

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

Materia Oscura: Modelli Teorici ed Evidenze Sperimentali

Relatore:
Prof. Michele Cicoli

Presentata da:
Sara Zucchini

Anno Accademico 2015/2016

SOMMARIO. Lo scopo di questa tesi è la trattazione della materia oscura partendo dalle evidenze sperimentali, ripercorrendo i possibili costituenti e riportando dati relativi a rivelazioni dirette ed indirette.

Il primo capitolo è dedicato alla discussione delle due più importanti evidenze della presenza di materia oscura, ossia le curve di rotazione ed il Bullet Cluster, che risultano entrambe interazioni di tipo gravitazionale.

Si provvede inoltre a fornire le due più plausibili soluzioni in grado di spiegare i risultati ottenuti dalle osservazioni sperimentali e a discutere la loro validità come modello per la descrizione di tali fenomeni.

Il capitolo successivo è volto all'esposizione delle possibili particelle che compongono la materia oscura, discutendo quali siano le più probabili, e alla spiegazione della loro creazione nell'Universo primordiale.

La terza parte è dedicata alle rilevazioni dirette, consistenti nello scattering fra particelle di materia oscura e nuclei, ed in particolare all'analisi del modello dei neutralini. Vengono poi riportati nello stesso capitolo i risultati di tali rilevazioni, con riferimento agli esperimenti CDMS II, XENON100 e LUX.

Nel quarto capitolo si tratteranno i risultati delle rilevazioni indirette, ossia osservazioni di processi derivanti dall'annichilazione di materia oscura, e verranno riportati i risultati degli esperimenti più importanti, fra cui i più recenti sono Fermi-LAT e CTA (ancora in sviluppo).

L'ultimo paragrafo è riservato ad un breve riassunto dei risultati e delle ipotesi trattate, per raccogliere i dati più importanti e fornire una visione generale della materia oscura.

Indice

Capitolo 1. Evidenze della Materia Oscura	6
1.1. Curve di Velocità	6
1.2. Lenti Gravitazionali e Bullet Cluster	10
1.3. Teorie MOND e Materia Oscura	12
Capitolo 2. Produzione di Materia Oscura e Possibili Costituenti	14
2.1. Produzione di Materia Oscura	14
2.2. Possibili Costituenti della Materia Oscura	18
2.3. Limiti Sperimentali	21
Capitolo 3. Rilevazioni Dirette	23
3.1. Scattering Elastico di Neutralini	25
3.2. DAMA	27
3.3. CDMS II	28
3.4. XENON100	29
3.5. LUX	33
Capitolo 4. Rilevazioni Indirette	35
4.1. Raggi Gamma dall'Annichilazione di WIMP	35
4.2. Raggi Cosmici dall'Annichilazione di WIMP	37
4.3. Neutrini dall'Annichilazione di WIMP nel Sole	38
4.4. PAMELA e ATIC	40
4.5. INTEGRAL	42
4.6. WMAP	43

INDICE	5
4.7. Planck	44
4.8. Fermi-LAT	46
4.9. CTA	48
Capitolo 5. Valutazioni Finali	51
Bibliografia	52

CAPITOLO 1

Evidenze della Materia Oscura

1.1. Curve di Velocità

Il moto di un corpo celeste è di tipo kepleriano. Tale oggetto si muove cioè attorno ad un centro di massa, da cui risulta gravitazionalmente attratto, seguendo le leggi di Keplero:

I Legge: "Le orbite descritte dai pianeti attorno al Sole sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi."

Il secondo fuoco dell'ellisse è lasciato libero. Attraverso questa legge è chiaro che il moto, che è di tipo periodico, avviene su un solo piano.

II Legge: "Il raggio vettore che unisce il Sole al pianeta orbitante descrive aree uguali in tempi uguali."

Il raggio vettore consiste nel vettore posizione tra Sole e corpo orbitante. Questa legge afferma sostanzialmente che la velocità areolare, a differenza della velocità angolare, è costante; è quindi costante il rapporto fra l'area ΔS descritta dal raggio vettore ed il tempo Δt impiegato per descriverla, ossia $\Delta S/\Delta t = costante$.

III Legge: "Il rapporto tra il cubo del semiasse maggiore dell'orbita e il quadrato del periodo di rivoluzione è costante." Se T è il periodo orbitale e a è il semiasse maggiore dell'ellisse descritta, allora $a^3/T^2 = costante$.

I corpi osservati sono in equilibrio, altrimenti precipiterebbero per attrazione gravitazionale nel centro di massa. Si può quindi stimare il modulo della velocità v di un oggetto celeste in moto uguagliando la forza centripeta e la forza centrifuga:

$$\frac{v^2}{R} = \frac{GM}{R^2} \quad (1.1.1)$$

dove $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ è la costante di gravitazione universale, M è la massa totale del sistema considerato ed R è la distanza dal centro di massa.

Da cui:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}} \quad (1.1.2)$$

L'andamento atteso della velocità è una funzione solo del raggio, ossia $v = v(R)$, in quanto, fissato il sistema, G e M sono costanti. In particolare $v \propto \sqrt{1/R}$. La misura della curva di velocità è possibile attraverso l'osservazione dell'emissione spettrale della riga di idrogeno a 21cm .

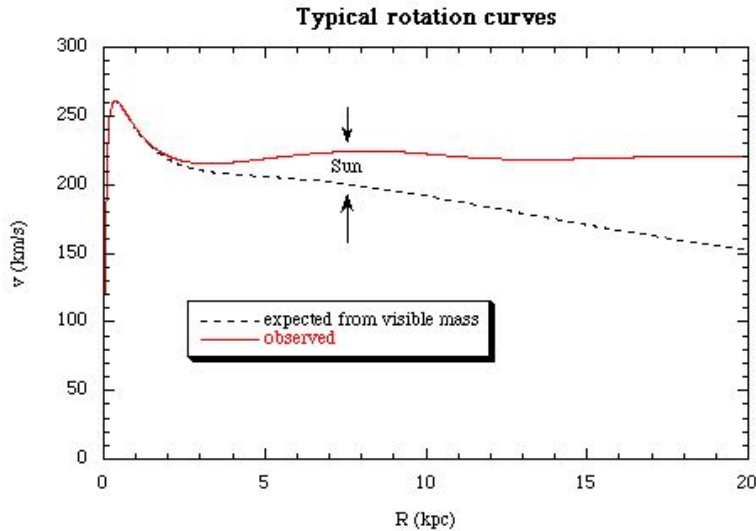


FIGURA 1.1.1. Confronto fra curva di velocità attesa e sperimentale. La linea nera tratteggiata rappresenta l'andamento kepleriano, mentre la linea rossa continua quello misurato.

Da rilevazioni sperimentali [1] [2] è evidente che l'andamento atteso non risulta rispettato, come si può vedere in Figura 1.1.1.

Inizialmente la curva varia come ipotizzato, ma, data una certa distanza (circa 4 kpc), la velocità sembra essere costante, ossia risulta costante la quantità M/R . Una possibile soluzione, per spiegare questo andamento, è che vi sia massa che non è stata considerata, una massa detta "oscura", ossia non visibile, diversamente dalla materia comune. Assumendo per ora che tale ipotesi sia corretta, è possibile dedurre dalla distribuzione della velocità ricavata dalle curve di rotazione la massa necessaria a riscontrare un andamento simile.

La massa in questione è mostrata in Figura 1.1.2 .

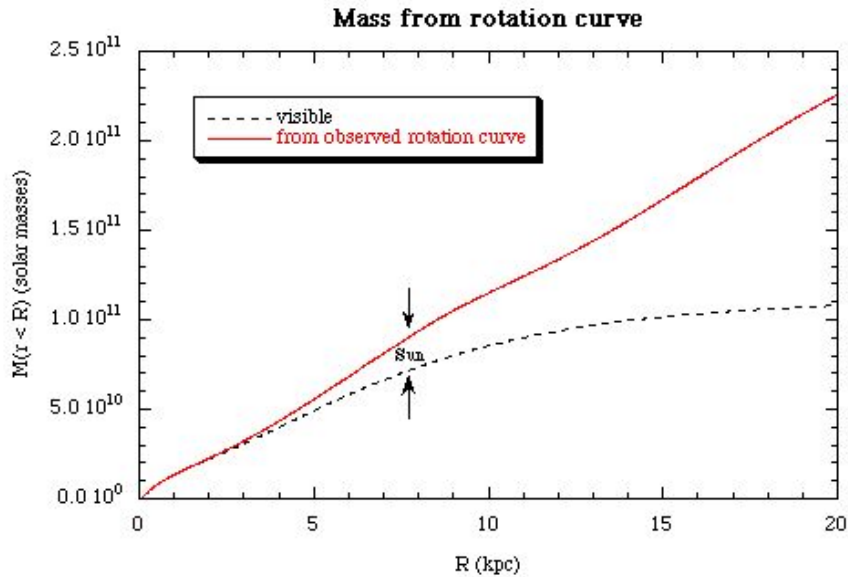


FIGURA 1.1.2. Distribuzione della massa in funzione della distanza. La linea tratteggiata rappresenta la massa visibile, mentre la linea rossa la massa dedotta dalle curve di rotazione.

Dall'immagine è evidente la corrispondenza fra massa visibile e dedotta fino ad una distanza di circa 4 kpc , dovuto alla corrispondenza fra velocità misurata e calcolata di Figura 1.1.1 . Oltre questa distanza si nota uno scostamento sempre

maggiore fra le due curve, fino ad ipotizzare una massiccia quantità di materia oscura a grandi distanze.

Di questa e delle altre soluzioni se ne parlerà più compiutamente nella sezione 1.3 .

1.2. Lenti Gravitazionali e Bullet Cluster

Un'altra evidenza sperimentale importante dell'esistenza della materia oscura si ottiene dall'osservazione di merger di galassie o ammassi di galassie. Quando due ammassi collidono, le singole galassie in essi contenute risultano sostanzialmente illese, così come la materia oscura presente. L'interazione dei due ammassi consiste nell'interazione di materia sotto forma di gas caldo, che si presenta all'interno e attorno alle galassie. Tale gas intergalattico viene perturbato dall'impatto fra gli ammassi e risulta essere altamente rarefatto. Per via della sua rarefazione è possibile osservarne l'emissione per bremsstrahlung in X.

