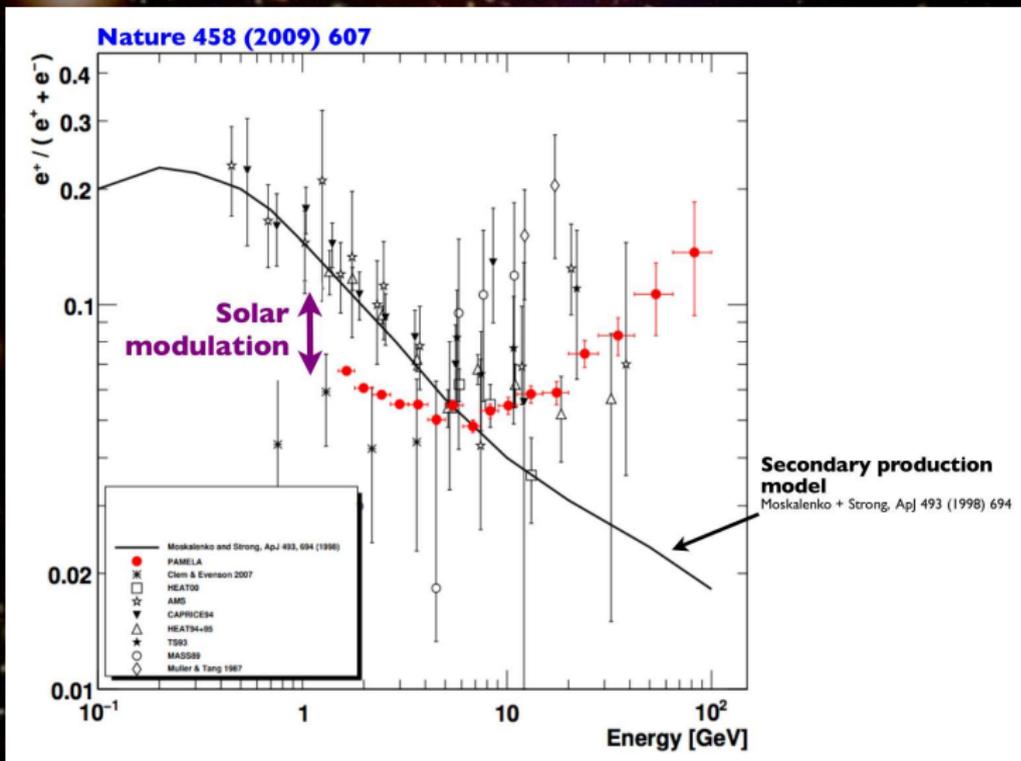
Conclusioni e prospettive future





Flusso di \bar{p} e e^+ misurato da PAMELA

Lo spettro dei positroni invece non è consistente con modelli di produzione secondaria.



Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

La ricerca indiretta

Descrizione degli esperimenti

L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

Flusso di $e^+ + e^-$ misurato da ATIC

Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti

La ricerca indiretta

Descrizione degli esperimenti

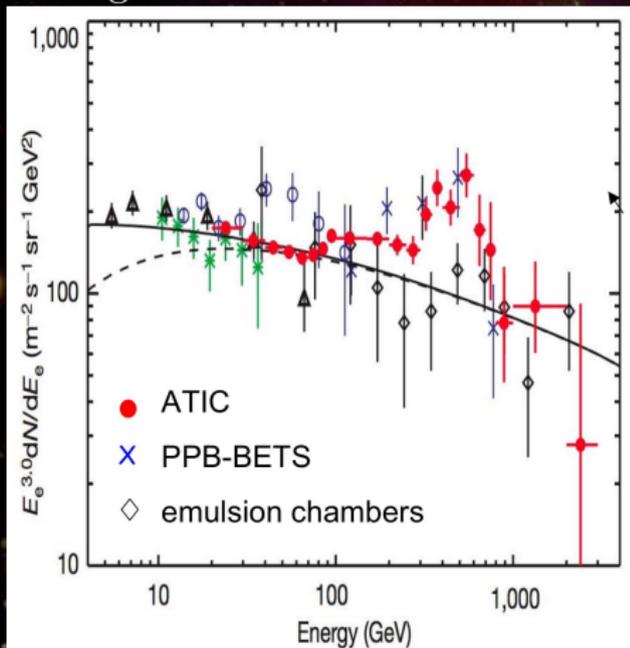
L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

ATIC non distingue gli elettroni dai positroni, ma manifesta un eccesso nel flusso complessivo, con una veloce ridiscesa del segnale.



Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca
indiretta ed
esperimenti

La ricerca
indiretta

Descrizione
degli
esperimenti

**L'evidenza
sperimentale**

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future

I dati sperimentali dell'emissione di microonde dal centro galattico mostrano una componente diffusa che è stata interpretata come radiazione di sincrotrone di e^\pm provenienti dal centro della galassia.

Un modello di Materia Oscura

Sommario

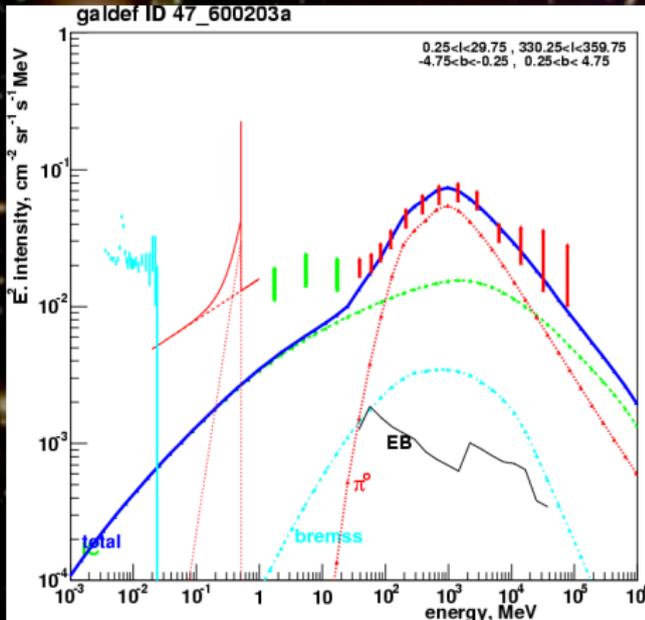
Introduzione all'esistenza della DM

Ricerca indiretta ed esperimenti
 La ricerca indiretta
 Descrizione degli esperimenti
 L'evidenza sperimentale

I requisiti

Una teoria

Conclusioni e prospettive future



- inverse Compton
- π^0
- brehmstralung

ha mostrato un eccesso di γ attribuiti a compton inverso di e^\pm sui fotoni della CMB

Requisiti necessari per una spiegazione unificata

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

Un'ipotesi di Materia Oscura, per spiegare in maniera coerente tutti i dati sperimentali fin qui evidenziati, deve necessariamente giustificare:

- $\sigma_{annichilazione} \approx 10^2 \cdot \sigma_{therm}$
- ***Decadimento filoleptonico della particella:*** questo esclude decadimenti attraverso i bosoni pesanti del modello standard
- ***Piccola ampiezza di decadimento adronica,*** dai limiti posti dallo studio dei γ (π^0) e dai \bar{p} di PAMELA

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

La teoria prevede:

- 1 Una particella di Materia Oscura fredda, ovvero non relativistica
 - 2 L'introduzione di un nuovo bosone mediatore, con scala di massa incognita
 - 3 L'innalzamento alla Sommerfeld * della sezione d'urto di annichilazione (Sommerfeld enhancement) a patto che la scala di massa del nuovo mediatore sia $m_\phi \leq \text{GeV}$
 - 4 Piccola interazione con il modello standard che gli permetta di decadere in leptoni, dal momento che i decadimenti adronici sono soppressi dalla piccola massa
- * da un'idea di Alessandro Strumia (INFN di Pisa)

Sommerfeld enhancement

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

È un effetto standard di meccanica quantistica non relativistica.

