



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## La natura particellare della materia oscura

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

Candidato  
Enrico Bignozzi  
Matricola 1855163

Relatore  
Prof. Valerio Ippolito

Anno Accademico 2020/2021

---

**La natura particellare della materia oscura**

Tesi di Laurea. Sapienza – Università di Roma

© 2020/2021 Enrico Bignozzi. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X e la classe Sapthesis.

Email dell'autore: [bignozzi.1855163@studenti.uniroma1.it](mailto:bignozzi.1855163@studenti.uniroma1.it)

# Indice

<b>Indice</b>	<b>2</b>
<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1 Prove dell'esistenza della materia oscura</b>	<b>4</b>
1.1 Curve di rotazione delle galassie . . . . .	4
1.2 Lente gravitazionale . . . . .	5
1.3 Bullet Cluster . . . . .	6
<b>2 Possibili spiegazioni teoriche</b>	<b>8</b>
2.1 Evoluzione dell'universo . . . . .	8
2.1.1 Equazione di Boltzmann . . . . .	8
2.1.2 Materia oscura calda e fredda . . . . .	10
2.2 Neutrini . . . . .	10
2.3 Particelle massive debolmente interagenti (WIMPs) . . . . .	11
<b>3 Proprietà della materia oscura</b>	<b>12</b>
3.1 Densità e velocità . . . . .	12
3.2 Massa . . . . .	14
3.3 Rate di interazione con i nuclei atomici . . . . .	15
3.4 Fattore di forma . . . . .	16
3.5 Flusso . . . . .	18
3.6 Modulazione annuale e giornaliera . . . . .	19
<b>4 Prospettive sperimentali per la rivelazione diretta</b>	<b>20</b>
4.1 Principi di funzionamento . . . . .	20
4.2 XENON . . . . .	21
4.3 DarkSide . . . . .	22
4.4 DAMA . . . . .	23
<b>Conclusioni</b>	<b>24</b>

# Introduzione

Fin dall'antichità l'uomo si interroga sul mondo ponendo lo sguardo verso il cielo. Nell'ultimo secolo si sono evidenziate profonde lacune nella nostra conoscenza dell'universo, del quale, secondo i calcoli, non conosciamo l'85% della massa che lo costituisce.<sup>[1]</sup> Allora, per colmare questa lacuna, si è ipotizzata l'esistenza della materia oscura, la cui natura particolare ci è al momento ancora ignota. In questa dissertazione tratteremo i principi di rivelazione diretta della particella di materia oscura. Più specificatamente:

- nel capitolo 1 si esporranno tre differenti prove che testimoniano la presenza di grandi densità di massa mancanti che noi non percepiamo: la materia oscura; queste prove sono dovute tutte ad osservazioni cosmologiche: curve di rotazione delle galassie, lenti gravitazionali e collisioni fra galassie;
- nel capitolo 2 si daranno le possibili spiegazioni al fenomeno della materia oscura: dopo aver discusso l'evoluzione temporale della densità di particelle, parleremo di materia oscura calda e fredda e introdurremo possibili candidati a ricoprire il ruolo di materia oscura;
- nel capitolo 3 si tratteranno le proprietà delle particelle di materia oscura: dopo aver discusso la densità di massa e la distribuzione di velocità all'interno di una galassia, studieremo i possibili constraint sulla loro massa e le quantità chiave di interesse per la rivelazione di materia oscura sulla Terra;
- nel capitolo 4 discuteremo risultati e prospettive di alcuni degli esperimenti principali di rilevazione diretta di materia oscura: XENON, Darkside, DAMA.

# Capitolo 1

## Prove dell'esistenza della materia oscura

### 1.1 Curve di rotazione delle galassie

La prima prova che evidenzia l'esistenza della materia oscura è dovuta allo studio della velocità di rotazione delle galassie a spirale (vedi figura 1.1).



**Figura 1.1.** Galassia a forma di spirale M51.[2]

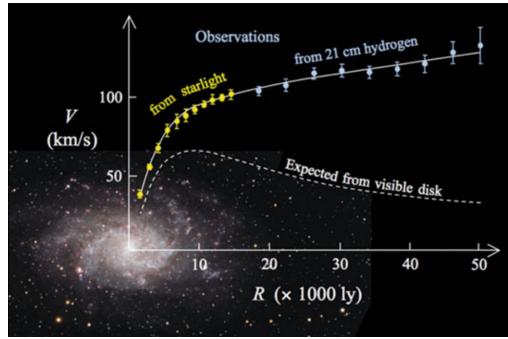
Ognuna fra queste galassie può essere trattata approssimativamente come un disco. Per un generico corpo di massa  $m$  che ruota intorno al centro del disco vale:

$$m \frac{v(r)^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}, \quad (1.1)$$

dove  $v(r)$  è la velocità tangenziale, ossia la velocità con cui ruota il corpo di massa  $m$  a distanza  $r$  dal centro lungo la tangente del disco. Isolando questa grandezza si ha:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}. \quad (1.2)$$

Ora si vuole comprendere come varia tale velocità in funzione della distanza dal centro: superato il raggio della galassia, poiché la massa rimane costante, la velocità dovrebbe avere un andamento:  $v \propto \sqrt{1/r}$ . Quindi ci attendiamo che la curva di rotazione ( $v(r)$ ) decresca superato il raggio della galassia. Quello che si evince dai risultati sperimentali però è differente (vedi figura 1.2).

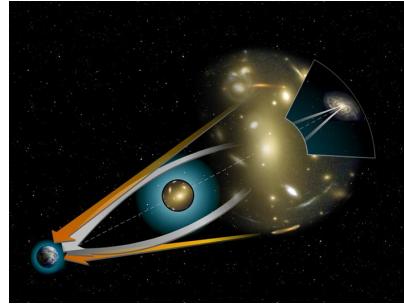


**Figura 1.2.** La curva di rotazione tratteggiata è quella attesa che decresce come  $\sqrt{1/r}$ ; la curva continua invece è quella trovata sperimentalmente che rimane pressoché costante dopo aver superato il raggio della galassia.[3]

La curva di rotazione non decresce, come teoricamente era atteso, bensì rimane circa piatta. Segue dall'equazione (1.2) che deve essere presente della massa, che noi non percepiamo, anche dopo aver superato il raggio della galassia.

## 1.2 Lente gravitazionale

La seconda prova dell'esistenza della materia oscura è dovuta allo studio del fenomeno della lente gravitazionale che deforma l'immagine da noi percepita dei corpi celesti. La luce emessa da questi ultimi viene deviata di un angolo  $\theta$  in virtù della presenza di una massa, frapposta fra il corpo celeste e l'osservatore, che curva lo spazio-tempo. Ne segue che la posizione dei corpi celesti può apparire traslata rispetto alla loro posizione reale (vedi figura 1.3). L'angolo di deviazione della traiettoria della luce



**Figura 1.3.** Fenomeno della lente gravitazionale dove la posizione apparente del corpo celeste è indicata dalle frecce arancioni mentre quella reale da quelle bianche.[4]

ha la seguente forma algebrica:[4]

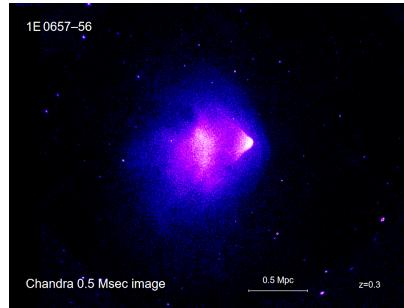
$$\theta = \sqrt{\frac{4GMd_{ls}}{c^2d_l d_s}}, \quad (1.3)$$

dove  $d_{ls}$ ,  $d_l$  e  $d_s$  sono rispettivamente la distanza fra la massa frapposta e il corpo celeste, fra la massa frapposta e l'osservatore ed infine fra il corpo celeste e l'osservatore. Ne segue che l'angolo di deviazione è proporzionale alla radice della massa dell'oggetto frapposto:  $\theta \propto \sqrt{M}$ .