Un chiaro esempio è il caso del Bullet Cluster [3]. In Figura 1.2.1 si osserva una sovrapposizione di tre diverse tecniche osservative: si hanno misure in ottico per quanto riguarda l'osservazione di galassie luminose, in rosa l'osservazione a raggi X dell'emissione del gas intergalattico e in blu la misura in massa della materia partecipante al merger attraverso l'utilizzo di lenti gravitazionali.

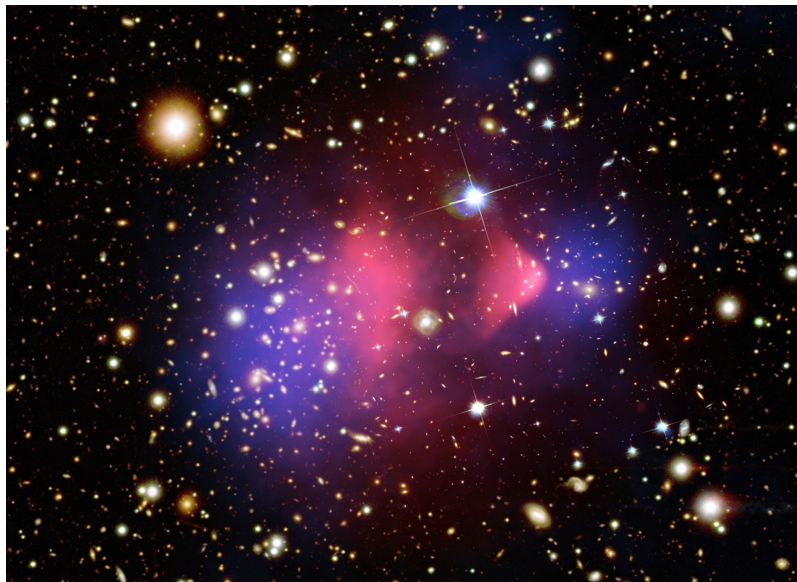


FIGURA 1.2.1. Immagine del Bullet Cluster con sovrapposizione di tecniche osservative. NASA, 24 Agosto 2006

Quest'ultima tecnica di misurazione permette di osservare come la maggior parte della materia presente negli ammassi durante il merger passi indisturbata la collisione, comportamento atteso per quanto riguarda la materia oscura.

1.3. Teorie MOND e Materia Oscura

Come accennato in precedenza questi risultati portano a due possibili soluzioni: o la teoria gravitazionale finora utilizzata necessita di una correzione, oppure vi è massa, oltre la materia visibile, associata alla materia oscura. Della prima ipotesi se ne occupano le cosiddette teorie MOND (Modified Newtonian Dynamics), che apportano una correzione alla teoria della gravità a grandi distanze. Consiste nell'aggiunta di un termine moltiplicativo alla formula utilizzata per la forza di gravità:

$$F = m a c(a) \tag{1.3.1}$$

con m massa del corpo, a accelerazione e $c(a) = a/a_0$ costante di correzione, funzione di a . L'attuale teoria gravitazionale risulta corretta fino a valori di $a_0 \sim 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$.

La seconda ipotesi coinvolge la possibilità che esista materia, particolarmente massiva, che non risulta direttamente osservabile per via della sua natura: non emette radiazione elettromagnetica, come la materia visibile, ma è osservabile attraverso la sua interazione gravitazionale. Per questo motivo si parla di materia oscura.

Il contenuto di energia del nostro Universo è soltanto in piccolissima parte, intorno al 5%, associato alla materia visibile, lasciando così grande spazio alla materia oscura, che ne costituisce circa il 25% (il restante circa 70% è in energia oscura). Ovviamente in corrispondenza alle particelle di materia oscura vi è anche le loro antiparticelle, ossia l'antimateria oscura.

L'ipotesi della presenza di materia oscura risulta la più consistente rispetto alle osservazioni sperimentali.

Non si può invece pensare alle teorie MOND, almeno come formulate finora, come ad un modello per la descrizione generale dei fenomeni osservati, in quanto risultano consistenti solo per lo studio delle curve di rotazione, poichè costruite

appositamente per spiegare tale fenomeno, mentre in general falliscono nella descrizione dei Bullet Cluster.

Oltre ad essere spiegabile attraverso la materia oscura, il fenomeno del Bullet Cluster permette, grazie alla sua osservazione, di avanzare una stima sulla sezione d'urto dell'interazione materia oscura-materia oscura, che risulta $\sigma/m \sim 1 \text{ barn}/\text{GeV}$, con $1 \text{ barn} = 1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$.

CAPITOLO 2

Produzione di Materia Oscura e Possibili Costituenti

2.1. Produzione di Materia Oscura

Si è soliti caratterizzare le particelle costituenti la materia oscura in base al loro processo di produzione: si differenziano in relitti non termici e termici. Sono del primo tipo particelle create attraverso processi non termici, ad esempio derivanti dal decadimento di particelle più pesanti fuori dall'equilibrio termico.

Si parla invece di relitti termici per particelle prodotte dall'interazione con il bagno termico primordiale. In questo stato le particelle raggiungono dapprima l'equilibrio con il bagno termico e successivamente subiscono un congelamento del loro numero, se la loro produzione risulta trascurabile rispetto all'espansione dell'universo.

Il congelamento è causato da un abbassamento della temperatura dell'Universo, il quale porta ad una diminuzione del numero di particelle presenti, fra cui anche quelle di materia oscura. Si ha una temperatura critica T_c (con $T_c \sim m_{dm}$, dove m_{dm} è la massa delle particelle di materia oscura) sotto la quale la densità delle particelle di materia oscura cala come $exp(-m_{dm}/T)$, con T temperatura dell'Universo.

Si ha quindi una diminuzione esponenziale del numero di particelle, fino al raggiungimento di una nuova situazione di equilibrio (ovviamente a temperatura inferiore a T_c), in cui il numero di particelle rimane stabile. Ad oggi sono presenti in quantità così ridotta da portare ad una probabilità di autointerazione della materia oscura molto bassa.

La variazione dettagliata di densità n di relitti termici di materia e antimateria oscura che interagiscono con il bagno termico è regolata dall'equazione di Boltzmann [3] [4]:

$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma_a v \rangle (n^2 - n_{eq}^2) \quad (2.1.1)$$

dove $H = \dot{a}/a$ è la costante di Hubble, che descrive il tasso di espansione dell'Universo (con a fattore di scala), σ_a è la sezione d'urto di annichilazione materia oscura-antimateria oscura, v è la velocità relativa delle due particelle di materia oscura che si annichilano e n_{eq} è la densità di equilibrio, ossia la densità di particelle quando raggiungono la stessa temperatura T del bagno termico.

La (2.1.1) si basa sull'approssimazione che vi sia simmetria nella densità di particelle e antiparticelle.

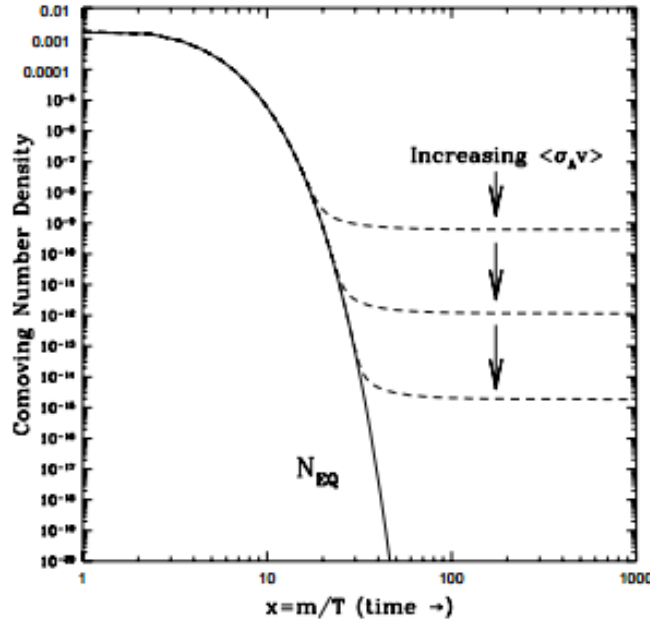


FIGURA 2.1.1. Evoluzione della densità in funzione del rapporto m/T , in approssimazione di simmetria fra densità di particelle e antiparticelle.

Questa equazione è composta da tre termini, di cui i primi due negativi e l'ultimo positivo: $(-3Hn)$ è il termine che rappresenta la diluizione di particelle di materia oscura per via dell'espansione dell'Universo, mentre $(-\langle\sigma_a v\rangle n^2)$ e $(\langle\sigma_a v\rangle n_{eq}^2)$ rappresentano in media rispettivamente le perdite per annichilazione di particelle di materia oscura in particelle ordinarie e l'aumento per creazione di particelle di materia oscura dall'annichilazione di particelle ordinarie.

Attraverso la (2.1.1) è possibile notare le dipendenze della densità n e della sua derivata dn/dt in base alla creazione e distruzione di particelle di materia oscura, ossia:

- Se non vengono né create né distrutte, cioè le particelle di materia oscura sono all'equilibrio termico e quindi $\langle\sigma_a v\rangle n^2 = \langle\sigma_a v\rangle n_{eq}^2$, $dn/dt = -3Hn$. Sfruttando il fatto che $H = a^{-1} da/dt$ si ottiene $n \sim a^{-3} \sim T^3$.
- Quando la temperatura scende sotto la massa della materia oscura, $T \ll m_{dm}$, le particelle di materia oscura escono dall'equilibrio termico dato che il processo che porta alla loro creazione è cinematicamente soppresso. Quindi è possibile considerare soltanto l'annichilazione, ottenendo $dn/dt = -n\Gamma$ dove $\Gamma_a = \langle\sigma_a v\rangle n$ è il tasso di annichilazione e $t_a = \Gamma_a^{-1}$ è il tempo di annichilazione. La soluzione dà luogo ad una diminuzione esponenziale del numero di particelle di materia oscura: $n \sim e^{-t/t_a}$.

Dopo l'uscita dall'equilibrio termico diventa sempre più difficile per le particelle di materia oscura interagire fra loro, poiché l'espansione dell'Universo le diluisce nello spazio.

Il congelamento avviene nel momento in cui il tasso di annichilazione Γ_a è dell'ordine della costante di Hubble H ($\Gamma_a \sim H$), ossia le particelle per incontrarsi ed annichilirsi impiegano un tempo maggiore rispetto all'età dell'Universo.