Se si considera una sezione d'urto $\sigma^{(0)}$ dovuta ad una Hamiltoniana di interazione H_{ann} , un aggiuntivo potenziale di interazione V , contribuirà alla sezione d'urto aumentandola per il semplice fatto di aver incrementato la sovrapposizione tra le sezioni d'urto delle particelle interagenti.

Sommerfeld enhancement

Caso semplice: una particella in potenziale centrale

Un modello
di Materia
Oscura

- particella libera \rightarrow onda piana
- direzione di propagazione z
- impulso k

$$\psi_k^{(0)}(\vec{x}) = e^{ikz}$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Sommerfeld enhancement

Caso semplice: una particella in potenziale centrale

Un modello di Materia Oscura

- particella libera \rightarrow onda piana
- direzione di propagazione z
- impulso k

$$\psi_k^{(0)}(\vec{x}) = e^{ikz}$$

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

I requisiti

Una teoria

La situazione a Luglio 2009

Conclusioni e prospettive future



$$H_{ann} = U_{ann} \delta^3(\vec{r})$$
$$\sigma^{(0)} \propto |\psi^{(0)}(0)|^2$$

Sommerfeld enhancement

Caso semplice: una particella in potenziale centrale

Un modello
di Materia
Oscura

- particella libera \rightarrow onda piana
- direzione di propagazione z
- impulso k

$$\psi_k^{(0)}(\vec{x}) = e^{ikz}$$



$$H_{ann} = U_{ann} \delta^3(\vec{r})$$
$$\sigma^{(0)} \propto |\psi^{(0)}(0)|^2$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Se si aggiunge un potenziale di interazione $V(r) \rightarrow$ modifica $\psi(0)$

$$\sigma = \sigma^{(0)} \frac{|\psi(0)|^2}{|\psi^{(0)}(0)|^2} = \sigma^{(0)} S_k \quad \text{fattore di } \textit{enhancement}$$

Sommerfeld enhancement

Determinazione dell'enhancement

Un modello
di Materia
Oscura

$$\sigma = \sigma^{(0)} S_k \quad S_k = \frac{|\psi_k(0)|^2}{|\psi_k^{(0)}(0)|^2}$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Per determinare S_k devo determinare la $\psi_k(0)$ modificata dal potenziale $V(r)$ e quindi trovare la $\psi_k(\vec{r})$ che soddisfi all'equazione di Schroedinger:

$$-\frac{1}{2M} \nabla^2 \psi_k + V(r) \psi_k = \frac{k^2}{2M} \psi_k$$

Sommerfeld enhancement

Determinazione dell'enhancement

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

$$\sigma = \sigma^{(0)} S_k \quad S_k = \frac{|\psi_k(0)|^2}{|\psi_k^{(0)}(0)|^2}$$

Per determinare S_k devo determinare la $\psi_k(0)$ modificata dal potenziale $V(r)$ e quindi trovare la $\psi_k(\vec{r})$ che soddisfi all'equazione di Schroedinger:

$$-\frac{1}{2M} \nabla^2 \psi_k + V(r) \psi_k = \frac{k^2}{2M} \psi_k$$

Per cercarne la forma esplicita sfrutto:

- simmetria in ϕ
 - la condizione al contorno
- $$\psi_k \rightarrow e^{ikz} + f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r}$$



Sommerfeld enhancement

Equazione di Schroedinger unidimensionale

Un modello
di Materia
Oscura

● mi porto in coordinate sferiche

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future



Sommerfeld enhancement

Equazione di Schroedinger unidimensionale

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

- mi porto in coordinate sferiche
- scompongo la ψ in autostati di ℓ e la fattorizzo in una parte radiale $R_{k\ell}$ ed una angolare per ogni ℓ :

$$\psi_k = \sum_{\ell} A_{\ell} P_{\ell}(\cos(\theta)) R_{k\ell}(r)$$

Sommerfeld enhancement

Equazione di Schroedinger unidimensionale

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

- mi porto in coordinate sferiche
- scompongo la ψ in autostati di ℓ e la fattorizzo in una parte radiale $R_{k\ell}$ ed una angolare per ogni ℓ :
$$\psi_k = \sum_{\ell} A_{\ell} P_{\ell}(\cos(\theta)) R_{k\ell}(r)$$
- assumo che il potenziale $V(r)$ cresca non più velocemente del potenziale coulombiano $\rightarrow R_{k\ell} \sim r^{\ell} \rightarrow R_{k,\ell=0}$

