



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Rivelazione indiretta della materia oscura

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea in Fisica

Candidato

Viola De Renzis
Matricola 1656259

Relatore

Prof. Antonio Capone

Anno Accademico 2017/2018

Tesi non ancora discussa

Rivelazione indiretta della materia oscura

Tesi di Laurea. Sapienza – Università di Roma

© 2018 Viola De Renzis. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con L^AT_EX e la classe Sapthesis.

Versione: 13 giugno 2018

Email dell'autore: derenzis.1656259@studenti.uniroma1.it

*Dedicato a
mio padre e mia madre*

Indice

INTRODUZIONE	vii
1 Prove cosmologiche e astrofisiche dell'esistenza della materia oscura	1
1.1 Materia oscura negli ammassi di galassie	1
1.2 Curve di rotazione delle galassie	2
1.3 Lenti gravitazionali	3
2 Ricerca della materia oscura	5
2.1 Proprietà delle particelle di Materia Oscura	5
2.2 Possibili candidati per la materia oscura	6
2.3 Ricerche dirette, indirette e ai collider	7
2.3.1 Ricerca diretta	7
2.3.2 Ricerca ai collider	9
2.3.3 Ricerca indiretta	10
3 Rivelazione indiretta della materia oscura	13
3.1 ANTARES	14
3.1.1 Ricerca di neutrini dovuti ad annichilazione di WIMPs accumulate nel Sole	17
3.1.2 Ricerca di neutrini dovuti ad annichilazione di WIMPs accumulate nella Terra	20
3.1.3 Ricerca di neutrini dovuti ad annichilazione di WIMPs accumulate nel Centro Galattico	23
4 Conclusioni	27
Bibliografia	29

INTRODUZIONE

L'esistenza della materia oscura è uno dei grandi problemi irrisolti della fisica moderna. Se si pensa che la materia ordinaria costituita da stelle e galassie rappresenta soltanto il 5% del nostro universo, risulta evidente che la maggior parte della materia esistente ci è sconosciuta. Questa materia invisibile ai nostri sensi e ai nostri strumenti è chiamata Materia Oscura.

Nel XX secolo sono state effettuate numerose osservazioni in cosmologia e astrofisica che costituiscono l'evidenza della possibile esistenza di materia oscura e che coinvolgono l'analisi delle curve di rotazione delle galassie, lo studio delle dinamiche interne degli ammassi di galassie e delle lenti gravitazionali.

Tutte le nostre conoscenze del mondo che ci circonda sono riassunte in un modello teorico chiamato Modello Standard (MS) il quale presenta però alcune questioni fisiche ancora irrisolte. Il modello standard infatti non teorizza l'esistenza della materia oscura poiché non prevede nessuna particella con le caratteristiche dedotte dalle osservazioni sperimentali: occorre una particella non barionica, non relativistica e che interagisce gravitazionalmente con la materia.

A causa di questa mancanza del modello standard sono nate molte teorie che cercano di fornire dei candidati possibili per la DM e tra queste vi è la Supersimmetria (SUSY). I nuovi modelli teorici e le osservazioni hanno portato alla conclusione che la materia oscura può interagire solo debolmente con le particelle del modello standard. Partendo da questa ipotesi si possono effettuare tre diversi tipi di ricerca della materia oscura: la ricerca diretta, indiretta o con i collider. La tipologia che verrà approfondita in questa tesi è quella indiretta che sfrutta i segnali di radiazione prodotti dall'annichilazione della materia oscura che si è accumulata in grandi oggetti astrofisici come il Sole, la Terra o il Centro Galattico.

Capitolo 1

Prove cosmologiche e astrofisiche dell'esistenza della materia oscura

Nei primi decenni del XX secolo molti astronomi e fisici tentarono di stimare l'ammontare della materia non luminosa nelle galassie.

La ricerca della materia oscura ha avuto origine all'inizio del '900 quando venne notata una discrepanza tra la massa misurata negli ammassi di galassie e la stessa quantità stimata considerando esclusivamente la materia luminosa.

Negli anni '70 gli astronomi trovarono nello studio delle curve di rotazione delle galassie un'ulteriore evidenza per l'esistenza della materia oscura.

Tutte le osservazioni effettuate in quegli anni hanno condotto all'ipotesi dell'esistenza di una quantità di materia ulteriore rispetto a quella visibile nell'universo.

La massa mancante prende appunto il nome di materia oscura.

1.1 Materia oscura negli ammassi di galassie

La necessità dell'esistenza della Materia Oscura si rese evidente sin dagli anni '30 del secolo scorso, quando l'astronomo Fritz Zwicky (1933) studiò i moti relativi delle galassie che formano l'ammasso della Chioma di Berenice.

Gli ammassi di galassie sono le strutture più dense e massicce conosciute nell'Universo. Sono composti da migliaia di galassie legate insieme dalla loro mutua attrazione gravitazionale e sono considerabili come sistemi virializzati. Per stimare la loro massa si può utilizzare il teorema del Viriale:

$$2 \langle K \rangle + \langle U \rangle = 0$$

. In questa relazione l'energia cinetica K è ricavabile tramite la dispersione delle velocità σ :

$$\langle K \rangle = \frac{1}{2} M_{tot} \sigma^2$$

dove M_{tot} è la massa totale della materia visibile, mentre l'energia potenziale U si ricava da:

$$U = -\alpha \frac{G M M_{tot}}{R_m}$$

dove α è una costante che vale 0.4, G è la costante di gravitazione universale, M è la massa totale dell'ammasso e R_m è il valore del raggio che divide in due popolazioni di egual numero la distribuzione dei raggi dell'ammasso. Sostituendo queste relazioni nel teorema del viriale si ottiene che la massa dell'ammasso è:

$$M = \sigma^2 \frac{R_m}{G\alpha}$$

Zwicky stimò che la massa totale dell'ammasso della Chioma, calcolata tenendo in considerazione solo la materia galattica visibile, risultava essere $M \sim 3 \times 10^{15} M_{sun}$ mentre la luminosità totale era $L \sim 1.4 \times 10^{13} L_{sun}$. Dal rapporto $\frac{M}{L} = 240 \frac{M_{sun}}{L_{sun}}$, Zwicky capì che il valore stimato della massa totale del sistema era decisamente inferiore rispetto al valore atteso, tanto da rendere instabile l'ammasso. Infatti la forza di gravità non avrebbe potuto impedire alle galassie componenti di disperdersi nello spazio. Dato che tale dispersione non si era verificata, era evidente che l'ammasso della Chioma fosse stabile.

Questo problema poteva essere risolto supponendo l'esistenza di una massa maggiore di quella visibile. Zwicky calcolò che, per fare in modo che la forza di gravità potesse tenere unite tutte le galassie componenti, la materia contenuta nell'ammasso della Chioma doveva essere 20 volte maggiore di quella visibile.

1.2 Curve di rotazione delle galassie

Lo studio della dinamica delle galassie è un'altra fondamentale evidenza dell'esistenza della Materia Oscura. Nel 1970 vennero pubblicati due importanti studi riguardo le curve di rotazione delle galassie. Kenneth Freeman, e separatamente, Vera Ford e Kent Rubin studiarono le curve di rotazione galattiche nella banda dell'ottico. Grazie a queste analisi e a quelle effettuate nel campo della radioastronomia, si scoprì che le curve di rotazione delle galassie non presentavano l'andamento atteso, ovvero quello kepleriano: le velocità osservate avevano un andamento in funzione della distanza dal centro galattico che a grandi distanze sembrava essere costante.

Le curve di rotazione sono diagrammi che rappresentano la velocità orbitale dei gas e delle stelle nelle galassie in funzione della loro distanza dal centro galattico. Per tracciare le curve di rotazione si prendono in considerazione le galassie a spirale che sono strutture contenenti miliardi di stelle, disposte nella forma di un disco rotante con una protuberanza centrale (il bulbo). La scelta delle galassie a spirale è giustificata dalla presenza di nubi di idrogeno neutro HI, il quale rende possibile studiare una zona estesa doppiamente rispetto al disco ottico e rende più semplice la misura grazie allo spostamento Doppler della riga di emissione a 21 cm. Si tratta di una riga spettrale causata da una variazione energetica dell'idrogeno neutro interstellare. Tale variazione corrisponde al passaggio dalla situazione in cui l'elettrone e il protone dell'atomo di idrogeno hanno spin parallelo a quella in cui hanno spin antiparallelo. Si ha dunque una transizione che causa emissione di fotoni a 21 cm. Il fenomeno è molto raro e non può essere osservato comunemente in laboratorio, al contrario del caso astronomico visto l'elevato numero di atomi presente nel mezzo interstellare. Si noti che la radiazione ha la frequenza tipica delle onde radio, più esattamente delle microonde, ed è largamente usata in

astronomia in quanto può attraversare le polveri interstellari, opache alla luce visibile.

Nell'approssimazione di galassie sferiche e autogravitanti, si può semplificare lo studio delle curve di rotazione considerando il teorema di Gauss per cui un corpo di massa m risentirà solo della forza generata dalla massa contenuta in una sfera di raggio pari alla distanza del corpo dal centro della distribuzione. Imponendo che tale forza di attrazione sia pari alla forza centripeta necessaria per mantenere il corpo in orbita si ha:

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

da cui si ottiene che la velocità tangenziale del corpo in esame è $v_g = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ dove $M(r)$ è la massa contenuta nell'orbita di raggio r e G è la costante di gravitazione universale. Nel calcolo si assume che la massa della galassia si trovi tutta all'interno di un certo raggio R e che la densità ρ sia uniforme. Per raggi minori di R , la massa risulta essere

$$M = \int_0^R \rho r^2 dr \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = \frac{4\pi\rho r^3}{3}$$

e dunque $v_g \sim r$. Per raggi maggiori di R allora la massa coincide con la massa della galassia ed è costante e quindi $v_g \sim \sqrt{\frac{1}{r}}$. La teoria della gravitazione classica di Newton e le leggi di Keplero prevedevano infatti una curva con un andamento decrescente per raggi maggiori di R .