Sperimentalmente si riscontra che l'angolo di curvatura è molto più grande rispetto a quello teoricamente atteso, da cui segue, tramite l'equazione (1.3), che deve esistere molta più massa frapposta rispetto a quella visibile.

### 1.3 Bullet Cluster

La terza prova dell'esistenza della materia oscura deriva dallo studio di due ammassi di galassie in collisione, detto fenomeno del Bullet Cluster (vedi figura 1.4).



**Figura 1.4.** Fenomeno del Bullet Cluster.[5]

Ciascuno dei due ammassi che si scontra è formato da stelle e gas che si comportano in modo diverso durante la collisione. Analizziamo quello che è successo ai componenti delle galassie dopo la collisione. La maggior parte delle stelle, osservabili alla luce visibile, è passata attraverso la galassia con l'unica conseguenza di essere rallentata per via della forza gravitazionale. Invece i gas delle due galassie in collisione, che rappresentano la maggior parte della materia visibile, interagiscono fra di loro elettromagneticamente, rallentando molto più delle stelle.

Ci si aspetta che il fenomeno della lente gravitazionale si verifichi prevalentemente nella regione di spazio dove c'è maggiore densità di massa, cioè dove è presente il gas. Questo però non è coerente con i risultati sperimentali. Infatti nella figura 1.5 si può osservare:



**Figura 1.5.** Immagine del Bullet Cluster nella quale vengono individuati i diversi costituenti delle galassie.[6]

- in rosa, il gas individuato tramite la radiazione di frenamento degli elettroni che lo costituiscono;
- in blu, la densità di massa più elevata individuata attraverso il fenomeno della lente gravitazionale.

Poiché la regione con maggiore densità di massa non coincide con quella dove è presente più massa visibile, allora ne segue che esiste una terza componente massiva che non percepiamo che costituisce le galassie: la materia oscura.

## Capitolo 2

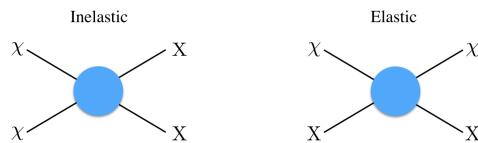
# Possibili spiegazioni teoriche

Per spiegare il fenomeno della materia oscura è necessario studiarne le caratteristiche particellari. Questo richiede fare alcune ipotesi sia sull'evoluzione dell'universo sia sull'esistenza di nuovi fenomeni microscopici, come teorie oltre il Modello Standard che sostengono l'esistenza di candidati ad essere la materia oscura.

### 2.1 Evoluzione dell'universo

#### 2.1.1 Equazione di Boltzmann

Per avere un modello teorico soddisfacente sulla materia oscura è necessario comprendere come questa interagisce con il mondo circostante. Le particelle di materia oscura presenti nell'universo in un dato momento possono interagire attraverso due tipologie di interazioni: tramite lo scattering inelastico ed elastico. Nella prima casistica (sulla sinistra di figura 2.1) la particella di materia oscura interagisce con la sua stessa antiparticella, producendone due del Modello Standard (particelle di materia ordinaria). Viceversa nella seconda (sulla destra di figura 2.1) la particella di materia oscura interagisce elasticamente con una particella del Modello Standard.



**Figura 2.1.** Illustrazione dello scattering anelastico  $\chi\bar{\chi} \rightarrow XX$  e di quello elastico  $\chi X \rightarrow \chi X$ . Si indica con  $\chi$  la particella di materia oscura e con  $X$  una particella del Modello Standard.[7]

La densità di particelle soggette a scattering è descritta dall'equazione di Boltzmann:[7]

$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma v \rangle (n^2 - n_{eq}^2), \quad (2.1)$$

dove  $H = \dot{a}/a$  è la costante di Hubble, che descrive quanto intensamente si espande l'universo ( $v = Hd$ );  $a$  è il fattore di scala che è un parametro adimensionale che caratterizza l'espansione relativa dell'universo;  $\sigma$  è la sezione d'urto di annichilazione,

che rappresenta la probabilità che avvenga l'interazione;  $v$  è la velocità relativa fra le particelle coinvolte nell'annichilazione ed infine  $n_{eq}$  è la densità di materia oscura all'equilibrio termico (all'inizio dell'universo le particelle si trovavano in equilibrio con il bagno termico, successivamente a causa dell'espansione di questo vi è stato il fenomeno del disaccoppiamento, cioè le particelle sono uscite dall'equilibrio termico.). Analizziamo i termini da cui è costituita la precedente equazione:

- $-3Hn$  rappresenta la diluizione, dovuta all'espansione dell'Universo, del numero di particelle per unità di volume di materia oscura;
- $-\langle\sigma v\rangle n^2$  rappresenta la perdita media, dovuta allo scattering anelastico, di particelle di materia oscura;
- $\langle\sigma v\rangle n_{eq}^2$  rappresenta l'aumento medio, dovuto allo scattering anelastico, di particelle di materia oscura.

Analizzando la precedente equazione si possono ricavare più soluzioni a seconda delle ipotesi che si fanno. Se le particelle di materia oscura sono all'equilibrio (cioè  $n = n_{eq}$ ) allora  $\langle\sigma v\rangle n^2 = \langle\sigma v\rangle n_{eq}^2$ , quindi  $\frac{dn}{dt} = -3Hn$ . Risolvendo questa equazione differenziale, si ottiene  $n \sim a^{-3}$ . Poiché con l'espandersi dell'universo il fattore di scala  $a$  aumenta e la temperatura  $T$  dell'universo diminuisce allora ne segue che  $T \propto \frac{1}{a}$ . Quindi la densità del numero di particelle di materia oscura è direttamente proporzionale alla temperatura dell'universo al cubo:

$$n \propto T^3. \quad (2.2)$$

Quando non si ha sufficiente energia cinetica affinché si creino particelle di materia oscura in virtù dell'annichilazione di particelle ordinarie ( $T \ll m_\chi$ ) l'equazione di Boltzmann si riduce a  $\frac{dn}{dt} = -n\Gamma$ , dove  $\Gamma = n\langle\sigma v\rangle$  è il tasso di annichilazione. Risolvendo l'equazione differenziale si ottiene:

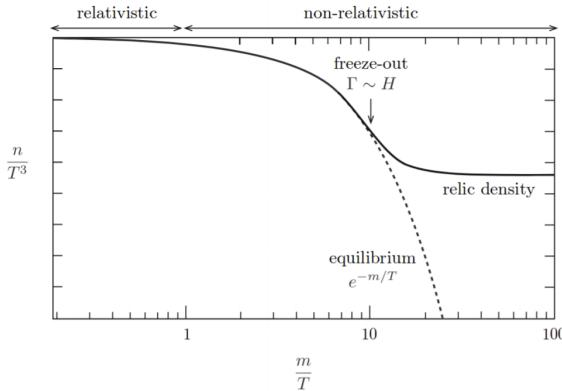
$$n = e^{-t\Gamma}. \quad (2.3)$$

Quindi la densità di particelle diminuisce esponenzialmente finché per le particelle di materia oscura diviene sempre più difficile annichilarsi. Questo significa che dopo un certo tempo (detto "tempo di congelamento"), la densità di materia oscura rimane costante. Tale "congelamento" avviene quando il tasso di annichilazione  $\Gamma$  è dell'ordine della costante di Hubble:[7]

$$\Gamma = n\langle\sigma v\rangle \sim H, \quad (2.4)$$

ossia quando le particelle per incontrarsi impiegano un tempo maggiore rispetto all'età dell'Universo.

Nella figura 2.2 a seguire è riassunto quanto detto sopra. Quindi per comprendere la densità di materia oscura nel tempo è necessario comprendere il valore di  $\langle\sigma v\rangle$ . In questa grandezza è racchiusa l'informazione sulla natura particolare della materia oscura.



**Figura 2.2.** Rappresentazione schematica delle soluzioni dell'equazione di Boltzmann in funzione del parametro  $m/T$ .[9]

### 2.1.2 Materia oscura calda e fredda

La materia oscura si può suddividere in due categorie: calda e fredda.[8] Quella fredda è un'ipotetica forma di materia formata da particelle che viaggiano a velocità significativamente minori della velocità della luce; viceversa quella calda è costituita da particelle che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce.

Questa classificazione caratterizza già fortemente le proprietà delle particelle di materia oscura, come per esempio la loro massa: maggiore è questa, più lentamente si sposteranno.

Vediamo nelle prossime sezioni alcune particelle ad essere candidate per il ruolo di materia oscura.

## 2.2 Neutrini

I neutrini sono candidati appartenenti alla categoria della materia oscura calda. Questi sono particelle di massa piccolissima e carica elettrica nulla.[10] I neutrini sono gli unici candidati possibili ad essere la materia oscura secondo il Modello Standard.

Da osservazioni cosmologiche si può tuttavia escludere che i neutrini da soli ricoprono la totalità della massa mancante. Infatti i dati ricavati dalla sonda spaziale WMAP vincolano la massa del neutrino a:[11]

$$m_v < 0.23\text{eV}. \quad (2.5)$$

Questo comporta che la densità cosmologica di neutrini sia:[11]

$$\Omega_v h^2 < 0.0072. \quad (2.6)$$

Poiché la densità cosmica di materia oscura misurata sperimentalmente da WMAP è  $\Omega_{dm} h^2 \approx 0.1123$ , ne segue che i neutrini possono dare solo un piccolo contributo alla massa mancante.

### 2.3 Particelle massive debolmente interagenti (WIMPs)

Le WIMPs sono candidati appartenenti alla categoria della materia oscura fredda. Una WIMP è un'ipotetica particella di massa relativamente grande (da qualche GeV a qualche centinaia di TeV) che interagisce tramite la gravità ed un'altra tipologia di interazione ancora a noi sconosciuta, con sezioni d'urto dell'ordine dell'interazione debole.<sup>[11]</sup> Queste assunzioni sono state fatte teoricamente in modo che si accordassero con la densità cosmologica di materia oscura ( $\Omega_{dm}h^2 \approx 0.1123$ ).

La teoria supersimmetrica, che è un'ipotetica estensione del Modello Standard, può proporre alcuni candidati a ricoprire il ruolo di WIMPs. Questa sostiene che per ogni fermione esista un rispettivo bosone di massa uguale e viceversa.<sup>[12]</sup> La supersimmetria candiderebbe a ricoprire il ruolo di WIMP l'ipotetico neutralino con massa minore, ossia il più stabile.

Attualmente si crede che le WIMPs siano i maggiori costituenti della materia oscura <sup>[11]</sup>, per questo la trattazione da qui in avanti considererà le particelle di questa come tali.

## Capitolo 3

# Proprietà della materia oscura

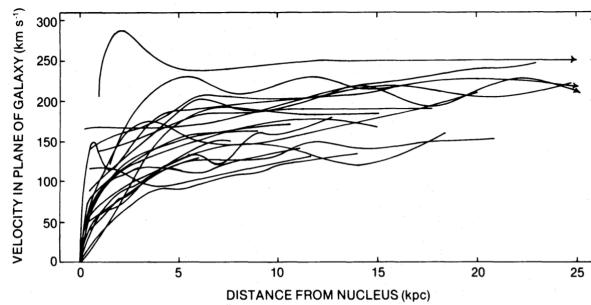
Il modo più promettente di studiare la natura particolare della materia oscura sono gli esperimenti di rilevazione diretta, che studiano lo scattering fra materia oscura e materia ordinaria. In questo capitolo, partendo da informazioni cosmologiche, studieremo da un punto di vista teorico i principi che permettono di effettuare questa ricerca.

### 3.1 Densità e velocità

La prima proprietà della materia oscura che indagheremo sarà la densità di massa di materia oscura, che è fortemente legata alla distribuzione di velocità (particolarmente interessante per il calcolo di  $\langle \sigma v \rangle$ ) tramite la seguente relazione:[7]

$$\rho(r) \propto e^{\Psi - v^2}, \quad (3.1)$$

dove  $\Psi$  è il potenziale gravitazionale e  $v$  la velocità della particella di materia oscura. Per ricavare la densità di massa osserviamo il risultato riportato in figura 3.1: affinché la curva di rotazione resti pressoché piatta dopo aver superato il raggio della galassia, la massa deve essere proporzionale al raggio (vedi equazione (1.2)):  $M(r) \propto r$ .



**Figura 3.1.** Curve di rotazione di galassie a spirale.[7]

Ne segue che se la materia oscura è uniformemente distribuita non solamente sul disco, come la materia barionica, bensì in una sfera tutt'intorno al centro della

galassia, allora la densità di massa avrà il seguente andamento:

$$\rho(r) \sim \frac{M(r)}{r^3} \sim \frac{1}{r^2}. \quad (3.2)$$

Quindi questa decresce quadraticamente all'aumentare della distanza dal centro della galassia. Il fatto che la distribuzione abbia tale andamento la rende in accordo con il profilo di densità isoterma di una sfera di gas autogravitante:[7]

$$\rho_{iso}(r) = \frac{\rho_0}{(1 + \frac{r}{r_s})^2}, \quad (3.3)$$

dove  $r_s = 3.5$  kpc. Questo consiglia la distribuzione delle velocità detta di Maxwell-Boltzmann:

$$\rho(\vec{v}) = \left( \frac{m}{2\pi K T} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2KT}}, \quad (3.4)$$

dove  $K$  è la costante di Boltzmann e  $\vec{v}$  è la velocità delle WIMPs rispetto al riferimento della galassia.