Sommerfeld enhancement

Equazione di Schroedinger unidimensionale

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

- mi porto in coordinate sferiche
- scompongo la ψ in autostati di ℓ e la fattorizzo in una parte radiale $R_{k\ell}$ ed una angolare per ogni ℓ :

$$\psi_k = \sum_{\ell} A_{\ell} P_{\ell}(\cos(\theta)) R_{k\ell}(r)$$

- assumo che il potenziale $V(r)$ cresca non più velocemente del potenziale coulombiano $\rightarrow R_{k\ell} \sim r^{\ell} \rightarrow R_{k,\ell=0}$

Pertanto l'unica componente da determinare della funzione d'onda ψ_k è la componente radiale $R_{k,\ell=0}$ della forma $\frac{\chi_k}{r}$

$$-\frac{1}{2M} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \chi_k + V(r) \chi_k = \frac{k^2}{2M} \chi_k$$

Sommerfeld enhancement

Equazione di Schroedinger unidimensionale

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

- mi porto in coordinate sferiche
- scompongo la ψ in autostati di ℓ e la fattorizzo in una parte radiale $R_{k\ell}$ ed una angolare per ogni ℓ :
$$\psi_k = \sum_{\ell} A_{\ell} P_{\ell}(\cos(\theta)) R_{k\ell}(r)$$
- assumo che il potenziale $V(r)$ cresca non più velocemente del potenziale coulombiano $\rightarrow R_{k\ell} \sim r^{\ell} \rightarrow R_{k,\ell=0}$

Pertanto l'unica componente da determinare della funzione d'onda ψ_k è la componente radiale $R_{k,\ell=0}$ della forma $\frac{\chi_k}{r}$

$$-\frac{1}{2M} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \chi_k + V(r) \chi_k = \frac{k^2}{2M} \chi_k$$

Enhancement factor

$$S_k = \left| \frac{\chi_k(0)}{k} \right|$$

Caso di potenziale Coulombiano

Un modello
di Materia
Oscura

$$V(r) = -\frac{\alpha}{2r}$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Usando le unità di Bohr: $r = \frac{1}{\alpha M} x$ e ponendo $\epsilon_v = \frac{v}{\alpha}$

L'equazione di Schroedinger diviene

$$-\frac{1}{2M} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \chi_k + V(r) \chi_k = \frac{k^2}{2M} \chi_k \rightarrow -\chi'' - \frac{1}{x} \chi = \epsilon_v^2 \chi$$

Caso di potenziale Coulombiano

Un modello
di Materia
Oscura

$$V(r) = -\frac{\alpha}{2r}$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Usando le unità di Bohr: $r = \frac{1}{\alpha M} x$ e ponendo $\epsilon_v = \frac{v}{\alpha}$

L'equazione di Schroedinger diviene

$$-\frac{1}{2M} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \chi_k + V(r) \chi_k = \frac{k^2}{2M} \chi_k \rightarrow -\chi'' - \frac{1}{x} \chi = \epsilon_v^2 \chi$$

Enhancement factor

$$S_k = \left| \frac{\chi_k(0)}{k} \right| = \left| \frac{\frac{\pi}{\sqrt{\epsilon_v^2}}}{1 - e^{\frac{-\pi}{\sqrt{\epsilon_v^2}}}} \right| \rightarrow \pi \alpha \frac{1}{v}$$

Caso di potenziale di Yukawa

Un modello
di Materia
Oscura

$$V(r) = -\frac{\alpha}{2r} e^{-m_\phi r} \quad \text{dove } m_\phi \text{ è la massa del mediatore.}$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Caso di potenziale di Yukawa