Le curve di rotazione galattica ottenute sperimentalmente riflettevano, per basse distanze, l'andamento lineare della velocità in funzione di r . Per distanze maggiori invece la velocità non seguiva l'andamento atteso risultando pressoché costante. I dati sperimentali non erano assolutamente conciliabili con le predizioni newtoniane, come è possibile vedere dalla figura [1.1](#). Oltre alla massa visibile deve esistere una massa aggiuntiva che non è concentrata all'interno della galassia stessa ma deve presentarsi come un alone di materia oscura non rivelabile dai nostri strumenti. Dalle considerazioni precedenti è possibile prevedere che, affinché si ottenga l'effetto osservato sperimentalmente, tale alone deve avere un impatto trascurabile a piccole distanze, quindi deve essere poco denso, e deve essere dominante a grandi distanze dove la densità delle stelle è quasi pari a zero. Questo alone di materia oscura è quindi distribuito fino a distanze almeno dieci volte maggiori di quelle occupate dalla materia visibile. Per dare un andamento di tipo piatto delle velocità, la densità a grandi distanze dovrebbe decrescere come $\frac{1}{r^2}$.

1.3 Lenti gravitazionali

Il lensing gravitazionale è un fenomeno che provoca la deviazione del cammino della luce a causa della distorsione della geometria dello spazio tempo, dovuta alla presenza di un grande campo gravitazionale. Gli ammassi di galassie hanno un proprio campo gravitazionale che provoca la curvatura dello spazio tempo. La luce emessa da un oggetto che si trovi dietro l'ammasso in questione viene deviata a causa di tale curvatura. A seconda dell'intensità del campo e dei possibili casi di allineamento tra sorgente, ammasso-lente e osservatore si ottengono immagini distorte dell'oggetto

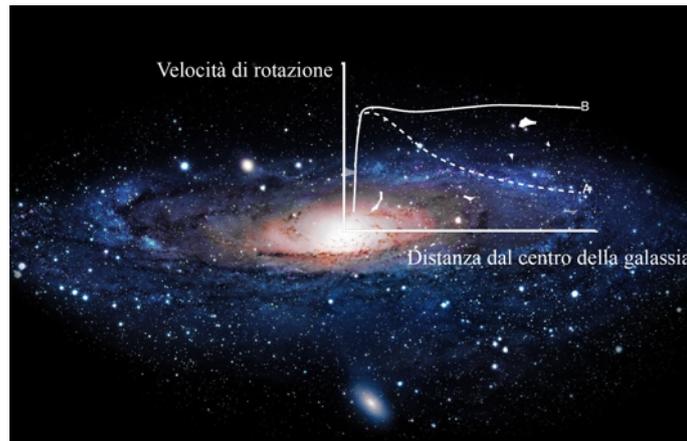


Figura 1.1. Curva di rotazione di una galassia a spirale. La linea tratteggiata rappresenta l'andamento atteso mentre quella continua l'andamento osservato sperimentalmente

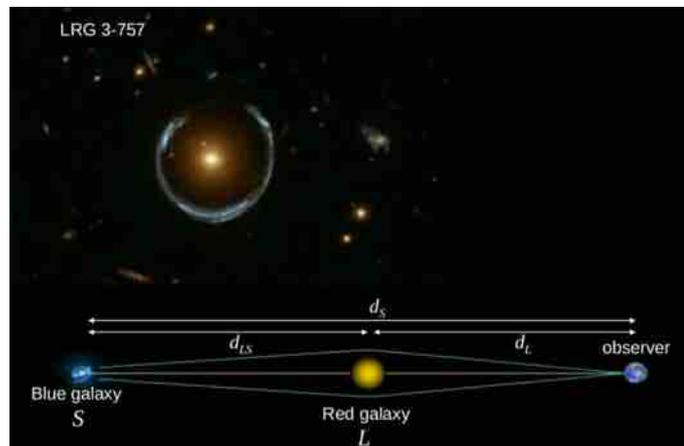


Figura 1.2. Anello formato dall'effetto del lensing gravitazionale dovuto al perfetto allineamento del sistema osservatore-lente-sorgente

che emette. Per diversi angoli di allineamento si possono osservare effetti diversi, come una lieve deformazione in archi: l'immagine originaria viene allungata dalla deflessione della luce. Oppure l'effetto di lensing si può manifestare tramite la creazione di immagini multiple dell'oggetto sorgente. Infine particolarmente visibile è la creazione di un anello, nel caso in cui i tre oggetti siano perfettamente allineati, come mostrato in Fig 1.2. Utilizzando la Relatività Generale si può ricavare l'angolo di deviazione della luce

$$\alpha = 4 \frac{GM}{c^2 b}$$

dove M è la massa dell'oggetto lente (in questo caso l'ammasso), b è la distanza tra il raggio e l'ammasso e c è la velocità della luce. Anche da questa stima della massa degli ammassi di galassie, si osserva che la massa totale del sistema deve essere molto maggiore rispetto a quella visibile.

Capitolo 2

Ricerca della materia oscura

Comprendere la vera natura della materia oscura rappresenta una delle maggiori sfide della fisica contemporanea. Mentre il modello standard delle particelle descrive esattamente le proprietà della materia ordinaria, la materia oscura è ancora sconosciuta. Una delle spiegazioni più accreditate riguardanti la natura della materia oscura consiste nell'introduzione di una nuova classe di particelle subatomiche, conosciute come WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*). Queste particelle hanno masse dell'ordine della scala debole (~ 100 GeV) e sono poco interagenti con le particelle del Modello Standard (le sezioni d'urto delle particelle di DM hanno valori simili alla σ delle interazioni deboli). Per questo motivo sono difficili da rivelare e impossibili da vedere poichè non emettono nè riflettono luce. Le WIMPs compaiono in molti modelli teorici quali la supersimmetria (SUSY). Anche se quello delle WIMPs non costituisce l'unico scenario possibile per la spiegazione della natura della materia oscura, la loro scoperta o l'esclusione di questa ipotesi rappresenta un passo essenziale per la ricerca della DM.

L'interazione tra le particelle di Dark Matter con quelle del Modello Standard ispira diversi approcci di ricerca. Nel capitolo verranno brevemente descritte le tecniche di ricerca diretta, indiretta e ai collider.

2.1 Proprietà delle particelle di Materia Oscura

Sulla base delle premesse fatte finora, pur non essendoci evidenze sperimentali dirette, si può ipotizzare che le particelle di Materia Oscura abbiano le seguenti proprietà:

- Devono essere non barioniche, non relativistiche e interagiscono gravitazionalmente;
- Devono essere neutre, cioè prive di carica elettrica e di colore, altrimenti non sarebbero oscure a causa dell'interazione elettromagnetica e di quella forte;
- Devono essere stabili su scale dei tempi confrontabili con l'età dell'universo. Se decadessero la loro componente di massa nelle galassie diminuirebbe e non si osserverebbero gli effetti ad esse dovuti

Per capire perchè gli astronomi hanno pensato che la DM sia formata da particelle di materia non ordinaria bisogna considerare l'evoluzione dell'Universo e lo

studio della formazione di strutture come gli ammassi di galassie. Si pensa che dopo il Big Bang, nell'universo primordiale, ci fosse una condizione di equilibrio termico e chimico fra tutte le specie di particelle. In questa condizione erano possibili processi di annichilazione e produzione di particelle del MS ma anche di DM e della sua rispettiva antiparticella. A causa dell'espansione dell'universo, la temperatura diminuì finché la produzione di coppia particella-antiparticella di DM non fu più possibile, anche se continuò il processo di annichilazione. La successiva diminuzione di densità di DM, poi, rese infinitesima la probabilità di annichilazione. A questo punto si verificò un congelamento della densità di materia oscura (residuo termico), la quale è arrivata fino a noi grazie alla sua proprietà di stabilità. Sulla base di questa ipotesi e della stima della densità di DM si può dedurre che essa sia composta da particelle della scala elettrodebole ($\sim 100\text{GeV}$), debolmente interagenti.

Gli studi sulla formazione delle strutture dell'universo aiutano a capire se la DM debba essere relativistica o meno. A questo scopo è necessario fare una distinzione: la materia oscura non barionica può essere fredda (CDM) o calda (HDM). La Cold Dark Matter (CDM) è un tipo di materia oscura che all'epoca del disaccoppiamento tra radiazione e materia era non relativistica al contrario della HDM che nella stessa epoca era invece relativistica. Il principale candidato per la HDM è il neutrino, una particella molto leggera che si muove a velocità vicine a quella della luce. Si pensa che la HDM non abbia contribuito alla formazione delle galassie proprio perché strutture di piccola massa fatte di materia oscura calda non sarebbero state in grado di collassare e addensarsi a causa della capacità di particelle come i neutrini di sfuggire in ogni direzione da zone di alta densità. In questo scenario della materia oscura calda si sarebbero formate prima le grandi strutture e solo successivamente esse si sarebbero frammentate. Considerando invece il caso della Materia Oscura Fredda, le WIMPs, più lente (non relativistiche) e pesanti, formano dapprima strutture relativamente piccole all'interno delle quali viene attratta la materia ordinaria. Solo successivamente queste strutture si addensano formando galassie e ammassi di galassie. In base a osservazioni astronomiche e simulazioni matematiche si tende a preferire l'ipotesi di materia oscura fredda nonostante quest'ultima sia solo ipotizzata dalle attuali teorie sulle particelle elementari e non sia stata ancora osservata. L'abbondanza residua di WIMPs, oggi, come risultato della produzione termica, richiede una sezione d'urto di annichilazione media di circa $\langle \sigma_{Av} \rangle = 3 \cdot 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ che è la scala attesa per le particelle poco interagenti. Inoltre le WIMPs si muoverebbero con una velocità media $\langle v \rangle \sim 270 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

2.2 Possibili candidati per la materia oscura

La teoria supersimmetrica (SUSY) è un'estensione del modello standard che fornisce i candidati più probabili per le particelle di materia oscura. La SUSY prevede l'esistenza di un partner supersimmetrico per ogni particella facendo corrispondere ad ogni fermione un bosone e viceversa. Poiché le particelle supersimmetriche non sono ancora state osservate, la supersimmetria, se esiste, deve essere una simmetria rotta, così da permettere a tali particelle di essere più massive di quelle corrispondenti del modello standard ed essere perciò sfuggite finora al riscontro sperimentale. La

particella più leggera predetta dalla supersimmetria è il neutralino χ meno massivo chiamato LSP (Lightest Supersymmetric Particle) che avrebbe tutte le proprietà richieste, compresa la stabilità grazie alla R-parità. La R-parità si introduce per soddisfare le osservazioni sperimentali secondo le quali il numero barionico e leptonic sono conservati. Si tratta di un numero quantico introdotto ad hoc che assume il valore di 1 per le particelle del MS e di -1 per le particelle supersimmetriche. Quindi la conservazione della R-parità impone che i prodotti di decadimento di LSP includano almeno un altro partner supersimmetrico, che ha massa necessariamente minore. La LSP non può quindi decadere in un'altra particella più leggera di R-parità -1 e quindi è stabile, come richiesto per le WIMPs, anche se può comunque annichilarsi con la sua rispettiva antiparticella.