Il risultato ottenuto non è propriamente corretto: dalla figura 3.1 si evince che le curve di rotazione non sono esattamente piatte superato il raggio della galassia, ma oscillano, suggerendo che la materia oscura non sia uniformemente distribuita. Al fine di comprendere meglio la distribuzione di materia oscura si sono fatte simulazioni di problemi a  $N$  corpi nelle quali si segue l'evoluzione di questi sotto l'effetto della loro reciproca interazione gravitazionale. Dalle simulazioni sono stati dedotti diversi profili di densità di materia oscura; in letteratura si utilizzano i seguenti:[7]

- Navarro, Frenk e White(NFW):

$$\rho_{nfw}(r) = \frac{\rho_0}{r_s(1 + \frac{r}{r_s})^2}, \quad (3.5)$$

dove  $r_s = 20$  kpc; l'aspetto fondamentale è quello di avere una densità centrale infinita;

- Einasto:

$$\rho(r)_{Ein} = \rho_0 \exp \left[ \frac{-2}{\gamma} \left( \left( \frac{r}{r_s} \right)^\gamma - 1 \right) \right], \quad (3.6)$$

dove  $r_s = 20$  kpc; a differenza del profilo NWF la caratteristica di questa distribuzione è quella di avere una cuspide centrale finita;

- Burkert:

$$\rho(r)_{Burk} = \frac{\rho_0}{(1 + \frac{r}{r_s})(1 + (\frac{r}{r_s})^2)} \quad (3.7)$$

dove  $r_s = 0.5$  kpc; a differenza dei precedenti profili descrive una densità costante a piccoli raggi.

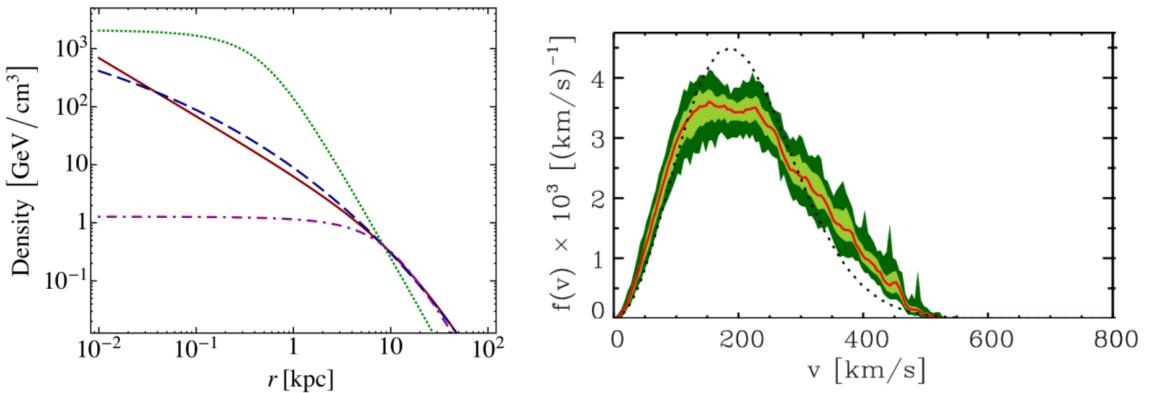
E' chiaro che le densità sopracitate hanno una dipendenza dal raggio totalmente differente rispetto alla densità di massa dell'equazione (3.3), suggerendo che la

distribuzione di Maxwell-Boltzmann non sia esatta. La distribuzione di velocità usata più spesso è:[7]

$$\rho(v) = \begin{cases} \frac{1}{N_{\text{esc}}} \left( \frac{3}{2\pi\sigma^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{v^2}{v_0^2}}, & \text{se } v < v_{\text{esc}}, \\ 0 & \text{altrove;} \end{cases} \quad (3.8)$$

dove  $\sigma$  è l'rms velocità di dispersione (la variabilità statistica delle velocità sulla velocità media per un gruppo di oggetti),  $v_0 = \sqrt{2/3}\sigma = 235 \text{ km/s}$  è la velocità più probabile,  $N_{\text{esc}} = \text{erf } z - 2\pi^{-1/2}ze^{-z^2}$ , con  $z = \frac{v_{\text{esc}}}{v_0}$  dove  $v_{\text{esc}}$  è velocità di fuga.

In figura 3.2 si riporta un confronto fra le diverse densità di massa e di velocità delle particelle di materia oscura.



**Figura 3.2.** A sinistra le densità di materia oscura confrontate: NFW in rosso; Einasto in blu; Burkert in verde; isoterma in viola. A destra le distribuzioni di velocità confrontate: Maxwell-Boltzmann in nero tratteggiato; quella ricavata dalle simulazioni a  $N$  corpi in rosso, con la dispersione del 68% raffigurata in verde chiaro, mentre in verde scuro sono rappresentati i valori di minimo/massimo.[7]

Non si può ancora affermare quale profilo fornisca il modello più coerente con i dati a causa della granularità delle simulazioni a  $N$  corpi, conseguentemente si è ancora incerti anche riguardo alla distribuzione di velocità delle particelle di materia oscura. Si noti che nelle distribuzioni di velocità ci sono differenze non solo nel picco della distribuzione ma anche nelle code. L'incertezza sulla distribuzione di velocità influenzerà il rate di interazione con la materia ordinaria (vedi equazione (3.14)) e comporterà una incertezza nel calcolo di  $\langle \sigma v \rangle$ .

### 3.2 Massa

E' possibile fare alcune considerazioni generali riguardo il range di massa delle particelle di materia oscura. Il limite inferiore di massa consentita si può ricavare dal numero di particelle che possono essere confinate all'interno di una cella nello spazio delle fasi.[7] Quindi la massa dipende dallo spin della particella. Se la materia oscura fosse un bosone allora, dalla più piccola zona di materia oscura che fino ad ora si è studiata, è possibile stimare un limite inferiore per la massa di una particella di materia oscura:[7]

$$m_{\text{bos}} \geq 10^{-22} \text{ eV}. \quad (3.9)$$

Se invece la particella di materia oscura fosse un fermione:[7]

$$M = m_{\text{ferm}} V \int f(p) d^3 p \leq m_{\text{ferm}} V \int d^3 p \sim m_{\text{ferm}} R^3 (m_{\text{ferm}} v_\chi)^3, \quad (3.10)$$

dove  $M$  è la massa di una sfera di materia oscura di raggio  $R$ ,  $f(p)$  è la densità di probabilità che la particella di materia oscura abbia impulso  $p$  e  $v_\chi$  è la velocità della particella di materia oscura. Dall'equazione (1.1) ricaviamo la velocità della particella di materia oscura:

$$v_\chi \sim \sqrt{\frac{GM}{R}}, \quad (3.11)$$

da cui, sostituendo l'espressione della velocità:[7]

$$m_{\text{ferm}} \geq (G^3 M R^3)^{-1/8} \sim 0.7 \text{ keV}. \quad (3.12)$$

Nell'ipotesi che le particelle di materia oscura siano WIMPs ci si aspetta che la massa vada da qualche frazione di GeV a qualche centinaio di TeV.[11]

Per comprendere meglio il valore della massa delle particelle di materia oscura è necessario attendere risposte sperimentali (vedi sezione 4).