Durante il congelamento possono presentarsi due diversi tipi di materia oscura, ovvero non relativistica (o fredda) e relativistica (o calda), ma esiste anche una

materia oscura tiepida, che assume comportamento intermedio.

2.2. Possibili Costituenti della Materia Oscura

Si ipotizza, attraverso l'osservazione dell'interazione gravitazionale fra materia oscura e materia ordinaria, che questa sia composta da particelle con carica nulla, piuttosto massive e prive di colore (e quindi non interagiscono fortemente) che interagiscono debolmente.

2.2.1. Materia Oscura Barionica. Inizialmente si pensava che questo tipo di materia potesse essere barionica, ossia composta da combinazioni di tre quark. Si tratta di MACHO [4], Massive Astrophysical Compact Halo Object, oggetti cosmici massivi (previsti dal Modello Standard) ricercati nell'alone della nostra galassia.

I migliori candidati fra i MACHO sono i PBH, Primordial Black Holes, ossia buchi neri creati nei primi istanti successivi al Big Bang. Per motivi sperimentali (risultati ottenuti attraverso l'osservazione della radiazione di fondo in microonde e di lenti gravitazionali) l'unico range possibile in massa per i PBH costituenti la materia oscura è $6 \times 10^{45} \text{ GeV}/c^2 \leq m \leq 2 \times 10^{48} \text{ GeV}/c^2$.

Attraverso lo studio della nucleosintesi del Big Bang e della radiazione di fondo nel microonde è stata osservata una quantità di materia barionica molto minore rispetto a quella attesa se si trattasse di materia oscura: la densità di materia totale è data da $\Omega_M h^2 = (0.1326 \pm 0.0063)$, con h costante di Hubble in unità di $100 \text{ km/s per } Mpc$, mentre quella esclusivamente barionica vale $\Omega_B h^2 = 0.02273 \pm 0.00062$, ossia il restante $80 \div 85\%$ della materia è di tipo non luminoso e non barionico.

Ecco perché, seppur i PBH siano una componente plausibile, non possono essere la sola. Si cercano dunque componenti alternative nella materia non barionica.

2.2.2. Materia Oscura Non Barionica. Vi sono diverse possibilità da analizzare per quanto riguarda possibili componenti della materia oscura di tipo non barionico.

Neutrini. I primi da potersi considerare tali sono i neutrini [3]. Questi risultano possibili costituenti della materia oscura calda, ossia relativistica: hanno energia molto elevata, per via delle loro velocità, che risultano prossime a quella della luce, rispetto alla loro massa, non nulla (per via della possibilità di oscillazione fra neutrini di diverse famiglie leptoniche) ma pur sempre piccola (minore di qualche meV). Il neutrino è l'unica particella prevista dal Modello Standard a potersi candidare come possibile componente della materia oscura non barionica. Le particelle successivamente descritte esulano dal Modello Standard, seppur siano contemplate in una sua estensione.

Assioni. Un secondo fra gli eventuali candidati a formare la materia oscura, in questo caso fredda, sono gli assioni [3], possibili particelle elementari prodotte nell'universo primordiale ed introdotte per spiegare la non violazione della simmetria CP nell'interazione forte (prodotto degli operatori di parità P e coniugazione di carica C, conservazione violata invece nella debole).

Tali particelle sono neutre, di spin zero ed in grado di interagire molto debolmente. La massa m prevista risulta piuttosto piccola e si colloca nel range $10^{-6} eV/c^2 \leq m \leq 10^{-2} eV/c^2$.

Particelle di Kaluza-Klein. Altre particelle possibili sono le particelle di Kaluza-Klein [4], introdotte nella teoria di Kaluza-Klein (che è naturalmente inglobata nella teoria delle stringhe), la quale cerca di unificare la teoria della gravità con l'elettromagnetismo attraverso l'aggiunta di una quinta dimensione spaziale. Sono considerate possibili particelle componenti la materia oscura fredda, nonostante finora non siano state direttamente osservate.

WIMPs. Di tutte le particelle proposte, le più plausibili sono le WIMP [1]

[2] [3] [4], Weakly Interacting Massive Particles, ossia particelle molto massive che interagiscono debolmente con la materia ordinaria. Le WIMP si ipotizza siano state create termicamente in grande quantità nell'universo primordiale, ma ad oggi si rilevano in scarsità per via della loro diluizione avvenuta durante il congelamento. Ad avvalorare la loro posizione come migliori candidati alla costituzione della materia oscura vi è il cosiddetto "WIMP Miracle", ossia il miracolo delle WIMP: si chiama in questo modo la coincidenza fra la sezione d'urto calcolata della materia oscura prodotta termicamente e quella tipica di un'interazione debole:

$$\langle \sigma_a v \rangle = (2 \times 10^{-26}) \text{ cm}^3/\text{s} \sim \sigma_{weak} \quad (2.2.1)$$

Nel caso di produzione non termica dal decadimento di particelle pesanti il tasso di annichilazione di materia oscura necessario per riprodurre la sua corretta abbondanza può avere valori molto differenti da (2.2.1). Una delle più probabili WIMP è il neutralino [4], una particella prevista dalla teoria supersimmetrica (o SUSY) e composta dal mixing di bino, wino e higgsino (partner supersimmetrici rispettivamente di bosone Z, bosone W e bosone di Higgs).

I neutralini sono particelle stabili, neutre, senza colore (interagiscono quindi solo debolmente) e con massa prevista tra circe $300 \text{ GeV}/c^2$ ed $1 \text{ TeV}/c^2$ a seconda del meccanismo di produzione. Al momento sono fra le particelle più plausibili per la decrizione della materia oscura fredda.

2.3. Limiti Sperimentali

Questo breve paragrafo è dedicato ai processi teorici di produzione di materia oscura che possono portare alla sua rilevazione sperimentale.

In Figura 2.3.1 sono mostrati i tre metodi di sperimentazione utilizzati: la produzione negli acceleratori, la rilevazione diretta e indiretta.

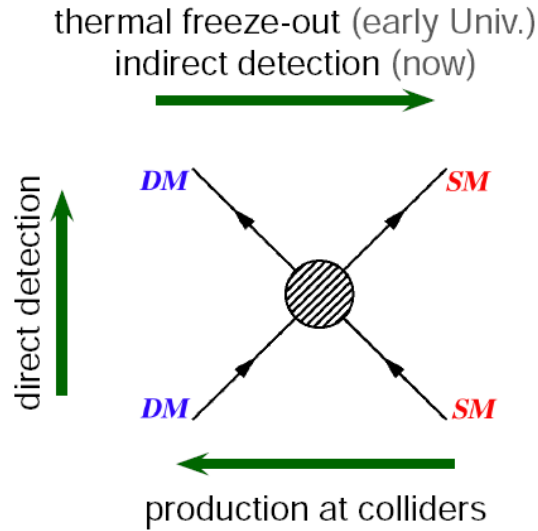


FIGURA 2.3.1. Modi di rilevazione della materia oscura: la freccia verso sinistra rappresenta la produzione di neutralini negli acceleratori ($SM + SM \rightarrow DM + DM$), quella verso l'alto la rilevazione diretta ($DM + SM \rightarrow DM + SM$) ed infine quella verso destra la rilevazione indiretta ($DM + DM \rightarrow SM + SM$). SM e DM indicano rispettivamente una particella del Modello Standard ed una di materia oscura.

La rilevazione diretta consiste nello scattering WIMP-nucleone, mentre quella indiretta si occupa dell'analisi delle particelle prodotte dall'annichilazione di materia oscura. Questi modelli di rilevazione sperimentale verranno trattati più

precisamente nei Capitoli 3 e 4 rispettivamente.

Fra gli esperimenti di produzione negli acceleratori vi sono ATLAS [5] e CMS [6], i quali si occupano di neutralini decaduti da particelle più pesanti, prodotte dalla collisione protone-protone.

Questo tipo di rilevazione consiste, imponendo la conservazione dell'energia, nel notare come via sia nello stato finale energia mancante, la quale è associata ai neutralini, passati inosservati, in quanto non interagiscono con la materia ordinaria.

I limiti imposti da tali esperimenti non sono molto stringenti, soprattutto per masse elevate (dell'ordine di alcune centinaia di GeV). Per questo motivo tale rilevazione non verrà trattata nel dettaglio.

CAPITOLO 3

Rilevazioni Dirette

In questo capitolo si tratteranno esperimenti volti alla rilevazione di particelle di materia oscura attraverso il loro scattering elastico con dei nuclei. Si parla in questo caso di rilevazione diretta, mentre quella indiretta studia la materia oscura attraverso il suo annichilimento in altre particelle.

Per una WIMP che incide su un nucleo, l'energia di rinculo vale

$$E_{rinc} = \frac{|\vec{q}|^2}{2 M_{nucleo}} \quad (3.0.1)$$

con \vec{q} quantità di moto della WIMP ed M_{nucleo} massa del nucleo bersaglio. Posso scrivere la (3.0.1) sostituendo la quantità di moto:

$$E_{rinc} = \frac{2 \mu^2 v^2 (1 - \cos\theta)}{2 M_{nucleo}} \quad (3.0.2)$$

con v velocità della particella incidente e $\mu = (m_x M_{nucleo}) / (m_x + M_{nucleo})$ massa ridotta, con m_x massa della WIMP, ottenendo così:

$$E_{rinc} = \frac{m_x^2 v^2 (1 - \cos\theta)}{2 M_{nucleo}} \quad (3.0.3)$$

Per una massa nucleare molto minore rispetto alla massa delle WIMP, ossia $m_x \gg M_{nucleo}$, ed una velocità $v \sim 300 \text{ km/s}$, la (3.0.3) si riduce a $E_{rinc} \sim M_{nucleo} v^2$, con valori tipici dell'energia di rinculo $E_{rinc} \sim 1 \div 100 \text{ keV}$.

L'interazione fra nuclei e WIMP può avvenire attraverso due tipi di scattering: spin-indipendente e spin-dipendente. Quest'ultimo è possibile solo per WIMP con spin e isotopi con numero di massa dispari (nell'esperimento XENON100 le WIMP si accoppiano con nuclei di ^{129}Xe).