2.3 Ricerche dirette, indirette e ai collider

Esistono tre diversi approcci di ricerca per lo studio tra le interazioni di particelle di DM e particelle del MS: la ricerca diretta, indiretta o ai collider. Attraverso la rivelazione diretta di materia oscura si osserva l'interazione elastica delle WIMPs con i nuclei dei rivelatori utilizzati che vengono respinti producendo una certa energia di rinculo. La ricerca indiretta di materia oscura tenta invece di osservare i prodotti finali (e quindi particelle elementari) delle annichilazioni fra WIMPs accumulate in grandi oggetti astrofisici come il Sole, la Terra e il Centro Galattico. La ricerca ai collider si propone invece di sfruttare le collisioni tra particelle di materia ordinaria (e quindi particelle del modello standard) negli acceleratori per produrre artificialmente particelle supersimmetriche. I processi di interazione tra le particelle di DM e di SM alla base dei vari approcci di ricerca sono illustrati in figura [2.1](#).

Per effettuare questi esperimenti è necessario stimare il numero di eventi attesi in un dato intervallo di tempo. Chiamiamo R la frequenza di eventi osservabili:

$$R = N \int \phi(e)\sigma(e)dE$$

in cui N è il numero di atomi bersaglio, ϕ il flusso delle particella di materia oscura e σ la sezione d'urto di annichilazione e produzione delle particelle ricercate. Il valore di N dipende dal materiale rivelatore e la sezione d'urto può essere trattata come parametro libero. La densità di materia oscura locale si ottiene da un confronto tra la relazione massa-luminosità attesa e sperimentale.

Ci sono due tipi di interazioni tra WIMPs e nuclei di materia: la prima è caratterizzata da un tipo di accoppiamento scalare indipendente dallo spin ("SI") per il quale la WIMP percepisce il nucleo puntiforme e quindi come unico bersaglio, andando incontro ad un processo di diffusione coerente; la seconda è relativa ad un accoppiamento vettoriale dipendente dalla configurazione di spin ("SD") che rende il processo dipendente dallo stato di polarizzazione, proporzionale alla quantità $J(J+1)$ dove J è il numero quantico angolare.

2.3.1 Ricerca diretta

La ricerca diretta di materia oscura (in inglese Direct Detection "DD") consiste nella rivelazione di un segnale prodotto dallo scattering $\chi - N$ tra le particelle di

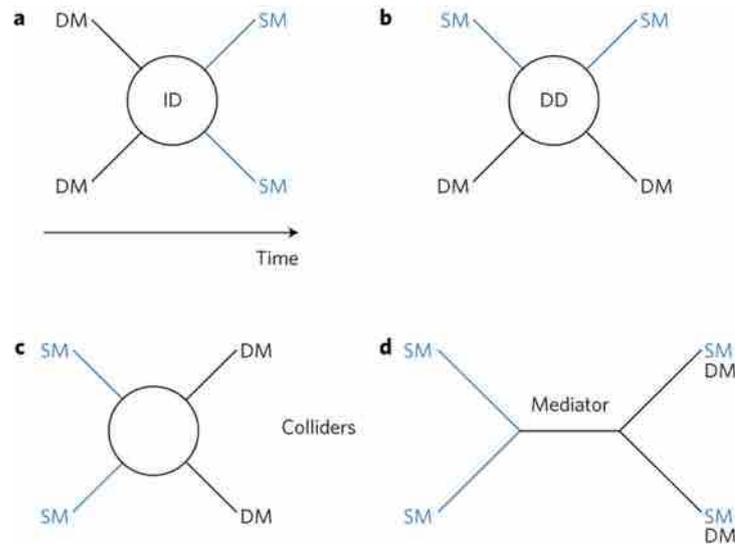


Figura 2.1. Interazioni fra particelle di materia oscura e particelle di materia ordinaria che sono alla base dei diversi approcci di ricerca. La figura **a** raffigura l'interazione alla base della ricerca indiretta, la figura **b** è la rappresentazione della ricerca diretta di materia oscura mentre le figure **c** e **d** raffigureranno le interazioni che avvengono negli acceleratori di particelle per la ricerca ai collider.

materia oscura e nuclei N di materia ordinaria, in particolare gli atomi del rivelatore utilizzato (fig 2.1 a). Il segnale è rappresentato dall'energia di rinculo degli atomi su cui lo scattering avviene, in genere dell'ordine del KeV. La difficoltà di questi esperimenti consiste nel fatto che la frequenza attesa di eventi è molto bassa, tanto che sarebbe impossibile riconoscere gli urti cercati in un apparato esposto alla radiazione atmosferica. Per questo motivo gli esperimenti di rivelazione diretta vengono realizzati in laboratori posti a grandi profondità in modo da evitare le contaminazioni dovute ai raggi cosmici o alla radioattività naturale dei materiali usati per i rivelatori.

Modulazione annuale Data l'impossibilità di costruire esperimenti ideali che eliminino completamente il fondo, vengono utilizzate tecniche in grado di discriminare il fondo dagli eventi di segnale. Una di queste tecniche sfrutta un effetto prevedibile dovuto al moto relativo della Terra rispetto all'alone di materia oscura galattica: una modulazione annuale delle interazioni WIMP-rivelatore. Tale modulazione è dovuta al fatto che, assumendo l'alone di Materia Oscura senza una direzione preferenziale nel sistema di riferimento della galassia, il Sole si muove con una velocità di ~ 220 km/s lungo il disco galattico verso la costellazione del Cigno. Il moto della Terra attorno al Sole, per un certo periodo dell'anno che va da marzo a settembre, è concorde con quello solare. Questo effetto, unito all'inclinazione del piano orbitale terrestre rispetto alla direzione del moto solare di circa 60 gradi, provoca nel sistema di riferimento del laboratorio situato sulla Terra, un vento di WIMP modulato nel corso dell'anno (fig 2.3). Questo fenomeno interessa fortemente la tecnica di rivelazione diretta poiché provoca un tasso di WIMPs modulato: il flusso di WIMPs che attraversano la Terra è massimo a Giugno quando le velocità del Sole e della

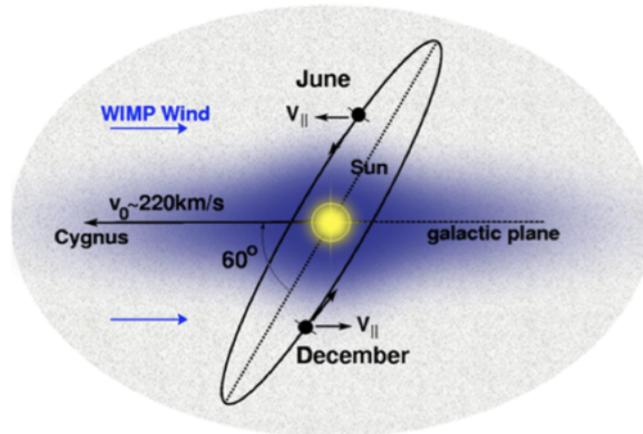


Figura 2.2. modulazione annuale del vento di WIMP dovuto al moto della Terra attorno al Sole

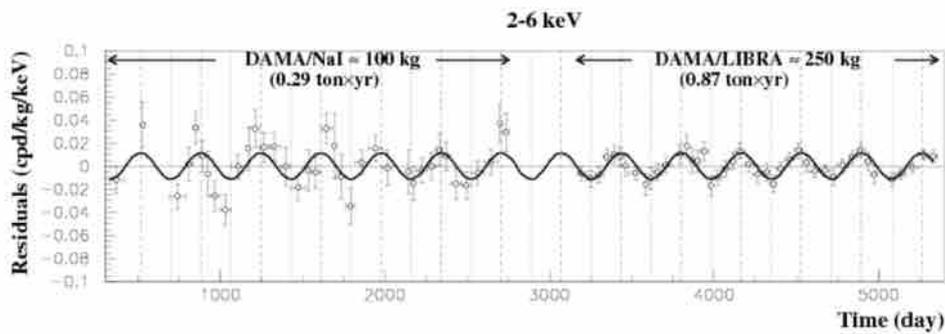


Figura 2.3. La modulazione annuale residua di DAMA

Terra nel sistema di riferimento della Galassia si sommano, mentre è minimo sei mesi più tardi, a dicembre, quando tali velocità hanno verso opposto.

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è attivamente impegnato nell'investigazione delle particelle di DM nell'Universo; in particolare, l'esperimento DAMA, presso i laboratori del Gran Sasso, esplora la presenza di WIMP nell'alone galattico mediante lo studio della modulazione annuale. L'esperimento ha osservato una modulazione del segnale che confermerebbe la presenza di particelle di DM.