### 3.3 Rate di interazione con i nuclei atomici

Per rivelare le particelle di materia oscura si ricorre ad esperimenti che ne ricercano lo scattering con un nucleo bersaglio. Queste possono compiere due tipologie di scattering: indipendente e dipendente dallo spin.[13] Ciò che differenzia i due processi è l'andamento della sezione d'urto  $\sigma$  dell'interazione: nel primo caso  $\sigma \sim M_{\text{atomo}}^2 \propto A^2$ , mentre nel secondo caso  $\sigma \sim J(J+1)$ ; dove  $M_{\text{atomo}}$ ,  $J$  ed  $A$  sono rispettivamente la massa dell'atomo, lo spin dei nuclei di cui è costituito il bersaglio e il numero di massa atomica.

Nelle prossime sezioni considereremo le interazioni con scattering indipendente dallo spin, più semplici da studiare sperimentalmente. La quantità di interesse è il rate, che rappresenta il numero di interazioni fra le particelle di materia oscura e i nuclei bersaglio. Dal calcolo di questo è possibile ricavare la sezione d'urto  $\sigma$ .

Il rate per unità di massa del rivelatore è:[7]

$$\frac{dR}{dE} = \frac{n_\chi}{m_n} \langle v \frac{d\sigma}{dE} \rangle, \quad (3.13)$$

dove  $n_\chi = \rho_\chi / m_\chi$  è la densità di materia oscura per unità di massa e  $d\sigma/dE$  è la sezione d'urto differenziale. Le parentesi indicano una media sulle velocità delle particelle della materia oscura in arrivo. Scrivendo interamente la precedente equazione si ha:[7]

$$\frac{dR}{dE} = \frac{\rho_\chi}{m_n m_\chi} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f(v, t) \frac{d\sigma}{dE} d^3 v, \quad (3.14)$$

dove  $f(v, t)$  è la distribuzione di densità di velocità delle particelle di materia oscura,  $v_{\max}$  è la velocità di fuga della particella di materia oscura (cioè la velocità per cui riesce a sfuggire all'attrazione gravitazionale dalla galassia che la contiene),  $v_{\min}$  è

la velocità minima necessaria per far rinculare il nucleo bersaglio.  $E$  è l'energia di rinculo che presenta la seguente forma algebrica:

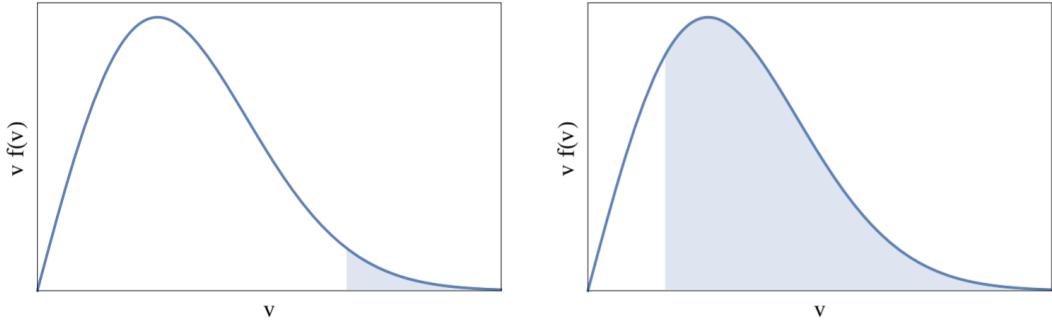
$$E \approx \frac{m_\chi^2 v^2 (1 - \cos\theta)}{2M_{\text{nucleo}}} \quad (3.15)$$

dove  $v \sim 200$  km/s, come visto in sezione 3.1 (questo giustifica il fatto che l'equazione (3.15) sia non relativistica), ed  $m_\chi$  sono rispettivamente la velocità e la massa della WIMP incidente. Ne segue che il rate dipende sia dalla massa sia dalla velocità della particella di materia oscura (che comporterà incertezze nel calcolo di  $\sigma$ , come trattato in sezione 3.1 e 3.2) ed inoltre anche dalla massa di quella bersaglio. Poiché  $d\sigma/dE \propto \frac{1}{v}$  [14], utilizzando la distribuzione di velocità in equazione (3.8), si ha:

$$\frac{dR}{dE} \propto \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{f(v, t)}{v} d^3v \propto \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} ve^{-\frac{v^2}{v_0^2}} dv. \quad (3.16)$$

Quindi il rate diminuisce in modo esponenziale all'aumentare della velocità della WIMP incidente.

In figura 3.5 è illustrata la regione di integrazione in funzione delle ipotesi fatte sulla particella di materia oscura incidente. E' evidente come, nel caso di materia oscura leggera ( $\sim$  GeV), il rate sia più sensibile alle incertezze sulle distribuzioni di velocità  $f(v)$ .



**Figura 3.3.** Illustrazione schematica della regione di integrazione, a parità di massa del nucleo, per una particella di materia oscura più leggera (a sinistra) rispetto a una particella di materia oscura più pesante (a destra). [7]

### 3.4 Fattore di forma

Per avere una risoluzione migliore del problema complichiamo leggermente la trattazione non trattando più il nucleo come un oggetto puntiforme (come fatto precedentemente). L'estensione spaziale del nucleo è descritta tramite uno strumento matematico detto fattore di forma. Questo è la trasformata di Fourier della densità di carica del nucleo  $\rho(r)$ :[15]

$$F(\vec{q}) = \int e^{i\vec{q} \cdot \vec{r}} \rho(\vec{r}) d^3r, \quad (3.17)$$

dove  $q = \sqrt{2M_{\text{nucleo}}E}$  è l'impulso di rinculo e dove  $\rho(r)$  ha la seguente forma algebrica:[15]

$$\rho(r) = \rho_0(1 + e^{(\frac{r-c}{a})^{-1}}) \quad (3.18)$$

Nel caso di scattering elastico fra materia oscura e nucleo bersaglio si utilizza la seguente espressione per il fattore di forma:[15]

$$F(qR) = 3 \frac{J_1(qR)}{qR} e^{\frac{-(qs)^2}{2}}, \quad (3.19)$$

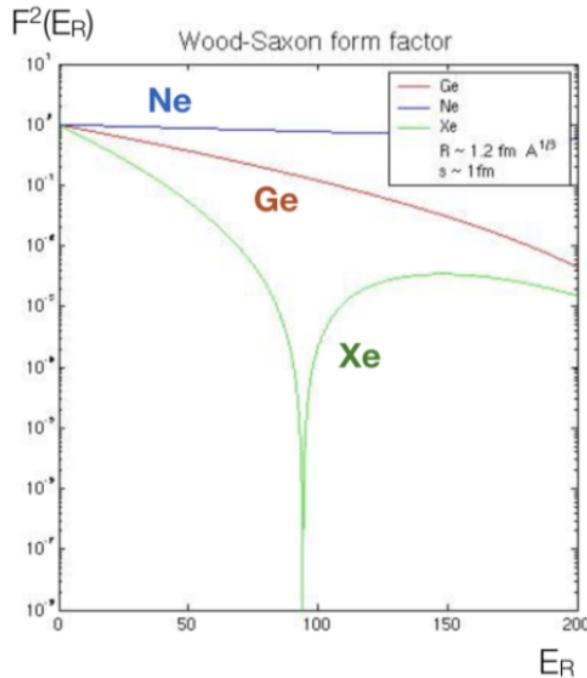
dove  $R$  è il raggio del nucleo,  $s$  è lo spessore del nucleo e  $J_1(qR)$  è la funzione di Bessel. Trattare il nucleo come non puntiforme comporta la ridefinizione della probabilità che avvenga lo scattering fra la WIMP incidente e il nucleo bersaglio:[15]