Ciò che differenzia i due processi è l'andamento della sezione d'urto σ dell'interazione: nel primo caso $\sigma \sim M_{atomo}^2$, mentre nel secondo $\sigma \sim J(J + 1)$, con M_{atomo} e J rispettivamente massa degli atomi e spin dei nuclei di cui è costituito il bersaglio. Come conseguenza, la sensibilità sperimentale risulta più alta per interazione spin-indipendente rispetto a quella spin-dipendente.

3.1. Scattering Elastico di Neutralini

I neutralini possono interagire per scattering elastico con i quark, attraverso due possibili canali, come mostrato in Figura 3.1.1: canale t con lo scambio di un bosone di Higgs o canale s con lo scambio di uno squark, partner supersimmetrico del quark.

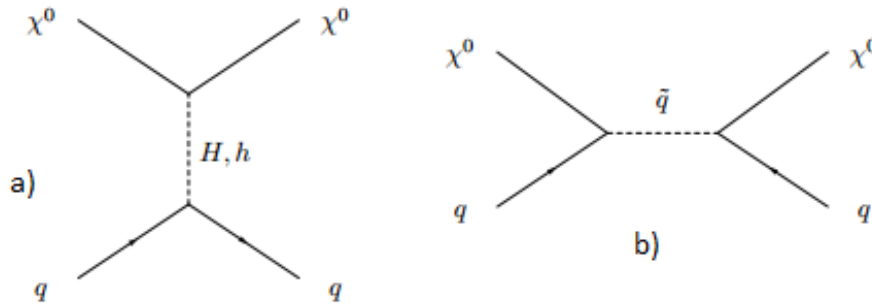


FIGURA 3.1.1. Scattering fra neutralino e quark: a) indica l'interazione attraverso il canale t con scambio di un bosone di Higgs, mentre b) attraverso il canale s con scambio di uno squark.

Sono di seguito analizzate le sezioni d'urto [2] per diversi casi:

- Se lo scattering è dominato dallo scambio di un bosone di Higgs pesante (H), di massa di 200 GeV , con accoppiamento a quark di tipo strange e bottom (comportamento tipico quando ho squark pesanti), per un neutralino di 100 GeV si ottiene una sezione d'urto $\sigma \sim 10^{-5} \div 10^{-7} \text{ pb}$ con massa ridotta $\mu \sim 1 \text{ TeV}$.
- Se lo scattering è dominato dallo scambio di un bosone di Higgs leggero (h) con accoppiamento a quark di tipo up, si ottiene una sezione d'urto $\sigma \sim 10^{-8} \div 10^{-10} \text{ pb}$ con massa ridotta $\mu \sim 200 \text{ GeV} \div 1 \text{ TeV}$.
- Se lo scattering è dominato dallo scambio di uno squark con accoppiamento a quark di tipo strange e bottom, il contributo maggiore alla sezione d'urto deriva dallo scambio di tale squark e si ottiene $\sigma \sim$

$10^{-6} \div 10^{-7} pb.$

- In questo tipo di rilevazione si può sfruttare anche il fatto che lo scattering WIMP-quark avvenga con contributi dovuti allo scambio di un quark di Kaluza-Klein attraverso il canale s e di un bosone di Higgs attraverso il canale t.

3.2. DAMA

La rilevazione diretta DAMA [2] ha riportato nel 2003 evidenze sperimentali di come il rate di eventi riguardanti lo scattering nucleare sia modulato durante l'anno.

Si attribuisce questa modulazione all'interazione fra WIMP, che deriva dalla variazione della velocità relativa della Terra, dovuta all'orbitare della stessa attorno al Sole, rispetto all'alone di materia oscura.

Il rate massimo per basse energie di scattering nucleare si osserva intorno al 24 Maggio, con un errore di 8 giorni.

L'unica spiegazione attribuibile è ricondurre tali effetti all'interazione fra materia oscura, poiché non vi è altra sorgente identificata che potrebbe generare un segnale simile. Questa ipotesi non è però né verificata né certa, in quanto altri esperimenti riportano dati in diretto conflitto con i risultati di DAMA.

3.3. CDMS II

Il CDMS II [7], versione più avanzata del CDMS (Cryogenic Dark Matter Search), è un esperimento volto alla raccolta dati, fra Luglio 2007 e Settembre 2008, mediante l'utilizzo di rivelatori a semiconduttore, che rivelino la presenza di WIMP. Tale esperienza impone un limite superiore per la sezione d'urto (Figura 3.3.1) di scattering WIMP-nucleone spin-indipendente, considerando WIMP distribuite con densità locale $\rho = 0.3 \text{ GeV}/(c^2 \text{ cm}^3)$, velocità circolare locale $v_0 = 220 \text{ km/s}$ e velocità di fuga $v_{esc} = 544 \text{ km/s}$, a $2.4 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$ per WIMP di massa attorno ai $10 \text{ GeV}/c^2$, con livello di confidenza al 90%.

Si è compiuta inoltre un'analisi di verosimiglianza, ottenendo una verosimiglianza massima in corrispondenza ad una sezione d'urto WIMP-nucleone di $1.9 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$ per WIMP con masse di $8.6 \text{ GeV}/c^2$.

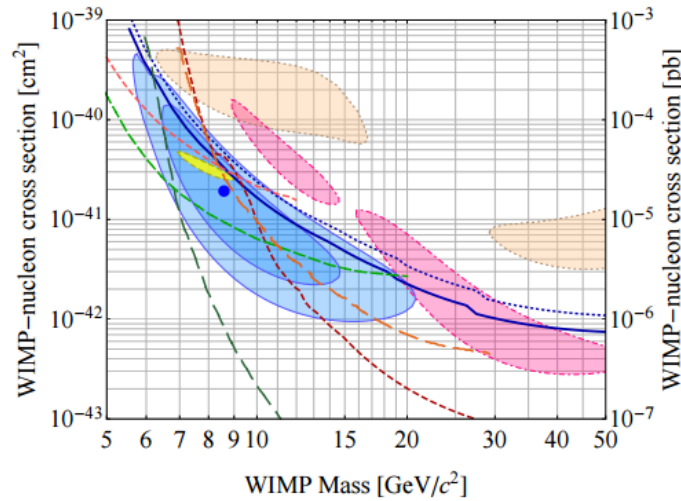


FIGURA 3.3.1. Limite superiore sperimentale imposto alla sezione d'urto WIMP-nucleone spin-indipendente come funzione della massa delle WIMP. Il risultato del CDMS II è riportato in blu tratteggiato. L'alone azzurro indica i risultati ottenuti dall'analisi di massima verosimiglianza, dove il punto blu indica il massimo.

3.4. XENON100

L'esperimento XENON100 [8] è volto alla rilevazione diretta della materia oscura nell'universo mediante l'impiego di una camera riempita con 161 kg di xeno liquido, con rilevazione dati di 224.6 giorni fra Febbraio 2011 e Marzo 2012.

Risultati per accoppiamento spin-indipendente e spin-dipendente.

I risultati di tale esperimento hanno recentemente imposto nuovi limiti per quanto riguarda lo scattering elastico WIMP-nucleone di tipo spin-dipendente e spin-indipendente. L'andamento della sezione d'urto per l'accoppiamento spin-indipendente (Figura 3.4.1), per WIMP distribuite in un alone isoterma con densità locale $\rho = 0.3 \text{ GeV}/(c^2 \text{ cm}^3)$, velocità circolare (ossia la velocità di equilibrio per rimanere in orbita attorno un oggetto gravitazionale) locale $v_0 = 220 \text{ km/s}$ e velocità di fuga $v_{esc} = 544 \text{ km/s}$, riporta un minimo a $2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ per WIMP di massa $55 \text{ GeV}/c^2$. Tali risultati sono riportati con un livello di confidenza del 90%.

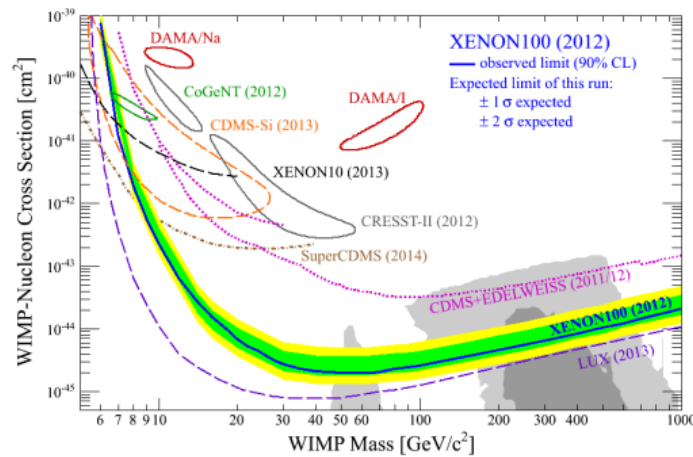


FIGURA 3.4.1. Sezione d'urto di uno scattering elastico spin-indipendente WIMP-nucleone in funzione della massa delle WIMP. I risultati di XENON100 sono mostrati in blu, dove la zona verde indica la sensibilità attesa di 1σ e quella gialla di 2σ .

Per gli eventi spin-indipendenti (Figura 3.4.2) invece, assumendo che le WIMP si accoppino prevalentemente con protoni o neutroni, il limite più stringente alla sezione d'urto WIMP-neutrone è ottenuto per una massa attorno ai $45 \text{ GeV}/c^2$ con un minimo a $3.5 \times 10^{-40} \text{ cm}^2$ con livello di confidenza al 90%, mentre per WIMP-protone la misura risulta più complicata (si utilizzano ^{129}Xe e ^{131}Xe , ovvero xeno con un numero dispari di neutroni ma pari di protoni).