2.3.2 Ricerca ai collider

La ricerca di materia oscura ai collider si basa sull'assunzione che le particelle di DM e del MS interagiscano tra loro. Esiste dunque la possibilità di produrre particelle di materia oscura a partire da quelle del modello standard in un acceleratore di particelle. Dimostrare la produzione di DM è uno degli obiettivi di LHC (Large Hadron Collider), il più grande collider di particelle del mondo situato in Svizzera. Nell'acceleratore LHC ci si aspetta di osservare una reazione come quella illustrata

in fig 2.1 c. Le ricerche ai collider puntano a rivelare le particelle di DM, ma possono anche cercare la particella mediatrice dell'interazione tra particelle di DM e del MS (vedi figura 2.1 d). Negli esperimenti all'interno degli acceleratori una particella viene rivelata grazie alla sua interazione con l'apparato sperimentale oppure attraverso l'identificazione dei suoi prodotti di decadimento. Tuttavia la DM non lascia traccia del suo passaggio nel rivelatore in quanto essa interagisce attraverso una sezione d'urto molto piccola con la materia. Inoltre la DM è stabile, quindi non è possibile rivelarla dai suoi prodotti di decadimento. Non essendo la DM direttamente rivelabile, la sua presenza deve essere ricavata per differenza sfruttando la conservazione del quadrimpulso. La ricerca del momento mancante nella collisione tra particelle potrebbe essere una prova rilevante per molti scenari della supersimmetria. Nel caso di eventi nei quali intervengano solo particelle del Modello Standard, il momento mancante atteso è pari a zero a differenza di eventi nei quali sono presenti particelle di DM. Questa è la ragione per cui il momento mancante consente di discriminare tra la produzione di DM e quella di eventi in cui è presente solo materia ordinaria.

La difficoltà in questo tipo di esperimenti consiste nel fatto che il momento mancante è esattamente pari a zero solo nell'ipotesi di rivelatori ideali. Nella realtà potrebbe essere diversa da zero anche nel caso in cui siano presenti solo particelle del MS, perchè i rivelatori hanno risoluzione finita e possono essere attraversati da particelle che non interagiscono con essi. Per questa ragione tale metodo per discriminare tra MS e DM funziona bene solo se la particella supersimmetrica porta con sé un impulso significativo e quindi si ha un elevato momento mancante.

Quindi la presenza di momento mancante segnala inequivocabilmente la presenza di nuova fisica.

2.3.3 Ricerca indiretta

La ricerca indiretta di materia oscura si basa sull'ipotesi secondo cui il neutralino χ , il candidato più probabile per la materia oscura, sia una particella di Majorana, ossia antiparticella di sé stessa; questo porterebbe a sporadiche annichilazioni $\chi - \chi$ che produrrebbero a catena le usuali particelle descritte dal Modello Standard: raggi γ , neutrini, positroni e antiprotoni. Si pensa che l'energia delle particelle prodotte risulterebbe una frazione non trascurabile della massa delle particelle annichilite, ossia centinaia di GeV.

Gli esperimenti per la rivelazione indiretta non rivelano dunque la materia oscura nei laboratori ma si pongono come obiettivo quello di rivelare i prodotti delle annichilazioni che siano compatibili con le energie attese e chiaramente distinguibili da quelli originati da meccanismi già noti.

L'annichilazione particella -antiparticella può avvenire all'interno del Sole o della Terra poichè la materia oscura si accumula negli oggetti astrofisici massicci. I prodotti dell'annichilazione rivelabili dai telescopi terrestri sono ad esempio i neutrini solari altamente energetici, prodotti come risultato finale dell'annichilazione di particelle di DM nel Sole.

La ricerca indiretta ("indirect detection") viene effettuata mediante telescopi sulla Terra o sui satelliti. Le tipologie di telescopi usati principalmente per la rivelazione

indiretta sono tre:

- **Telescopi Cherenkov Imaging** (MAGIC, VERITAS, HESS) che ricercano raggi γ con energia molto elevata ($E_\gamma > 30\text{GeV}$) e si trovano sulla superficie terrestre. Il nome di questi telescopi deriva dall'effetto Cherenkov dovuto alla propagazione nell'atmosfera degli sciame di particelle cariche relativistiche originate dall'interazione di raggi cosmici di alta energia. Tale effetto viene poi rivelato dai telescopi.
- **Rivelatori di neutrini** (ANTARES e Ice-Cube) che si focalizzano sulla ricerca di neutrini secondari prodotti dall'annichilazione della materia oscura accumulata al centro del Sole, della Galassia o della Terra. La descrizione di questo tipo di rivelatori verrà approfondita nel capitolo successivo.
- **Telescopi spaziali** (PAMELA, satellite Fermi, AMS) che sono in grado di rivelare raggi cosmici primari e raggi cosmici ad alte energie, grazie alla loro posizione nello spazio. La prova dell'esistenza di materia oscura sarebbe l'aumento del flusso di positroni e antiprotoni poichè la loro origine può essere attribuita alla sua annichilazione o al suo decadimento.

Capitolo 3

Rivelazione indiretta della materia oscura

Gli strumenti utilizzati nella ricerca indiretta di materia oscura sono i rivelatori di neutrini. La DM si accumula all'interno di oggetti astrofisici massicci come il Sole, la Terra e gli aloni galattici grazie ai loro forti campi gravitazionali. Affinchè ciò avvenga, le sezioni d'urto di interazione delle WIMPs con la materia barionica devono essere molto piccole, dell'ordine della sezione d'urto delle interazioni deboli e devono presentare una certa sezione d'urto di annichilazione. Dato che il neutralino è antiparticella di sè stesso, la sua annichilazione produce particelle del Modello Standard (quark, bosoni di gauge e leptoni) dal cui decadimento si originano i neutrini che vengono rivelati dai telescopi posti sulla Terra.

I neutrini, privi di carica elettrica e debolmente interagenti con la materia, si propagano nell'universo senza essere deviati da campi magnetici e senza essere assorbiti. A differenza di fotoni e protoni, i neutrini conservano l'informazione sulla direzione di provenienza, costituendo una valida sonda per l'esplorazione dell'Universo lontano. Il piccolo valore della sezione d'urto dei neutrini e il piccolo valore del flusso di neutrini aspettati richiedono, per poter raccogliere in tempi limitati una discreta statistica di eventi, l'utilizzo di un volume di rivelazione molto esteso, realizzabile solo sfruttando risorse naturalmente disponibili, quali l'acqua degli oceani o il ghiaccio delle calotte polari.

I tre maggiori rivelatori Cherenkov in funzione sulla Terra sono ANTARES in Francia, IceCube al Polo Sud e Baikal in Russia. Esistono poi rivelatori di dimensioni minori come il Super-Kamiokande in Giappone. Questi strumenti vengono quindi costruiti in zone in cui sono presenti notevoli quantità di acqua o ghiaccio, come il polo Sud o le aree sottomarine.

La tecnica di rivelazione adottata in tutti i telescopi elencati ha alla base l'effetto Cherenkov originato dal percorso, in un mezzo trasparente come acqua o ghiaccio, dei muoni relativistici prodotti dalle interazioni di neutrini.

Il fenomeno noto come "effetto Cherenkov" consiste nell'emissione di radiazione di diseccitazione (luce Cherenkov) come conseguenza del passaggio di una particella carica ultra-relativistica ($\beta = \frac{v}{c} \sim 1$) in un mezzo trasparente, che si somma

coerentemente sulla superficie di un cono, con apertura θ_{Ch} , avente come asse la direzione della particella carica. Infatti può avvenire che una particella superi la velocità di propagazione della luce in un mezzo denso con indice di rifrazione n . Nel caso dei rivelatori di neutrini, la raccolta di luce Cherenkov rende possibile l'individuazione delle tracce dei muoni prodotti nell'interazione neutrino-nucleone in prossimità o all'interno del rivelatore. La cinematica dell'interazione garantisce che la direzione di propagazione del muone sia quasi parallela a quella del neutrino primario ($\theta_{\mu\nu} \sim \frac{0.7^\circ}{\sqrt{E_\nu[\text{TeV}]}}$).

Nella pratica sperimentale, la luce è raccolta per mezzo di fotomoltiplicatori (PMT). I telescopi Cherenkov per neutrini sono realizzati, sia in acqua che in ghiaccio, come un reticolo di PMT. La conoscenza della posizione di ciascun modulo ottico è essenziale per una buona risoluzione angolare nella ricostruzione delle tracce.

Occorre inoltre separare il segnale dal fondo, dovuto sia a cause ambientali, sia a tracce non associabili a flussi di neutrini dovuti ad annichilazione della materia oscura. Negli apparati sottomarini, il fondo luminoso ambientale è costituito dalla radioattività naturale (ed in particolare dal decadimento del ^{12}K) e da fenomeni di bioluminescenza, dovuta ad alcune specie che costituiscono la fauna marina, che sono in grado di emettere un segnale di disturbo per l'osservazione.

Il contributo principale per il background è costituito da neutrini e muoni atmosferici, prodotti nelle interazioni dei raggi cosmici primari con l'atmosfera.

E' fondamentale comprendere che gli eventi di segnale sono cercati tra le tracce "**up-going**", cioè in eventi provenienti dal basso; poichè la Terra agisce come uno scudo contro tutte le particelle tranne i neutrini, un telescopio per neutrini utilizza il rilevamento di muoni provenienti dal basso ("upgoing") come una prova delle interazioni di corrente carica di ν_μ avvenute al di sotto del rivelatore: $\nu_\mu + N \rightarrow \nu + X$.

- I **muoni atmosferici** costituiscono eventi "down-going", cioè provenienti dall'alto e sono scartati selezionando solo tracce "up-going". Proprio per facilitare la distinzione tra muoni atmosferici e segnale, i telescopi per neutrini vengono posti a grandi profondità sottomarine in modo che la massa d'acqua sopra l'apparato possa fungere da schermo, riducendo gli eventi di fondo.

- I **neutrini atmosferici** sono invece sia "down-going" sia "up-going" e la distinzione tra il fondo e il segnale richiede, in questo caso, un'analisi statistica più approfondita che include la stima dell'energia dell'evento e la ricostruzione della posizione della sorgente.