Un modello
di Materia
Oscura

$$V(r) = -\frac{\alpha}{2r} e^{-m_\phi r} \quad \text{dove } m_\phi \text{ è la massa del mediatore.}$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Usando le unità di Bohr: $r = \frac{1}{\alpha M} x$ e ponendo $\epsilon_\phi = \frac{m_\phi}{\alpha M}$

L'equazione di Schroedinger diviene

$$-\frac{1}{2M} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \chi_k + V(r) \chi_k = \frac{k^2}{2M} \chi_k \rightarrow -\chi'' - \frac{1}{x} e^{-\epsilon_\phi x} \chi = \epsilon_v^2 \chi \rightarrow$$
$$-\chi'' - \frac{1}{x} \chi = (\epsilon_\phi + \epsilon_v^2) \chi$$

Caso di potenziale di Yukawa

Un modello
di Materia
Oscura

$$V(r) = -\frac{\alpha}{2r} e^{-m_\phi r} \quad \text{dove } m_\phi \text{ è la massa del mediatore.}$$

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Usando le unità di Bohr: $r = \frac{1}{\alpha M} x$ e ponendo $\epsilon_\phi = \frac{m_\phi}{\alpha M}$

L'equazione di Schroedinger diviene

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2M} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \chi_k + V(r) \chi_k &= \frac{k^2}{2M} \chi_k \rightarrow -\chi'' - \frac{1}{x} e^{-\epsilon_\phi x} \chi = \epsilon_v^2 \chi \rightarrow \\ -\chi'' - \frac{1}{x} \chi &= (\epsilon_\phi + \epsilon_v^2) \chi \end{aligned}$$

Enhancement factor

$$S_k = \left| \frac{\chi_k(0)}{k} \right| = \left| \frac{\frac{\pi}{\sqrt{\epsilon_v^2 + \epsilon_\phi}}}{1 - e^{\frac{-\pi}{\sqrt{\epsilon_v^2 + \epsilon_\phi}}}} \right| \rightarrow \left| \frac{\frac{\pi}{\sqrt{\epsilon_\phi}}}{1 - e^{\frac{-\pi}{\sqrt{\epsilon_\phi}}}} \right|$$

Mediatore

- **massivo** $m_\phi > 0$
dal Sommerfeld enhancement

$$\sigma \propto \frac{1}{v} \quad \text{per} \quad \frac{v}{c} \gtrsim \frac{m_\phi}{m_\chi}$$

per velocità inferiori l'enhancement satura a $\frac{m_\chi}{m_\phi}$

- **leggero** $m_\phi \sim \text{GeV}$
 - i canali adronici non devono essere cinematicamente permessi
 - l'enhancement è inversamente proporzionale alla massa del mediatore.

$\chi\chi \rightarrow \phi\phi$  $\begin{cases} \text{decadimenti leptonici} \\ \text{permette un Sommerfeld enhancement} \\ \text{sufficiente a spiegare i dati} \end{cases}$

I dati di Fermi ed una teoria alternativa

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

La teoria presentata è estremamente completa, dal momento che sotto alcune ipotesi aggiuntive di non abelianità del gruppo di simmetria del nuovo bosone mediatore permette di spiegare anche i dati di DAMA.

I dati di Fermi ed una teoria alternativa

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

La teoria presentata è estremamente completa, dal momento che sotto alcune ipotesi aggiuntive di non abelianità del gruppo di simmetria del nuovo bosone mediatore permette di spiegare anche i dati di DAMA.

Ciononostante le recenti misure di Fermi/GLAST (Luglio 2009) non confermano lo spettro di elettroni e positroni di ATIC, offrendo una spiegazione meno intrigante alla fenomenologia presente.