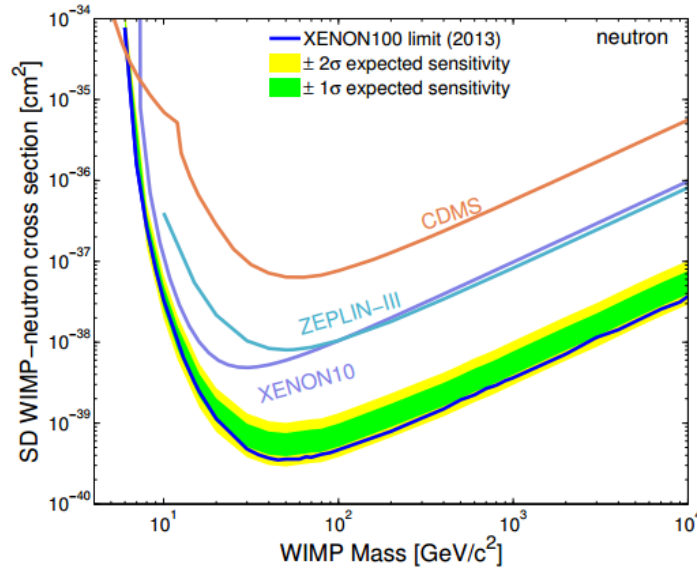


FIGURA 3.4.2. Sezione d'urto di uno scattering elastico spin-dipendente WIMP-neutrone in funzione della massa delle WIMP. I risultati di XENON100 sono mostrati in blu, dove la zona verde indica la sensibilità attesa di 1σ e quella gialla di 2σ .

Assioni solari e risultati accoppiamento assioni-elettroni.

Gli assioni sono particelle leggere possibili costituenti della materia oscura. Questi possono accoppiarsi ad elettroni atomici (con g_{AE} costante tipica di questo accoppiamento), ma possono interagire anche con fotoni, nuclei ed elettroni liberi.

Vi sono due possibili tipi di assione:

- solari, prodotti nel Sole per bremsstrahlung e per ricombinazione o diseccitazione atomica. Il limite (Figura 3.4.3) imposto da XENON100 riguardo l'accoppiamento con elettroni, per assioni con masse minori di $1 \text{ keV}/c^2$, è $g_{AE} < 7.7 \times 10^{-12}$, con confidenza del 90%.

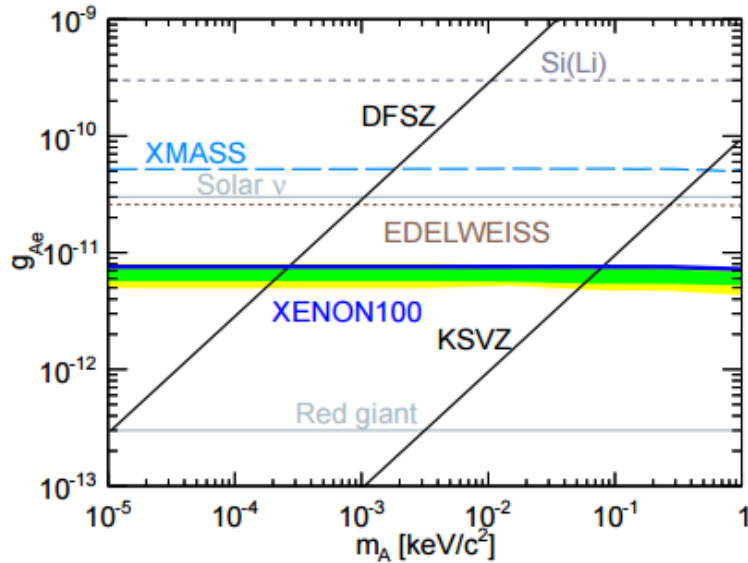


FIGURA 3.4.3. Costante di accoppiamento assioni solari-elettroni in funzione della massa degli assioni. I risultati di XENON100 sono mostrati in blu, dove la zona verde indica la sensibilità attesa di 1σ e quella gialla di 2σ .

- galattici, prodotti non termicamente nell'universo primordiale. Il limite (Figura 3.4.4) imposto riguardo l'accoppiamento con elettroni, per assioni con masse sui $5 \sim 6 \text{ keV}/c^2$, è $g_{AE} < 1 \times 10^{-12}$, con confidenza del 90%.

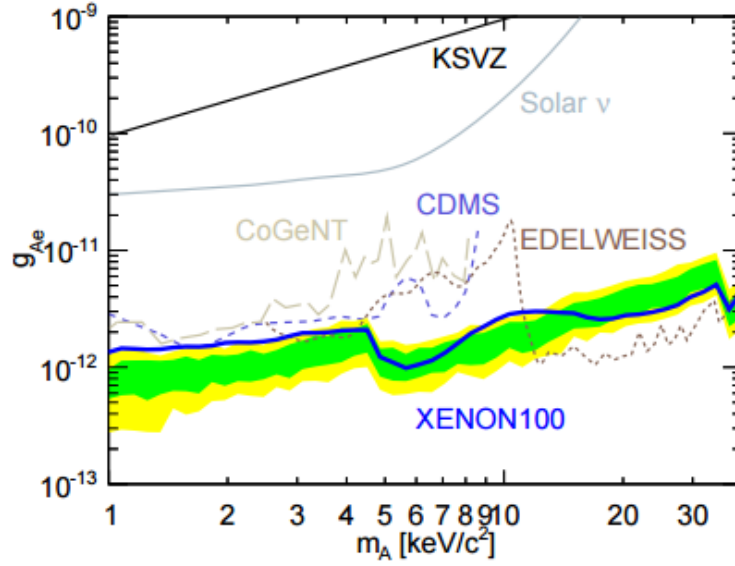


FIGURA 3.4.4. Costante di accoppiamento assioni galattici-elettroni in funzione della massa degli assioni. I risultati di XENON100 sono mostrati in blu, dove la zona verde indica la sensibilità attesa di 1σ e quella gialla di 2σ .

3.5. LUX

L'esperimento LUX (Large Underground Xenon) [9] [10] è una rilevazione volta alla misura dello scattering WIMP-nucleone mediante l'utilizzo di una camera riempita con 250 *kg* di nuclei di xeno liquido.

L'andamento della sezione d'urto per l'accoppiamento spin-indipendente misurato nel 2014 (Figura 3.5.1), per WIMP distribuite in un alone isoterma con densità locale $\rho = 0.3 \text{ GeV}/(c^2 \text{ cm}^3)$, velocità circolare locale $v_0 = 220 \text{ km/s}$ e velocità di fuga $v_{esc} = 544 \text{ km/s}$, riporta un minimo a $7.6 \times 10^{-46} \text{ GeV}/c^2$ per masse $33 \text{ GeV}/c^2$. Tali risultati sono riportati con un livello di confidenza del 90%.

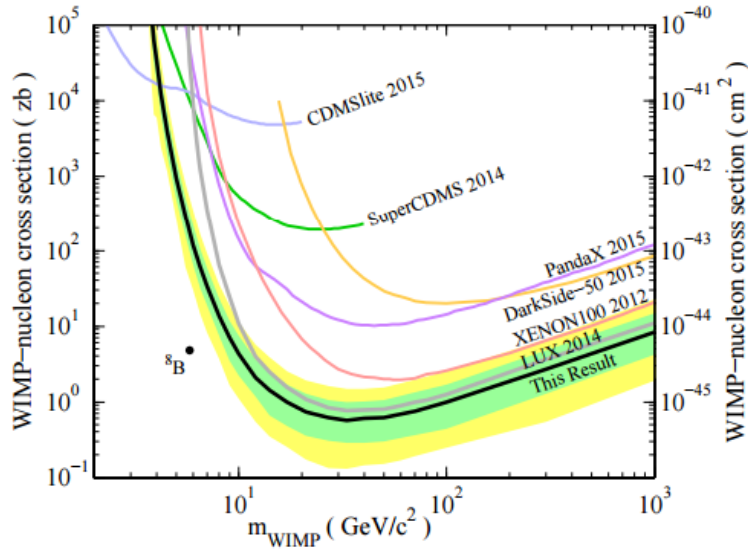


FIGURA 3.5.1. Limiti attuali alla sezione d'urto di uno scattering WIMP-nucleone di tipo spin-indipendente ed elastico in funzione della massa delle WIMP. I risultati di LUX sono mostrati in nero, dove la zona verde indica la sensibilità attesa di 1σ e quella gialla di 2σ .

Risultati del genere implicano un grande miglioramento nelle tecnologie impiegate, tale da testare l'ipotesi dell'esistenza di WIMP a bassa energia.

CAPITOLO 4

Rilevazioni Indirette

La maggior parte degli esperimenti rivolti alla determinazione delle particelle che compongono la materia oscura è rappresentata dalle rilevazioni indirette. Questo tipo di operazione consiste nella rilevazione di particelle prodotte dall'annichilazione delle WIMP, fra cui raggi gamma, neutrini, positroni ed elettroni.

4.1. Raggi Gamma dall'Annichilazione di WIMP

La ricerca di fotoni generati dall'annichilazione [2] della materia oscura è una fra le rilevazioni indirette più semplici, in quanto i raggi gamma, a differenza di particelle cariche, non vengono deflessi dal campo magnetico, lasciando così invariata la loro traiettoria e fornendoci informazioni sulla loro provenienza angolare. Altri dati importanti derivanti la rilevazione dei raggi gamma riguardano il loro spettro, non attenuato per scale dell'ordine delle distanze galattiche, ottenendo così informazioni sullo spettro incidente a terra, che risulta lo stesso con cui è stato generato dall'annichilazione.

In generale le WIMP non annichilano dando origine direttamente a fotoni (se così fosse, sarebbero EMIMP piuttosto che WIMP, ossia particelle che decadono per interazione elettromagnetica), ma possono produrre particelle in grado di dare luogo, passando attraverso ad uno stato finale con fotoni, come ad esempio neutralini che decadono in fotone-fotone oppure in fotone-bosone Z .

Una delle più importanti fonti da cui ottenere raggi gamma derivanti dall'annichilazione è il centro galattico.

Per quanto riguarda la rilevazione nelle zone più prossime al centro galattico è

difficile ottenere una stima della distribuzione di materia oscura: in primo luogo ciò è dovuto ai limiti sperimentali imposti dalla simulazione ad N corpi, poi al fatto che il potenziale gravitazionale sia dominato nella regione interna della Via Lattea non da materia oscura, ma da barioni, il cui contributo rispetto alla distribuzione di materia oscura è difficile da prevedere.

Ad occuparsi della rilevazione di raggi gamma derivanti dall'annichilazione di materia oscura sono telescopi come Fermi, il quale osserva una grande frazione del cielo, e telescopi a terra, i quali studiano l'emissione gamma ad angoli piccoli. Mentre questi ultimi rilevano solo raggi gamma con energia maggiore di 100 GeV , Fermi si occupa di raggi gamma con energia fra i 100 MeV ed i 300 GeV .

Un'altra possibile fonte, se il centro galattico dovesse risultare povero in densità di materia oscura, è da ricercare nelle galassie nane vicine o dentro la Via Lattea.