3.1 ANTARES

L'esperimento ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental RESearch) utilizza il primo telescopio per neutrini situato nel Mediterraneo. Il rivelatore è posizionato a 40 km a largo di Toulon (Francia) a 2500 m di profondità. Il telescopio è costituito da 12 linee, ciascuna composta da 25 piani con 3 moduli ottici (PMT) per piano. Le linee distano l'una dall'altra $\sim 60m$ e sono disposte secondo una geometria ottagonale con un'area di $\sim 0.1km^2$, e una sensibilità nell'intervallo $10^{12} - 10^{16}$ eV. Posizionato nell'emisfero Nord, ANTARES ha una buona visibilità del Centro Galattico e del Piano Galattico. La risoluzione angolare è di

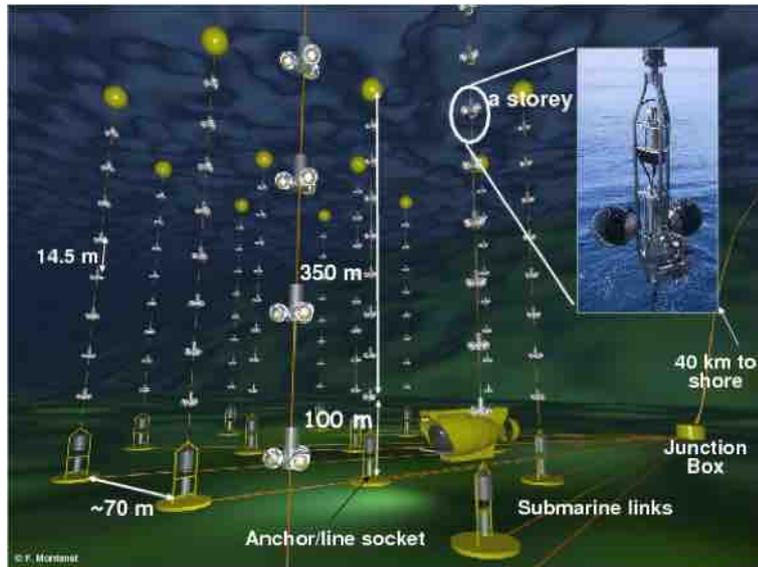


Figura 3.1. Telescopio Antares

~ 0.3 gradi per neutrino con $E > 1 \text{ TeV}$.

In figura 3.1 viene mostrata una rappresentazione schematica del telescopio ANTARES.

L'esperimento è stato completato nel giugno 2008 e la presa dati è iniziata con le prime 5 linee del rivelatore, installate nel 2007. ANTARES ha funzionato ininterrottamente dal 2008, eccetto per alcuni brevi periodi di manutenzione e riparazione e finora l'analisi mostra un buon accordo tra dati sperimentali e simulazioni Montecarlo.

Il principale canale di rivelazione è quello dei muoni prodotti nelle interazioni tra nucleoni N e neutrini muonici ν_μ che interagiscono con la materia prima del rivelatore, producendo muoni relativistici, i quali inducono luce Cherenkov passando nell'acqua. La luce Cherenkov è rivelata dai moduli ottici con i quali è possibile ricostruire la traccia del muone grazie alla conoscenza della geometria dell'emissione dei fotoni Cherenkov. Infatti i muoni relativistici inducono luce Cherenkov sulla superficie di un cono il cui angolo di apertura ha un valore caratteristico, che nel caso del rivelatore ANTARES corrisponde al valore di 42° : $\cos(\theta_{Ch}) > \frac{1}{n}$ con $n=1.35$. La traccia di un muone con energia superiore a 50 GeV si può considerare rettilinea, e la velocità del muone è pari a quella della luce nel vuoto. La traccia è completamente identificata dalla posizione $\vec{p} = (x_0, y_0, z_0)$ del muone al tempo di riferimento t_0 e dagli angoli ϕ (angolo azimutale) e θ , l'angolo di zenith. Tenendo presente la figura 3.2 è possibile calcolare il tempo t_{PMT} di arrivo del generico fotone Cherenkov, emesso con un angolo $\theta_C=42^\circ$ rispetto alla traccia, sull' i -esimo fotomoltiplicatore del rivelatore, in posizione $\vec{q} = (x_i, y_i, z_i)$. Il tempo t_{PMT} si calcola come

$$t_{PMTi} = t_0 + t_{OA} + t_{AB}$$

dove $t_{OA} = d_\mu/c$ è il tempo impiegato dal muone per arrivare al punto di emissione del fotone e $t_{AB} = d_{light}/(c/n)$ è il tempo di propagazione del fotone nel mezzo con

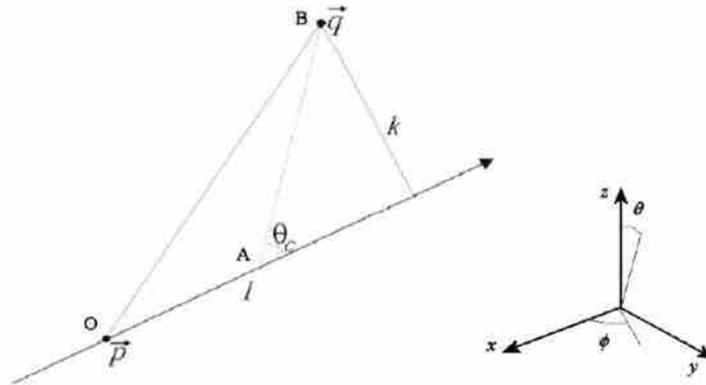


Figura 3.2. Sinistra: Traiettoria del muone e del generico fotone Cherenkov. Destra: sistema di riferimento con le coordinate spaziali (x,y,z) e gli angoli di zenith e azimuth (θ e ϕ)

indice di rifrazione n .

Per ogni quintupla di parametri $(x_0, y_0, z_0, \theta, \phi)$, che identifica univocamente la traccia del muone, è possibile calcolare il tempo di arrivo dei fotoni Cherenkov su ogni PMT dell'apparato.

Si ha un "hit" quando la luce raggiunge il PMT e viene rivelata. Tenendo conto della distribuzione degli "hit" nell'apparato e dei tempi di arrivo, il programma di ricostruzione individua le tracce e calcola le traiettorie dei muoni che attraversano il rivelatore e, di conseguenza, le tracce dei neutrini muonici.

Vengono utilizzati due algoritmi di ricostruzione. Il primo è basato sulla minimizzazione di una quantità simil- χ^2 , Q , funzione dei cinque parametri $(x_0, y_0, z_0, \theta, \phi)$ che utilizza la differenza tra il tempo di rivelazione dei fotoni atteso e misurato, considerando sempre l'effetto dell'assorbimento della luce nell'acqua. Questa quantità rappresenta l'errore quadratico medio tra i tempi di hit teorici e quelli misurati. Minimizzando questa funzione si trova la traccia del muone più probabile. Il secondo algoritmo consiste in una procedura a più passi per adattare la traccia del muone massimizzando un rapporto di verosimiglianza, Λ , che descrive la qualità della ricostruzione. In aggiunta al parametro Λ , viene utilizzata l'incertezza β sull'angolo di direzione del muone. Questi due algoritmi sono rispettivamente chiamati QFit e Λ Fit. Il primo si usa per eventi muonici ricostruiti in una singola linea di rivelazione (single line events) mentre il secondo è utilizzato per eventi muonici ricostruiti in più di una linea di rivelazione (multi-line events), per ottenere la migliore efficienza di ricostruzione possibile dell'intero range di energia del neutrino.

Il QFit e il Λ Fit presentano diverse efficienze nella ricostruzione, caratterizzate dall'area efficace per i neutrini muonici A_{eff}^{ν} . L'area efficace, ad una data energia, è definita come il rapporto tra il tasso di eventi dei neutrini nel rivelatore e il flusso di neutrini a quella energia e rappresenta la capacità del rivelatore di identificare la traccia di un muone. L'area efficace è l'area all'interno della quale i muoni originati nelle interazioni ν_{μ} -CC possono essere rivelati da ANTARES e dipende dalla geometria del rivelatore e dall'energia dei neutrini. Il QFit ha una efficienza maggiore

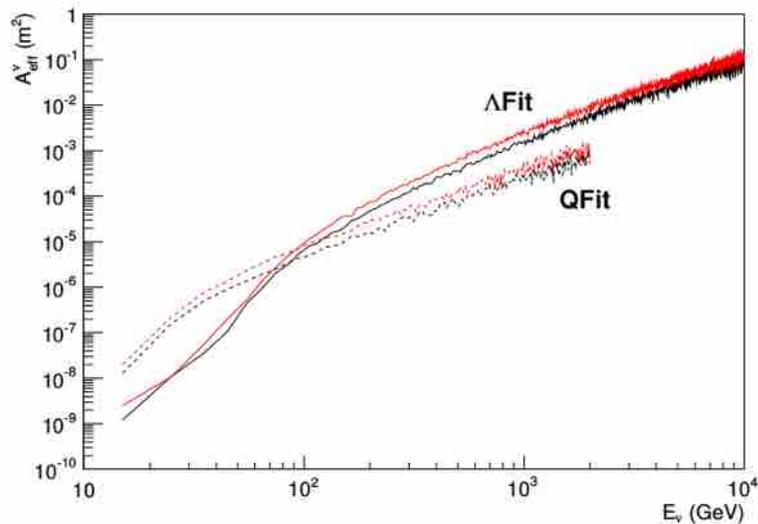


Figura 3.3. Area efficace in funzione dell' energia E_{ν} dei neutrini primari per la rivelazione di neutrini muonici (nero) e antineutrini (rosso) tramite QFit (linea tratteggiata) e Λ Fit (linea continua), con la configurazione a 12 linee di rivelazione di ANTARES

a regimi di basse energie, perchè A_{eff}^{ν} è maggiore di quella ottenuta con Λ Fit per energie $E_{\nu} < 100$ GeV, come si può vedere in Figura 3.3

Oltre alla differente area efficace, i due algoritmi presentano diverse risoluzioni angolari.

Entrambi gli algoritmi sono utilizzati, ma viene selezionato ogni volta il migliore a seconda del range di energia in cui ci si trova. Sono state effettuate ricerche di neutrini dalla direzione del Centro Galattico, della Via Lattea, del Sole e della Terra.

3.1.1 Ricerca di neutrini dovuti ad annichilazione di WIMPs accumulate nel Sole

L'accumulo di WIMP nel nucleo del Sole si è verificato per un lungo lasso di tempo e per questo una buona parte della Galassia deve aver contribuito a tale processo. I neutrini altamente energetici che dal Sole arrivano sulla Terra non potrebbero essere spiegati da nessun altro processo astrofisico.

Il flusso di neutrini che arrivano sulla superficie terrestre dal nucleo del Sole è calcolato attraverso simulazioni al computer che prendono in considerazione l'assorbimento dei neutrini nel plasma solare e le oscillazioni dei neutrini nel Sole e nel loro percorso dal Sole al rivelatore.