Un modello di Materia Oscura

Fermi è un rivelatore a grande campo visivo che provvede ad una scansione completa del cielo ogni 3 ore

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

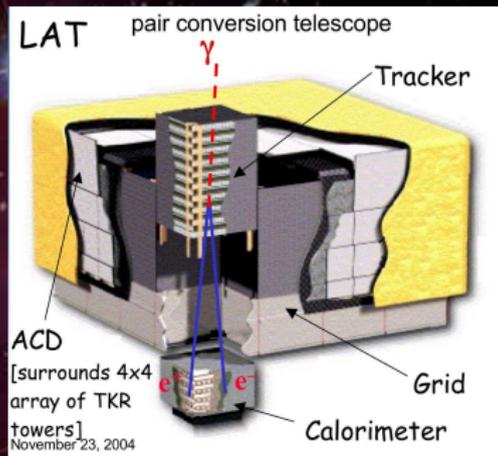
I requisiti

Una teoria

La situazione a Luglio 2009

Conclusioni e prospettive future

- Tracker/Converter: per la conversione del γ
 - x rivelatore a strip di silicio
 - x elevata granularità
 - x elevata precisione
- Calorimetro
 - x a cristalli di Cs
 - x 8.6 lunghezze di radiazione
 - x permette la distinzione tra cascata adronica ed elettromagnetica



- Rivestimento di anticoincidenza (efficienza di rivelazione:0.9997)

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

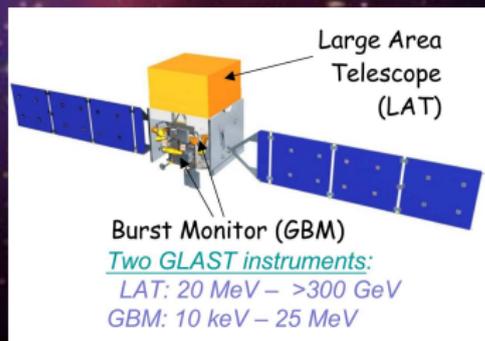
Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

È stato lanciato l'11 Giugno 2008 ed ha già ottenuto numerosi risultati:

- è dotato di monitor per la rivelazione di Gamma-Ray Burst
- ha confermato in pochi giorni la presenza di pulsar scoperte da EGRET in anni di misura.
- **ha scoperto numerose Pulsar, alcune che emettono esclusivamente in raggi gamma.**



Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

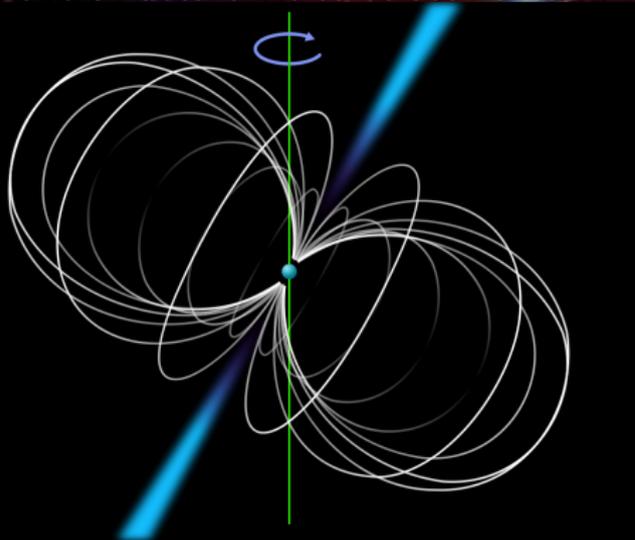
I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future

Sono stelle di neutroni generate dall'esplosione di supernovae che, per le loro piccole dimensioni, per conservare il momento angolare, iniziano a ruotare molto velocemente.



I jet generati dal forte campo magnetico espellono dalla stella, oltre ai γ , particelle fortemente accelerate.