4.2. Raggi Cosmici dall'Annichilazione di WIMP

Oltre ai raggi gamma, l'annichilazione di WIMP nell'alone galattico [2] crea raggi cosmici carichi, fra cui elettroni, positroni, protoni e antiprotoni.

Per quanto riguarda queste emissioni, diversamente dai raggi gamma che passano indisturbati, le particelle cariche vengono deflesse dal campo magnetico galattico e si muovono sotto l'influenza di questo, venendo diffuse e perdendo energia, dando così origine, giunti a terra, ad uno spettro diffuso.

Dallo studio di tale spettro è possibile identificare l'avvenimento di annichilazione di materia oscura.

4.3. Neutrini dall'Annichilazione di WIMP nel Sole

Come già spiegato sopra, nella sezione 2.2, le particelle di materia oscura interagiscono in generale solo debolmente, ma occasionalmente risentono dello scattering elastico [2] con altri nuclei nel Sole, perdendo così quantità di moto e legandosi gravitazionalmente. Considerando l'età del Sole, una notevole quantità di WIMP prodotte attorno ad esso dovrebbe essere stata catturata gravitazionalmente ed essersi accumulata al suo interno. Quando due WIMP si incontrano, danno luogo ad annichilazione; si ipotizza che all'interno del sole vi sia raggiunto l'equilibrio fra rate di annichilazione e di cattura.

Particelle derivanti da questo processo sono i neutrini, i quali hanno energia sufficiente per lasciare il Sole, rappresentando così una possibile traccia dell'annichilazione di materia oscura.

Una volta prodotti nel nucleo del Sole, i neutrini si muovono attraverso il mezzo solare giungendo poi sulla Terra.

Durante questo viaggio possono essere assorbiti, possono perdere energia o anche cambiare sapore. La probabilità che un neutrino prodotto nel Sole venga assorbito risulta:

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{E_\nu}{E_{abs}}\right) \quad (4.3.1)$$

dove E_ν rappresenta l'energia del neutrino, mentre E_{abs} è l'energia necessaria perché venga assorbito, che vale circa 130 GeV per neutrini elettronici o muonici e 200 GeV per i loro antineutrini.

Una volta raggiunta la Terra, questi neutrini vengono rilevati da telescopi, come quelli utilizzati nei seguenti esperimenti:

- IceCube, con superficie più grande di un kilometro quadrato, profondo chilometri ed in grado di catturare muoni attorno ai 50 GeV .

- Deep Core, estensione dell'esperimento IceCube, sensibile a muoni fino ad un'energia minima di 10 GeV .
- Super-Kamiokande, rivelatore con area effettiva mille volte più piccola rispetto a quella dell'IceCube e profondo solo 36.2 m , ma molto utile per catturare muoni a bassa energia, ossia di circa 1 GeV .

Il limite più stringente al flusso dei neutrini generati dall'annichilazione di WIMP nel Sole è imposto dall'esperimento IceCube per masse attorno ai $35 \text{ GeV}/c^2$ per accoppiamento WIMP-protoni spin-dipendente.

4.4. PAMELA e ATIC

Gli esperimenti PAMELA e ATIC [2] si basano sull'osservazione dei raggi cosmici carichi prodotti dall'annichilazione di WIMP.

PAMELA ha riportato nel 2006 un picco anomalo a circa 10 GeV nel rapporto positroni/(positroni+elettroni) dei raggi cosmici, come in Figura 4.4.1 .

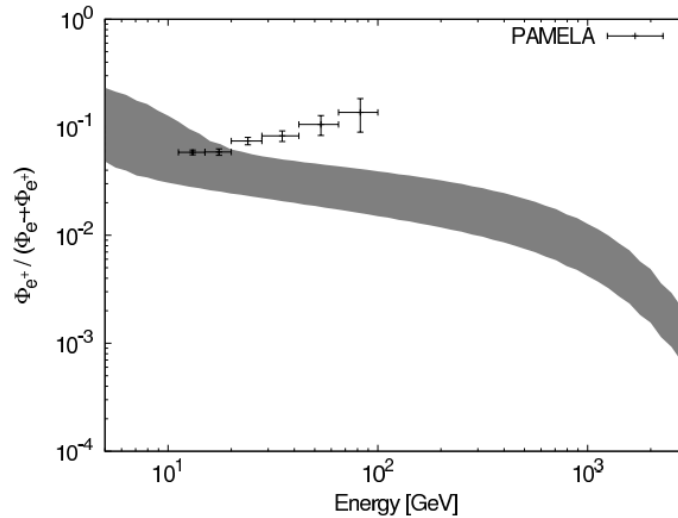


FIGURA 4.4.1. Picco a circa 10 GeV nel rapporto positroni/(positroni+elettroni) dei raggi cosmici nell'esperimento PAMELA.

ATIC, pallone sonda, ha rivelato nel 2008 una distribuzione caratteristica fra i 300 ed i 800 GeV degli elettroni e positroni nei raggi cosmici, con picco a 600 GeV , come in Figura 4.4.2 .

In accordo con gli esiti di tali rilevazioni deve essere presente, ad una distanza massima di 1 kpc dal sistema solare, una sorgente di elettroni e positroni energetici, la cui natura è ancora sconosciuta.

Per produrre i segnali trovati da questi esperimenti, sono necessari un'annichilazione in leptoni carichi nella maggioranza dei casi e un grande rate di annichilazione, spiegabile o da un'estesa sezione d'urto associata alle WIMP o supponendo che

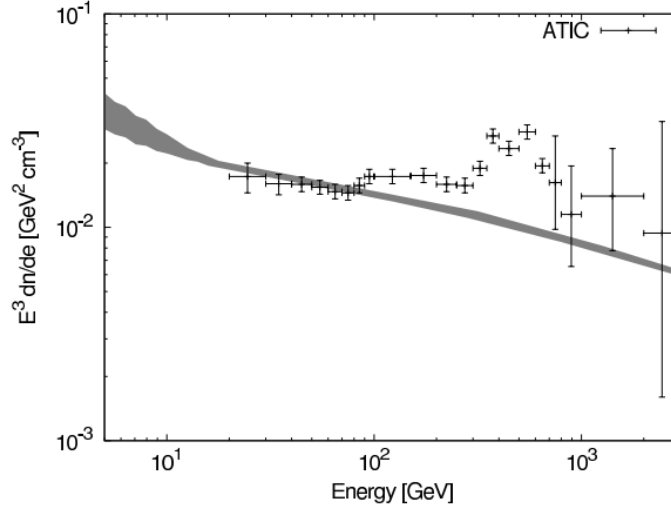


FIGURA 4.4.2. Spettro di elettroni e positroni misurato dal pallone sonda ATIC.

la distribuzione di materia oscura sia non omogenea, producendo così localmente un aumento dell'annichilazione.

Una possibile soluzione ad un tale esito è che si tratti effettivamente di annichilazione di materia oscura.

Una spiegazione alternativa, e più probabile (come spiegato nella sezione 4.7), è da ricercarsi nelle pulsar, poiché è noto che siano sede di produzione di coppie elettrone-positrone. Per accomodare i dati raccolti da PAMELA e ATIC è necessario che una (o più) pulsar ad una distanza massima di 1 kpc e relativamente giovane (di circa $10^5 \div 10^6$ anni) abbia convertito qualche percentuale della sua energia per produrre coppie elettrone-positrone con uno spettro ad alta frequenza. Anche se questa ipotesi richiede un utilizzo di energia maggiore rispetto a quella solitamente osservata, non risulta comunque impossibile.

4.5. INTEGRAL

Il satellite INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) [2], lanciato nel 1993, confermò un'emissione molto luminosa di fotoni a 511 keV dalla regione del bulge galattico, corrispondente ad un rate di $3 \times 10^{42} \text{ positroni/s}$ nella parte più interna della galassia.

Questo rate risulta essere molti ordini superiore a quello atteso. Si può valutare l'ipotesi di un'origine di tipo stellare: da supernovae Ia non risulta possibile, in quanto la supernova non emette abbastanza positroni per spiegare la potenza del segnale misurato, mentre risulta invece plausibile che tale fenomeno sia dovuto a ipernovae o a getti di raggi gamma, entrambi in grado di emettere positroni nel range osservato.

Oltre ad un'origine astrofisica, non è da escludere l'ipotesi materia oscura, ossia che tale segnale sia generato durante l'annichilazione, emettendo positroni ad energia minore di qualche MeV . Questo implica una massa per la materia oscura dell'ordine di $1 \div 3 \text{ MeV}$, che risulta molto più leggera rispetto alla massa attribuita dai modelli più condivisi.

Per particelle di materia oscura con massa dell'ordine dei MeV che generano una abbondanza equivalente a quella misurata, è necessario che queste si siano annichilate durante l'epoca del congelamento con sezione d'urto $\sigma \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^2/\text{s}$; per iniettare però il flusso di positroni richiesto è necessaria una sezione d'urto di $4 \div 5$ ordini inferiore.

Come ultima soluzione è da considerare l'ipotesi di urto: una particella di circa 500 GeV di materia oscura è eccitata da una collisione con particelle più pesanti di circa 1 MeV , emettendo così coppie elettrone-positrone per tornare allo stato fondamentale.

4.6. WMAP

Questo esperimento prende il nome di Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, ossia WMAP [2], ed è utile alla misura della radiazione di fondo nel microonde e allo studio del meccanismo di emissione del mezzo interstellare, inclusi polvere, gas ionizzati e radiazione di sincrotrone. Si tratta di un satellite, lanciato il 30 Giugno 2001, che si occupa dell'analisi della radiazione cosmica.

Tale osservazione ha evidenziato nel 2008 un eccesso di emissione nel microonde ad un angolo di osservazione fino a 20° dal centro della Via Lattea, distribuita approssimativamente con simmetria radiale ed interpretata come radiazione di sincrotrone. Questo eccesso è conosciuto come "nebbia di WMAP".

Tale nebbia era inizialmente attribuita a bremsstrahlung termica da gas caldi, ossia attorno a temperature di $10^4 \div 10^6$ K; ipotesi che risulta da scartare appurata l'assenza di linee di ricombinazione di $H\alpha$ (particolare riga di assorbimento o emissione nello spettro dell'idrogeno) e di emissione di raggi X.