Inoltre è fondamentale tenere a mente che la velocità di fuga dal campo gravitazionale solare (~ 620 km/s) è di gran lunga superiore rispetto alla velocità quadratica media delle WIMPs nella Galassia (~ 270 km/s). Questo implica che una parte considerevole di WIMPs è attratta dal centro del Sole e vi si accumula creando un equilibrio fra il processo di cattura e quello di annichilazione.

Sono state eseguite simulazioni per 16 diverse masse di WIMP di ordini di grandezza compresi tra 50 GeV e 10 TeV. Sono inoltre stati studiati tre principali canali di autoannichilazione delle WIMP, scelti come riferimento per il neutralino più leggero

(LSP):

$$\chi^0 \bar{\chi}^0 \rightarrow b\bar{b}, W^+W^-, \tau^+\tau^-$$

La ricerca di WIMP accumulate nel Sole può essere eseguita attraverso un metodo di analisi di massima verosimiglianza. La massimizzazione della funzione di verosimiglianza $L(n_s)$ fornisce una stima del segnale all'interno dei dati sperimentali. Vi sono due contributi che descrivono la distribuzione sperimentale: uno dovuto al segnale ed uno dovuto al fondo. La distribuzione sperimentale viene confrontata con quella teorica realizzata tramite il metodo della massima verosimiglianza, variando il peso relativo dei due contributi (fondo e segnale). La massimizzazione della funzione di verosimiglianza fornisce una stima degli eventi di segnale che meglio si adatta ai dati misurati.

Allo scopo di verificare la validità statistica del metodo di massima verosimiglianza adottato, vengono eseguiti 10^4 pseudoesperimenti per ciascuna combinazione di masse di WIMP, canali di annichilazione e per ogni variazione del valore di n_s . Infatti in ogni pseudoesperimento viene simulata una condizione di background e viene variato n_s , cioè il numero di eventi di segnale presente nella funzione di verosimiglianza allo scopo di massimizzarne il valore quando $n_s = n_{max}$.

Vengono fatte simulazioni anche nel caso in cui siano presenti solo eventi di fondo ($L(n_s=0)$).

Il test statistico della misura si calcola da

$$TS = \log_{10}\left(\frac{L(n_{max})}{L(0)}\right)$$

Le simulazioni permettono di costruire la distribuzione della variabile TS (test statistico) sia per diversi valori del numero di eventi di segnale (n_s variabile), sia per il caso più comune in cui gli eventi osservati siano dovuti al solo fondo ($n_s = 0$). Il confronto fra il TS con eventi di segnale e del TS nel caso di puro background è una misura della probabilità di scambiare il fondo per un evento.

Da quest'analisi è possibile ricavare la frazione di eventi di background che fluttuando possono apparire come eventi di segnale. Se il valore di questa frazione è basso, aumenta la possibilità di rilevare eventi di segnale vero e proprio che non derivano dalle oscillazioni del fondo.

La ricerca di WIMP all'interno del Sole è basata sullo studio della distribuzione degli angoli ψ che i muoni rivelati formano con la direzione sottesa dal centro del Sole (figura 3.4). Per neutrini generati in seguito all'annichilazione di WIMPS tale angolo deve essere nullo (o compatibile con zero per la risoluzione angolare dell'apparato). Il fondo si distribuisce invece uniformemente su tutti gli angoli attorno al Sole.

Per ogni massa di WIMP e per ogni canale di annichilazione, la selezione degli eventi candidati per il segnale consiste nella scelta dei valori di Q_{cut} e ψ_{cut} che minimizzano il limite superiore, con livello di confidenza al 90%, del flusso di neutrini e antineutrini $\bar{\Phi}_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}$ che è definito come

$$\bar{\Phi}_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu} = \frac{\bar{\mu}^{90\%}}{\sum_i \bar{A}_{eff}^i(M_{WIMP}) \times T_{eff}^i}$$

dove l'indice i indica i periodi con differenti configurazioni del detector, $\bar{\mu}^{90\%}$ è il limite superiore medio per il background con un intervallo di confidenza del 90%,

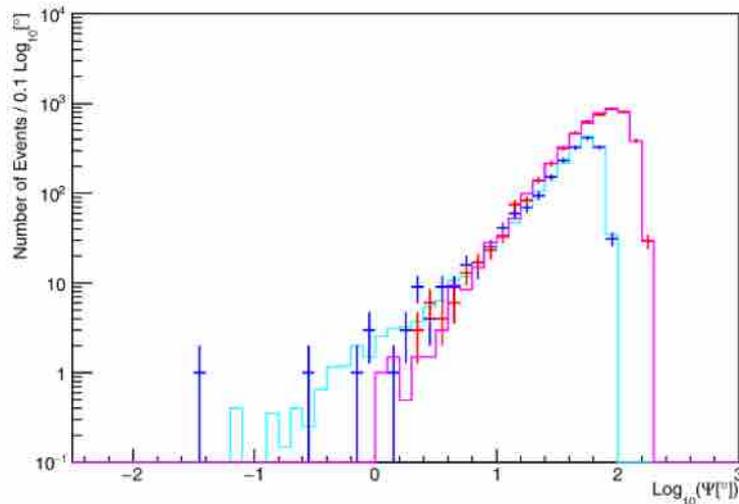


Figura 3.4. Ricerca nel Sole. Distribuzione della distanza angolare tra la direzione della traccia degli eventi e la direzione del sole per i dati sperimentali (croci) ricostruiti con il AFit (rosa e viola) e con il QFit (blu e azzurro) comparati alla stima del background (istogrammi)

T_{eff}^i è l'effettivo tempo di vita per ogni configurazione del rivelatore e $\bar{A}_{eff}^i(M_{WIMP})$ è l'area efficace mediata sull'energia dei neutrini.

La procedura di ottimizzazione fornisce i valori migliori di Q e ψ per ogni massa di WIMPs. A questo punto è possibile graficare ψ_{cut} in funzione della massa delle WIMP come mostrato in figura 3.4; da questo grafico risulta chiaro che non ci sono eventi abbastanza evidenti da poter essere classificati come un segnale oltre il background. Proprio a causa della mancata osservazione nel segnale di un picco dovuto alla presenza di neutrini derivanti dall'annichilazione di WIMPs nel Sole, diventa necessario porre un limite superiore al flusso di neutrini e antineutrini e alla sezione d'urto di annichilazione $\langle\sigma v\rangle$ delle WIMP.

Usando i valori ottenuti durante la procedura di ottimizzazione è quindi possibile calcolare il limite superiore sul flusso di neutrini e antineutrini $\bar{\Phi}_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu}$ tramite l'equazione presentata precedentemente.

Assumendo che ci sia equilibrio tra la cattura e l'annichilazione di WIMPs nel Sole, dalle informazioni sulla sezione d'urto di annichilazione $\langle\sigma v\rangle$ è possibile calcolare anche i limiti superiori sulla sezione d'urto di interazione WIMP-protone dipendente dallo spin (σ_{SD}) e indipendente dallo spin (σ_{SI}) considerando la situazione in cui uno dei due sia dominante. Il flusso di neutrini dovuto all'annichilazione di WIMPs nel Sole è fortemente dipendente dal rate di cattura di WIMPs nel nucleo del Sole, che è dominato dalla sezione d'urto σ_{SD} . Questo fa sì che i limiti ottenuti sulla sezione d'urto siano comparabili con quelli risultanti dagli esperimenti della ricerca diretta soltanto per la sezione d'urto dipendente dallo spin. I limiti superiori sulla sezione d'urto dipendente dallo spin in funzione della massa delle WIMPs sono mostrati in 3.5.

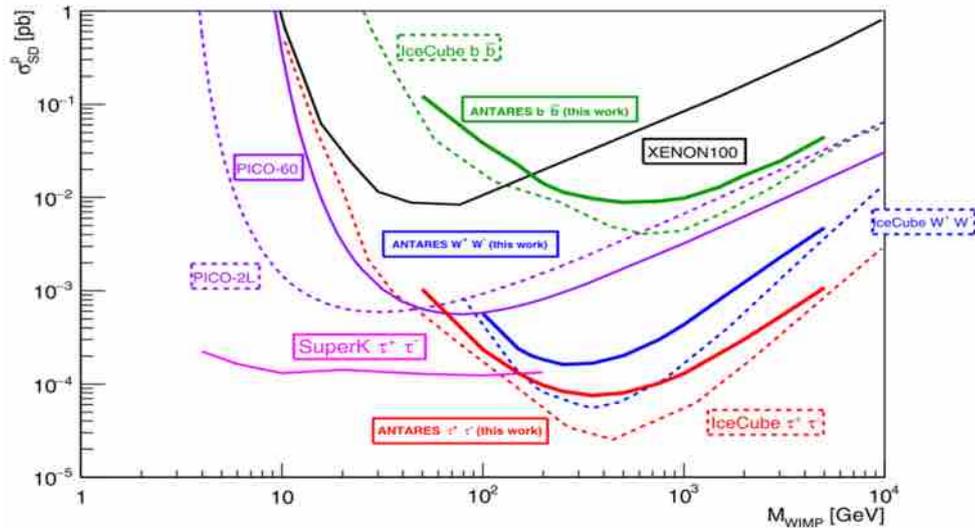


Figura 3.5. Limiti superiori con livello di confidenza al 90% sulla sezione d'urto σ_{SD} dipendente dallo spin in funzione della massa delle WIMP per i tre canali di annichilazione $b\bar{b}$, W^+W^- , $\tau^+\tau^-$. Sono comparati i risultati di ricerca indiretta forniti da ANTARES 2007-2008, SuperKamiokande 1996-2008, IceCube 2010-2011 con quelli più stringenti di ricerca diretta come XENON100 2011-2012

3.1.2 Ricerca di neutrini dovuti ad annichilazione di WIMPs accumulate nella Terra

Le particelle di Materia Oscura presenti nell'alone galattico possono perdere energia interagendo con i nuclei di oggetti massicci come la Terra e rimanere gravitazionalmente legati ad essi. Questo può accadere se la velocità delle WIMP è più piccola della velocità di fuga dal campo gravitazionale terrestre (cioè $11.1 \frac{km}{s}$ sulla superficie e $14.8 \frac{km}{s}$ nel centro). Si suppone che la velocità delle WIMPs segua una distribuzione di Maxwell Boltzmann, in cui il valore quadratico medio della velocità è di $270 \frac{km}{s}$. A differenza del caso del Sole, nella Terra la velocità di fuga dal campo gravitazionale è molto inferiore rispetto alla velocità quadratica media delle WIMPs. Mentre nel Sole si giunge ad un equilibrio tra il processo di cattura e quello di annichilazione, nella Terra questo equilibrio non viene mai raggiunto.