$$\frac{d\sigma_e}{dE} = \frac{d\sigma}{dE} |F(q)|^2, \quad (3.20)$$

dove  $\sigma_e$  è la sezione d'urto ottenuta considerando il nucleo come un oggetto esteso e  $\sigma$  è considerandolo come puntiforme. Conseguentemente l'equazione 3.16 viene modificata nel seguente modo:

$$\frac{dR}{dE} \propto |F(q)|^2 \int_{v_{min}}^{v_{max}} v e^{-\frac{v^2}{v_0^2}} dv. \quad (3.21)$$

Ne segue che il rate decresce all'aumentare dell'energia di rinculo, dello spessore e del raggio del nucleo. In figura 3.4 è riportato il modulo quadro del fattore di forma per diversi nuclei in funzione dell'energia di rinculo.



**Figura 3.4.** Fattore di forma per neon, germanio e xenon.[16]

### 3.5 Flusso

Per ricavare la sezione d'urto è necessario ottenere il rate. Nell'ipotesi che la massa della WIMP sia approssimativamente di 100 GeV ( $m_\chi = 100 \text{ GeV}$ ), che la densità di WIMPs sia di  $\rho_0 = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$  e che la velocità media della WIMP incidente sia  $\bar{v}_\chi \approx 220 \text{ km/s}$ , allora si ha il seguente flusso di particelle:[17]

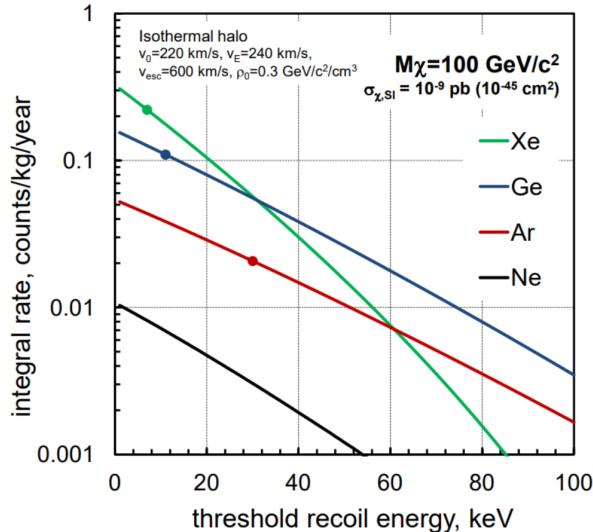
$$\Phi_\chi \sim \frac{\rho_0 \bar{v}_\chi}{m_\chi} \approx 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \quad (3.22)$$

Da questo è possibile ricavare il rate di eventi:

$$R = \sigma_\chi \Phi_\chi N_B / A, \quad (3.23)$$

dove  $N_B$  è il numero di particelle bersaglio e  $A$  è il numero di massa degli atomi bersaglio.

In figura 3.5 è raffigurato, per diversi elementi, il numero di eventi attesi nel corso di un anno per ogni kg del materiale per diversi tipi di nucleo bersaglio. Si noti che per  $E = 100 \text{ keV}$   $F(q)_{\text{xeno}} \sim 0$  e  $F(q)_{\text{argon}} \sim 0.5$ .

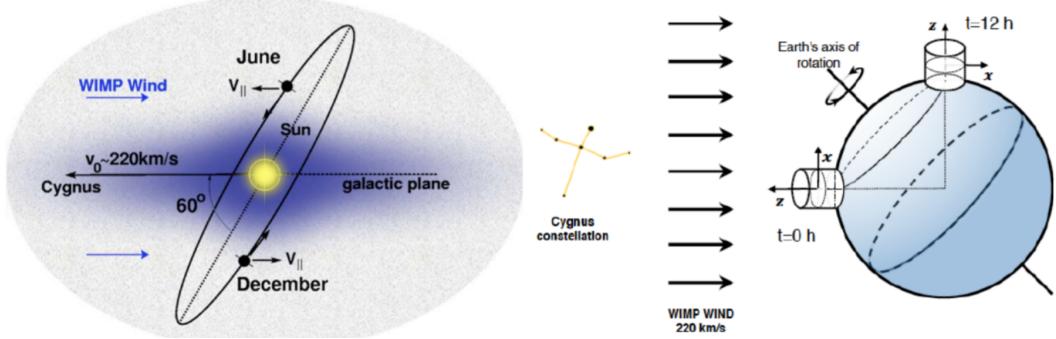


**Figura 3.5.** Rate in funzione dell'energia di rinculo per WIMPs di massa  $m_\chi = 100 \text{ GeV}$  e sezioni d'urto  $\sigma = 1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ .[17]

Quindi per massimizzare il rate è conveniente utilizzare come bersaglio per WIMPs meno energetiche i nuclei di xeno, mentre per quelle più energetiche quelli di argon.

### 3.6 Modulazione annuale e giornaliera

La Via Lattea è immersa in un bagno di particelle di materia oscura.[18] Queste particelle arrivano sulla Terra da una specifica direzione. Poiché il sistema solare ruota attorno al centro galattico e la Terra ruota a sua volta intorno al Sole, ci si aspetta una modulazione annuale del flusso di particelle rivelate (vedi figura 3.6). Il picco è atteso intorno a Maggio ed il minimo intorno a Novembre. Inoltre poiché la Terra ruota anche attorno al proprio asse, si ha anche una modulazione giornaliera (vedi figura 3.6): infatti l'angolo di impatto delle WIMPs con i nuclei bersaglio varierà comportando potenzialmente un diverso conteggio di eventi.



**Figura 3.6.** Illustrazione della modulazione annuale e giornaliera.[18]

## Capitolo 4

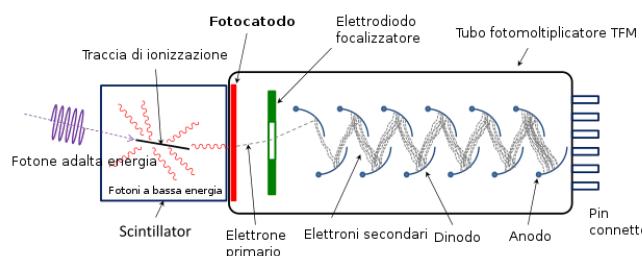
# Prospettive sperimentali per la rivelazione diretta

In questo capitolo illustreremo i risultati e le prospettive di alcuni degli esperimenti principali di rivelazione diretta della materia oscura.