La produzione di questa nebbia può essere associata ad annichilazione di materia oscura, la quale crea elettroni e positroni relativistici che viaggiano sotto l'influenza del campo magnetico galattico, emettendo fotoni di sincrotrone.

Lo studio della distribuzione angolare di tale nebbia risulta interessante, in quanto può essere impiegato nella deduzione della forma del profilo dell'alone della materia oscura.

La morfologia della nebbia risulta ora consistente se si ipotizza essere stata generata da materia oscura distribuita come $\rho \propto r^{-1.2}$.

4.7. Planck

Planck [13], satellite lanciato in orbita nel Maggio 2009, è impiegato per l'osservazione e lo studio della radiazione cosmica di fondo (CMB Cosmic Microwave Background).

Dall'anisotropia di tale radiazione è possibile non solo avanzare ipotesi sulla natura della materia oscura, ma anche spiegare il picco di frazione di positroni ad energie di circa 10 GeV rilevato da PAMELA (sezione 4.4). Secondo i dati raccolti questo picco è dovuto a radiazione cosmica in gamma emessa da oggetti astrofisici, per esempio pulsar, piuttosto che derivanti dall'annichilazione di materia oscura.

La materia oscura, annichilendo, scalda e ionizza la radiazione gassosa; questo processo dipende dalla natura delle particelle prodotte dall'annichilazione, in particolare la coppia elettrone-positrone e fotoni.

La frazione di energia dovuta alla massa a riposo iniettata nel gas è caratterizzata da un fattore di efficienza $f(z)$, che dipende dal redshift ed assume tipicamente valori nel range $0.01 \div 1$.

La dipendenza di $f(z)$ dal redshift può essere ignorata, considerando che i dati raccolti da Planck riguardo alla CMB risultano sensibili rispetto al redshift solo in un range limitato di $z \sim 1000 \div 600$, con z redshift.

Assumendo dunque $f(z = 600) = f_{eff}$, i risultati del 2013, con confidenza del 95%, per la sezione d'urto di annichilazione di materia oscura per velocità media moltiplicata per il parametro di efficienza $\langle \sigma v \rangle f_{eff}$ sono mostrati in Figura 4.7.1

.

Si noti come nell'area blu, ossia quella esclusa da Planck, vi siano riportati 3 punti grigi, uno dei quali indica i risultati ottenuti da PAMELA nell'osservazione dei raggi gamma.

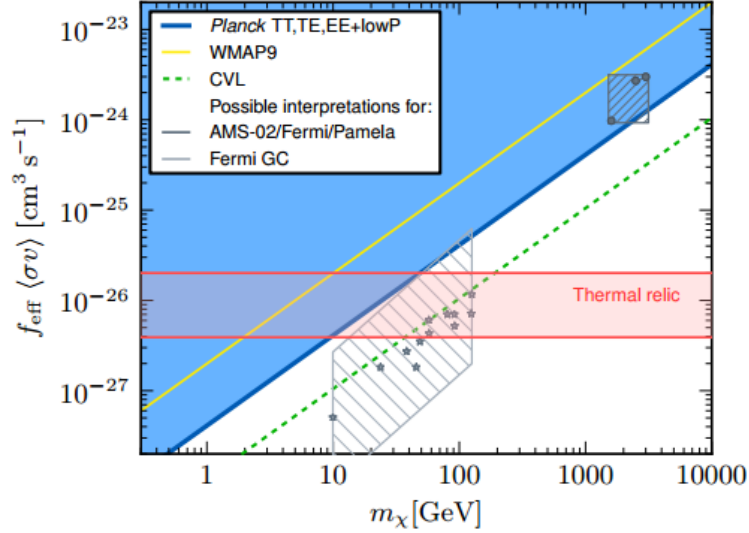


FIGURA 4.7.1. Limiti sulla sezione d’urto di annichilazione di materia oscura per velocità media moltiplicata per il parametro di efficienza f_{eff} , in funzione della massa delle particelle di materia oscura. L’area blu mostra la zona esclusa da Planck, mentre i punti grigi indicano i best fit degli eccessi di radiazione gamma trovati per diversi esperimenti, fra cui PAMELA.

Grazie a Planck è dunque possibile spiegare come i risultati ottenuti da PAMELA non siano principalmente da attribuire alla materia oscura, ma piuttosto a radiazione riconducibile a corpi celesti.

Nonostante l’ipotesi che il picco in gamma sia dovuto all’annichilazione di materia oscura sia improbabile, non è da escludere completamente, attribuendo una sezione d’urto del genere (due ordini di grandezza maggiore rispetto ad una tipica sezione d’urto associata a relitti termici) a materia esotica, la cui sezione d’urto scala come v^2 (ipotesi non confermabile con dati di CMB).

4.8. Fermi-LAT

Il telescopio Fermi-LAT (Fermi Large Area Telescope) [11] [16] processa dati riguardanti l'osservazione delle galassie sferoidali nane nella Via Lattea.

Tale rilevazione è durata 6 anni e sono di seguito riportati i risultati ottenuti.

I dati processati dall'Agosto 2008 all'Agosto 2014 non riportano un particolare eccesso di raggi gamma associati alle galassie sferoidali nane della Via Lattea, sia analizzandole individualmente che come popolazioni.

È stato possibile, attraverso l'analisi combinata di 15 galassie nane, imporre un limite superiore alla sezione d'urto (in realtà sezione d'urto per velocità media $\langle \sigma v \rangle$) con livello di confidenza al 95% per WIMP con massa $2 \text{ GeV} \div 10 \text{ TeV}$ che annichiliscono in 6 differenti modi in particelle del Modello Standard: $u\bar{u}$ (quark up), $b\bar{b}$ (quark bottom), W^+W^- (bosone W), $\tau^+\tau^-$ (leptone tau), $\mu^+\mu^-$ (leptone mu) o e^+e^- (elettrone). Tali andamenti sono riportati in Figura 4.8.1.

Si ipotizza che i decadimenti sopra descritti avvengano con un rate de 100% rispetto ad un solo tipo.

Attraverso questa analisi si nota come la deviazione massima nella radiazione si ha per particelle di materia oscura con masse di circa $2 \text{ GeV}/c^2$ con annichilazione e^+e^- , mentre di $5 \text{ GeV}/c^2$ per particelle con annichilazione $\mu^+\mu^-$.

Si noti dalla Figura 4.8.1 come il limite imposto sulla sezione d'urto per velocità media corrisponda al range di valori assunto da un tipico decadimento debole ($10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$), ed è questo che si intende per WIMP Miracle (sezione 2.2.2).

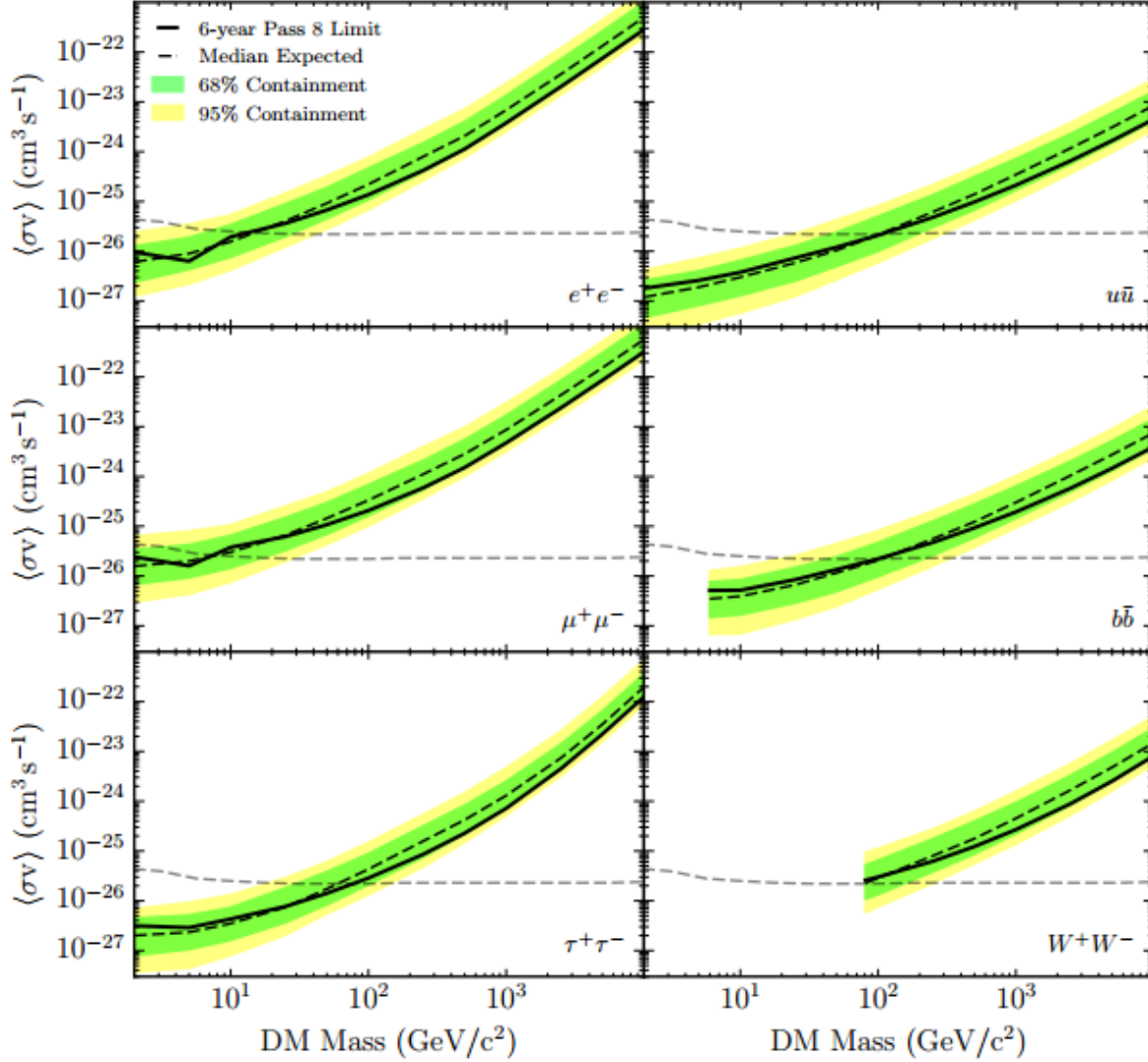


FIGURA 4.8.1. Sezione d'urto per velocità media in funzione della massa delle particelle di materia oscura, dove la zona verde indica la sensibilità attesa di 1σ e quella gialla di 2σ . Dati ottenuti dall'analisi di 15 galassie sferoidali nane.