Sotto queste premesse, solo una piccola frazione di WIMP perderà abbastanza energia per poter essere catturata dal campo gravitazionale terrestre nel caso in cui ci sia una grande differenza tra la massa delle WIMP e la massa della particella interagente. Ci si aspetta che il processo di cattura delle WIMPs sia dominato da scattering elastico indipendente dallo spin attraverso l'interazione con nuclei pesanti come ferro e nickel. Questa è un'altra differenza rispetto al caso della ricerca di neutrini provenienti dal Sole dove il processo di cattura delle WIMPs è dominato da scattering dipendente dallo spin in quanto il Sole è formato prevalentemente da idrogeno ed altre piccole percentuali di elementi leggeri.

L'annichilazione delle WIMP nel centro della Terra produce particelle del modello standard che includono i neutrini come prodotti finali di decadimento. Il rate di

annichilazione delle WIMP, $\Gamma_A(t)$, nella Terra può essere scritto come:

$$\Gamma_A(t) = \frac{1}{2}C_A N^2(t) = \frac{1}{2}C_c \tanh^2\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{C_c C_A}}$$

dove $N(t)$ è il numero totale delle WIMP al tempo t dopo la formazione della Terra, τ determina il tempo di cui avrebbero bisogno le WIMP per arrivare ad un equilibrio tra cattura ed annichilazione nel centro di un oggetto astrofisico che dipende dal fattore di annichilazione C_A e dal fattore di cattura C_c . Nel caso della Terra l'equilibrio non è mai raggiunto.

Il fattore di annichilazione è definito come

$$C_A = \frac{\langle \sigma_{AV} \rangle}{V_0} \left(\frac{m_\chi}{20\text{GeV}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

in cui $\langle \sigma_{AV} \rangle$ è la sezione d'urto di annichilazione per la velocità media, m_χ è la massa della WIMP e V_0 è il volume della Terra.

Il fattore di cattura è invece definito come

$$C_c = \frac{\sigma_p^{SI} \rho^\chi}{m_\chi \bar{v}} \sum_i F_i(m_\chi)$$

dove m_χ è la massa sconosciuta delle WIMP, σ_p^{SI} la sezione d'urto per interazione con i nuclei terrestri, \bar{v} è la velocità quadratica media delle WIMPs, ρ^χ la densità locale di massa delle WIMPs nell'alone galattico. La composizione della Terra rientra invece nel fattore F_i ; la sommatoria viene fatta su tutti i nuclei presenti nella Terra. Come affermato precedentemente, lo scattering elastico indipendente dallo spin è il processo che domina l'interazione di materia oscura con i nucleoni della Terra la cui sezione d'urto è σ_p^{SI} .

Per $t \gg (C_c C_A)^{-\frac{1}{2}}$ il valore di $\tanh^2(t\sqrt{C_c C_A})$ nell'equazione che definisce Γ_A tende a uno e si ottiene un equilibrio fra i rate di cattura e annichilazione nella Terra. Il rate di annichilazione Γ_A in questo caso non dipenderebbe più da $\langle \sigma_{AV} \rangle$ e diventerebbe semplicemente

$$\Gamma_{A,eq} = \frac{1}{2}C_c$$

In questo caso si può definire un fattore di conversione c_f tra $\Gamma_{A,eq}$ e σ_p^{SI} per una data m_χ . Il fattore di conversione è definito come

$$c_f = \frac{\Gamma_{A,eq}}{\sigma_p^{SI}} = \frac{\rho^\chi}{2m_\chi \bar{v}} \sum_i F_i(m_\chi)$$

In figura [3.6](#) è riportato il grafico del fattore di conversione in funzione della massa delle WIMPs. Risulta evidente un picco in corrispondenza di $m_\chi \sim 50\text{GeV}$. Tale picco è dovuto alla cattura di WIMPs da parte del Ferro che è l'elemento più abbondante sulla terra. Dato che gli urti fra particelle di materia oscura e nuclei terrestri avvengono classicamente, il maggior trasferimento di impulso si verifica fra

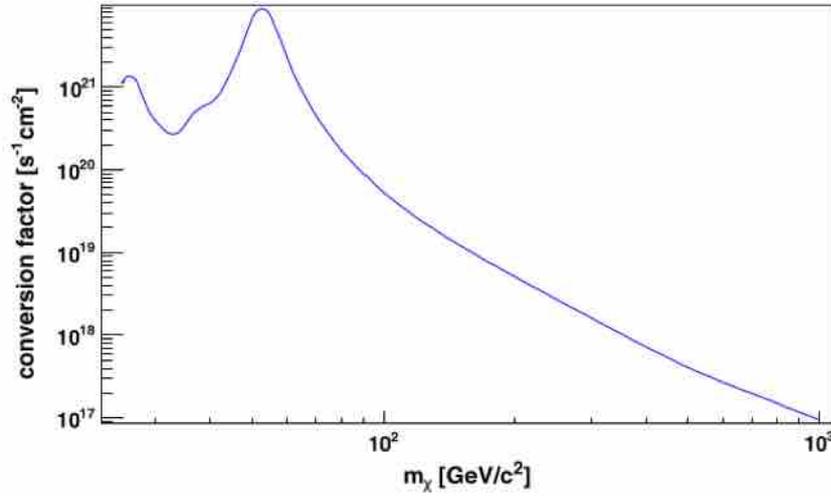


Figura 3.6. Il fattore di conversione c_f in funzione della massa m_χ della WIMP, assumendo l'equilibrio. Il picco presente attorno a 50 GeV è dovuto alla cattura di particelle di DM da parte del Ferro, l'elemento più abbondante sulla Terra. A energie più basse diventa rilevante anche la presenza di nuclei di Si, Mg e O

particelle con masse dello stesso ordine di grandezza. Questo spiega il motivo per cui il picco visibile nel grafico in figura [3.6](#) si trova in corrispondenza di 50 GeV. Se si assume che $\langle \sigma_A v \rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, che è la scala naturale a cui ci si aspetterebbe una particella debolmente interagente, l'equilibrio non si verifica mai sulla Terra. Infatti sotto questa condizione $\tau \sim 10^{11}$ years mentre l'età della Terra è $t^* \sim 4.5 \times 10^9$ years.

Considerando il caso di non equilibrio, con $t^* \gg \tau$, il rate di annichilazione può essere scritto come

$$\Gamma_A \propto C_c^2 C_A$$

Questo significa che il rate di annichilazione, e quindi il flusso di neutrini che da esso dipende, dipende quadraticamente dal fattore di cattura e linearmente da quello di annichilazione.

Anche in questa analisi il principale contributo del background è dovuto a muoni e neutrini originati dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre. Per ridurre il fondo di muoni atmosferici, si selezionano angoli di zenit vicini alla direzione verticale, e vengono posti dei limiti all'energia registrata, per eliminare il caso di "falsi" muoni dal basso, cioè dovuti a muoni atmosferici che passano al di fuori dello strumento e creano reazioni. La maggior parte del segnale si aspetta attorno al nadir.

Sono stati presi in considerazione i dati del rivelatore ANTARES raccolti tra il 2007 e il 2012, per un totale di 1191 giorni.

In figura [3.7](#) vengono mostrati i limiti superiori sulla sezione d'urto di interazione σ_p^{SI} in funzione della massa delle WIMPs m_χ . I risultati finali non mostrano eventi in

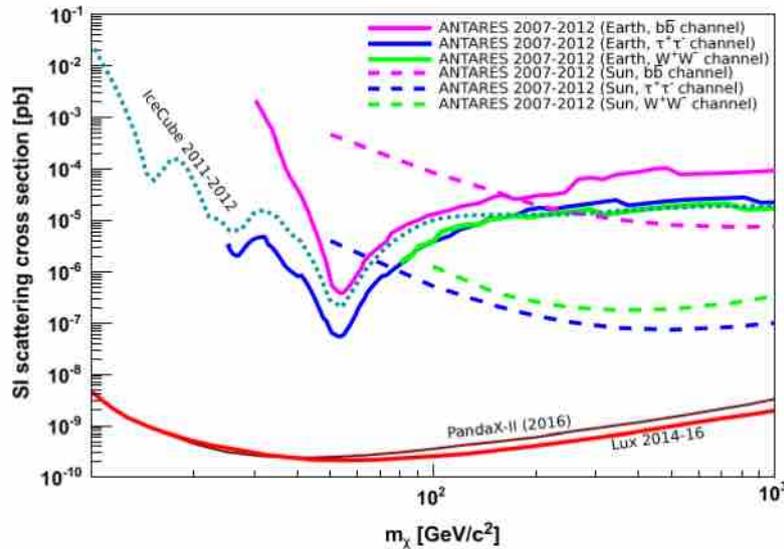


Figura 3.7. Limiti superiori con livello di confidenza al 90% per σ_p^{SI} in funzione della massa m_χ assumendo $\langle \sigma v \rangle = 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

eccesso rispetto a quelli aspettati per il solo fondo e forniscono i limiti più stringenti per ricerche indirette per l'intervallo di massa tra 40 e 70 GeV, dove il fattore di cattura delle WIMP è accresciuto dalla composizione pesante della Terra.

Dal grafico è possibile notare che il limite più stringente per σ_p^{SI} si trova in corrispondenza della massa $m_\chi \sim 50 \text{ GeV}$ che corrisponde a un valore in cui la cattura delle WIMPs nella terra è fortemente aumentato dalla presenza del Ferro.