### 4.1 Principi di funzionamento

La rivelazione diretta è una tecnica che si basa sul fenomeno dello scattering elastico fra le WIMPs incidenti ed i nuclei bersaglio che costituiscono il rivelatore. Per ragioni di brevità, discuteremo alcuni dei principali esperimenti di rivelazione diretta a gas e liquidi nobili come XENON e DarkSide ed esperimenti a cristalli come DAMA.

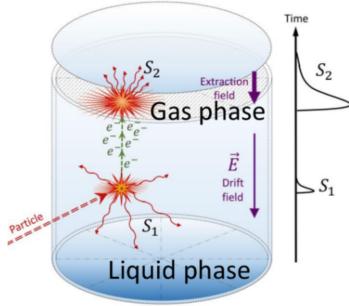
Tutti questi esperimenti si basano sull'utilizzo di materiale scintillante. La particella WIMP incidente cede parte della sua energia ad un nucleo di uno degli atomi bersaglio che costituiscono il rivelatore. A seguito del rinculo, altri atomi possono raggiungere uno stato eccitato, tornando poi al livello energetico occupato precedentemente emettendo un fotone che può essere ricostruito sotto forma di segnale elettrico tramite l'uso di un fotomoltiplicatore (vedi figura 4.1), rivelando così il rinculo nucleare della WIMP.



**Figura 4.1.** Scintillatore abbinato con fotomoltiplicatore.[19]

Inoltre XENON e Darkside hanno una seconda modalità di rivelazione diretta basata sulla ionizzazione (vedi figura 4.2). Infatti nell'urto vengono liberati, dall'atomo del nucleo bersaglio, degli elettroni che sono trasportati tramite un campo

elettrico nella parte superiore del rivelatore dove è presente l'elemento costituente il rivelatore nello stato gassoso. Qui l'elettrone, a causa di una forte variazione del campo elettrico, viene accelerato emettendo fotoni che possono essere ricostruiti sotto forma di segnale elettrico tramite l'uso di un fotomoltiplicatore, rivelando così la WIMP.



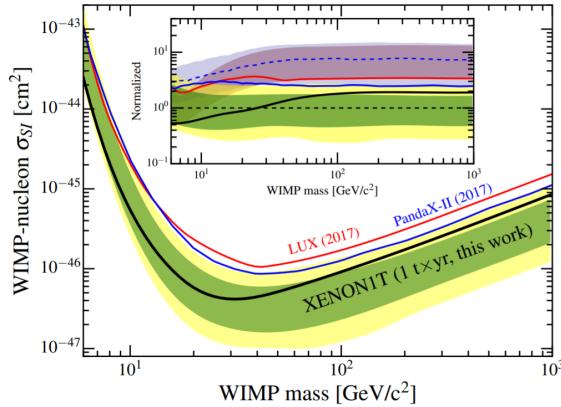
**Figura 4.2.** Schematizzazione dell'apparato sperimentale, detto TPC a doppia fase. Nella parte inferiore dell'apparato è presente il materiale nello stato liquido permettendo la rivelazione tramite scintillazione, viceversa nella parte superiore è presente il materiale nello stato gassoso permettendo la rivelazione tramite ionizzazione.[20]

Affinché questo segnale possa essere notato (l'evento è raro come discusso in sezione 3.5) c'è un'esigenza che accomuna tutti gli esperimenti: la necessità di ridurre il fondo. Nel seguito si riporteranno i tre esperimenti sopracitati che hanno luogo tutti nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), dove 1600 m di roccia forniscono un eccellente schermo alla radiazione cosmica.

## 4.2 XENON

Il progetto XENON si propone di rivelare in modo diretto le WIMPs mediante lo scattering elastico sui nuclei di Xeno ( $Z = 54$ ) utilizzato come bersaglio. Per avere un numero di eventi sufficientemente grande (vedi sezione 3.5) sono stati utilizzati 2000 kg di xeno nell'esperimento XENON1T. La scelta di questo elemento come bersaglio è dovuta principalmente a due vantaggi: il fatto che abbia un numero di massa alto, che favorisce lo scattering indipendente dallo spin ( $\sigma \propto A^2$ ), ed al fatto che è un elemento stabile e quindi produce poco rumore.

Il rivelatore XENON1T[21], che usa PMT per la lettura dei segnali, ha permesso di stabilire un limite superiore alla sezione d'urto delle WIMPs al 90% CL di 55 GeV pari a  $4.1 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ . In figura 4.3 sono riportati i risultati di XENON.

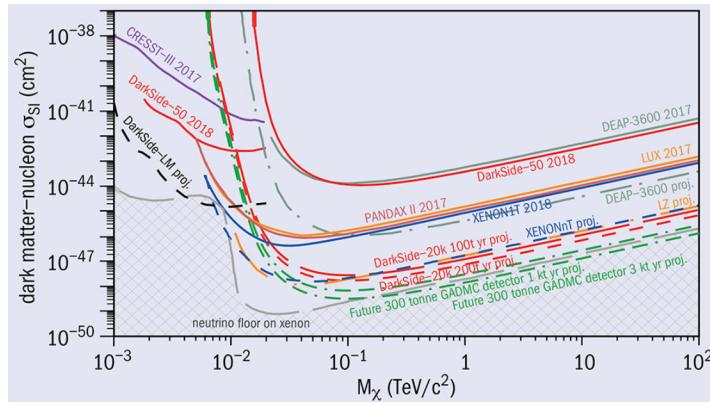


**Figura 4.3.** Limite superiore della sezione d’urto con un livello di confidenza del 90%. La banda verde (gialla) rappresenta il margine di errore di una (due) deviazione standard.[21]

### 4.3 DarkSide

Il progetto DarkSide si propone di rivelare in modo diretto le WIMPs mediante lo scattering elastico sui nuclei di Argon ( $Z = 18$ ) utilizzato come bersaglio. Per avere un numero di eventi sufficientemente grande (vedi sezione 3.5) sono stati utilizzati 150 kg di argon nell’esperimento DS-50. L’argon, sebbene abbia un numero di massa più piccolo rispetto allo xeno, è un elemento maggiormente radiopuro, cioè è più stabile. Questo esperimento, che usa PMT per la lettura dei segnali, è sensibile anche a particelle fino a qualche decimo di GeV grazie allo studio di segnali di sola di ionizzazione. Attualmente si sta costruendo DarkSide-20k, che sarà costituito da 20 000 kg di Argon liquido e sarà sensibile, utilizzando SiPM, fino a sezioni d’urto di  $7.4 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$  per WIMPs di 1 TeV di massa.[22]

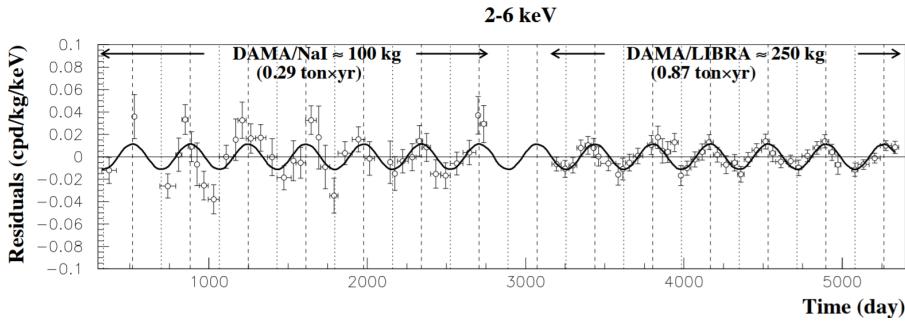
In figura 4.4 sono riportati i risultati di DarkSide.