Un modello di Materia Oscura

Sommario

Introduzione all'esistenza della DM

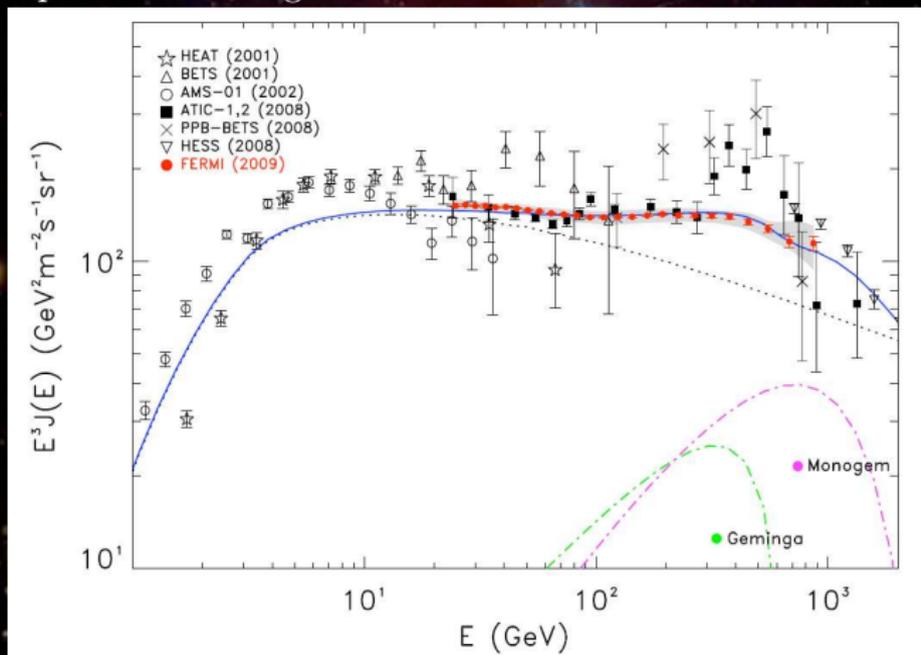
I requisiti

Una teoria

La situazione a Luglio 2009

Conclusioni e prospettive future

Tenendo in considerazione le nuove Pulsar scoperte da Fermi nei primi 9 mesi di raccolta dati, è possibile riprodurre lo spettro di fermi e quello di PAMELA considerando esclusivamente elettroni e positroni di origine secondaria.



L'eccesso di PAMELA con le pulsar

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

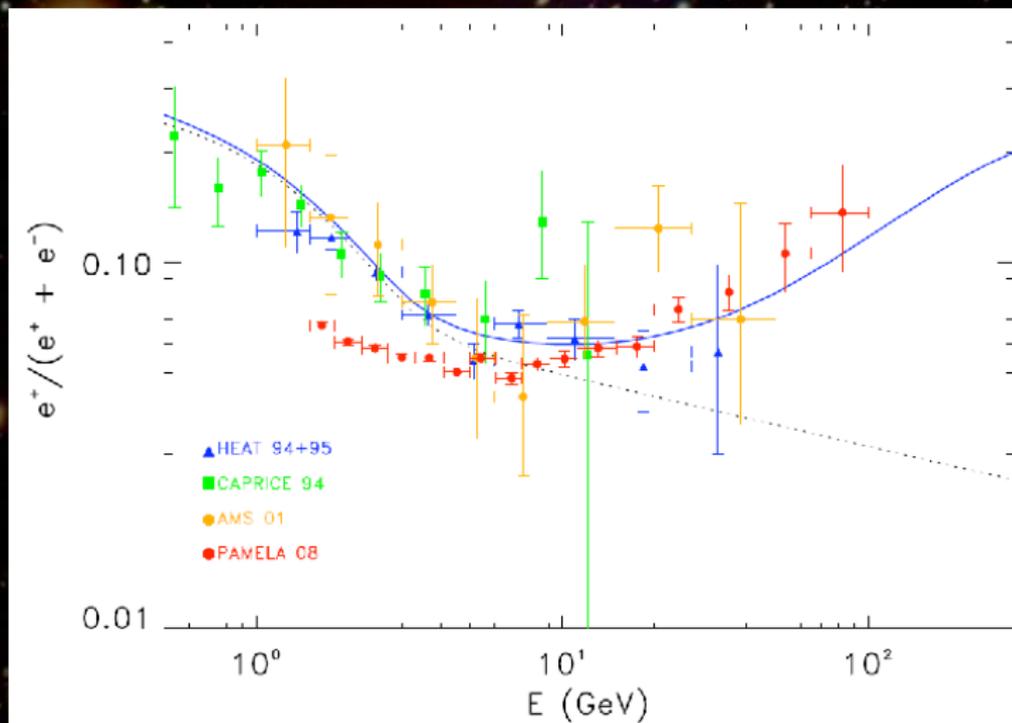
Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