3.1.3 Ricerca di neutrini dovuti ad annichilazione di WIMPs accumulate nel Centro Galattico

Per calcolare gli spettri di energia iniziale dei neutrini nel Centro Galattico, sono stati presi in considerazione cinque canali di riferimento per l'annichilazione delle particelle WIMP in particelle del Modello Standard:

$$WIMP + WIMP \rightarrow b\bar{b}, W^+W^-, \tau^+\tau^-, \mu^+\mu^-, \nu_\alpha\bar{\nu}_\alpha$$

I neutrini muonici, risultanti dall'annichilazione di particelle di DM in particelle del modello standard attraverso i 5 canali descritti, si propagano sulla terra per 17 diverse masse di WIMP che variano da 25 GeV a 10 TeV.

I diversi sapori dei neutrini $\alpha = e, \mu, \tau$ possono essere prodotti direttamente o come prodotti dei decadimenti delle particelle del Modello Standard. Lo spettro di energia dei neutrini muonici può essere scritto come

$$\frac{dN_{\nu_\mu}}{dE_{\nu_\mu}} = \sum_{\alpha} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\mu) \frac{dN_{\nu_\alpha}}{dE_{\nu_\alpha}}$$

dove $\frac{dN_{\nu_\mu}}{dE_{\nu_\mu}}$ è lo spettro di energia dei neutrini muonici sulla Terra, $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\mu)$ rappresenta la probabilità di osservare l'oscillazione $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\mu$, dove $\alpha = e, \mu, \tau$, e

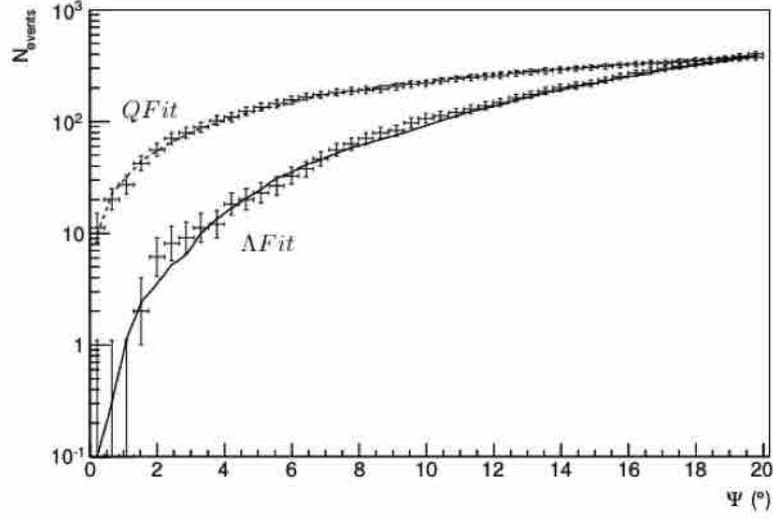


Figura 3.8. Numero di eventi di neutrini in funzione della separazione angolare ψ nella direzione del Centro Galattico per il background atteso (linea tratteggiata per il Qfit e linea continua per il AFit) in relazione ai dati sperimentali (croci nere) per il QFit e il AFit

$\frac{dN_{\nu\alpha}}{dE_{\nu\alpha}}$ è il corrispondente spettro di energia nel centro galattico.

Il fondo è composto principalmente da neutrini e muoni prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre. I muoni atmosferici "downgoing" (provenienti dall'alto) hanno una frequenza di rivelazione nell'apparato ANTARES compresa tra 3 e 10 Hz, a seconda delle condizioni di trigger, e dominano la raccolta dei dati. I neutrini che vanno verso l'alto hanno un rate di $\sim 50 \mu\text{Hz}$ (circa quattro al giorno). Muoni, neutrini e tracce dei muoni sono simulati con programmi di Montecarlo specifici.

Innanzitutto vengono applicati dei tagli di preselezione per ottenere eventi campione ben ricostruiti. Per quanto riguarda il QFit, vengono considerati solo eventi verso l'alto ("upgoing") mentre per il AFit si considerano solo eventi con $\cos\theta_{rec} > -0.1$.

Dopo la preselezione, viene scelta la separazione angolare ψ tra la traccia ricostruita e la direzione del Centro Galattico attraverso il criterio di ottimizzazione descritto nei paragrafi precedenti.

In figura [3.8](#) viene mostrata la distribuzione del numero di eventi in funzione della separazione angolare ψ dal Centro Galattico. Il numero di eventi di neutrini osservati dalla direzione del centro galattico è compatibile con i valori attesi dal solo contributo del fondo. Dunque dalla misura si può escludere la presenza di neutrini dovuti all'annichilazione di materia oscura e mettere un limite superiore (con un livello di confidenza del 95%) alla sezione d'urto di annichilazione, grazie alla conoscenza del limite superiore sul flusso di neutrini.

Il limite superiore per $\bar{\Phi}_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}$ è stato ottenuto combinando i risultati del QFit e del AFit per tutti e cinque i canali di annichilazione nel range $25\text{GeV} < M_{WIMP} < 10\text{TeV}$.

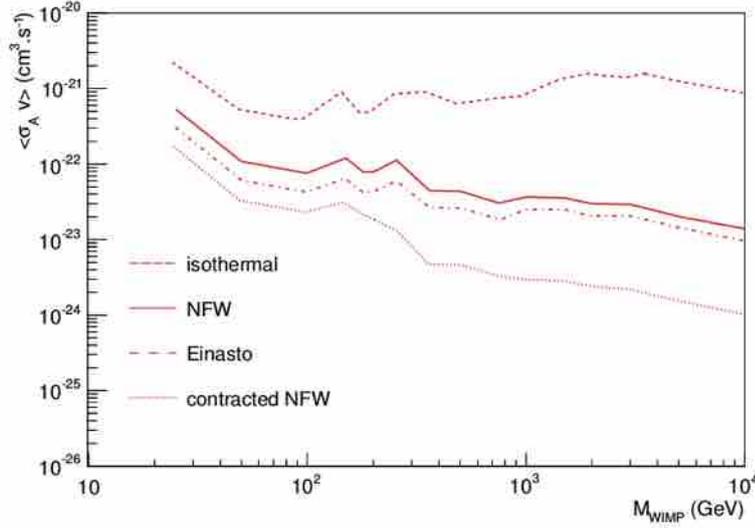


Figura 3.9. Limiti superiori con confidenza al 90% sulla sezione d'urto di annichilazione $\langle \sigma_{AV} \rangle$ in funzione della massa di WIMPs nel range $25 \text{ GeV} < M_{WIMP} < 10 \text{ TeV}$ per il canale di annichilazione $WIMP+WIMP \rightarrow \tau^+\tau^-$.

Il flusso di neutrini derivante dall'annichilazione di particelle di materia oscura nel centro galattico si può scrivere come

$$\bar{\Phi}_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu} = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle \sigma_{AV} \rangle}{2M_{WIMP}^2} N_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu} \times J(\Delta\Omega)$$

in cui $\langle \sigma_{AV} \rangle$ è la sezione d'urto di annichilazione, $N_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu}$ è il numero di neutrini che raggiunge la terra e il fattore astrofisico $J(\Delta\Omega) = \int_{\Delta\Omega} \int \rho_{DM}^2 dl d\omega$ tiene conto della forma dell'alone di Materia Oscura attorno al Centro Galattico ed è l'integrale lungo la linea di vista, l , e sull'angolo solido attorno al Centro Galattico, Ω , della densità di materia oscura ρ_{DM} al quadrato.

La densità ρ_{DM} dipende dal profilo scelto per l'alone galattico e normalmente si sceglie il profilo di densità di Navarro-Frenk-White (NFW).

In figura [3.9](#) vengono mostrati i limiti superiori con livello di confidenza al 90% della sezione di annichilazione $\langle \sigma_{AV} \rangle$ in funzione della massa di WIMPs per il canale $WIMP+WIMP \rightarrow \tau^+\tau^-$. Nel grafico vengono mostrati anche altri profili di densità possibili per il calcolo del fattore astrofisico J .

I limiti imposti sulla sezione d'urto di annichilazione sono compatibili con i risultati ottenuti negli esperimenti effettuati da Ice-Cube, MAGIC e Fermi-LAT, prendendo in considerazione il canale di annichilazione $WIMP+WIMP \rightarrow \tau^+\tau^-$.

Capitolo 4

Conclusioni

L'esistenza della materia oscura è oggi confermata da molte evidenze sperimentali. Sono numerose le teorie che ipotizzano possibili candidati per le particelle di DM sulla base delle proprietà dedotte sperimentalmente. Dato che è impossibile osservare la Materia Oscura, le particelle di DM possono interagire con le particelle del Modello Standard molto debolmente e devono avere una massa maggiore di quella del protone.

Inoltre l'ipotesi che la materia oscura interagisca con le particelle ordinarie conduce a diversi tipi di ricerca. In questa dissertazione è stato approfondito il metodo di ricerca indiretta della Materia Oscura attraverso l'esperimento ANTARES.

ANTARES è un telescopio che ha, fra i vari obiettivi, anche quello di rivelare i neutrini prodotti dall'annichilazione di particelle di materia oscura che si sono accumulate in grandi oggetti astrofisici come il Centro Galattico, la Terra e il Sole. Lo scopo degli esperimenti descritti è quello di porre dei limiti sempre più stringenti al valore della massa delle WIMPs, in modo da poterle identificare.

Le ricerche effettuate non hanno portato alla scoperta di un segnale interpretabile con la presenza di Materia Oscura nell'universo. La conferma dell'esistenza della DM rappresenterebbe un passo fondamentale per la fisica poichè permetterebbe di aprire le porte per nuove ricerche. Ad esempio, la scoperta della DM costituirebbe una prova schiacciante per la teoria Supersimmetrica, una teoria che va oltre il Modello Standard. In questo nuovo contesto la Materia Oscura rappresenterebbe soltanto la più leggera di tutte le particelle supersimmetriche ancora da scoprire.

Bibliografia

- [1] The ANTARES Collaboration, *Search of Dark Matter annihilation in the Galactic Centre using the ANTARES neutrino telescope*. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2015.
- [2] The ANTARES Collaboration, *Search of Dark Matter annihilation in the Earth using the ANTARES neutrino telescope*. Physics of the Dark Universe, 2017.
- [3] The ANTARES Collaboration, *First results on dark matter annihilation in the Sun using the ANTARES neutrino telescope*. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics , 2013.
- [4] The ANTARES Collaboration, *Limits on Dark Matter annihilation in the Sun using the ANTARES neutrino telescope*. Physics Letters B, 2016.