**Figura 4.4.** Limiti attuali sulla materia oscura WIMP, che mostrano la sensibilità prevista dal programma DarkSide (rosso e verde). Le curve continue rappresentano i risultati attuali, quelle tratteggiate le proiezioni dei risultati delle versioni future dell’esperimento.[23]

## 4.4 DAMA

Il progetto DAMA si occupa dell'identificazione di una modulazione annuale del flusso di WIMPs, usando PMT per la lettura dei segnali, mediante 9 cristalli radiopuri di NaI drogati al Tallio del peso di 9.7 kg l'uno. Tale modulazione, come già spiegato nella sezione 3.4, è dovuta al moto complessivo della Terra e del sistema solare nella galassia. La presa dati totale riportata in figura 4.5 è di 14 anni.[24] L'esperimento ha rivelato una modulazione annuale che è coerente con ciò che si



**Figura 4.5.** Modulazione ottenuta dall'esperimento DAMA. Sull'asse delle ordinate è riportata la differenza fra il segnale e il fondo.[25]

attendeva. Attualmente nessun altro esperimento ha confermato il segnale riportato da DAMA.

# Conclusioni

Come abbiamo visto in questa dissertazione è chiaro che negli ultimi anni ci sono stati grandi progressi nella comprensione della natura della materia oscura.

L'ipotesi delle WIMPs è stato ciò che ha avviato una serie di esperimenti necessari per scoprire o escludere le WIMPs come candidati, che migliorano di anno in anno la loro sensibilità.

Nei prossimi anni quindi si avranno delle risposte: se queste saranno positive, indicando le WIMPs come materia oscura, allora avremo aggiunto un gigantesco tassello alla comprensione umana dell'universo, altrimenti sarà necessario rivoluzionare non solo il modo di pensare la materia oscura, ma anche la nostra comprensione del mondo.

# Bibliografia

- [1] NASA, "Dark Energy, Dark Matter", <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/what-is-dark-energy>
- [2] NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA), <https://hubblesite.org/contents/media/images/2011/03/2809-Image.html>
- [3] NASA Extragalactic Database, "Dati di NGC 598", <https://italiawiki.com/pages/galassia/curva-di-rotazione.html>
- [4] Valerio Ippolito, "Take a Walk on the Dark Side", <https://cernbox.cern.ch/index.php/s/5ijMWY2IMUZZaBG>.
- [5] NASA Chandra X-ray Observatory, [https://cxc.harvard.edu/symposium\\_2005/proceedings/files/markevitch\\_maxim.pdf](https://cxc.harvard.edu/symposium_2005/proceedings/files/markevitch_maxim.pdf)
- [6] NASA Chandra X-ray Observatory, <https://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/more.html>
- [7] Mariangela Lisanti, "Lectures on Dark Matter Physics", <https://arxiv.org/pdf/1603.03797.pdf>
- [8] J-W. Hsueh, W. Enzi, S. Vegetti, M. W. Auger, C. D. Fassnacht, G. Despali, L. V. E. Koopmans, J. P. McKean, "SHARP – VII. New constraints on the dark matter free-streaming properties and substructure abundance from gravitationally lensed quasars", <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020MNRAS.492.3047H/abstract>
- [9] Daniel D. Baumann, "Lecture notes on Cosmology", <https://www.dropbox.com/s/5slirav7yd9mocf/Chapter3.pdf?dl=0>
- [10] IUPAC Gold Book, "neutrino (electron neutrino)", <https://goldbook.iupac.org/terms/view/N04115>
- [11] Katherine Garrett, Gintaras Duda, "Dark Matter: A Primer", <https://arxiv.org/abs/1006.2483>
- [12] M. F. Sohniius, "Introducing supersymmetry", [http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/485/North-Holland%20-%20Sohniius%20M.F.%20Introducing%20supersymmetry%20\(PR%201985\)\(T\)\(166s\).pdf](http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/485/North-Holland%20-%20Sohniius%20M.F.%20Introducing%20supersymmetry%20(PR%201985)(T)(166s).pdf)
- [13] Gianfranco Bertone and Dan Hooper GRAPPA, "A History of Dark Matter", <https://arxiv.org/pdf/1605.04909.pdf>

- [14] Neil Spooner, "*WIMP Cross Sections and Recoil Rates*", [https://www.sheffield.ac.uk/polopoly\\_fs/1.26700!/file/PHY323-2011-13-notes.pdf](https://www.sheffield.ac.uk/polopoly_fs/1.26700!/file/PHY323-2011-13-notes.pdf)
- [15] Orrigo, Alvarez-Ruso, Pena-Garay, "*A New Approach to Nuclear Form Factors for Direct Dark Matter Searches*", <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405601415005490?via%3Dihub>
- [16] Valerio Ippolito, "*Direct Detection: Status and Perspective*", <https://pandora.infn.it/public/5d77c4>
- [17] Vitaly Chepela and Henrique Araújob, "*Liquid noble gas detectors for low energy particle physics*", <https://arxiv.org/pdf/1207.2292.pdf>
- [18] Valerio Ippolito, "*Weakly-interacting Massive Particles and Where To Find Them*", <https://cernbox.cern.ch/index.php/s/E3DST1V4jzFS019>
- [19] <https://it.wikipedia.org/wiki/File:PhotoMultiplierTubeAndScintillator.svg>
- [20] DEAP Project, "*Dark matter experiment using argon Pulseshape discrimination*", <http://deap3600.ca/darkside-20k/>
- [21] XENON Collaboration, "*Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T*", [https://indico.cern.ch/event/699961/contributions/3043381/attachments/1691779/2723606/idm\\_moraa\\_xenon1t\\_analysis.pdf](https://indico.cern.ch/event/699961/contributions/3043381/attachments/1691779/2723606/idm_moraa_xenon1t_analysis.pdf)
- [22] P Agnes et al., "*DarkSide-50 532-day dark matter search with low-radioactivity argon*", <https://arxiv.org/abs/1802.07198>
- [23] Collaborazione DarkSide, <https://cerncourier.com/a/defeating-the-background-in-the-search-for-dark-matter/>
- [24] Dan Hooper et al., "*A Consistent Dark Matter Interpretation For CoGeNT and DAMA/LIBRA*", <https://arxiv.org/abs/1802.07198>
- [25] Marco Vignati, "*La Materia Oscura*", [https://www.phys.uniroma1.it/fisica/sites/default/files/masterclass/Marco-Vignati\\_Materia\\_Oscura.pdf](https://www.phys.uniroma1.it/fisica/sites/default/files/masterclass/Marco-Vignati_Materia_Oscura.pdf)