4.9. CTA

Il telescopio CTA (Cherenkov Telescope Array) [14] ricerca WIMP, considerando un vasto range di masse. Tale esperimento ancora non è stato realizzato, i dati di seguito riportati sono ipotesi sulla sensibilità.

L'osservazione si svolge principalmente ad angoli di pochi gradi ($\pm 1.3^\circ$) dal centro dell'alone galattico.

Vengono raccolte 500 ore all'anno di osservazione della Via Lattea, escludendo però la zona più centrale, poiché la densità di materia oscura è ancora incerta ad una distanza di pochi *kpc*; per questo CTA si occupa anche della rilevazione nella zona vicina alle galassie sferoidali nane, con una raccolta dati di 100 ore all'anno.

L'osservazione della Via Lattea permette di ricevere un segnale di annichilazione di materia oscura (raggi gamma) su grandi scale angolari, ma, poiché diffuso, risulta difficile discernere il segnale effettivo, proveniente da tale annichilazione, da un fondo dovuto all'emissione di altre sorgenti astrofisiche.

Nelle vicinanze di galassie nane invece tale separazione è più semplice, ma risulta più complicata la rilevazione di un segnale adeguato, il quale si presenta più debole, rispetto a quello osservato nella Via Lattea, a causa della distanza.

É di seguito riportato (Figura 4.9.1) l'andamento della sensibilità per sezione d'urto in funzione della massa delle particelle di materia oscura determinato dalle osservazioni della Via Lattea, con il metodo del profilo di Einasto (funzione matematica che descrive l'andamento della densità in oggetti stellari sferici, in funzione della distanza).

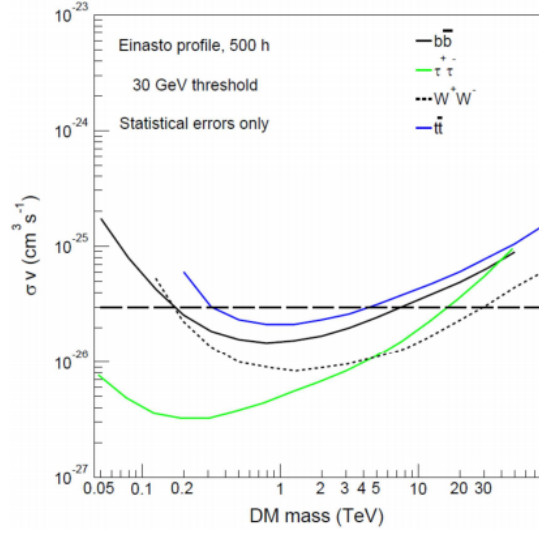


FIGURA 4.9.1. Predizione della sensibilità per osservazione nell'alone galattico, per diversi modi di annichilazione.

Per le osservazione delle galassie nane invece sono di seguito riportati due grafici: Figura 4.9.2, che mostra l'andamento della sensibilità della sezione d'urto, in base ai diversi modi di annichilazione, in funzione della massa delle particelle di materia oscura per la galassia sferoidale nana Sculptor, e Figura 4.9.3, che riporta sempre tale sensibilità, ma per un'annichilazione del solo tipo $b\bar{b}$ e per più galassie nane (Sculptor, Draco, Coma Berenices e Segue 1).

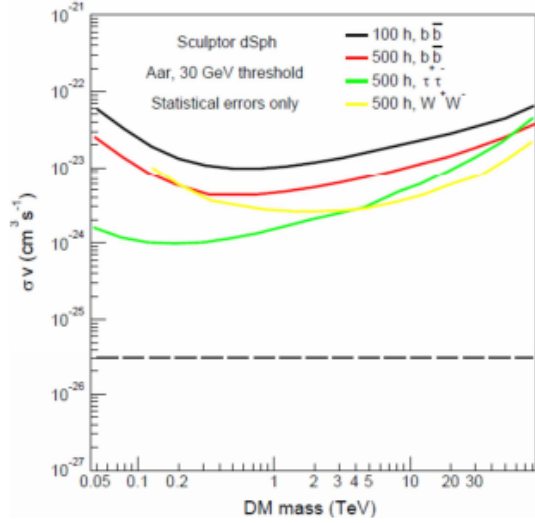


FIGURA 4.9.2. Sensibilità della sezione d'urto, in base ai diversi modi di annichilazione, in funzione della massa delle particelle di materia oscura per la galassia sferoidale nana Sculptor.

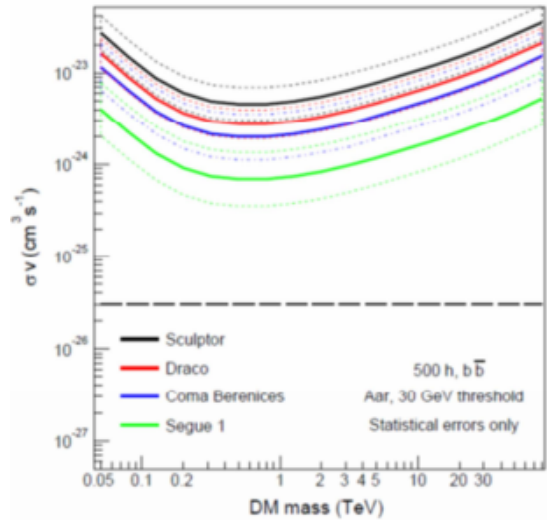


FIGURA 4.9.3. Sensibilità della sezione d'urto per annichilazione $b\bar{b}$, in funzione della massa delle particelle di materia oscura per diverse galassie sferoidali nane.

CAPITOLO 5

Valutazioni Finali

Nei capitoli precedenti sono state riportate le evidenze sperimentali che portano a teorizzare l'esistenza della materia oscura e sono state trattate varie ipotesi sulla sua produzione e composizione.

Questa sezione è dedicata alla sintesi di quanto trattato.

Per via di evidenze sperimentali di tipo gravitazionale (cfr. Capitolo 1) si è ipotizzata la presenza di una materia diversa dalla visibile, in grado di interagire gravitazionalmente, detta materia oscura.

Le moderne teorie prevedono che tale materia possa essere composta da diversi tipi di particelle (cfr. Sezione 2.2.2), fra cui le più probabili sono le WIMP.

Vi sono diversi metodi per rilevare la presenza di materia oscura, mostrati in Figura 2.3.1 (nella Sezione 2.3): abbiamo descritto in particolare la rilevazione diretta (cfr. Capitolo 3), ossia derivante dallo scattering con nuclei di materia ordinaria, e quella indiretta (cfr. Capitolo 4), rilevando particelle derivanti dalla sua annichilazione.

I risultati di tali esperimenti riportano limiti riguardanti la sezione d'urto (nel caso di rilevazione dirette si tratta di sezione d'urto per un accoppiamento WIMP-nucleone, mentre nel caso di rilevazioni indirette per annichilazione di WIMP) in funzione solitamente della massa.

Grazie all'imposizione di tali limiti si sono potute avanzare ipotesi a proposito della materia oscura, la cui presenza è ormai associata. Ancora oggi però non vi sono evidenze schiaccianti riguardo alla composizione di tale materia o alle proprietà delle particelle costituenti.

Bibliografia

- [1] Mariangela Lisanti *Lectures on Dark Matter Physics* arXiv:1603.03797v1 [hep-ex], 2016.
- [2] Dan Hooper *TASI 2008 LECTURES ON DARK MATTER* arXiv:1304.4279v3 [hep-ex], 2013.
- [3] Matthew Reece *Lectures on Dark Matter* Department of Physics, Harvard University, 2015.
- [4] Graciela B. Gelmini *TASI 2014 LECTURES: THE HUNT FOR DARK MATTER* arXiv:0901.4090v1 [hep-ph], 2009.
- [5] ATLAS Collaboration *Search for direct production of charginos, neutralinos and sleptons in final states with two leptons and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS detector* arXiv:1403.5294v1 [hep-ex] , 2014.
- [6] The CMS Collaboration *Searches for electroweak production of charginos, neutralinos, and sleptons decaying to leptons and W, Z, and Higgs bosons in pp collisions at 8 TeV* arXiv:1405.7570v2 [hep-ex] , 2014.
- [7] R. Agnese, Z. Ahmed, A.J. Anderson et al. *Silicon Detector Dark Matter Results from the Final Exposure of CDMS II* arXiv:1304.4279v3 [hep-ex], 2013.
- [8] S.E.A. Orrigo. *Direct Dark Matter Search with XENON100* EDP Sciences, 2015.
- [9] D.S. Akerib, H.M. Araùjo, X. Bai et al. *First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research Facility* arXiv:1310.8214v2 [astro-ph.CO], 2014.
- [10] D.S. Akerib, H.M. Araùjo, X. Bai et al. *Improved Limits on Scattering of Weakly Interacting Massive Particles from Reanalysis of 2013 LUX data* arXiv:1512.03506v3 [astro-ph.CO], 2016.
- [11] M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert et al. *Limits on Dark Matter Annihilation Signals from the Fermi LAT 4-year Measurement of the Isotropic Gamma-Ray Background* arXiv:1501.05464v2 [astro-ph.CO] , 2015.

- [12] L. Aparicio, M. Cicoli, B. Dutta et al. *Non-thermal CMSSM with a 125 GeV Higgs* arXiv:1502.05672v1 [hep-ph], 2015.
- [13] P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al. *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters* arXiv:1502.01589v3 [astro-ph.CO] , 2016.
- [14] J. Carr, C. Balazs, T. Bringmann et al. *Prospects for Indirect Dark Matter Searches with the Cherenkov Telescope Array (CTA)* The 34th International Cosmic Ray Conference, 2015.
- [15] M.G. Aartsen, R. Abbasi, Y. Abdou et al. *Search for dark matter annihilations in the Sun with the 79-string IceCube detector* arXiv:1212.4097v3 [astro-ph.HE], 2015.
- [16] M. Ackermann, A. Albert, B. Anderson et al. *Searching for Dark Matter Annihilation from Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies with Six Years of Fermi-LAT Data* arXiv:1503.02641v2 [astro-ph.HE] , 2015.