La
situazione a
Luglio 2009

Conclusioni
e
prospettive
future



Conclusioni

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

- La presenza di materia oscura, è accertata da diverse prove sperimentali.
- è non relativistica e non barionica.
- La plausibile presenza di forze attrattive tra di esse rende necessario considerare il meccanismo di Sommerfeld enhancement nei modelli di annichilazione e quindi può essere un elemento importante in una teoria di materia oscura.
- Alla luce dei dati raccolti da Fermi/GLAST, gli eccessi nel flusso di positroni registrato dai precedenti esperimenti sembra poter essere spiegato senza ipotesi di materia oscura, la cui natura resta ancora un intrigante problema aperto.

Nel prossimo futuro ... LHC

Un modello
di Materia
Oscura

Sommario

Introduzione
all'esistenza
della DM

I requisiti

Una teoria

Conclusioni
e
prospettive
future

Numerose particelle predette da svariate teorie sono ottimi candidati di materia oscura.

- il neutralino o la LSP
- neutrini leggeri inerti
- neutrini massivi
- la particella di Kaluza Klein
- etc...

Le scoperte di LHC potranno confermare o fornire nuove idee alle attuali ricerche sulla Materia Oscura

Un modello
di Materia
Oscura

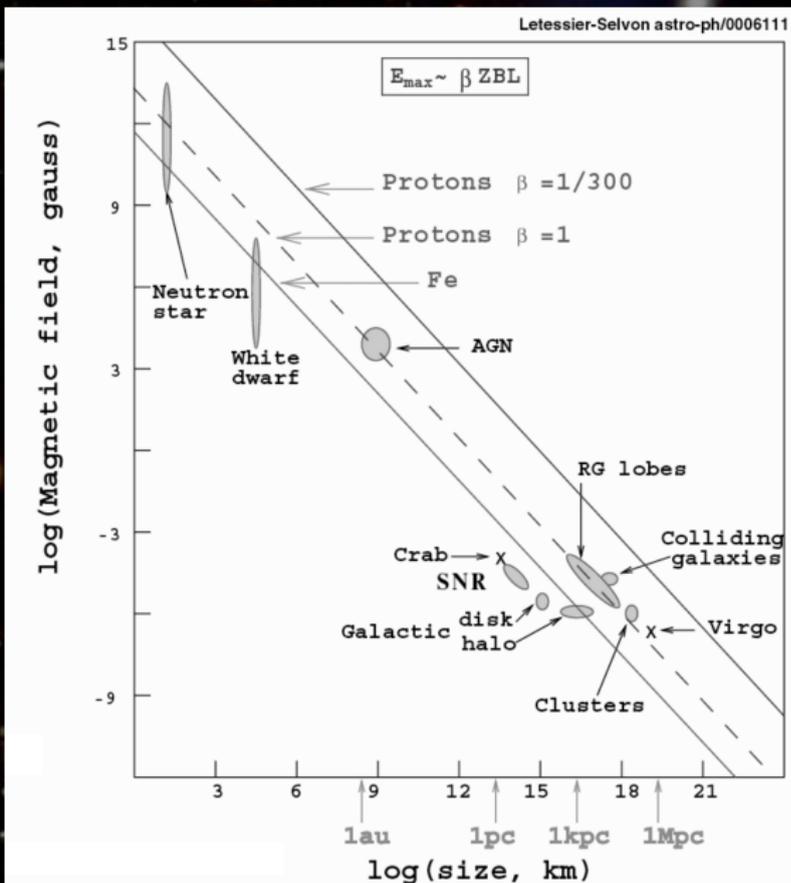
Backup

BACKUP

Meccanismi di accelerazione dei cosmici

Un modello
di Materia
Oscura

Backup



Spettro dei cosmici

Un modello
di Materia
Oscura

Backup

